

УДК 581.132.1:582.26/.27

## СОДЕРЖАНИЕ ХЛОРОФИЛЛА В БИОМАССЕ МОРСКИХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ ПРИ СВЕТОВОМ ЛИМИТИРОВАНИИ (МОДЕЛЬ)

© 2019 г. Р. П. Тренкеншу, Т. М. Новикова

Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,  
Севастополь, Российская Федерация  
E-mail: [r.trenkenshu@rambler.ru](mailto:r.trenkenshu@rambler.ru)

Поступила в редакцию 25.10.2019; после доработки 11.12.2019;  
принята к публикации 25.12.2019; опубликована онлайн 30.12.2019.

Представлена математическая модель светозависимого содержания хлорофилла в биомассе морских микроводорослей. Основой модели служит представление о биомассе как сумме резервных и структурных макромолекулярных форм органического вещества клеток. При этом хлорофилл относится к структурным формам биомассы. Используя такие представления, можно применять известные уравнения для светозависимого содержания структурных форм в биомассе. Предложенное уравнение хорошо описывает результаты, полученные в экспериментах с хлорофиллостатной культурой *Tetraselmis viridis*.

**Ключевые слова:** микроводоросли, хлорофилл, световые условия, хлорофиллостат

Оценка содержания хлорофилла  $a$  в биомассе микроводорослей крайне важна, поскольку это ключевой параметр, лежащий в основе расчёта первичной продукции в Мировом океане [5]. Экспериментально установлено, что содержание хлорофилла  $a$  в биомассе клеток существенно зависит от условий, в которых растут микроводоросли [5]. Из множества факторов, определяющих первичную продукцию, главным является свет, который прямо или косвенно энергетически обеспечивает все продукционные процессы за счёт фотосинтеза.

В случае, когда клетки полностью обеспечены минеральным питанием (и когда другие условия также оптимальны), можно изучить влияние света на соотношение хлорофилл  $a$  / биомасса. Такие условия можно реализовать только в непрерывной культуре микроводорослей при стабилизации концентрации хлорофилла (хлорофиллостат) и варьировании внешнего освещения [1]. Обнаружено, что с ростом интенсивности облучения клеток содержание хлорофилла  $a$  в биомассе плавно снижается с максимальных (при невысоких освещённостях) до минимальных (при высоких облучённостях клеток) значений [1].

В качестве одного из обоснований этого снижения высказано предположение о деструктивном фотоокислении пигментов и использовании соответствующих количественных моделей [1], хотя деструкция пигментов не была подтверждена, а явление снижения объясняется наличием артефактов, связанных с применением методических приёмов при исследованиях [6].

В этой публикации на основе представлений о процессах фото- и биосинтеза микроводорослей [3] предложена количественная модель, описывающая зависимость соотношения хлорофилл / биомасса от света в непрерывной культуре невысокой плотности.

**Модель.** Общий подход к моделированию фотобиосинтеза и биохимических трансформаций в клетках микроводорослей подробно изложен в [3].

Использовались общепринятые схемы разделения процессов на световые и темновые стадии фотобиосинтеза и разделения продуктов этих стадий на резервные и структурные (их сумма представляет собой биомассу). В результате получено уравнение зависимости соотношения структура / биомасса ( $\beta^*$ ) от интенсивности света для непрерывной культуры микроводорослей, которое можно записать в виде:

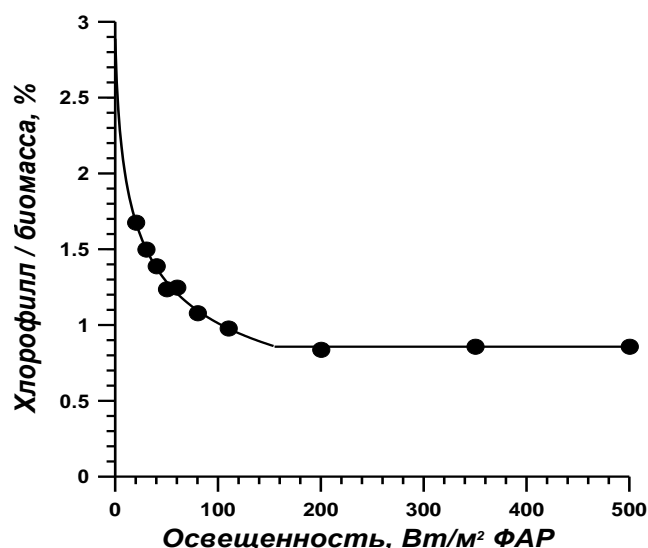
$$\beta^* = \frac{\beta_{max}}{1 + a + \sqrt{a^2 + bI_0/I_{sat}}},$$

где  $a$  и  $b$  — видоспецифические коэффициенты;

$I_0$  и  $I_{sat}$  — действующая и насыщающая интенсивность света соответственно.

Если отнести пигменты к структурным формам биомассы, можно интерпретировать это уравнение как зависимость содержания хлорофилла  $a$  в клетках микроводорослей от интенсивности действующего света. Подтверждением может служить линейная связь между концентрациями белка и хлорофилла в биомассе [4].

**Описание экспериментальных данных.** Точную зависимость соотношения хлорофилл / биомасса от света экспериментально можно получить только в непрерывной фотоавтотрофной культуре невысокой плотности при стабилизации хлорофилла (хлорофиллостат) на уровне, когда клетки не затеняют друг друга и полностью обеспечены минеральным питанием. Для морских видов такие данные получены для флагелляты *Tetraselmis (Platymonas) viridis* [1, 2]. В опытах стабилизировали оптическую плотность в области  $\Delta D_{680}$  от 0,33 до 0,35 ед. опт. пл. для освещаемого слоя культуры 3 см, что соответствует концентрации хлорофилла  $a$  1,7–1,8 мг·л<sup>-1</sup>. Ежечасное разведение культуры до заданного уровня хлорофилла позволяло определять концентрацию биомассы в сливах. Результаты показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Зависимость относительного содержания хлорофилла  $a$  в биомассе *Tetraselmis (Platymonas) viridis* от поверхностной освещённости непрерывной хлорофиллостатной культуры; ● — эксперимент; сплошная линия — расчёт по уравнению

**Fig. 1.** Dependence of relative chlorophyll  $a$  content in *Tetraselmis (Platymonas) viridis* biomass on surface illumination of continuous chlorophyll-state culture; ● – experiment; solid line – calculation according to the equation

**Выводы.** Предложена модель зависимости соотношения хлорофилл  $a$  / биомасса от интенсивности действующего света для фотоавтотрофного роста микроводорослей. Модель основана на общепринятом представлении о механизме фотобиосинтетических процессов в клетке. Предлагаемое уравнение с высокой точностью описывает результаты экспериментальных данных для морской микроводоросли *Tetraselmis viridis*.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса» (№ гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Беянин В. Н. *Светозависимый рост низших фототрофов (в управляемых условиях)*. Новосибирск : Наука, 1984. 98 с. [Belyanin V. N. *Svetozavisimyi rost nizshikh fototrofov (v upravlyayemykh usloviyakh)*. Novosibirsk : Nauka, 1984, 98 p. (in Russ.)]
2. Терсков И. А., Тренкеншу Р. П., Беянин В. Н. Светозависимый рост водоросли *Platymonas viridis* в непрерывной культуре // *Известия Сибирского отделения АН СССР. Серия биологических наук*. 1979. Т. 10, № 2. С. 103–108. [Terskov I. A., Trenkenshu R. P., Belyanin V. N. Svetozavisimyi rost vodorosli *Platymonas viridis* v nepreryvnoi kul'ture. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya AN SSSR. Seriya biologicheskikh nauk*, 1979, vol. 10, no. 2, pp. 103–108. (in Russ.)]
3. Тренкеншу Р. П. Влияние света на макромолекулярный состав микроводорослей в непрерывной культуре невысокой плотности (Часть 1) // *Вопросы современной альгологии*. 2017. № 2 (14). [3 с.] [Trenkenshu R. P. Influence of light on macromolecular composition of microalgae in continuous culture of low density (Part 1). *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2017, no. 2 (14). [3 p.] URL: <http://algology.ru/1180> (in Russ.)]
4. Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С., Новикова Т. М. Линейный рост морских микроводорослей в культуре // *Морской биологический журнал*. 2018. Т. 3, № 1. С. 53–60. [Trenkenshu R. P., Lelekov A. S., Novikova T. M. Linear growth of marine microalgae culture. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 53–60. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.1.06>
5. Финенко З. З., Мансурова И. М., Суслин В. В. Динамика концентрации хлорофилла *a* в Чёрном море по спутниковым данным // *Морской биологический журнал*, 2019. Т. 4, № 2. С. 88–96. [Finenko Z. Z., Mansurova I. M., Suslin V. V. Dynamics of chlorophyll *a* concentration in the Black Sea on satellite data. *Morskoy biologicheskij zhurnal*, 2019, vol. 4, no. 2, pp. 87–95. (in Russ.)]. <https://doi.org/10.21072/mbj.2019.04.2.09>
6. Goericke R., Welschmeyer N. A. Pigment turnover in the marine diatom *Thalassiosira weissflogii*. 1. The <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>-labeling kinetics of chlorophyll *a*. *Journal of Phycology*, 1992, vol. 28, iss. 4, pp. 498–507. <http://dx.doi.org/10.1111/j.0022-3646.1992.00498.x>

## CHLOROPHYLL CONCENTRATION IN MARINE MICROALGAE BIOMASS UNDER THE CONDITION OF LIGHT LIMITATION (MODEL)

R. P. Trenkenshu and T. M. Novikova

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation  
E-mail: [r.trenkenshu@rambler.ru](mailto:r.trenkenshu@rambler.ru)

The paper presents a mathematical model of light-dependent chlorophyll concentration in the marine microalgae biomass. The model is based on the concept of biomass as the sum of reserve and structural macromolecular forms of organic cell matter. At the same time, chlorophyll refers to structural forms of biomass. Using such concepts, it is possible to apply known equations for light-dependent content of structural forms in biomass. The proposed equation describes well the experimental results obtained in a number of experiments with the chlorophyllostate culture *Tetraselmis viridis*.

**Keywords:** microalgae, chlorophyll, light conditions, chlorophyllast