

**ДИНАМИКА БИОМАССЫ *DUNALIELLA SALINA*
В УСЛОВИЯХ НЕПРЕРЫВНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ**

Демонстрируется возможность прогнозирования динамики биомассы микроводорослей в условиях непрерывного режима культивирования с использованием простейших математических моделей.

Прогностическая оценка – неотъемлемая часть организации интенсивного культивирования микроводорослей в лабораторных и промышленных условиях. На производстве особенно важным является прогноз количества биомассы микроводорослей, которое можно получить при тех или иных режимах культивирования. Для выполнения условий управляемого роста микроводорослей необходимо создание адекватной модели этого процесса. При этом особое место занимает вопрос о функциональной связи количества биомассы микроводорослей в рабочем объеме от различных факторов среды, влияющих на их рост. Априори эта зависимость неизвестна, поэтому исследователи прибегают к моделированию, выделяя наиболее существенные факторы, приносящие, по их мнению, наибольший вклад. Значительное число факторов, влияющих на рост микроводорослей как то: лимитирование и ингибирование минеральными компонентами и светом, конкуренция в смешанной культуре и пр., — привело к созданию большого числа разнообразных математических моделей и достаточно сложной теории роста микроорганизмов [1, 2, 9, 10]. Однако большинству исследователей, не имеющих должной математической подготовки, порой не под силу оценить возможность и границы применимости той или иной теории в конкретной ситуации. Кроме того, не существует каких-либо простых практических (обоснованных теоретически) рекомендаций выбора необходимого режима культивирования подобно работам [4, 6].

Наиболее информативными характеристиками культуры, выращенной в конкретных условиях, являются продуктивность и удельная скорость роста, определение которых является ключевым моментом в построении любых прогностических оценок. При определении этих характеристик экспериментатор вынужден принимать априори некоторые положения. К примеру, при расчете удельной скорости роста наиболее распространенным в гидробиологической практике является положение об экспоненциальном законе роста, хотя реальность эксперимента далека от подобной идеализации [7]. Также общепризнанным является положение о существовании нескольких фаз роста [8]. Однако формального определения границ фаз роста по экспериментальным данным до сих пор не существует. На основе положения о статистической природе потока субстрата в процессах субстратзависимого роста в [10] предложено аналитическое выражение, с высокой точностью описывающее накопительную кривую роста микроводорослей. Это выражение представляет собой чрезвычайно сложную зависимость, практически неприменимую в условиях производства. В сложившейся ситуации, на наш взгляд, наиболее приемлем подход, основанный на одном из основополагающих принципов природы — принципе простоты, т.е. применение простейших моделей, описывающих динамику роста микроводорослей на разных участках накопительной кривой [11]. В определении границ различных фаз роста есть некоторая доля субъективизма, но можно полагать, что для явно выраженных участков вероятность ошибки экспериментатора минимальна.

Цель данной работы на примере галобной микроводоросли *Dunaliella salina*, выращенной в лабораторных условиях, оценить изменения плотности в различных условиях непрерывной культуры, используя подход, предложенный в [11].

Материал и методы. В эксперименте использовали микроводоросль *D. salina*, полученную из коллекции микроводорослей ИнБЮМ НАН Украины. Установка для культивирования подробно описана в [5], а условия, методы и постановка эксперимента

в [3]. При переходе от оптических характеристик к сухой биомассе использовали коэффициент $k = 0,34$ г/(л·ед.опт.пл).

Результаты и обсуждение. На рис. 1 представлены экспериментальные данные,

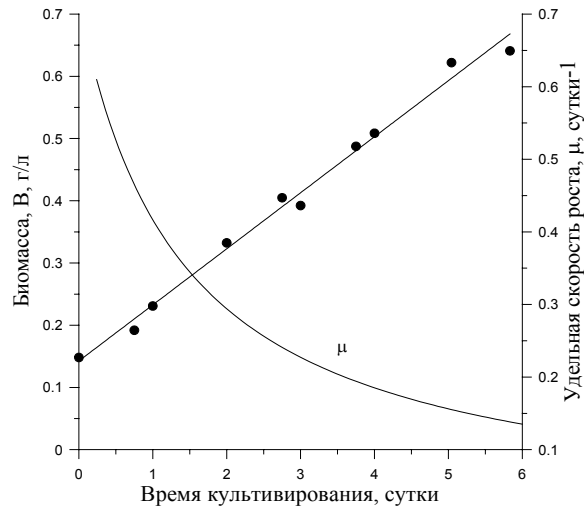


Рисунок 1. Динамика биомассы и удельной скорости роста *D. salina*
Figure 1. Dynamics of cells concentration and specific growth rate of *D. salina*

которые принадлежат линейной фазе роста. Используя эти данные, мы попытаемся составить прогноз динамики биомассы дуналиеллы при различных режимах непрерывного культивирования. Наиболее простой моделью, описывающей линейную фазу роста, является уравнение прямой:

$$B = P_m \times t + B_0 \quad (1)$$

где B — концентрация биомассы, г/л; P_m — продуктивность, г/(л×сут); t — время, сут; B_0 — концентрация биомассы при $t = 0$.

$$P_m = 0,094, B_0 = 0,132, \mu(t) = \frac{1}{t+1,4}$$

Для линейного участка накопительной кривой продуктивность есть первая производная функциональной зависимости биомассы от времени, т.е. $P_m = dB / dt$. В свою очередь удельная скорость роста определяется как $\mu = P_m / B$. Следовательно, уравнение удельной скорости роста можно записать следующим образом:

$$\mu = \frac{P_m}{B} = \frac{P_m}{P_m \times t + B_0} = \frac{1}{t \times \frac{B_0}{P_m}} \quad (2)$$

В условиях непрерывного культивирования для разной величины удельной скорости протока ω , изменение биомассы определяется выражением [11]:

$$B = \frac{P_m}{\omega} - \left(\frac{P_m}{\omega} - B_p \right) e^{-\omega(t-t_p)}, \quad B_p = P_m \times t_p + B_0 \quad (3)$$

где B_p — плотность культуры в момент включения протока t_p , полагая, что проток включен именно на линейном участке накопительной кривой. Заметим, в последнем выражении именно отношение величин P_m и ω определяет

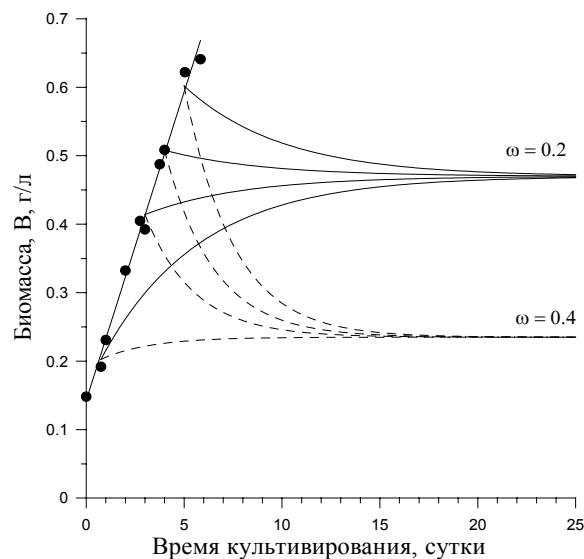


Рисунок 2. Семейство кривых, описывающих динамику биомассы *D. salina* при различных режимах непрерывного культивирования
Figure 2. Family of the curves describing the dynamics of concentration of *D. salina* cells at various modes of continuous cultivation

что проток включен именно на линейном участке накопительной кривой. Заметим, в последнем выражении именно отношение

величину биомассы в пределе, т.е. при $t = \infty$. Другими словами, изменяя удельную скорость протока, можно изменять плотность в проточной культуре. Используя выше изложенное, на рис. 1 приведены линейная зависимость концентрации клеток *D. salina* от времени, удельной скорости роста и расчетные характеристики культуры. Имея расчетные характеристики, заданную величину ω и момент включения протока, можно легко получить уравнение для составления прогноза. Естественно, для различных значений ω и t_p мы получим семейство кривых. Например, при $P_m = 0,094$, $B_0 = 0,132$, $\omega = 0,2$ и $t_p = 3$ имеем (рис. 2):

$$B_p = 0,094 \times 3 + 0,132 = 0,414; B = 0,47 - (0,47 - 0,414) e^{-0,2(t-3)}$$

или:

$$B = 0,47 - 0,056 e^{-0,2(t-3)}$$

В тех же условиях, но при $t_p = 1$ получим:

$$B = 0,47 - 0,226 e^{-0,2(t-1)}$$

Аналогично, при $t_p = 4$ и $t_p = 5$: $B = 0,47 + 0,038 e^{-0,2(t-4)}$, $B = 0,47 + 0,132 e^{-0,2(t-5)}$

Заключение. Используя основные характеристики роста культуры и различные величины удельной скорости протока и времени включения протока, можно прогнозировать уровень стационарного динамического состояния культуры. Проведенные расчеты не учитывают некоторые существенные факторы, влияющие на рост микроводорослей, например, степень адаптации и автоселекцию. Все же расчеты оправдывают себя, особенно тогда, когда речь идет о срочных прогнозах в условиях производства.

1. Абросов Н. С. Замкнутая система и хемостат — аналогия и примеры анализа // Журн. общ. биол. — 1979. — 11, №2. — С. 252 - 258.
2. Белянин В. Н. Светозависимый рост низших фототрофов (в управляемых условиях). — Новосибирск: Наука, 1984. — 96 с.
3. Владимирова М. Г., Семенов В. Е. Интенсивная культура одноклеточных водорослей. — М., 1962. — 60 с.
4. Геворгиз Р. Г., Шахматов А. П. Установка для полупромышленного культивирования морских микроводорослей // Экология моря. — 2005. - Вып. 67. - С. 44 — 47.
5. Гудвилович И. Н., Береговая Н. М., Боровков А. Б. Динамика суммарных каротиноидов и хлорофилла-а в клетках *Dunaliella salina* в квазинепрерывной культуре // Экология моря. — 2005. - Вып. 67. - С. 52 — 55.
6. Инструкция по массовому разведению морских одноклеточных водорослей и коловраток /Составители: Спектрова Л. В., Проскурина Е. С., Шерпов С. В. и др. — М., 1986. — 64 с. — (ВНИРО).
7. Парчевский В. П., Парчевский К. В. Средние скорости роста и их свойства // Экология моря. — 2000. — Вып. 53. — С. 92 - 96.
8. Перт С. Дж. Основы культивирования микроорганизмов. — М.: Мир, 1978. — 33 с.
9. Роботнова И. Л., Позмогова И. Н. Хемостатное культивирование и ингибирование роста микроорганизмов. — М.: Наука, 1979. — 208 с.
10. Тренкеншу Р. П. Применение теории массового обслуживания в биокинетике //Эволюционное моделирование и кинетика. - Новосибирск: Наука, 1992. - С. 125 - 160.
11. Тренкеншу Р. П. Простейшие модели роста микроводорослей 1. Периодическая культура. // Экология моря. — 2005. - Вып. 67. - С. 89 — 97.

Институт биологии южных морей НАН Украины,
г. Севастополь

Получено 15.06.2005

R. G. GEVORGIZ, A. B. BOROVKOV

DYNAMICS OF *DUNALIELLA SALINA* BIOMASS IN CONDITIONS OF CONTINUOUS CULTIVATION

Summary

Possibility of forecasting of dynamics of microalgae's biomass in conditions of continuous cultivation using the elementary mathematical model is shown.