

## МАКСИМАЛЬНАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ НАКОПИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ *PORPHYRIDIUM PURPUREUM* И *ARTHROSPIRA PLATENSIS* ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ОСВЕЩЁННОСТИ

Лелеков А.С.<sup>1</sup>, Клочкова В.С.<sup>2</sup>, Гаджи А.В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН»  
пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, Россия; e-mail: a.lelekov@yandex.ru

<sup>2</sup> Севастопольский государственный университет  
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: viki-iki@mail.ru

Поступила в редакцию: 10.07.2020

**Аннотация.** В работе проведено сравнение скоростей роста красной микроводоросли *Porphyridium purpureum* и цианобактерии *Arthrospira platensis* при различных значениях поверхностной облучённости для линейного участка накопительной кривой. Значения освещённости, измеряемые в клк, переведены в величины облучённости (энергии ФАР) с учётом спектра излучения используемых люминесцентных ламп. Определены величины максимальной продуктивности на линейном участке накопительных кривых. Для *P. purpureum* наибольшее значение данного параметра составило 0,62 г/(л·сут) при поверхностной освещённости 15 клк, а для *A. platensis* – 0,28 г/(л·сут) при 8,3 клк. Исследована зависимость максимальной продуктивности от облучённости, рассчитаны значения тангенса угла наклона линейной регрессии, величина которого составила 0,1 для *P. purpureum* и 0,2 для *A. platensis*. Показано, что зависимость коэффициента поглощения от плотности культуры для обоих видов описывается с высокой точностью ( $R^2 = 0,99$ ) уравнением Бугера-Ламберта-Бера. Определён удельный коэффициент экстинкции, который составил 0,08 и 0,14 для *P. purpureum* и *A. platensis* соответственно. Предложена модель зависимости удельной скорости роста культуры микроводорослей от её биомассы, основанная на положении о том, что удельная скорость синтеза прямопропорциональна количеству поглощённой световой энергии. Верификация модели показала высокое соответствие ( $R^2 = 0,98$ ) с экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** линейная фаза роста, максимальная продуктивность, удельная скорость роста, облучённость, коэффициент поглощения света, удельный коэффициент экстинкции.

Благодаря простоте технической реализации и эффективности накопительный режим культивирования является оптимальным способом выращивания микроводорослей. В условиях накопительного культивирования исследователи отмечают наличие линейной фазы, характеризующейся постоянством продуктивности. Этот участок имеет относительно большую протяжённость во времени, а плотность культуры иногда увеличивается в десятки раз. Для низших фотоавтотрофов механизмы линейного роста в литературе не описываются. В некоторых работах его связывают с газовым обеспечением, либо световыми условиями, то есть с факторами, которые приводят к кажущемуся постоянству скорости роста [1]. Независимо от механизма, обеспечивающего линейный рост, параметр продуктивности культуры микроводорослей можно рассматривать как обобщённую характеристику её физиологического состояния, так как он включает в себя всю совокупность биосинтетических и биоконверсионных процессов в клетках. Постоянство скорости роста позволяет относительно простыми способами управлять биохимическим составом получаемой биомассы в довольно широком диапазоне. Это свойство очень удобно в практическом плане, т. к. без потери продуктивности можно выбрать такую плотность непрерывной культуры, при которой на выходе будет получена биомасса с заданным биохимическим составом.

Световые условия, в которых находятся микроводоросли, первоочередно влияют на все процессы, которые протекают в клетках, так как свет является единственным источником энергии для роста и биосинтеза. В процессе фотосинтеза поглощённая энергия ФАР запасается клетками микроводорослей в виде макроэргов АТФ и НАДФ·Н. Современные представления о нециклическом транспорте электронов сводятся к общепринятой Z-схеме [2]. В результате циклического переноса электронов происходит синтез добавочного количества АТФ, необходимого для нормальной работы цикла Кальвина и протекания последующих биосинтетических процессов. Основным продуктом цикла Кальвина являются фосфорилированные гексозы. Промежуточное соединение цикла  $C_3$ -фосфоглицериновая кислота может превращаться в пировиноградную кислоту при недостатке НАДФ·Н, и далее в аланин. Наряду с аминокислотами, при определённых условиях, продуктами цикла Кальвина могут являться органические кислоты, жиры, липиды [3].

При любом лимитирующем факторе (минеральном или энергетическом) продуктивность культуры будет напрямую связана со скоростью энергообмена, причём результирующая скорость роста определяется минимальной величиной скорости энергообмена, которая, в свою очередь, зависит от наименьшего из потоков минерального и светового питания [4]. При минеральном дефиците скорость энергообмена будет ограничена скоростью окисления макроэргов, при световом лимитировании – скоростью их восстановления. При полном минеральном обеспечении и прочих оптимальных значениях внешней среды скорость образования макроэргов, а, следовательно, максимальная продуктивность будут определяться скоростью поглощения фотонов и количеством квантов, необходимых для восстановления одной молекулы макроэрга [5]. Однако скорость роста

увеличивается с ростом освещённости до некоторого предела и ограничена максимальным значением, которое определяется внутренней структурой клеток микроводорослей (узким местом). В этом случае максимальная скорость синтеза биомассы будет пропорциональна общему количеству ключевого фермента (или переносчика) и максимальной эффективности преобразования энергии макроэргов в химическую энергию, запасенную в биомассе. Оценка данных параметров для различных видов микроводорослей позволит получить новые знания о механизмах светового ограничения скорости роста в культуре.

Цель работы – исследование зависимости максимальной продуктивности накопительных культур *P. purpureum* и *A. platensis* от внешней освещённости.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнялась на базе кафедры “Физика” СевГУ, а также в отделе биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского РАН г. Севастополь. Культуру порфиридиума *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew & Ross (1965), полученную из ЦКП “Коллекция гидробионтов Мирового океана” ФИЦ ИнБЮМ, выращивали на среде для красных морских микроводорослей [6] с добавлением 10 г/л поваренной соли для повышения общей солёности. Культуру спирулины *Spirulina (Arthrospira) platensis* (Nordst.) Geitler (1932), выращивали на среде «Zarrouk» [7] (для приготовления среды используется дистиллированная вода). Культивирование осуществляли в накопительном режиме в плоскопараллельном фотобиореакторе [8] толщиной 2 см, с рабочим объёмом 1 л, площадью освещаемой поверхности 0,05 м<sup>2</sup> при круглосуточном искусственном освещении люминесцентными лампами Philips Daylight 54-765. Сверху культиватор закрывался пластиковой крышкой, в которой было выполнено отверстие для подачи воздуха, а также был оснащен системой охлаждения («водяной рубашкой»), обеспечивающей поддержание температуры суспензии 26-28 °С. Среднюю освещённость поверхности фотобиореактора определяли люксметром Ю-116 по шести точкам.

В эксперименте проводилось измерение температуры, оптической плотности культуры микроводорослей, а также сухой биомассы. Перед отбором проб объём в фотобиореакторе доводили дистиллированной водой до начального, компенсируя испарение. Температуру суспензии измеряли ртутным термометром непосредственно в фотобиореакторе, абсолютная погрешность измерений составляла 0,5 °С. Отбор проб для определения оптической плотности проводили с помощью дозатора Biohit 1-5 мл с разных точек внутри фотобиореактора: отбирали по 5 мл суспензии клеток водорослей, получая таким образом «среднюю пробу» объёмом 30 мл. В средней пробе после перемешивания определяли коэффициент пропускания. Оптическую плотность определяли на фотометре КФК-2 при длине волны 750 нм. Для определения сухого веса (СВ) величину оптической плотности  $D_{750}$  умножали на эмпирический коэффициент  $k = 1,4 \text{ г} \cdot \text{СВ} \text{ л}^{-1} \cdot \text{ед. опт. пл}^{-1}$  для *P. purpureum* и  $k = 0,8 \text{ г} \cdot \text{СВ} \text{ л}^{-1} \cdot \text{ед. опт. пл}^{-1}$  для *A. platensis* [9, 10]. Измерения проводили относительно дистиллированной воды. Кюветы располагали максимально близко к фотоприёмнику, что позволяло снизить погрешность измерения оптической плотности культуры, связанную с светорассеянием. При выходе показаний прибора за границы рабочего диапазона (от 30 до 70 % пропускания), проба разбавлялась дистиллированной водой. Спектр излучения люминесцентных ламп получен при помощи спектроколориметра ТКА-ВД/02.

Фотометрические величины освещённости, перевели в энергетические единицы облучённости освещаемой поверхности фотобиореактора согласно формуле [11]:

$$E = 1,464 \cdot N \cdot E_0, \quad (1)$$

где  $E$  – облучённость, Вт/м<sup>2</sup>,  $E_0$  – освещённость поверхности культиватора, клк,  $N$  – соотношение полной и видимой люксметром энергии ФАР.

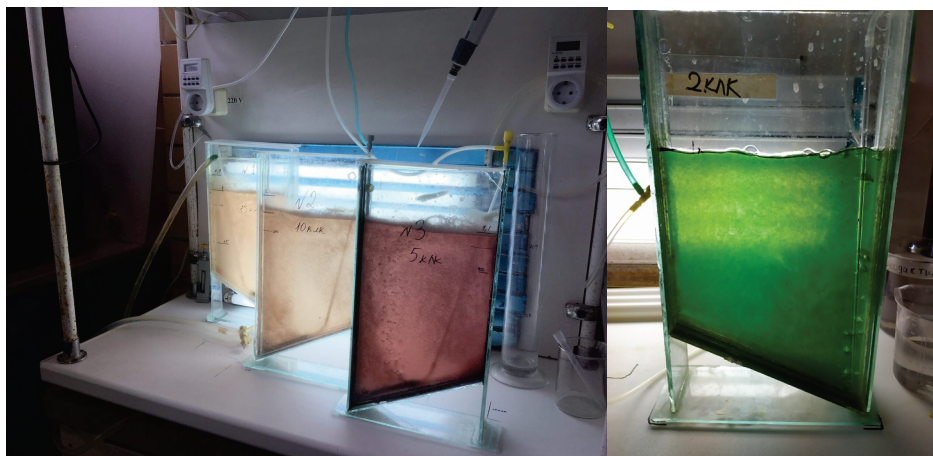


Рисунок 1. Внешний вид лабораторных установок

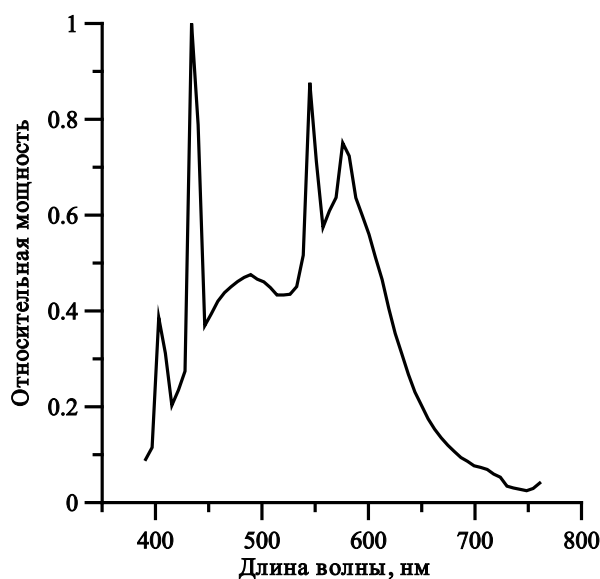


Рисунок 2. Энергетический спектр излучения люминесцентной лампы Philips Daylight-54-765

Для расчёта величины  $N$ , согласно методике [11], была сделана таблица с 2-мя колонками. В первую колонку были внесены значения длин волн  $\lambda$  от 400 до 800 нм. Во вторую колонку были внесены величины излучаемой источником света энергии, соответствующие этим длинам волн  $\Phi(\lambda)$ , которые были получены в результате оцифровки графика энергетического спектра излучения люминесцентной лампы Philips Daylight-54-765 (рис. 2) в программе Grafula. Далее добавлена колонка со значениями относительной спектральной световой эффективности  $V(\lambda)$  (относительной видности), которые соответствуют спектру поглощения люксметра Ю-116. Данные были интерполированы в программе SciDavis с шагом 1 нм. Затем, перемножив значения излучаемой энергии  $\Phi(\lambda) \cdot V(\lambda)$ , получили долю энергии, регистрируемой люксметром. Результаты представлены в таблице 1.

Просуммировав все значения  $\Phi(\lambda)$  и  $\Phi(\lambda) \cdot V(\lambda)$ , рассчитаем  $N$  по формуле:

$$N = \frac{\sum_{400}^{800} \Phi(\lambda)}{\sum_{400}^{800} \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda)} = 2.32 \quad (2)$$

Далее, подставляя полученное значение  $N$  и величин освещённости, попадающие на рабочую поверхность культиватора площадью 0,05 м<sup>2</sup>, в формулу (1), была найдена облучённость  $E$  в Вт/м<sup>2</sup>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе эксперимента получены накопительные кривые роста микроводорослей *P. purpureum* и *A. platensis*, представленные на рисунке 3.

Таблица 1. Излучаемая энергия  $\Phi(\lambda)$ , относительная видность  $V(\lambda)$  и спектр видности лампы  $\Phi(\lambda) \cdot V(\lambda)$  при некоторых длинах волн

$\lambda$ , нм	$\Phi(\lambda)$	$V(\lambda)$	$\Phi(\lambda) \cdot V(\lambda)$
400	2,66	0,0004	0,00106
401	4,50	0,0005	0,00216
402	5,76	0,0006	0,00323
...	...	...	...
600	12,46	0,63	7,86
601	12,33	0,62	7,62
602	12,20	0,61	7,38
...	...	...	...
768	0,53	0,00002	$1,1 \cdot 10^{-5}$
769	0,53	0,00001	$5,3 \cdot 10^{-6}$
770	0,53	0	0

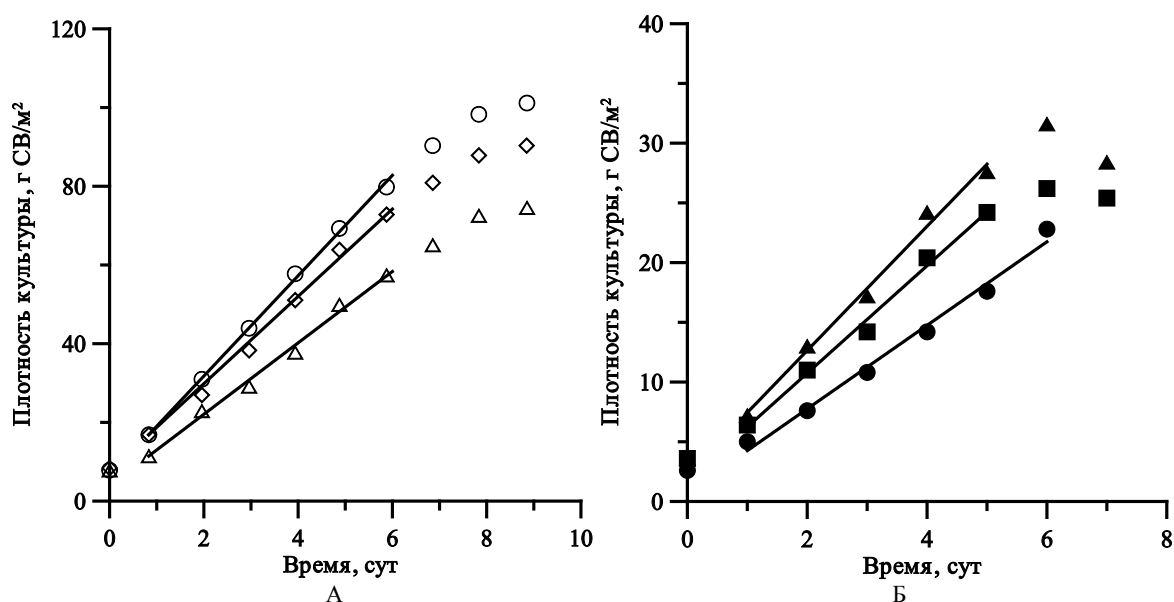


Рисунок 3. А – Накопительные кривые роста *P. purpureum*: ○ – 15 клк; ◇ – 10 клк; △ – 5 клк. Б – некоторые кривые роста *A. platensis*: ▲ – 8,3 клк; ■ – 6,5 клк; ● – 4,5 клк

Для определения максимальной продуктивности  $P_m$  на каждом из графиков провели аппроксимацию линейного участка роста уравнением:

$$B = B_0 + P_m \cdot t, \quad (3)$$

где  $B_0$  – начальная плотность культуры.

Значения максимальной продуктивности представлены в г/(л·сут) и с учётом толщины культиватора в г/(м<sup>2</sup>·сут). Полученные данные представлены в таблице 2.

Из таблицы можно сделать вывод, что максимальное значение продуктивности у *P. purpureum* достигает 12,4 г/(м<sup>2</sup>·сут) при облучённости 51 Вт/м<sup>2</sup>, а у *A. platensis* максимальная продуктивность 5,6 г/(м<sup>2</sup>·сут) при 28,1 Вт/м<sup>2</sup>. Согласно литературным данным [12], насыщающая облучённость, при которой удельная скорость роста достигает максимума, составляет около 50 и 100 Вт/м<sup>2</sup> для *P. purpureum* и *A. platensis*. Следовательно, для порфиридиума поверхностная облучённость в эксперименте была близка к насыщающей, в то время как для спирулины данная величина составляла около 30 % от насыщающей облучённости. Тем не менее, даже для *A. platensis* максимальная удельная скорость роста составила 0,04 ч<sup>-1</sup>, что в двое меньше, чем указано в [12]. Отметим, что максимальные скорости 0,08 – 0,09 ч<sup>-1</sup> могут быть реализованы только при условии стабилизации биохимического состава клеток в плотностате. Для накопительной культуры с ростом плотности микроводорослей происходит изменение пигментного и биохимического состава клеток. Эти изменения вызваны метаболическим [13], либо энергетическим лимитированием продуктивности [14].

Согласно классическим модельным представлениям, величина максимальной продуктивности культуры связана с поверхностной освещённостью или концентрацией биогенных элементов в среде и может быть описана гиперболической зависимостью по уравнению Моно [15]. В случае лимитирования роста микроводорослей пластическим субстратом, наблюдается высокое соответствие модели Моно с экспериментальными данными [9]. Результаты, полученные в данной работе для обоих видов для линейной фазы роста, с более высокой точностью описываются линейным сплайном. Согласно расчётам (см. рис. 4), тангенс угла наклона прямой составляет 0,1 для *P. purpureum* и 0,2 для *A. platensis*. Эти коэффициенты являются обобщёнными параметрами, указывающими на отличия способности различных видов микроводорослей усваивать световую энергию. Согласно предложенным ранее базовым принципам моделирования роста культур микроводорослей [5], скорость синтеза биомассы, выраженная в нормированном виде, прямолинейно зависит от количества квантов света, поступающих на одну молекулу ключевого комплекса за время его оборота. При этом коэффициент пропорциональности связан

Таблица 2. Максимальная продуктивность исследуемых объектов при разных значениях облучённости

	<i>P. purpureum</i>			<i>A. platensis</i>							
	Е, Вт/м <sup>2</sup>	17,0	34,0	51	6,1	10,9	15,6	20,4	22,1	25,0	28,1
$P_m$ , г/(л·сут)	0,45	0,55	0,62	0,05	0,09	0,14	0,21	0,23	0,25	0,25	0,28
$P_m$ г/(м <sup>2</sup> ·сут)	9,0	11,0	12,4	1,0	1,8	2,8	4,2	4,6	5,0	5,0	5,6

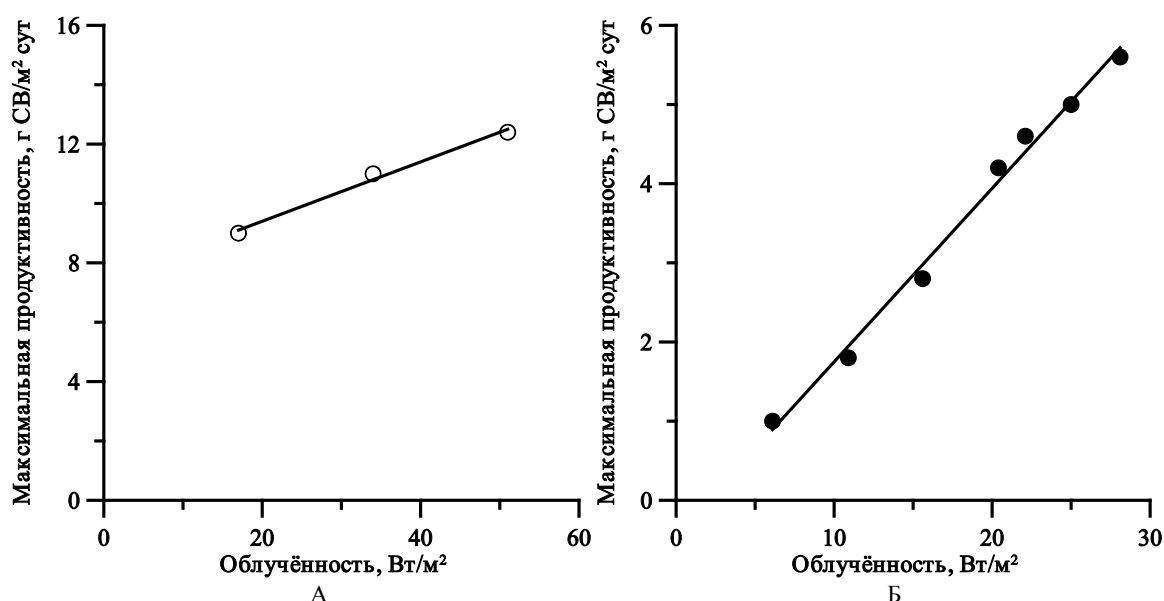


Рисунок 4. Линейная зависимость максимальной продуктивности культуры *P. purpureum* (А) и *A. platensis* (Б) от облучённости для линейной фазы накопительной кривой

с калорийностью биомассы, коэффициентом поглощения и эффективностью усвоения световой энергии и др. Полученные значения тангенсов угла наклона для двух видов микроводорослей, относящихся к различным систематическим группам низших фотоавтотрофов, могут быть использованы при разработке теоретических основ роста плотных культур.

Величина максимальной продуктивности не может являться независимым параметром для характеристики роста, т.к. зависит от количества биомассы. Подобного недостатка лишена удельная скорость роста. Для линейного участка зависимость удельной скорости роста от плотности культуры определяется выражением:

$$\mu = \frac{P_m}{B} \quad (4)$$

Подставив значения максимальной продуктивности из таблицы 3 и значения плотности культуры, соответствующие каждой величине облучённости, в формулу (4), получим динамику изменения удельной скорости. Гиперболическое снижение удельной скорости обусловлено тем, что при увеличении концентрации клеток в фотобиореакторе происходит затенение одних клеток другими, что приводит к уменьшению количества поглощаемой световой энергии на клетку. Учитывая то, что используемая питательная среда в обоих случаях обеспечивает рост биомассы микроводорослей не менее чем до 4 г СВ/л, на выбранном диапазоне плотностей элементы минерального питания и газовое обеспечение не являются лимитирующим фактором. Таким образом, удельная скорость роста будет определяться поверхностной освещённостью культуры, её оптической плотностью и коэффициентом поглощения света. В свою очередь оптические свойства культуры зависят от спектральных свойств источника света и концентрации пигментов в клетках. При моделировании светозависимого роста культуры микроводорослей удобно использовать параметр среднепространственной облучённости [12], физический смысл которой состоит в количестве световой энергии, приходящейся на единицу хлорофилла а. С учётом разработанных ранее теоретических представлений [5], можно считать, что величина удельной скорости синтеза биомассы прямопропорциональна  $E_{cp}$ . Наблюдаемая удельная скорость роста равна разности скоростей синтеза и эндогенного расхода биомассы. При условии того, что изменение содержания хлорофилла в клетках незначительное, то можно использовать ранее предложенную модель, которая позволяет описать зависимость удельной скорости роста от плотности культуры [1]:

$$\mu = \frac{\alpha \cdot I_0}{k \cdot B} - \mu_r \quad (5)$$

где  $k$  – удельный коэффициент экстинкции,  $m^2/g$  СВ;  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\mu_r$  – удельная скорость эндогенного расхода биомассы,  $сут^{-1}$ .

Для определения коэффициента поглощения света воспользуемся основополагающим законом оптики Бугера-Ламберта-Бера, записанного для культуры микроводорослей:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot B} \quad (6)$$

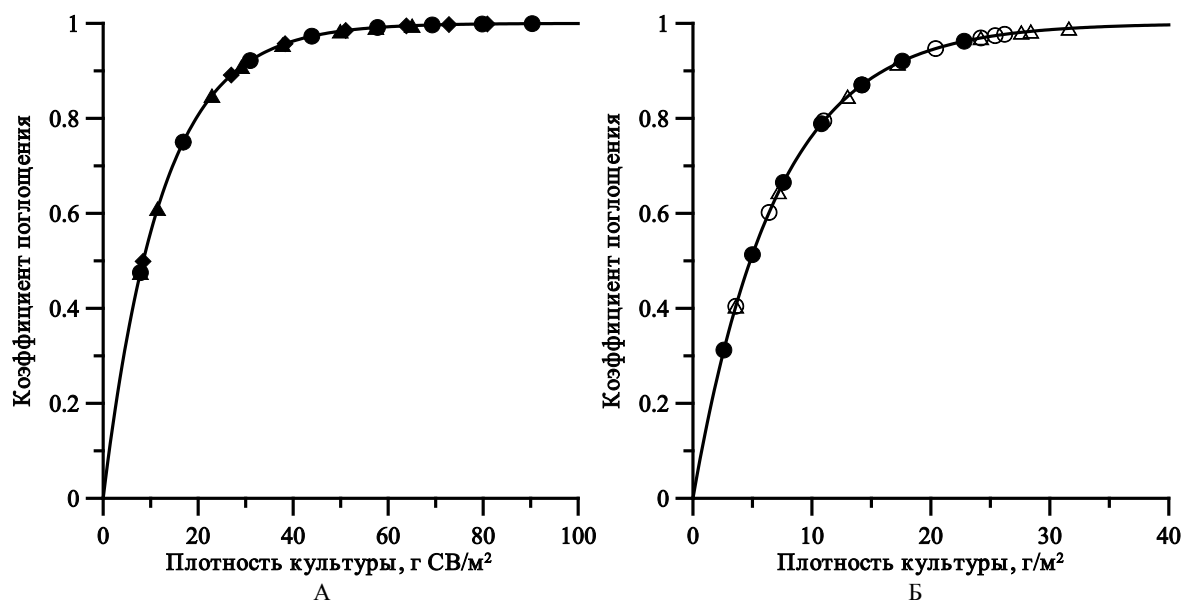


Рисунок 5. Зависимость коэффициента поглощения от биомассы *P. purpureum* (А) и *A. platensis* (Б)

где  $I$ ,  $I_0$  – интенсивность плоской монохроматической выходящей и падающей на слой вещества,  $k$  – удельный коэффициент экстинкции, зависящий от свойств растворенного вещества,  $B$  – поверхностная концентрация биомассы микроводорослей.

Коэффициент поглощения света суспензией имеет вид:

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot B} \quad (7)$$

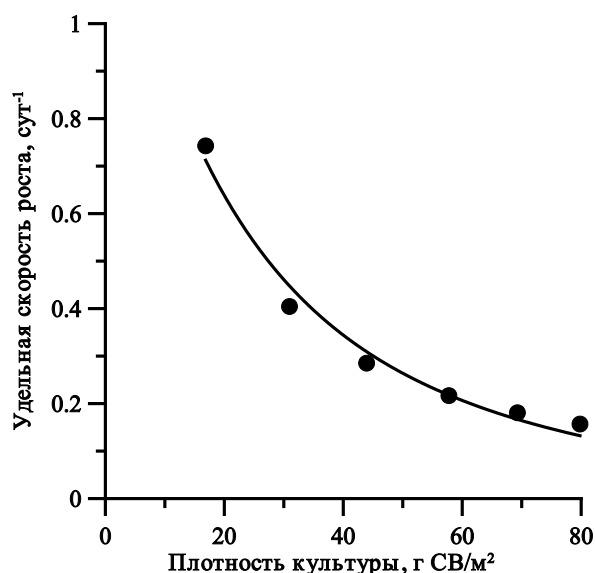
Применимость уравнения (7) для описания процессов светопоглощения в оптически плотных культурах микроводорослей вызывает множество вопросов. Тем не менее, (7) с высокой точностью ( $R^2 = 0,99$ ) позволяет описать полученные экспериментальные данные. На рисунке 5 представлена аппроксимация уравнением (7) зависимости коэффициента поглощения от биомассы для двух исследуемых видов. В результате расчёта определены коэффициент удельной экстинкции: 0,08 для *P. purpureum* и 0,14 для *A. platensis*. Это значит, что при 1 г при 1 м<sup>2</sup> клетки *P. purpureum* поглощают 8 % падающего света, а клетки *A. platensis* – 14 %, что обусловлено различным пигментным составом, эффективностью усвоения и преобразования световой энергии и пр.

Подставляя найденные значения экстинкции в (7), с учётом (5), получим окончательное уравнение зависимости удельной скорости роста от плотности культуры. Для примера, при 15 клк на линейном участке  $\mu$  *P. purpureum* описывается уравнением (рис. 6):

$$\mu = \frac{1,48 \cdot (1 - e^{-0,08 \cdot B})}{0,08 \cdot B} - 0,1. \quad (8)$$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что вне зависимости от вида микроводоросли и количества световой энергии, падающей на поверхность фотобиореактора, на линейном участке накопительной кривой наблюдается линейная взаимосвязь максимальной продуктивности с облучённостью. Полученные результаты справедливы для плоскопараллельных систем выращивания с тонким слоем культуры. В общем случае, линейный участок является результирующей относительно большого количества воздействующих факторов, которые приводят к постоянству скорости роста. Например, изменяющаяся эффективность усвоения световой энергии, изменение скорости синтеза тех или иных биохимических составляющих клеток и пр. Предложенная модель зависимости удельной скорости роста от биомассы с высокой точностью ( $R^2 = 0,98$ ) позволяет описать гиперболическое снижение  $\mu$ , однако не объясняет постоянства величины максимальной продуктивности. Дальнейшее развитие моделирования в данном направлении должно учитывать изменение биохимического состава клеток на линейном участке. Тем не менее, полученные результаты могут быть использованы при разработке теоретических основ линейного роста культур микроводорослей.



**Рисунок 6.** Зависимость удельной скорости роста от биомассы *P. purpureum* для линейной фазы накопительной культуры при 15 клк. Линия – расчёт по уравнению (8)

Работа выполнена в рамках госзадания ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН», № гос. регистрации АААА-А18-118021350003-6.

#### Список литературы / References:

1. 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 in culture. *Marine biological journal*, 2018, vol. 3, no. 1, pp. 53-60. (In Russ.)]
2. Холл Д., Рао К. *Фотосинтез*. М.: Мир, 1983, 134 с. [Hall D., Rao K. *Photosynthesis*. М.: Мир, 1983, 134 p. (In Russ.)]
3. Алехина Н.Д. *Физиология растений: Учебник для студ. вузов* / Н.Д. Алехина, Ю.В. Балконин, В.Ф. Гавриленко и др. Под ред. И. П. Ермакова. М.: «Академия», 2005, 640 с. [Alekhina N.D. *Plant Physiology: A Textbook for Stud. universities* / N.D. Alekhine, Yu.V. Balkonin, V.F. Gavrilenko et al. Ed. I.P. Ermakova. М.: "Academy", 2005, 640 p. (In Russ.)]
4. Liebig J. *Chemistry in its Application to Agriculture and Physiology*. London: Taylor and Walton, 1847, 418 p.
5. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С. *Моделирование роста микроводорослей*. Белгород: ООО «КОНСТАНТА», 2017, 152 с. [Trenkenshu R.P., Lelekov A.S. *Modeling of microalgae growth*. Belgorod: CONSTANTA LLC, 2017, 152 p. (In Russ.)]
6. Тренкеншу Р.П., Терсков И.А., Сидько Ф.Я. Плотные культуры морских микроводорослей. *Известия Сибирского отделения Академии наук СССР. Серия биологических наук*, 1981, т. 5, № 1, с. 75-82. [Trenkenshu R.P., Terskov I.A., Sidko F.Ya. Dense cultures of marine microalgae. *Bulletin of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. A series of biological sciences*, 1981, vol. 5, no. 1, pp. 75-82. (In Russ.)]
7. Zarrouk C. *Contribution à l'étude d'une cyanophycée. Influence de divers facteurs physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthèse de Spirulina maxima* (Setch et Gardner) Geitler: Ph. D thèse. Paris, 1966, 114 p.
8. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С., Боровков А.Б., Новикова Т. М Унифицированная установка для лабораторных исследований микроводорослей. *Вопросы современной альгологии*, 2017, № 1 (13), URL: <http://algology.ru/1097>. [Trenkenshu R.P., Lelekov A.S., Borovkov A.B., Novikova T.M Unified installation for laboratory research of microalgae. *Questions of modern algology*, 2017, no. 1 (13). URL: <http://algology.ru/1097>. (In Russ.)]
9. Горбунова С.Ю., Боровков А.Б., Тренкеншу Р.П. Продуктивность культуры *Arthrospira platensis* (Nordstedt) Geitler (Cyanoprokaryota) при различной обеспеченности минеральным фосфором. *Альгология*, 2011, т. 21, № 3, с. 374-384. [Gorbunova S.Yu., Borovkov A.B., Trenkenshu R.P. The productivity of the culture *Arthrospira platensis* (Nordstedt) Geitler (Cyanoprokaryota) with different availability of mineral phosphorus. *Algology*, 2011, vol. 21, no. 3, pp. 374-384. (In Russ.)]
10. Гудвилевич И.Н., Боровков А.Б. Продукционные характеристики *Porphyridium purpureum* (Bory) Ross в условиях накопительной и квазинепрерывной культуры. *Альгология*, 2014, т. 24, № 1, с. 34-46. [Gudvilovich I.N., Borovkov A.B. Production characteristics of *Porphyridium purpureum* (Bory) Ross in the conditions of cumulative and quasi-continuous culture. *Algology*, 2014, vol. 24, no. 1, pp. 34-46. (In Russ.)]
11. Геворгиз Р.Г., Малахов А.С. *Пересчёт величины освещённости фотобиореактора в величину облучённости*. Севастополь: ООО «Колорит», 2018, 60 с. [Gevorgiz R.G., Malakhov A.S. *Recalculation of the illumination value of the photobioreactor into the irradiation value*. Sevastopol: Kolorit LLC, 2018, 60 p. (In Russ.)]

12. Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. *Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей*. Новосибирск: Наука, 1980, 136 с. [Belyanin V.N., Sidko F.Ya., Trenkenshu A.P. *Energy of photosynthetic microalgae culture*. Novosibirsk: Science, 1980, 136 p. (In Russ.)]
13. Sánchez-Saavedra M.P., Castro-Ochoa F.Y., Nava-Ruiz V.M. et al. Effects of nitrogen source and irradiance on *Porphyridium cruentum*. *J. Appl. Phycol.*, 2017. DOI: 10.1007/s10811-017-1284-2.
14. Satthong S., Saego K, Kitrunloadjanaporn P, Nuttavut N. Modeling the effects of light sources on the growth of algae. *Advances in Difference Equations*, 2019, DOI: 10.1186/s13662-019-2112-6.
15. Monod J. The growth of bacterial cultures. *Ann. Rev. Microbiol.*, 1949, vol. 3, pp. 371-394.

#### MAXIMUM PRODUCTIVITY OF *PORPHYRIDIUM PURPUREUM* AND *ARTHROSPIRA PLATENSIS* BATCH CULTURE IN DIFFERENT LIGHT CONDITIONS

Lelekov A.S.<sup>1</sup>, Klochkova V.S.<sup>2</sup>, Gadzhi A.V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,  
Nachimov av. 2, Sevastopol, 299011, Russia, e-mail: a.lelekov@yandex.ru

<sup>2</sup> Sevastopol State University  
Universitetskaya 33, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: viki-iki@mail.ru

**Abstract.** The paper compares the growth rates of the red microalgae *Porphyridium purpureum* and cyanobacteria *Arthrospira platensis* at different values of surface irradiation for a linear phase of the batch curve. The illumination values measured in the klux are translated into irradiance values (energy PAR) taking into account the radiation spectrum of the fluorescent lamps. The values of maximum productivity on a linear phase of batch curves are determined. For *P. purpureum*, the highest value of this parameter was 0.62 g/(l·day) with a surface illumination of 15 klux, for *A. platensis* – 0.28 g/(l·day) at 8.3 klux. The dependence of maximum productivity on irradiation was studied, and the values of the tangent of the slope angle of the linear regression were calculated. The value of which was 0.1 for *P. purpureum* and 0.2 for *A. platensis*. It is shown that the dependence of the absorption coefficient on the culture density for both species is described with high accuracy ( $R^2 = 0.99$ ) by the Booger-Lambert-Behr equation. The specific extinction coefficient was determined, which was 0.08 and 0.14 for *P. purpureum* and *A. platensis*, respectively. A model of the dependence of the specific growth rate of a microalgae culture on its biomass is proposed. Model was based on the assumption that the specific rate of synthesis is directly proportional to the amount of absorbed light energy. Verification of the model showed high compliance ( $R^2 = 0.98$ ) with experimental data.

**Key words:** linear growth phase, maximum productivity, specific growth rate, irradiance, light absorption coefficient, specific extinction coefficient.