

**НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ МОРЕЙ
ИМ. А.О. КОВАЛЕВСКОГО**

Р.П. ТРЕНКВНШУ Р.Г. ГЕВОРГИЗ

**ПРИМЕНЕНИЕ УРАВНЕНИЙ СВЕТОЗАВИСИМОГО
СОДЕРЖАНИЯ ПИГМЕНТОВ В РАСТИТЕЛЬНЫХ
КЛЕТКАХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
КРИВЫХ**

Препринт

СЕВАСТОПОЛЬ, 1996

Получены уравнения зависимости содержания пигментов в растительных клетках от поверхностной освещенности.

Уравнения применены для описания светозависимого содержания пигментов микроводорослей различных систематических групп.

Определены коэффициенты полученных уравнений. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических кривых.

Equations of dependence of pigment concentration on surface illumination in plant cells have been obtained.

The equations have been used to describe light-dependent pigment concentration of microalgae of different systematic groups.

Coefficients of the equations obtained have been calculated. Experimental and theoretical curves have been shown to be in good agreement.

Тренкеншу Рудольф Павлович

335000, Крым, г. Севастополь, пр.Нахимова,2,

Институт биологии южных морей НАН Украины, т.44-98-02

Геворгиз Руслан Георгиевич

335000, Крым, г. Севастополь, пр.Нахимова,2,

Институт биологии южных морей НАН Украины, т.54-55-50

В предыдущей нашей работе [1] был предложен механизм, объясняющий снижение содержания пигментов в растительных клетках при высоких интенсивностях света. В зависимости от количества квантов, одновременно поглощенных молекулой пигмента (n) и приводящих его к разрушению, содержание пигментов в клетках будет определяться выражением:

$$\beta_n = \beta_{\max} \frac{1 + Q_1\lambda + Q_2\lambda^2 + Q_3\lambda^3 + \dots + Q_{n-1}\lambda^{n-1} + Q_n\lambda^n}{1 + Q_1\lambda + Q_2\lambda^2 + Q_3\lambda^3 + \dots + Q_{n-1}\lambda^{n-1} + q\lambda^n}$$

где β_n — относительное содержание пигмента в биомассе клеток (определяется отношением установившихся концентраций данного пигмента и биомассы); $\beta_{\max}$ — максимальное содержание пигмента в биомассе; λ — интенсивность потока квантов, поглощаемых одной молекулой пигмента в единицу времени; $Q_1, Q_2, \dots, Q_n, q$ — постоянные коэффициенты. Для одно-квантового механизма фотодеструкции ($n = 1$) уравнение имеет простой вид:

$$\beta_1 = \beta_{\max} \frac{1 + Q_1\lambda}{1 + q\lambda}$$

В случае, если известны спектральные характеристики источника света и пигментов, например, для культур микроводорослей, можно найти зависимость β от интенсивности падающего света. Коэффициент поглощения ξ описывается формулой $\xi = 1 - 10^{-k\lambda}$ где k — показатель поглощения, зависящий от спектральных свойств пигмента (λ) и источника света. Интен-

сивность потока квантов, поглощаемых пигментом будет равна:
 $\lambda = \xi I_0 / \pi h \nu$ где I_0 — поверхностная облученность; π — по-
 верхностная концентрация пигментов; h — постоянная Планка,
 ν — частота действующего света. Следовательно, можно сделать
 переход зависимости β от λ к зависимости β от I_0 . Приведенное
 выше уравнение для одноквантового механизма будет иметь
 вид:

$$\beta_1 = \beta_{\max} \frac{1 + Q_1 \frac{\xi}{\pi h \nu} I_0}{1 + q \frac{\xi}{\pi h \nu} I_0}.$$

Введем обозначения:

$$Q_1 \frac{\xi}{\pi h \nu} = a_1; \quad q \frac{\xi}{\pi h \nu} = a_2.$$

Получаем следующее выражение:

$$\beta_1 = \beta_{\max} \frac{1 + a_1 I_0}{1 + a_2 I_0}. \quad (1)$$

Аналогично записываем для двух- и трехквантового механизма
 фотодеструкции (т.е. при $n=2$ и $n=3$):

$$\beta_2 = \beta_{\max} \frac{1 + b_1 I_0 + b_2 I_0^2}{1 + b_1 I_0 + b_3 I_0^2}, \quad (2)$$

$$\beta_3 = \beta_{\max} \frac{1 + c_1 I_0 + c_2 I_0^2 + c_3 I_0^3}{1 + c_1 I_0 + c_2 I_0^2 + c_4 I_0^3}. \quad (3)$$

Вероятность одновременного поглощения четырех, пяти и т.д.
 квантов света молекулой пигмента ничтожно мала. Поэтому эти
 случаи можно не рассматривать.

Таким образом, получены уравнения (1), (2), (3), в которых
 определена зависимость содержания пигментов от интенсив-

ности света для одно-, двух- и трехквантового механизма фотодеструкции.

Описание экспериментальных кривых

Полученные уравнения (1), (2), (3) справедливы для процесса, который протекает при стационарных условиях, поэтому для того, чтобы их применить, воспользуемся экспериментальными данными, полученными в непрерывном режиме выращивания клеток, при котором стабилизировалась оптическая плотность суспензии микроводорослей. Микроводоросли выращивались на определенной питательной среде при прочих оптимальных условиях. Мы воспользуемся данными, которые были взяты из работы [2] для морской микроводоросли *Platymonas viridis*. В эксперименте применяли плотностатный метод культивирования [3]. Прирост водорослей измеряли по величине оптической плотности в красной области спектра (D_{680}), характеризующей поглощение хлорофилл *a*. Запись спектра производили через 1-2 часа на регистрирующем спектрофотометре. Затем часть суспензии сливали и доливали соответствующий объем питательной среды, чем обеспечивалась стабилизация оптической плотности. После достижения стационарного роста определяли концентрацию сухой биомассы в суспензии. Содержание хлорофилла рассчитывали по методике, описанной в работе [4].

Следующие экспериментальные данные, которыми мы воспользуемся были предоставлены лично авторами работ [5,6,7]. В исследованиях использовались сине-зеленые и зеленые водоросли: *Spirulina platensis*, *Synechococcus elongatus* и *Chlorella vulgaris*.

Выращивание культур производили на определенных питательных средах при различных освещенностях с использованием люминесцентных и кварцевых ламп в условиях периодического культивирования в конических колбах при круглосуточном освещении и непрерывном барбатировании газовой смесью.

В цитированных работах приведены данные зависимости β от поверхностной облученности клеток.

Приведем данные по содержанию хлорофилла *a* в зависимости от интенсивности света для различных микроводорослей. Здесь β — относительное содержание хлорофилла *a* в сухой биомассе.

1. Зеленые водоросли:

а) Хлорелла:

$I_0(\text{Вт/м}^2)$	20	30	40	50	60	80	110	200	350	500
$\beta \%$	1.68	1.5	1.39	1.24	1.25	1.08	0.89	0.84	0.86	0.86

б) Платимонас:

$I_0(\text{Вт/м}^2)$	20	30	40	50	60	80	110	200	350	500
$\beta \%$	1.68	1.5	1.39	1.24	1.25	1.08	0.89	0.84	0.86	0.86

1. Сине-зеленые водоросли:

а) Синехококкус:

$I_0(\text{Вт/м}^2)$	100	200	400	570	800
$\beta \%$	0.855	0.655	0.538	0.512	0.48

б) Спирулина:

$I_0(\text{Вт/м}^2)$	30	70	105	206	387
$\beta \%$	1.74	1.38	1.23	1.05	0.95

На основе приведенных выше данных были получены коэффициенты уравнений (1), (2), (3) для каждого вида водорослей, которые приведены на рисунках. Коэффициенты определялись

из условий минимума средней квадратической ошибки

$$E_n = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left[\beta^{(i)} - f_n(I_0^{(i)}) \right]^2}. \text{ Для этого использовалась про-}$$

грамма в которой реализован метод покоординатного спуска.

Из расчетов коэффициентов уравнений зависимости относительного содержания хлорофилла a от облученности и из сопоставления экспериментальных данных с теоретическими видно, что моделью, наиболее точно описывающей экспериментальные данные, является модель в основе которой лежит механизм фотодеструктивного окисления пигментов при поглощении двух квантов света.

Заключение

1. На основе разработанной ранее модели [1] получены уравнения зависимости содержания пигментов в растительных клетках от поверхностной освещенности .

2. Уравнения применены для описания светозависимого содержания пигментов микроводорослей различных систематических групп .

3. Определены коэффициенты полученных уравнений. Показано хорошее соответствие экспериментальных и теоретических кривых.

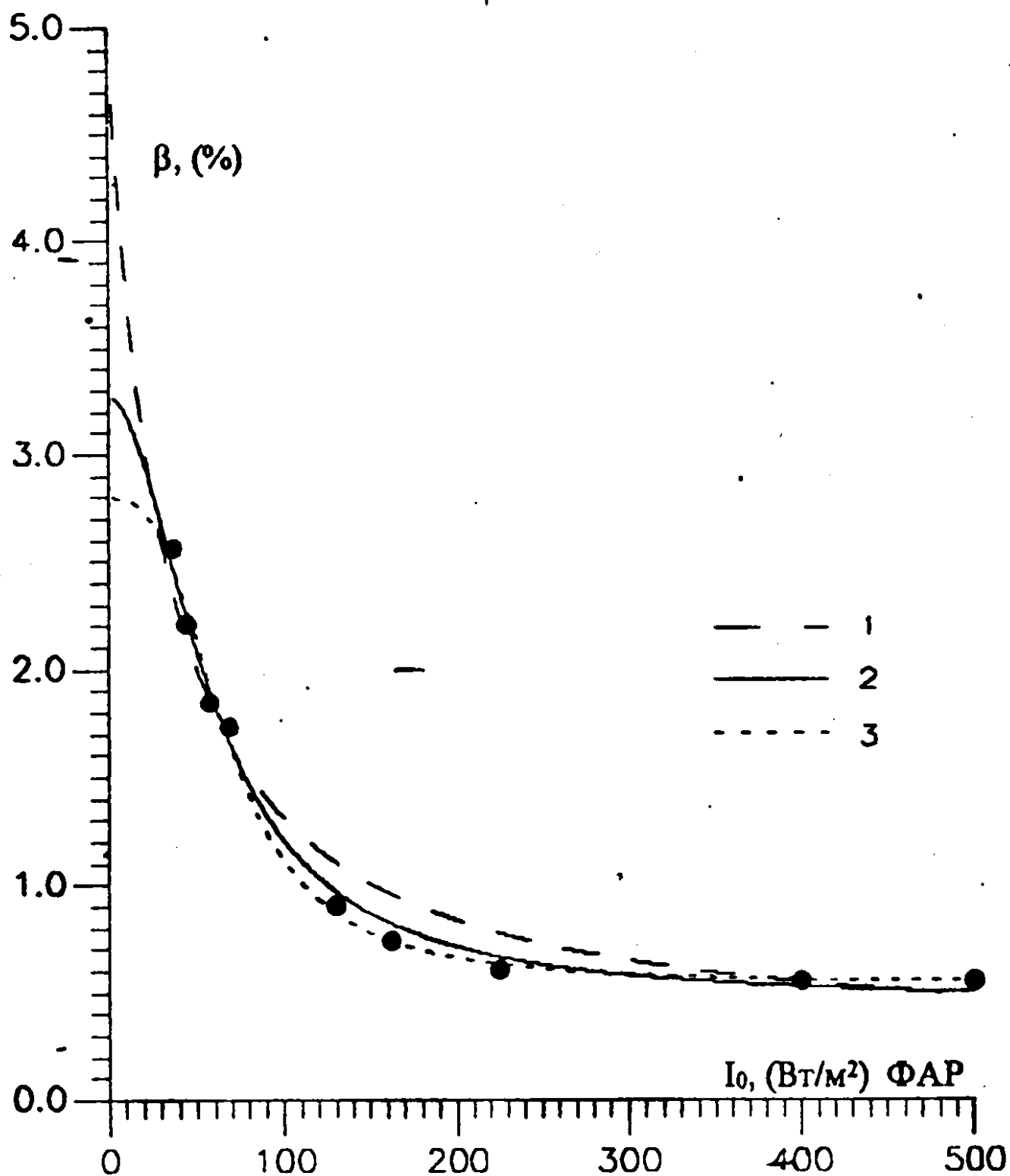


Рис 1. Зависимость относительного содержания хлорофилла *a* в сухой биомассе хлореллы от поверхностной освещенности. Расчет по уравнениям (1), (2), (3). Полученные коэффициенты:

по уравнению (1):
 $\beta_{\max} = 4.94 \%$; $a_1 = 0.15 \times 10^{-2}$; $a_2 = 0.332 \times 10^{-1}$; $E_1 = 0.063$;

по уравнению (2):
 $\beta_{\max} = 3.27 \%$; $b_1 = 0.197 \times 10^{-2}$; $b_2 = 0.418 \times 10^{-4}$;
 $b_3 = 0.316 \times 10^{-3}$; $E_2 = 0.31 \times 10^{-1}$;

по уравнению (3):
 $\beta_{\max} = 2.8 \%$; $c_1 = 0.173 \times 10^{-2}$; $c_2 = 0.14 \times 10^{-4}$; $c_3 = 0.71 \times 10^{-4}$;
 $c_4 = 0.373 \times 10^{-5}$; $E_3 = 0.3 \times 10^{-1}$.

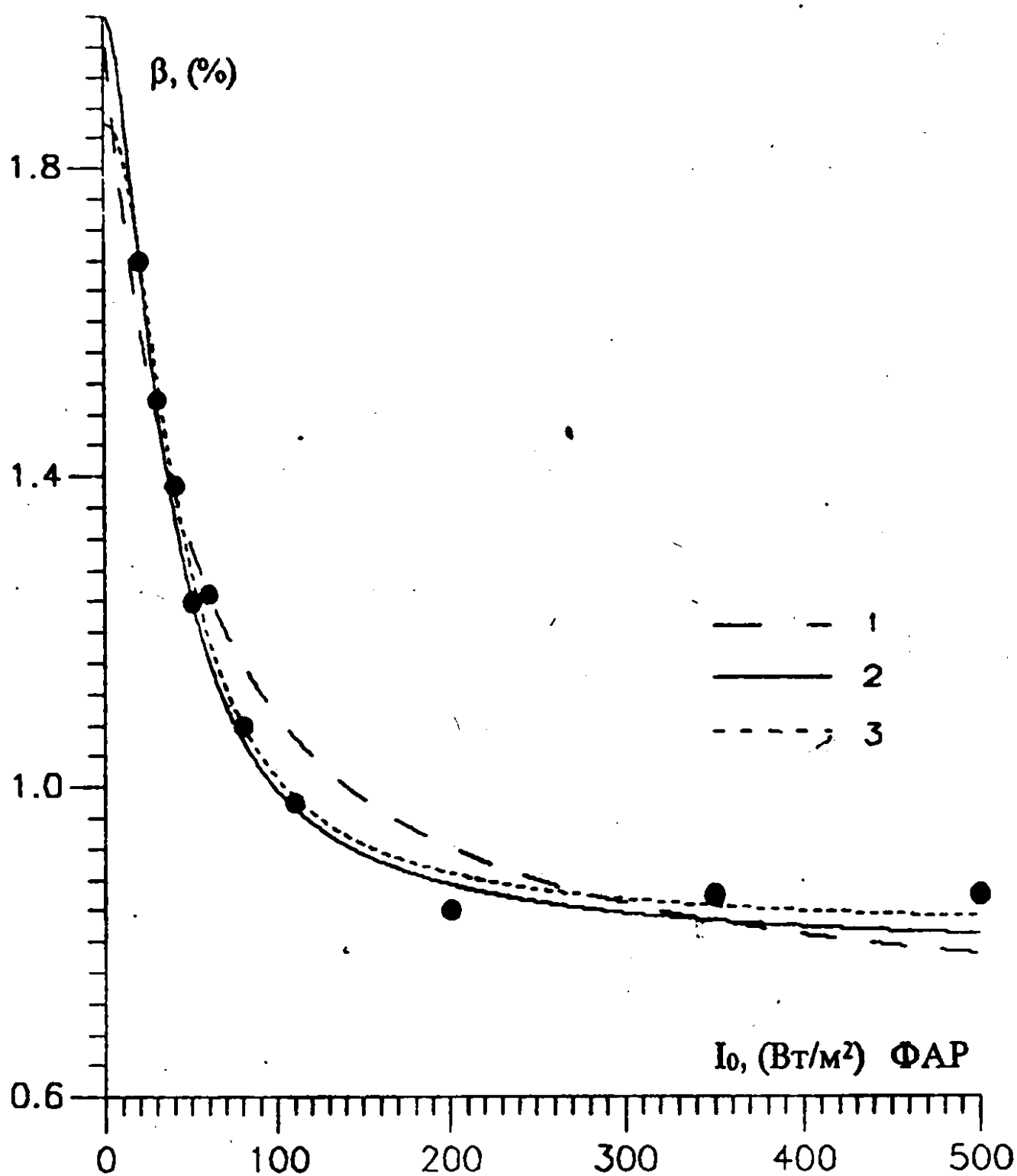


Рис 2. Зависимость относительного содержания хлорофилла *a* в сухой биомассе платимонаса от поверхностной освещенности. Расчет по уравнениям (1), (2), (3). Полученные коэффициенты:

по уравнению (1):
 $\beta_{\text{MAX}} = 1.99 \%$; $a_1 = 0.71 \times 10^{-2}$; $a_2 = 0.211 \times 10^{-1}$; $E_1 = 0.063$;

по уравнению (2):
 $\beta_{\text{MAX}} = 2 \%$; $b_1 = 0.15 \times 10^{-1}$; $b_2 = 0.44 \times 10^{-3}$; $b_3 = 0.11 \times 10^{-2}$;
 $E_2 = 0.31 \times 10^{-1}$;

по уравнению (3):
 $\beta_{\text{MAX}} = 1.86 \%$; $c_1 = 0.915 \times 10^{-1}$; $c_2 = 0.812 \times 10^{-3}$; $c_3 = 0.32 \times 10^{-4}$;
 $c_4 = 0.744 \times 10^{-4}$; $E_3 = 0.3 \times 10^{-1}$.

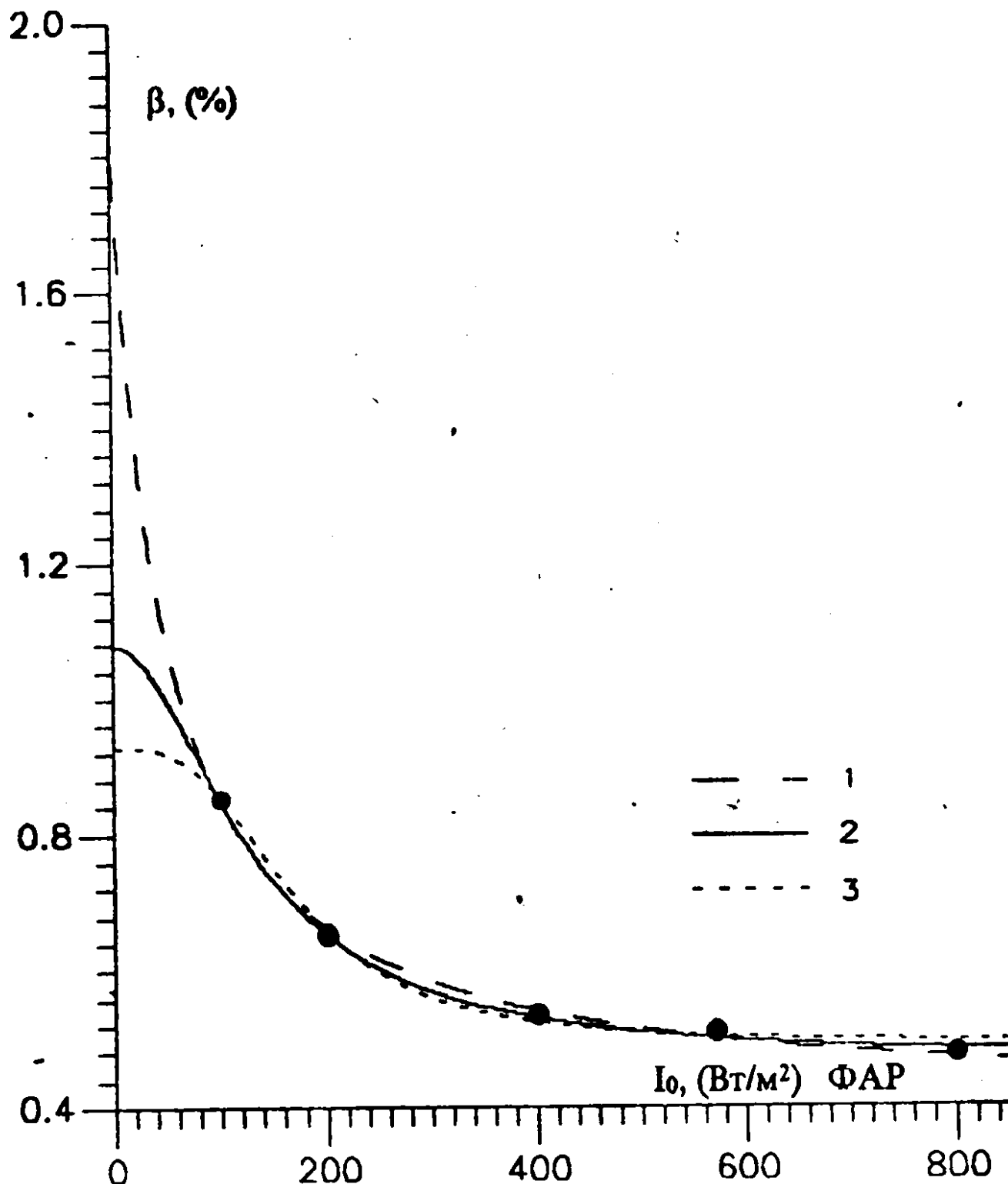


Рис 3. Зависимость относительного содержания хлорофилла *a* в сухой биомассе синехококкуса от поверхностной освещенности. Расчет по уравнениям (1), (2), (3). Полученные коэффициенты:

по уравнению (1):

$$\beta_{\max} = 1.82\%; \quad a_1 = 0.463 \times 10^{-2}; \quad a_2 = 0.214 \times 10^{-1}; \quad E_1 = 0.8 \times 10^{-2};$$

по уравнению (2):

$$\beta_{\max} = 1.08\%; \quad b_1 = 0.67 \times 10^{-3}; \quad b_2 = 0.27 \times 10^{-4};$$

$$b_3 = 0.63 \times 10^{-4}; \quad E_2 = 0.59 \times 10^{-2};$$

по уравнению (3):

$$\beta_{\max} = 0.93\%; \quad c_1 = 0.177 \times 10^{-3}; \quad c_2 = 0.23 \times 10^{-4};$$

$$c_3 = 0.112 \times 10^{-4}; \quad c_4 = 0.211 \times 10^{-4}; \quad E_3 = 0.01.$$

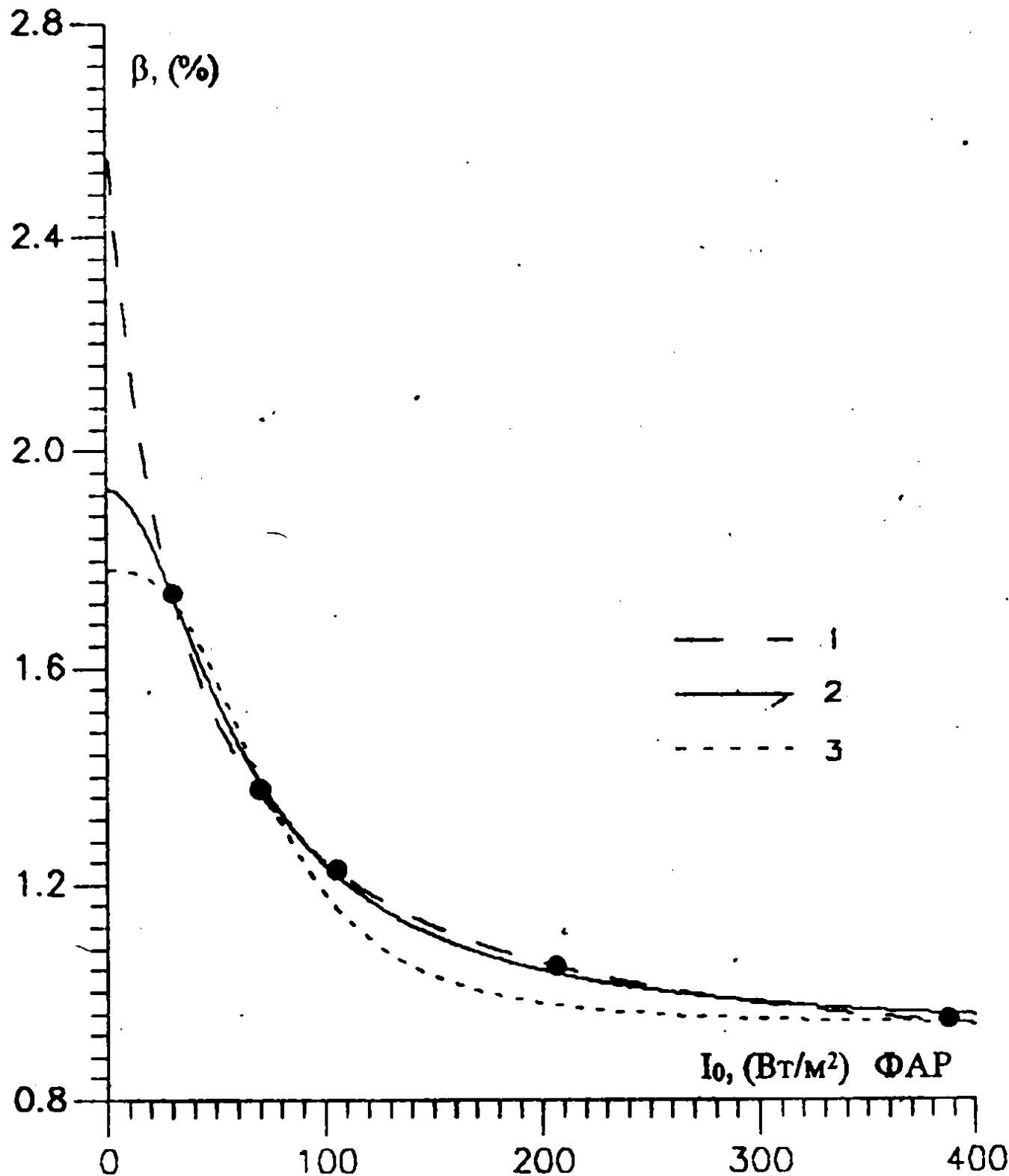


Рис 4. Зависимость относительного содержания хлорофилла *a* в сухой биомассе спироулины от поверхностной освещенности. Расчет по уравнениям (1), (2), (3). Полученные коэффициенты:

по уравнению (1):

$$\beta_{\text{MAX}} = 2.6 \text{ \%}; \quad a_1 = 0.96 \times 10^{-2}; \quad a_2 = 0.31 \times 10^{-1}; \quad E_1 = 0.24 \times 10^{-2};$$

по уравнению (2):

$$\beta_{\text{MAX}} = 1.93 \text{ \%}; \quad b_1 = 0.399 \times 10^{-2}; \quad b_2 = 0.134 \times 10^{-3};$$

$$b_3 = 0.287 \times 10^{-3}; \quad E_2 = 0.102 \times 10^{-1}.$$

по уравнению (3):

$$\beta_{\text{MAX}} = 1.78 \text{ \%}; \quad c_1 = 0.445 \times 10^{-3}; \quad c_2 = 0.196 \times 10^{-7};$$

$$c_3 = 0.132 \times 10^{-5}; \quad c_4 = 0.251 \times 10^{-5}; \quad E_3 = 0.32 \times 10^{-1}.$$

Литература

1. Тренкеншу Р.П., Геворгиз Р.Г. Математическая модель светозависимого содержания пигментов в микроводорослях /Ин-т биол. юж. морей НАН Украины. - Севастополь, 1995. - 12 с. - (Препринт).
2. Тренкеншу Р.П., Белянин В.Н., Сидько Ф.Я. Модель светозависимого роста морских микроводорослей. - Красноярск, 1981. - 61 с. - (Препринт. ИФСО - N 18 Б).
3. Терсков И.А., Гительзон И.И. Применение непрерывного плотностатного процесса для управляемого культивирования микроорганизмов // Непрерывное управляемое культивирование микроорганизмов. - М.: Наука, 1967. - С. 3-13.
4. Фиценко З.З., Тен В.С., Акинина Д.К., Сергеева Л.М., Берсенева Г.М. Пигменты в морских одноклеточных водорослях и интенсивность фотосинтеза // Экологическая физиология морских планктонных водорослей. - Киев, 1971. - С. 51-90.
5. Заворуева Е.Н., Белянин В.Н. Светоиндуцированные изменения размера фотосинтетической единицы фотосистемы I у сине-зеленых водорослей // Физиол. раст. - 1984. - Т.31, вып. 3. - С. 427-432.
6. Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. - Новосибирск, 1980. - 126 с.
7. Болсуновский А.Я., Дегерменджи А.Г. Изучение фотоэнергетического механизма сосуществования видов в смешанной проточной культуре "хлорелла — спирулина" // Вопросы управления биосинтезом низших растений. - Новосибирск, 1982. - С. 99-116.