

УДК 58.009

ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СИСТЕМЫ КУЛЬТИВИРОВАНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОМ ОСВЕЩЕНИИ

Б. Зареи Дарки¹
О. Н. Король²

¹Отдел биологии морей, факультет природных ресурсов
и естественных морских наук, Тарбиат Модарес университет,
Тегеран, Иран

Р. Г. Геворгиз²

²Институт биологии южных морей НАН Украины, Севастополь

E-mail: zareidarki@modares.ac.ir

Получено 27.08.2013

Установлено предельное значение суточной производительности системы культивирования микроводорослей с различной ориентацией освещаемой поверхности. Расчеты сделаны для условий естественного освещения в окрестностях г. Исфахан (Иран). Показано, что при коэффициенте полезного действия фотосинтеза 5% предельное значение продуктивности составляет 38 г абсолютно сухой биомассы с 1 м² освещаемой поверхности культиватора, а 15% — 114 г. Рассчитана производительность системы культивирования микроводорослей при различных ориентациях ее по отношению к Солнцу для разных коэффициентов полезного действия фотосинтеза за период от весеннего до осеннего равноденствия (с 21 марта по 21 сентября). Установлено, что предельное значение урожая при коэффициенте полезного действия 15% за этот период составит около 18,5 кг сухой биомассы с 1 м² освещаемой поверхности.

Результаты работы могут быть использованы для разработки технологий получения промышленно важных биологически активных соединений из микроводорослей.

Ключевые слова: микроводоросли, предельная оценка производительности культивирования, фотосинтез, солнечная радиация.

Многообразный спектр продуктов биосинтеза, которые можно получить из биомассы водорослей [1, 2], обусловил создание различных высокопродуктивных технологий промышленного производства биомассы микроводорослей и продуктов их жизнедеятельности [3].

Среди многих факторов, влияющих на рост водорослей, особая роль принадлежит световому обеспечению клеток, поскольку именно свет является основным источником энергии при фотосинтезе, т. е. главным лимитирующим условием роста. Для обеспечения культуры светом могут быть применены как естественные, так и искусственные источники света [4–9]. В сравнении с естественными современные искусственные источники света в культивировании микроводорослей обладают существенными преимуществами [10], поскольку могут создавать значительно большую облученность, нежели солнечный свет, а главное — способны сделать процесс управляемым. Однако, учитывая затраты на электроэнергию, мно-

гие производители при массовом выращивании водорослей отдадут предпочтение естественному освещению. Поэтому разработка биотехнологий интенсивного культивирования микроводорослей в промышленных масштабах с использованием естественного освещения является актуальной задачей.

Для Ирана интенсивное выращивание микроводорослей все еще остается вне поля зрения как для ученых, так и для коммерческого использования, несмотря на то, что для решения этой задачи есть все климатические предпосылки. Водоемы Ирана населяют большое разнообразие представителей различных отделов водорослей [11], многие из которых можно рассматривать как объекты биотехнологии для искусственного культивирования: *Dunaliella salina* Teod. (обнаруженные в б. Гавхуни, оз. Урмия, оз. Мехарлу), *Chlorella vulgaris* Beijer. (биологические пруды), *Scenedesmus obliquus* (Turp.) Kütz. (вдхр. Вошмгир, вдхр. Джирофт, п. Дизине), *S. quadricauda* (Turp.) Breb. (вдхр. Зайендеруд, Минаб, Карун, вдхр. Аракс и

др.), *Nostoc pruniforme* Ag. (в. Ясудж, Семиром), *Anabaena variabilis* Kütz. (вдхр. Керхе, Аракс, Торок) и др.

Учитывая это, целью работы было оценить предельное значение производительности системы культивирования микроводорослей с различной ориентацией освещаемой поверхности и при различных коэффициентах полезного действия (КПД) фотосинтеза в условиях естественного освещения в окрестностях г. Исфахан (Иран).

Материалы и методы

В связи с использованием в работе таких терминов, как фотосинтез, продуктивность, производительность, «следящий» и «горизонтальный» культиваторы, целесообразно привести их определения.

Фотосинтез — это согласованный биологический синтез клеточных компонентов [12], происходящий за счет световой энергии. Чтобы подчеркнуть сущность процесса фотосинтеза, этот термин обычно употребляют с названиями организмов, а не веществ.

Под термином «следящий культиватор» подразумевают систему культивирования, в которой освещаемая поверхность всегда перпендикулярна потоку падающей радиации, а «горизонтальный культиватор» — это система культивирования, в которой освещаемая поверхность расположена параллельно поверхности земли.

Продуктивность (P) — суммарное количество биомассы, образованной растущими и размножающимися клетками микроводорослей за 1 сут на 1 м^2 освещаемой поверхности или в 1 л суспензии клеток [13]:

$$P = B * \mu, \quad [P] = [\text{г}/(\text{л} \cdot \text{сут})],$$

где B — текущая плотность суспензии, г/л; μ — удельная скорость роста микроводорослей, 1/сут.

Производительность системы культивирования — суммарное количество биомассы, образованной растущими и размножающимися клетками микроводорослей за 1 сут на всей площади освещаемой поверхности или во всем объеме системы культивирования.

Для культиватора типа «бассейн», рассматриваемого в нашем случае, площадь, занимаемая на земле, и площадь освещаемой поверхности одинаковы и равны 1 м^2 , т. е. термины «производительность» и «продуктивность» эквивалентны. Используя в статье термин «производительность», мы подчеркиваем, что предельная оценка проведена для

любых типов фотобиореакторов, а не только для культиваторов типа «бассейн».

Суточная продуктивность (в граммах абсолютно сухой биомассы, г. с. б.) 1 м^2 освещаемой поверхности культиватора определяется так:

$$P = \frac{E_x}{R} = \frac{\eta \cdot E_n}{R} = \frac{\eta \cdot \alpha \cdot W}{R},$$

$$P = \left[\frac{\text{г. с. б.}}{\text{м}^2 \cdot \text{сут}} \right], \quad (1)$$

где E_x — усвоенная в виде биомассы световая энергия, кДж/м²; E_n — поглощенная суспензией микроводорослей световая энергия, кДж/м²; η — КПД фотобиосинтеза, выраженный в долях ($\eta = 0 \div 1$); α — доля поглощения световой энергии суспензией микроводорослей ($\alpha = 0 \div 1$); W — суммарное количество фотосинтетически активной радиации (ФАР), падающей за сутки на освещаемую поверхность культиватора, кДж/м²·сут; R — калорийность одного г. с. б., кДж.

Поскольку расчеты проведены для определения предельных (оптимальных) значений производительности, будем считать $\alpha = 1$, т. е. когда поглощается вся падающая энергия и $E_n = W$, а η принимает значения 0,05, 0,10 и 0,15, соответствующие 5, 10 и 15% КПД фотобиосинтеза, выбранные как средние значения для разных типов фотобиореакторов [14, 15]. Средняя калорийность 1 г. с. б. микроводорослей *Chlorella vulgaris* Beijer., *Spirulina platensis* Geitl., *Synechococcus elongatus* Nag. и *Platymonas viridis* Rouch. составляет 5 ккал (21 кДж) [16]. Предполагается, что доля фактически активной радиации (ФАР) в падающей радиации составляет 50% [17].

Для простоты будем считать, что энергия активной радиации для фотосинтеза в течение суток распределена по синусоиде с минимумами 6 и 18 ч и максимумом 12 ч:

$$E(t) = E_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (2)$$

где t — время в ч; $E_{\max} = 0,5 \cdot E_s$, а E_s — максимальная суточная суммарная солнечная радиация, падающая на горизонтальную поверхность Земли, кДж/м²·сут.

Тогда суммарная энергия ФАР, падающая за сутки на 1 м^2 освещаемой поверхности, будет равна:

$$W = \int_6^{18} E(t) \cdot dt \quad (3)$$

Данные о суточном притоке суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации E_s на горизонтальную поверхность в месяцы, включающие дни равноденствий и солнцестояний (в кДж/м²·сут), любезно предоставлены господином Эшраги, инженером метеорологической организации г. Исфahan «Esfahan Meteorological Bureau».

Результаты и обсуждение

Предельные значения производительности микроводорослей в окрестностях Исфahan

Известно, что за пределами земной атмосферы интенсивность падающей радиации, составляющей в среднем 118 МДж энергии, позволяет получать 309 г. с. б. в сутки [18]. К поверхности Земли приходит только некоторая часть этой энергии, определяемая временем года, широтой и долготой местности, оптическими характеристиками атмосферы, рельефом местности и пр. [19, 20].

Территорию Ирана можно рассматривать как весьма благоприятную для выращивания водорослей в промышленных масштабах под открытым небом. Его географическая широта находится между 24° и 40°, и особенности климата характеризуют территорию страны одним из наибольших притоков солнечной радиации у поверхности Земли [21, 22].

Зная максимальные суточные величины падающей солнечной радиации на горизонтальную поверхность Земли, можно оценить предельные значения производительности системы культивирования микроводорослей (табл. 1).

Рассчитаем величину падающей энергии E_n ФАР:

$$E_n = W = 0,5 \cdot E_s; \quad [W] = [\text{кДж}].$$

Таблица 2. Суточная продуктивность P (η) г. с. б./м²·сут) освещаемой поверхности в зависимости от типа культиватора для различных КПД фотобиосинтеза

Тип культиватора	Продуктивность				За летнее полугодие
	29/III	20/VI	06/IX	05/XII	
<i>КПД фотобиосинтеза 0,05</i>					
Горизонтальный	22,86	30,00	23,96	8,86	6190
Следящий	28,95	37,90	30,32	11,18	
<i>КПД фотобиосинтеза 0,1</i>					
Горизонтальный	45,71	60	47,93	17,71	12385
Следящий	57,90	75,81	60,65	22,36	
<i>КПД фотобиосинтеза 0,15</i>					
Горизонтальный	68,57	90	71,89	26,57	18577
Следящий	86,86	113,71	90,97	33,54	

Таблица 1. Приток максимальной суточной суммарной солнечной радиации E_s на горизонтальную поверхность (кДж/м²·сут) и суммарная энергия ФАР, падающая за 1 сут на 1 м² освещаемой поверхности (W , кДж) в периоды (месяцы), включающие дни равноденствий и солнцестояний

День	E_s	W
29/III	24320	12160
20/VI	31839	15919,5
06/IX	25472	12736
05/XII	9391	4695,5

Тогда продуктивность:

$$P(\eta) = \frac{\eta \cdot W}{R},$$

где величина η принимает значения 0,05, 0,10 и 0,15 для КПД фотобиосинтеза, равно соответственно 5, 10 и 15%.

Результаты расчета для идеальных условий на поверхности Земли приведены в табл. 2.

Рассчитанные предельные значения продуктивности приведены для следящего культиватора. Культиватор такого типа поворачивается вслед за Солнцем так, что падающий световой поток остается все время перпендикулярным к освещаемой поверхности.

Зная значения максимальной суточной энергии ФАР W на горизонтальную поверхность (кДж), по формуле (3) можем рассчитать E_{\max} в данные месяцы. В простейшем случае поверхность культиватора в течение дня будет освещаться по синусоидальному закону (2) (рис. 1):

$$E_{\text{след}}(t) = E_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{12} \cdot t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Необходимо сравнить две системы культивирования: следящий культиватор и обычный

бассейн — горизонтальный культиватор, у которого продуктивность падает из-за снижения мощности облучения в течение дня.

Горизонтальный культиватор расположен параллельно земле, поэтому на него будет падать проекция светового потока, равная:

$$E_{\text{гор}}(t) = E(t) \cdot \sin(\theta) = E_{\text{max}} \sin^2(\theta),$$

$$\text{где } \theta = \frac{\pi}{12} \cdot t - \frac{\pi}{2}.$$

На основе сделанных выше предположений относительно распределения солнечной радиации, падающей на следящий и горизонтальный культиваторы, по формуле (3) можно рассчитать суммарную энергию, падающую за 1 сут на горизонтальный культиватор. Далее, зная суммарную энергию ФАР W и калорийность R , по формуле (1) можно определить продуктивность системы культивирования в обычном бассейне. Результаты приведены в табл. 2.

Полученные значения продуктивности равны 30, 60 и 90 г. с. б./($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) освещаемой поверхности культиватора при КПД фотобиосинтеза 5%, 10% и 15%, соответственно.

Сравнивая полученные данные для следящего и горизонтального культиваторов, можно заключить, что любые усовершенствования конструкции культиватора (формы и ориентации относительно направления потока солнечной радиации) дают возможность увеличить продуктивность не более чем на 21%.

Величина урожая за период от весеннего до осеннего равноденствия

Как известно, основной урожай можно получить в течение летнего полугодия, когда наблюдается наибольшая активность

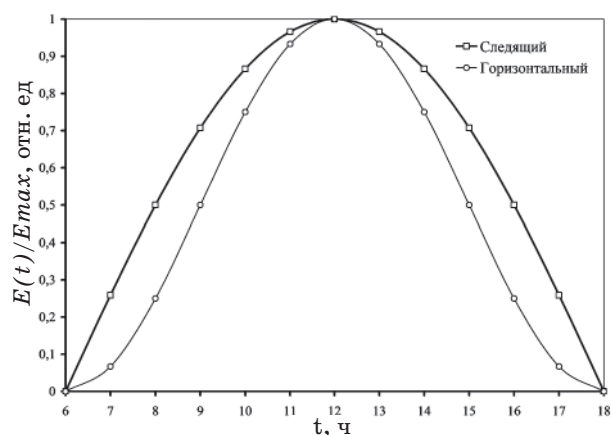


Рис. 1. Относительное распределение солнечной радиации, падающей на поверхность следящего и горизонтального культиваторов

солнца. Рассчитаем максимально возможное значение урожая с каждого м^2 освещаемой поверхности культиватора за период от весеннего до осеннего равноденствия. На основании результатов, приведенных в табл. 1, зная суммарную энергию ФАР W , построили кривую третьего порядка (сплайн) через точки, соответствующие дням весеннего (20–21 марта) и осеннего (20–21 сентября) равноденствия и летнего солнцестояния (22 июня). Таким образом, получена упрощенная модель распределения суточного облучения за указанный период. При суммировании получим значение солнечной радиации за полугодие, которое в нашем случае составило около 5 200 МДж/($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) (рис. 2). Продуктивность (урожай) за этот промежуток времени определяем по формуле (1) аналогично приведенным выше расчетам (табл. 2).

Следовательно, предельное (оптимальное) значение урожая составит около 18 500 г. с. б., или 18,5 кг. с. б. с 1 м^2 освещаемой поверхности культиватора при КПД фотобиосинтеза 15% за период от весеннего до осеннего равноденствия.

Приведенные расчеты предельных значений производительности системы культивирования микроводорослей свидетельствуют о том, что максимальная продуктивность освещаемой поверхности составит 38 г. с. б./($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) при КПД фотобиосинтеза 5% и 114 г. с. б./($\text{м}^2 \cdot \text{сут}$) при КПД 15%. На практике достичь таких значений продуктивности не представляется возможным, поскольку даже при полном световом обеспечении клеток величина продуктивности будет снижаться из-за действия других лимитирующих факторов: минерального обеспечения клеток, ингибирования роста продуктами метаболизма и пр.

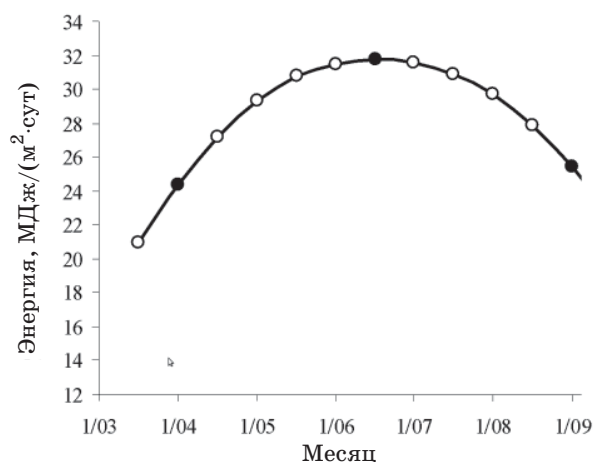


Рис. 2. Распределение падающей солнечной радиации в течение летнего полугодия на поверхности земли в окрестностях Исфахан

Следует также отметить, что любые усовершенствования конструкции культиватора (формы и ориентации относительно направления потока солнечной радиации) позволят увеличить продуктивность не более чем на 21% по сравнению с культиватором, у которого рабочая (освещаемая) поверх-

ность расположена параллельно земной поверхности (бассейн).

За летний период с 21 марта по 21 сентября предельное (идеальное) значение урожая составит около 18 500 г. с. б., или 18,5 кг. с. б. с 1 м² освещаемой поверхности при КПД 15%.

REFERENCES

1. Borowitska M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes, and fermenters. *J. Biotechnology*. 1999, N70, P. 313–321.
2. Perez-Garcia, O., Escalante, F. M. E.; de-Bashan, L.; Bashan, Y. Heterotrophic cultures of microalgae: Metabolism and potential products. *Water Research*. 2011, N45, P. 11–36.
3. Spolaore P., Joannis-Cossan C., Duran E., Isambert A. Commercial applications of microalgae (Review). *J. Biosci Bioeng*. 2006, 101(2), 87–96.
4. Choi H.-J., Lee J.-M., Lee S.-M. A novel optical panel photobioreactor for cultivation of microalgae. *Water Science & Technology*. 2013, 67(11), 2543–2548.
5. Kumar K., Nag Dasgupta C., Nayak B., Lindblad P., Das D. Development of suitable photobioreactors for CO₂ sequestration addressing global warming using green algae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*. 2011, N102, P. 4945–4953.
6. Loubière K., Olivo E., Bougaran G., Pruvost J., Robert R., Legrand J. A new photobioreactor for continuous microalgal production in hatcheries based on external-loop airlift and swirling flow. *Biotechnology and Bioengineering*. 2009, 102(1), 132–147.
7. Pulz O. Evaluation of Green Fuel's 3D matrix algae growth engineering scale unit. *Performance summary report, IGV Institut für Getreideverarbeitung GmbH*, September 2007, 14 p.
8. Pulz O., Scheibenbogen K. Photobioreactors: design and performance with respect to energy input. *Advances in biochemical engineering biotechnology*. 1998, N59, P. 123–152.
9. Ugwu C. U., Aoyagi H., Uchiyama H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresource Technology*. 2008, 99(10), P. 4021–4028.
10. Blanken W., Cuaresma M., Wijffels R. H., Jansse M. Cultivation of microalgae on artificial light comes at a cost. *Algal Research*. 2013, 2(4), P. 333–340
11. Zarei-Darki. B. Algae of water bodies of Iran. *Abstract of the thesis for degree of philosophy doctor in biology, Kyiv*. 2004, 20 p.
12. Belyanin V. N. Light-dependent growth of the lower phototrophs. *Novosibirsk: Nauka Press*, 1984, 96 p. (In Russian).
13. Vonshak A. Outdoor mass production of *Spirulina*: the basic concept. *Spirulina platensis (Arthrospira): physiology, cell-biology and biotechnology*. UK: Taylor & Francis, 2002, P. 79–100.
14. Janssen M., Tramper J., Mur L. R., Wijffels R. H. Enclosed outdoor photobioreactors: light regime, photosynthetic efficiency, scale-up, and future prospects. *Biotechnol Bioeng*. 2003, N81, P. 193–210.
15. Lundquist T. J., Woertz I. C., Quinn N. W. T., Benemann J. R. A realistic Technological and Economic Assessment of Algae Biofuels. *Report prepared for Energy Biosciences Institute, Barkley, California, October 2010*, 153 p.
16. Belyanin V. N., Sidko F. Y., Trenkenshu A. P. Energy of photosynthesizing algae culture. *Novosibirsk: Nauka Press*, 1980, 136 p. (In Russian).
17. Tooming, H. G. and Gulyayev, B. I. Methods of measurement of photosynthetically active radiation. *Moscow: Nauka Press*, 1967, 144 p. (In Russian).
18. Gevorgiz R. G., Schepachev S. G., Korol O. N. Limiting estimate for microalgal productivity in natural and artificial lighting conditions. *Ekologia morya*. 2010, V. 80, P. 29–33. (In Russian).
19. *Dynamic maps, GIS data and analysis tools, solar maps. National renewable energy laboratory (NREL)*, 2006. Available at <http://www.nrel.gov/gis/solar.html>.
20. *Renewable energy unit. European commission, Joint research center institute for energy*. 2013. Available at <http://re.jrc.ec.europa.eu>.
21. Khromov S. P., Petrosyants M. A. Meteorology and climatology. *Moscow University Press*. 2001, 528 p. (In Russian).
22. *Ministry of Road and Transportation. Isfahan Meteorological Bureau*, 2010. — www.esfahanmet.ir.

**ПРОДУКТИВНІСТЬ СИСТЕМИ
КУЛЬТИВУВАННЯ МІКРОВОДОРОСТЕЙ
ЗА УМОВ ПРИРОДНОГО ОСВІТЛЕННЯ**

*B. Zarei Darki¹
O. N. Korol²
R. G. Gevorgiz²*

¹Відділ біології морів, факультет природних ресурсів та морських наук, Тарбіат Модарес університет, Тегеран, Іран

²Інститут біології південних морів НАН України, Севастополь

E-mail: zareidarki@modares.ac.ir

У роботі визначено граничне значення добової продуктивності системи культивування мікроводоростей із різною орієнтацією освітлюваної поверхні. Розрахунки зроблено для умов природного освітлення в околицях м. Ісфахан (Іран). Встановлено, що за коефіцієнта корисної дії фотосинтезу 5% граничне значення продуктивності становитиме 38 г абсолютно сухої біомаси з 1 м² освітлюваної поверхні, а 15% — 114 г. Розраховано продуктивність системи культивування мікроводоростей за різних орієнтацій її стосовно Сонця для різних коефіцієнтів корисної дії фотосинтезу за період від весняного до осіннього рівнодення (з 21 березня до 21 вересня). Показано, що граничне значення врожаю за коефіцієнта корисної дії 15% становитиме 18,5 кг сухої біомаси з 1 м² освітлюваної поверхні.

Результати роботи можуть бути використані для розроблення технологій одержання промислово важливих сполук із мікроводоростей.

Ключові слова: мікроводорості, гранична оцінка продуктивності системи культивування, фотосинтез, сонячна радіація.

**PRODUCTIVITY OF MICROALGAE
SYSTEM CULTIVATION UNDER
THE DAYLIGHT**

*B. Zarei Darki¹
O. N. Korol²
R. G. Gevorgiz²*

¹Faculty of Natural Resources and Marine Sciences, Marine Biology Group Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

²Institute of Biology of the Southern Seas of the National Academy of Sciences of Ukraine, Sevastopol

E-mail: zareidarki@modares.ac.ir

Extreme daily productivity values of microalgae culturing system with different orientation of the illuminated surface and under natural light were assessed. Calculations are made for natural light in the neighborhood of Isfahan City (Iran). It is shown that if the efficiency factor of photosynthesis equals to 5%, limit values of productivity will be 38 grams of dry biomass per 1 m² of illuminated surface and 114 grams will be at efficiency of 15%. On basis of simple model understandings regarding the daily distribution of solar radiation, which arrives at the surface of the Earth, productivity of microalgae culturing system for its various orientations relative to the Sun at different photosynthetic efficiency was calculated during the summer half-year (from March 21 to September 21). It is shown that the limit (optimal) value of the yield at the efficiency of 15% will be about 18.5 kg of dry biomass per square meter of illuminated surface.

The results can be used to develop technologies for the production of industrially important compounds from microalgae.

Key words: microalgae, limit assessment of productivity of microalgae system, photosynthesis, and total solar radiation.