

А. С. ЛЕЛЕКОВ, Р. П. ТРЕНКЕНШУ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СОДЕРЖАНИЯ
В-ФИКОЭРИТРИНА И ХЛОРОФИЛЛА А В КЛЕТКАХ
PORPHYRIDIVM PURPUREUM И SPIRULINA PLATENSIS**

Проведена верификация полученного ранее уравнения, описывающего динамику относительного содержания пигментов микроводорослей, на примере В-фикоэритрина культуры *Porphyridium purpureum* и хлорофилла *a* культуры *Spirulina platensis*. С помощью рассчитанных обобщённых коэффициентов получено теоретическое уравнение, описывающее динамику содержания В-фикоэритрина при различных освещённостях.

Ключевые слова: микроводоросли, пигмент, фотодеструкция, математическая модель.

В настоящее время накоплено огромное количество экспериментальных данных о динамике роста различных видов микроводорослей в условиях накопительной культуры. Часто эти материалы включают в себя параллельные измерения биомассы и относительного содержания (β) какого-либо пигмента клеток микроводорослей (хлорофилла *a*, фикобилипротеинов и т. д.) [1 – 3]. Авторы обычно не используют теоретические подходы для объяснения процесса нелинейного изменения величины β на начальных этапах культивирования. Этот процесс обусловлен акклимацией клеток культуры микроводорослей к новым световым условиям. Ранее нами предложена модель динамики относительного содержания пигментов в клетках культуры микроводорослей в плотностате [5]. Модель основана на предположении, что наблюдаемая скорость изменения концентрации пигмента является алгебраической суммой скоростей синтеза, фотодеструкции и скорости восстановления части фотоокисленных пигментов. Уравнение, описывающее динамику относительного содержания пигмента β в клетках культуры микроводорослей от времени t , можно записать в виде:

$$\beta = \beta_{st} + \beta_s^0 \cdot e^{-\mu_m \cdot t} - (\beta_{st} + \beta_s^0 - \beta_0) \cdot e^{-(K I_0 + k_r + \mu_m) \cdot t}, \quad (1)$$

где β_0 – начальное относительное содержание пигмента в биомассе; μ_m – максимальная удельная скорость роста культуры микроводорослей; I_0 – внешняя освещённость; K – константа, зависящая от оптических свойств среды, в которой находится культура микроводорослей; k_r – константа восстановления части фотоокисленных пигментов; β_{st} – стационарное значение относительного содержания пигмента, определяемое по формуле (2); β_s^0 – видоспецифичный коэффициент.

$$\beta_{st} = \beta_m - \frac{\beta_m \cdot K \cdot I_0}{\mu_m^2 / (\mu_m - k_r) + K \cdot I_0}, \quad (2)$$

где β_m – максимальное относительное содержание пигмента.

Цель работы – провести верификацию предложенной модели на различных видах низших фототрофов, находящихся в экспоненциальной фазе роста.

Материал и методы. При проведении эксперимента с *Porphyridium purpureum* использовали установку для культивирования микроводорослей, состоящую из четырёх фотобиореакторов, систем освещения и термостабилизации. Объём суспензии поддерживали на уровне 5 л. В процессе выращивания культуру барботировали газовоздушной

© А. С. Лелеков, Р. П. Тренкеншу, 2010

Экология моря. 2010. Спец. вып. 81

смесью, содержащей 3 % углекислого газа, pH среды составлял 6 – 7 единиц, температура колебалась в диапазоне 25 – 29 °С, освещённость рабочей поверхности фотобиореактора составляла $80 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ [1].

Результаты и обсуждение. Динамика плотности и содержания В-фикоэритрина в клетках накопительной культуры *P. purpureum*, находящейся в экспоненциальной фазе роста, представлена на рис. 1. Отметим, что в течение первых суток эксперимента величина β уменьшалась, это обусловлено преобладанием деструкции пигмента над его синтезом. С течением времени плотность культуры *P. purpureum* увеличивалась, поэтому всё меньше квантов света приходилось на единицу пигмента. Так как скорость синтеза пигмента мы считаем пропорциональной скорости роста культуры микроводорослей, всё большее количество пигмента синтезировалось. В связи с этим кривая имеет точку перегиба, и происходит увеличение содержания пигментов в клетке. Это связано с тем, что плотность культуры увеличивается, а средняя пространственная облучённость на одну клетку уменьшается. Таким образом, для поддержания постоянной удельной скорости роста необходимо больше пигментов в клетке. В итоге мы достигаем стационарного равновесия, которое определяется в соответствии с уравнением (2) величиной внешнего светового потока.

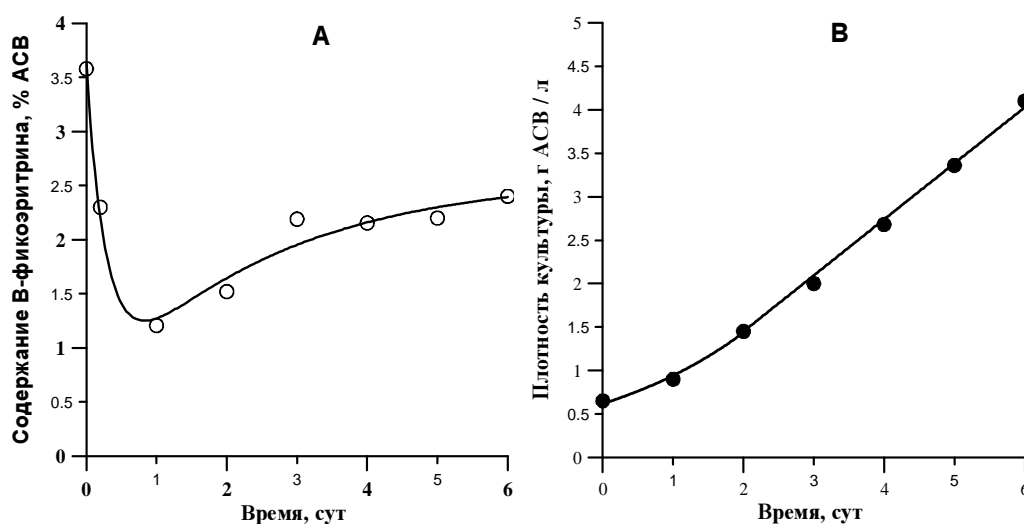


Рисунок 1. Динамика относительного содержания В-фикоэритрина (А) и плотности культуры *P. purpureum* (В). Аппроксимация уравнением (3) экспериментальных данных относительного содержания В-фикоэритрина ($R^2 = 0,97$)

Figure 1. The dynamics of the B-phycoerythrin (А) and cell density of *P. purpureum* (В). Approximation by the equation (3) of experimental data of B-phycoerythrin is shown ($R^2 = 0,97$)

При аппроксимации экспериментальных данных в уравнении (1) необходимо переобозначить коэффициенты, которые являются алгебраической суммой нескольких параметров:

$$\beta = \beta_{st} + \beta_s^0 \cdot e^{-\mu_m t} - a \cdot e^{-b \cdot t}, \quad (3)$$

где $a = \beta_{st} + \beta_s^0 - \beta_0$, $b = K \cdot I_0 + k_r + \mu_m$.

Для уменьшения количества неизвестных коэффициентов, величину максимальной скорости роста μ_m определим при аппроксимации динамики плотности культуры *P. purpureum* экспоненциальной зависимостью (рис. 1 В) [4]. Полученное значение составляет $0,42 \text{ сут}^{-1}$. Отметим, что остальные четыре неизвестных коэффициента в уравнении (3) являются кинетическими характеристиками роста культуры микроводорослей

при заданных условиях. Таким образом, при обработке экспериментальных данных уравнением (3) мы можем рассчитать значения константы восстановления фотоокисленных пигментов k_r , максимального содержания пигмента β_m и т. д. Для этого при проведении экспериментальных исследований необходимо измерять как можно больше точек. В данной работе мы ограничимся определением только лишь обобщённых коэффициентов модели (табл. 1).

Таблица 1. Значения обобщённых коэффициентов, полученных при аппроксимации экспериментальных данных [1] уравнением (3)
Table 1. The values of the generalized coefficients obtained by fitting the experimental data [1] by equation (3)

b_{st}	b_s^0	μ_m	a	b
2,61	- 2,43	0,42	- 3,42	2,52

Значения коэффициентов из табл. 1 подставим в уравнение (3). В результате получим функциональную зависимость относительного содержания В-фикоэритрина в клетках порфиридиума от времени:

$$\beta = 2,61 - 2,43 \cdot e^{-0,42 \cdot t} + 3,42 \cdot e^{-2,52 \cdot t}.$$

Полученное уравнение позволяет прогнозировать изменение β при изменении величины внешней освещённости. На рис. 2 представлены теоретические кривые динамики относительного содержания В-фикоэритрина при различных значениях внешней освещённости I_0 . Отметим, что форма кривой определяется внешними световыми условиями: увеличение I_0 в 2 раза приводит к уменьшению значения минимума функции, а также, в соответствии с уравнением (2), к снижению стационарной концентрации пигмента. Соответственно, уменьшение I_0 приводит к увеличению стационарной концентрации пигмента.

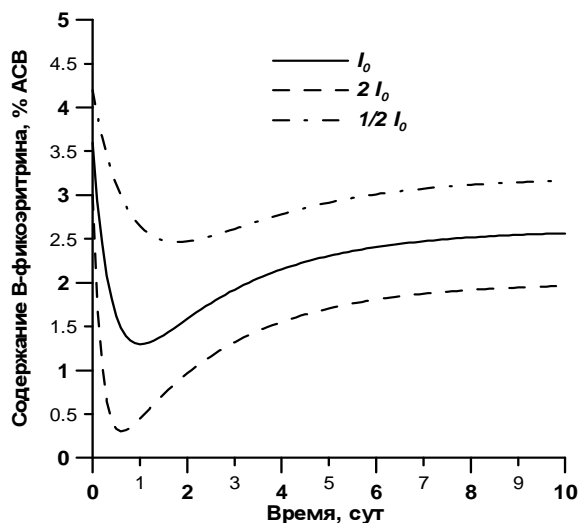


Рисунок 2. Теоретические кривые динамики относительного содержания В-фикоэритрина в клетках *P. purpureum* при различных значениях I_0
Figure 2. Theoretical curves of B-phycoerythrin dynamics of *P. purpureum* at different values of I_0

Подобные рассуждения подтверждаются многочисленными экспериментальными данными динамики относительного содержания других светозависимых пигментов в процессе роста различных культур низших фототрофов. Например, на рис. 3 представлена динамика относительного содержания хлорофилла *a* при культивировании *Spirulina platensis* [2]. Как и в случае с В-фикоэритрином, на начальном этапе кривая имеет ярко выраженный минимум (на 2-е сутки). Далее относительное содержание хлорофилла *a* в клетках *S. platensis* увеличивается и на 10-е сутки выходит на стационар. Аппроксимация экспериментальных точек уравнением (3) даёт высокое значение коэффициента детерминации ($R^2 = 0,95$).

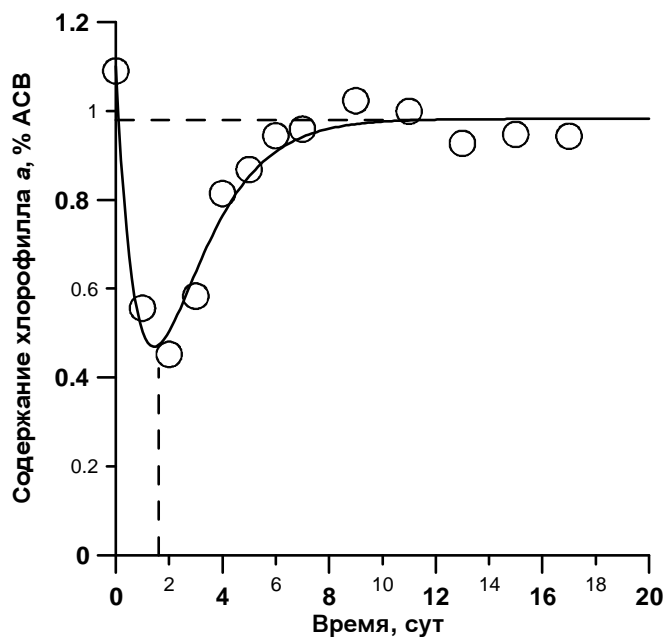


Рисунок 3. Динамика относительного содержания хлорофилла *a* в культуре *S. platensis*. Аппроксимация экспериментальных данных уравнением (3). Пунктиром показаны минимум функции и стационарное значение β_{st}

Figure 3. The dynamics of chlorophyll *a* of *S. platensis* culture. Approximation of experimental data by equation (3). The dotted lines show the minimum function and the stationary value β_{st}

Таким образом, предложенная модель описывает экспериментальные данные фотоакклимации культуры микроводорослей к изменению внешней освещённости. На всех приве-

дённых экспериментальных данных показана фотоакклимация клеток культуры микроводорослей от низкой к высокой освещённости. Однако модель позволяет проводить описание относительного содержания пигментов при переносе клеток микроводорослей с высокой на низкую облучённость. В этом случае коэффициент перед второй экспонентой в уравнении (1) изменит свой знак на противоположный.

Заключение. На основе известных представлений о процессах синтеза и фотодеструктивного окисления пигментов получена модель, описывающая изменение относительного содержания светозависимого пигмента клеток микроводорослей при условии экспоненциального роста. Проведена верификация полученной модели при описании динамики относительного содержания В-фикоэритрина культуры *P. purpureum* и хлорофилла *a* культуры *S. platensis*. Данная модель может быть использована для прогнозирования динамики содержания светозависимых пигментов при культивировании микроводорослей с заданной внешней освещённостью, но при этом необходимо рассчитать значения неизвестных видоспецифичных коэффициентов. При использовании приведённой модели необходимо соблюдать условие экспоненциального роста плотности накопительной культуры микроводорослей. В противном случае возможны отклонения экспериментальных данных от теоретической кривой (1), которые связаны с наличием ограничения роста культуры микроводорослей либо по свету, либо по газовому обеспечению, либо по минеральному питанию.

1. Гудвилович И. Н., Лелеков А. С. Влияние различных концентраций минерального азота в среде на содержание В-фикоэритрина в клетках *Porphyridium purpureum* Nag. // Экология моря. —

2008. – Вып. 76. – С. 45 - 48.
2. Минюк Г. С., Дробецкая И. В., Тренкеншу Р. П., Вялова О. Ю. Ростные и биохимические характеристики *Spirulina platensis* при различных условиях азотного питания // Экология моря. – 2002. – Вып. 62. – С. 61 - 66.
 3. Паламодова О. С. Динамика фотоадаптации некоторых видов диатомовых водорослей // Экология моря. – 2009. – Вып. 78. – С. 70 – 74.
 4. Тренкеншу Р. П. Простейшие модели роста микроводорослей. 1. Периодическая культура // Экология моря. – 2005. – Вып. 67. – С. 89 – 97.
 5. Тренкеншу Р. П., Лелеков. А. С. Модель динамики пигментов культуры микроводорослей в плотностате // Морск. экол. журн. – 2010. – 8, № 4. – (В печати).

Институт биологии южных морей НАН Украины,
г. Севастополь, Украина

Получено 08.04.2010 г.

О. С. ЛЕЛЕКОВ, Р. П. ТРЕНКЕНШУ

**МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВМІСТУ В-ФІКОЕРИТРИНУ ТА ХЛОРОФІЛУ А В КЛІТИНАХ
PORPHYRIDIUM PURPUREUM ТА *SPIRULINA PLATENSIS***

Резюме

Проведена верифікація отриманого раніше рівняння, що описує динаміку відносного вмісту пігментів микроводорослей, на прикладі В-фікоеритрину культури *Porphyridium purpureum* та хлорофілу *a* культури *Spirulina platensis*. За допомогою розрахованих узагальнених коефіцієнтів моделі, отримано теоретичне рівняння, що описує динаміку вмісту В-фікоеритрину при різній освітленості.

Ключові слова: микроводорості, пігмент, фотодеструкція, математична модель.

A. S. LELEKOV, R. P. TRENKENSHU

**MODELING THE DYNAMICS OF RELATIVE ABUNDANCE OF B-PHYCOERYTHRIN AND
CHLOROPHYLL IN *PORPHYRIDIUM PURPUREUM* AND *SPIRULINA PLATENSIS* CELLS**

Summary

The verification of the previously obtained model describing the dynamics of pigment content of B-phycoerythrin of *Porphyridium purpureum* and chlorophyll *a* of *Spirulina platensis* culture is carried out. The theoretical equation describing the dynamics of B-phycoerythrin at different illumination is received using computed generalized coefficients.

Key words: microalgae, a pigment photodestruction, mathematical model.