

Департамент образования города Севастополя
Государственное бюджетное образовательное учреждение
«Центр дополнительного образования «Малая академия наук»

**ЛИНЕАРИЗИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ
ЗАВИСИМОСТИ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ
НАКОПИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ
ARTHROSPIRA PLATENSIS ОТ ОСВЕЩЁННОСТИ**

Работу выполнила:

Лукьянчук Полина Сергеевна,
учащаяся творческого объединения
«Биотехнологии» ГБОУ ЦДО
«Малая академия наук», ГБОУ
«Гимназия №1 им. А. С.
Пушкина», 11 класс;

Научный руководитель:

Дорошенко Юлия Валерьевна,
педагог ДО, руководитель
творческого объединения
«Биотехнологии» ГБОУ ЦДО
«Малая академия наук», к.б.н., н.с.
ФИЦ ИнБЮМ;

Научный консультант:

Лелеков Александр Сергеевич
старший научный сотрудник ФИЦ
ИнБЮМ, к.б.н.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	5
1.1. Краткая характеристика <i>Arthrospira platensis</i>	5
1.2. Способы культивирования микроорганизмов	6
1.3. Факторы, влияющие на рост микроорганизмов	7
РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	9
2.1. Метод культивирования микроводорослей	9
2.2. Состав и приготовление питательной среды	9
2.3. Постановка эксперимента	10
2.4. Метод определения биомассы оптическим способом	10
2.5. Статистическая обработка данных	11
РАЗДЕЛ 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	12
3.1. Культивирование <i>A. platensis</i> в накопительном режиме и определение максимальной продуктивности	12
3.2. Максимальная продуктивность спирулины и её зависимость от освещённости	14
ВЫВОДЫ	16
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	17

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы. Проект посвящён фундаментальной научной проблеме – влиянию абиотических факторов среды на скорость роста культур микроорганизмов.

Использование микроводорослей в научно-исследовательских и промышленных целях непрерывно расширяется. Различные виды водорослей служат источниками растительного белка, витаминов, хлорофилл-каротиноидных комплексов и т.д. Микроводоросли, в качестве объекта марикультуры, являются основным видом корма для личинок и спата мидий и устриц. Использование микроводорослей для доочистки сточных вод позволяет решить проблему возрастающей эвтрофикации поверхностных вод [1, 2].

Однако среди широких слоёв населения наибольшую известность и популярность получила цианобактерия *Arthrospira platensis* или микроводоросль *Spirulina platensis* [3].

С начала 80-х годов спирулина начала свое победное шествие по всему миру в качестве пищевой добавки. Она входит в состав многих готовых продуктов, а также продаётся в чистом виде, как порошок или таблетки. Спирулина - это живой организм, проживший на Земле без изменений сотни миллионов лет именно благодаря своему уникальному биохимическому составу. Это тщательно сбалансированный самой природой набор витаминов, минералов и аминокислот, заключённый в легко усваиваемую мукопротеиновую мембрану. Однако её польза не останавливается только на обеспечении энергетических запросов человека. Это создание – кладёз единично встречающихся в природе веществ, оказывающих профилактическое и лечебное действие на опасные и тяжёлые в лечении заболевания [4].

Важнейшим фактором, определяющим продукционные свойства культур микроводорослей, являющихся фототрофными организмами, является свет. Зависимость жизнедеятельности водорослей, в частности, фотосинтеза от освещённости может выражаться как в лимитировании, так и в ингибировании их роста. Эти два основных процесса отражают регуляторную роль света в запасании свободной энергии для создания биомассы микроводорослей [5, 6].

Цель и задачи исследования. Цель работы – исследование зависимости максимальной продуктивности накопительной культуры *A. platensis* от внешней освещённости.

Цель работы определила следующие задачи:

- освоить методику культивирования *A. platensis* в накопительном режиме в фотобиореакторе плоскопараллельного типа;
- освоить методику определения биомассы микроводорослей в культуре;
- проводить измерение средней освещённости поверхности культиватора люксметром;

- определить в эксперименте динамики температуры, оптической плотности культуры микроводорослей, а также сухой биомассы;
- выявить зависимость максимальной скорости роста *A. platensis* от облучённости для линейной фазы накопительной кривой.

Объект исследования – цианопрокариота *Arthrospira platensis* (син. *Spirulina platensis*).

Предмет исследования – зависимость максимальной продуктивности от облучённости.

Методы исследования – методы микробиологии и биотехнологии (для культивирования микроорганизмов, для определения плотности культуры микроводорослей), математической статистики (для анализа и оценки достоверности полученных данных).

Связь работы с научными программами. Научная работа выполнена на базе отделов морской санитарной гидробиологии и биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ в рамках работы творческого объединения «Биотехнология».

Личный вклад учащегося. Лукьянчук П. С. принимала непосредственное участие в разработке темы «Линеаризированная модель зависимости максимальной продуктивности накопительной культуры *Arthrospira Platensis* от освещённости»: подбирала литературу по выбранной теме, осваивала микробиологические, биотехнологические и гидробиологические методики. Подготовка посуды, сред, определение оптической плотности культур цианобактерий проводились учащейся самостоятельно под руководством Дорошенко Ю. В. и Лелекова А. С. Постановка эксперимента и статистическая обработка полученных данных, а также интерпретация результатов выполнены лично согласно инструкциям научного руководителя.

Структура и объём работы. Научная работа изложена на 18 страницах машинописного текста, состоит из введения, трёх разделов, выводов, списка литературы, который содержит 18 источников (в том числе, иностранных – 3). Текст работы иллюстрирован 2 таблицами, 9 рисунками.

РАЗДЕЛ 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

1.1. Краткая характеристика *Arthrospira platensis*

Arthrospira platensis – цианобактерия или сине-зелёная прокариотическая микроводоросль, которая хорошо развивается в обогащённых карбонатами и гидрокарбонатами водах. Спирулина, как все прокариоты, имеет низкий уровень клеточной дифференциации (отсутствуют хроматофоры, истинное ядро, ядрышки, вакуоли, митохондрии, эндоплазматическая сеть и т.д.). Неветвящиеся спиралеобразные трихомы (нити или филаменты) из цилиндрических клеток окружены слизистым чехлом и способны к скользящему и вращательному движению. При воздействии различных физических и химических факторов филаменты могут распрямляться (рис. 1.1). Было установлено, что при выращивании клоновой культуры *A. platensis* в одинаковых условиях роста при многократных пассажах наряду с обычными рыхлыми спиралями (исходная культура, рис. 1.1 а) могут появиться другие варианты: прямые или слегка волнистые, слабо спиральные утолщенные (рис. 1.1 б), веретеновидные и гантелевидные спирали (рис. 1.1 в), спирали в виде «бухт», вкрапленные в слизистый субстрат [7].

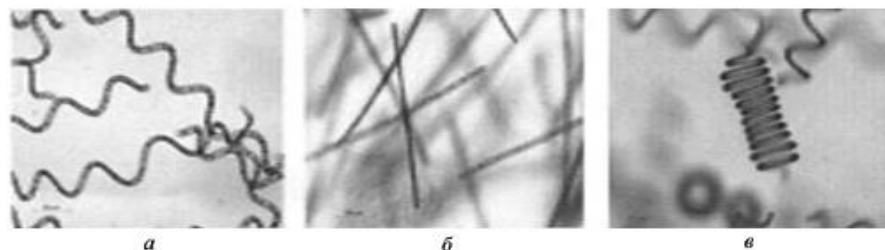


Рис. 1.1 Морфологические варианты клоновой культуры *A. platensis* [7]

Половой процесс у цианобактерий отсутствует. Размножается *A. platensis* при помощи гормогоний – короткоцепочечных, способных к движению, участков нитей, образующихся путем фрагментации материнских трихомов по некридиям (специализированным клеткам, подвергающимся лизису). Типичными пигментами, помимо хлорофилла и каротиноидов, являются фикобилипротеины [8, 9].

В современной систематике существует два подхода. «Альгологический» основан на функциональном сходстве про- и эукариотических водорослей, как оксигенных фототрофов по способу питания. Поэтому спирулину относили к группе низших растений. «Микробиологический» подход появился в 60-х годах XX века благодаря установлению чётких различий между про- и эукариотными типами клеточной организации. Это потребовало создания новой классификации, в основе которой лежит установление генетических, эволюционных связей между организмами. Согласно одной из современных систем классификации такого типа, таксономический статус *S. platensis* отражает следующая схема: царство Прокариоты (Procaryota, Monera), домен эубактерий (Bacteria), класс

(Cyanophyceae), группа цианобактерий (Cyanobacteria), род (Arthrospira) [3, 10].

В настоящее время не вызывает сомнения существование двух отдельных родов *Spirulina* и *Arthrospira*, и в двух параллельных классификационных системах – ботанической и бактериологической – они так и представлены. Исторически сложилось, что все «пищевые» штаммы вошли в род артроспира, но выращиваются в промышленном масштабе под названием «спирулина» [7], которое, пусть и не является полностью научным, используется в сфере маркетинга.

1.2. Способы культивирования микроорганизмов

Культивирование микроорганизмов – важный этап многих технологических производств. При культивировании происходит накопление биомассы и продуктов метаболизма (жизнедеятельности) микроорганизмов. Продукты метаболизма могут, как накапливаться внутри клеток, так и выделяться в питательную среду [11].

В зависимости от цели выращивания культуры: использование продуктов жизнедеятельности биомассы, её накопление и т.д., используются разные способы, наиболее подходящие под задачу (рис. 1.2).



Рис. 1.2 Классификация способов культивирования [11]

Процессы культивирования различаются содержанием кислорода, состоянием питательной среды, способом перемешивания, количеством ферментёров, способом управления.

Система может быть открытой или закрытой. Открытая система культивирования – это система, в которую все компоненты могут свободно поступать, а так же покидать её. В закрытой системе хотя бы одно вещество не обменивается своей массой с остальной культурой. Все непрерывные

культуры, имеющие, с одной стороны приток питательной среды, с другой – отток биомассы, являются открытыми системами [11].

1.3. Факторы, влияющие на рост микроорганизмов

Как в естественных, так и в лабораторных условиях, микроорганизмы подвергаются воздействию абиотических факторов, значительно различающихся по своей природе и механизму действия.

Температура – один из важнейших абиотических факторов среды, влияющий на микроорганизмы. Она регулирует скорость реакций в среде клетки, влияет на макромолекулы, составляющие клеточные мембраны. Её повышение может привести к денатурации белков, а понижение – замедлить процессы жизнедеятельности настолько, что появится возможность их длительного хранения при поддержании данной температуры. Организмы разделяются на группы по своему отношению к температуре. К примеру, психрофилы могут существовать при низких температурах в глубинах океанов (до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$), а экстремальные термофилы могут жить в гейзерах (при $t=90\text{ }^{\circ}\text{C}$) [12].

Влажность среды имеет большое значение для микроорганизмов. Составляя до 85%, вода поддерживает тургорное давление в них, проводит питательные вещества в растворённом состоянии и удаляет из клетки продукты обмена. Так же вода является средой прохождения реакций клетки, поэтому обезвоживание субстрата и клеток микроорганизмов приводит к задержке их развития, хотя они при этом могут сохранять жизнеспособность. Так микроорганизмы переносят периоды засухи, восстанавливаясь при увеличении этого показателя [12].

Молекулярный кислород – один из важнейших факторов внешней среды, который определяет направление биохимических реакций, осуществляемых в энергетическом обмене. Отношение микроорганизмов к содержанию кислорода в среде определяется наличием у них тех или иных окислительно-восстановительных ферментов, ответственных за энергетический обмен [13].

Осмотическое давление среды определяется концентрацией растворённых в ней веществ и имеет большое значение для жизнедеятельности организмов. В естественных средах обитания (воде, почве) микроорганизмы встречаются с различным содержанием растворённых веществ, следовательно, и с различным осмотическим давлением. Например, в воде пресных водоемов осмотическое давление значительно ниже, чем в соленых, и т.п. [13]. Повышенная солёность среды (гипертонический раствор) может привести к обезвоживанию клетки и плазмолизу, нахождение же в среде с недостаточным содержанием солей (гипотоническом растворе) ведёт к лизису [12].

Концентрация водородных ионов (pH) в среде обитания является фактором, определяющим возможность роста и размножения микроорганизмов. Водородный показатель реакции среды pH показывает степень ее кислотности (pH от 7,0 до 1,0) или щелочности (pH от 7,0 до 14,0).

Если pH не соответствует оптимальному значению для данного организма, то он не может развиваться даже при соблюдении всех остальных условий на оптимальном уровне [13].

Электромагнитное излучение в зависимости от длины волны влияет на организмы по-разному: может оказывать физиологическое, летальное и мутагенное, тепловое и механическое воздействия. Физиологическое действие оказывают ближний ультрафиолет, видимый свет и инфракрасные лучи. Инфракрасное излучение обладает тепловым воздействием и используется некоторыми бактериями в процессе фотосинтеза вместе с видимой частью спектра. Избыточное освещение может привести к разрушению фотосинтетических пигментов, а его недостаток будет препятствовать фотохимическим реакциям, использующим его энергию [12].

Световые условия, в которых находятся микроводоросли, влияют на все процессы, протекающие в клетках, так как свет является единственным источником энергии для роста и биосинтеза. При любом лимитирующем факторе (минеральном или энергетическом) продуктивность культуры будет напрямую связана со скоростью энергообмена. Однако скорость роста увеличивается с ростом освещённости до некоторого предела и ограничена максимальным значением, которое определяется внутренней структурой клеток.

РАЗДЕЛ 2 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Работа выполнялась в отделе биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ им. А. О. Ковалевского РАН г. Севастополь. В экспериментальной работе в качестве объекта использовали цианобактерию (прокариотическую микроводоросль) *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nordst.) Geitler, из коллекции культур ФИЦ ИнБЮМ.

2.1. Метод культивирования микроводорослей

Культивирование осуществляли в накопительном режиме в культиваторе (фотобиореакторе) плоскопараллельного типа, имеющего форму параллелепипеда со скошенным дном. Геометрические размеры культиватора: ширина – 26 см, высота – 55 см, толщина 2 см, скос дна – 9 см. Рабочий слой содержащейся в нём суспензии – 1 см (рис. 2.1).

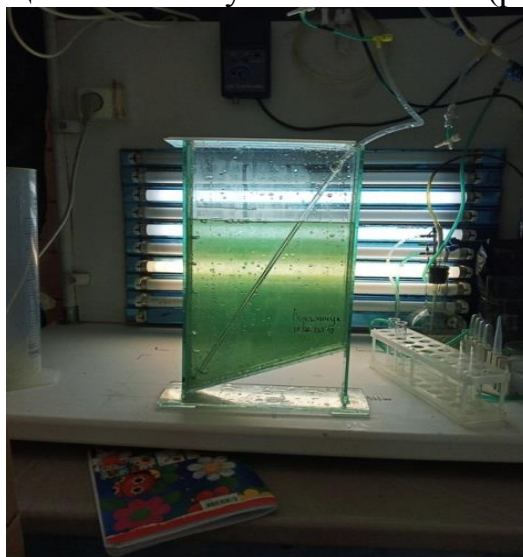


Рис. 2.1 Внешний вид лабораторной установки (фото автора)

Перемешивание культуры осуществлялось путём непрерывной подачи воздуха, обеспечиваемой с помощью аквариумного компрессора «Resun». Скорость подачи воздуха в культиватор составляла 0,5 л воздуха в минуту на 1 литр культуры. Освещение в эксперименте было односторонним, источник света – люминисцентные лампы Philips Daylight 54-765. Средняя освещённость рабочей поверхности культиватора изменялась в различных опытных вариантах и составляла – 1,8 клк, 3,2 клк, 4,6 клк 6,5 клк и 8,3 клк. Среднюю освещённость на поверхности культиватора измеряли при помощи люксметра Ю-116 по шести точкам.

2.2. Состав и приготовление питательной среды

Для приготовления сред, необходимых для экспериментов, использовались реактивы квалификации х.ч. и ч.д.а. Состав среды Заррук [14] приведён на 1 л дистиллированной воды (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Состав питательной среды для культивирования спирулины

№	Компонент	Навеска, г/л	Класс чистоты
1	NaHCO ₃	16,8	технич
2	K ₂ HPO ₄	0,5	ч
3	NaNO ₃	2,5	хч
4	K ₂ SO ₄	1,0	хч
5	NaCl	1,0	ч
6	Na ₂ EDTA	0,08	ч
7	FeSO ₄ x 7H ₂ O	0,01	ч
8	CaCl ₂	0,04	ч
9	MgSO ₄ x 7H ₂ O	0,2	хч
10	Раствор микроэлементов	1 мл/г	-
Раствор микроэлементов			
№	Компонент	г/л	Класс чистоты
1	H ₃ BO ₃	2,86	ч
2	MnCl ₂ x 4H ₂ O	1,81	ч
3	ZnSO ₄ x 7H ₂ O	0,222	ч
4	CuSO ₄ X 5H ₂ O	0,079	ч
5	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ x 4H ₂ O	0,0229	ч
6	NH ₄ VO ₃	0,02296	ч
7	CoCl ₂ x 6H ₂ O	0,044	ч
8	K ₂ Cr ₂ (SO ₄) ₄ x 24H ₂ O	0,096	чда
9	NiSO ₄ x 7H ₂ O	0,04785	хч
10	Na ₂ WO ₄ x 2H ₂ O	0,01794	хч

2.3. Постановка эксперимента

Объём питательной среды составлял 0,9 л, объём инокулята спирулины, вносимой в питательную среду, составлял 0,1 л. Суммарный объём 1 л поддерживали на протяжении всего эксперимента, доливая перед измерениями дистиллированную воду до нанесённой на внешнюю сторону культиватора метки. После температуру суспензии измеряли ртутным термометром (абсолютная погрешность составляет 0,5 °С) непосредственно в культиваторе. Отбор проб проводился с помощью градуированной пипетки с разных точек культиватора, чтобы получить «среднюю пробу», три пробирки заполнялись суспензией на 5 мл. Из пробирок суспензию, после перемешивания, дабы исключить вероятность выпадения части клеток в осадок, переливали в кюветы, предназначенные для КФК-3. На нём мы определяли оптическую плотность культуры.

2.4. Метод определения биомассы оптическим способом

Метод основан на изменении интенсивности проходящего света через суспензию микроорганизмов. Клетки микроорганизмов поглощают и

рассеивают свет, причем интенсивность этих процессов зависит от числа клеток и их размеров.

Для определения биомассы оптическим способом необходимо измерить коэффициент пропускания (T_{750}) света суспензиями на длине волны 750 нм и определить величину оптической плотности (D_{750}).

Переход от единиц оптической плотности (D_{750}) к величине сухой биомассы (СВ) осуществляли посредством эмпирического коэффициента

$$k = 0,8 \pm 0,05 \text{ г} \cdot \text{л}^{-1} \text{ ед. опт. пл.}^{-1},$$

$$\text{СВ} = k \times D_{750}$$

2.5. Статистическая обработка данных

Выбор тактики статистической обработки и подготовку данных для анализа выполнили, базируясь на общепринятых методах. Статистическая обработка проведена с помощью стандартных программ «Excel» и «SciDavis».

РАЗДЕЛ 3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

3.1. Культивирование *A. platensis* в накопительном режиме и определение максимальной продуктивности

Благодаря простоте технической реализации и эффективности, накопительный режим культивирования является оптимальным способом выращивания микроводорослей. Культивирование спирулины проводили по методике, описанной выше. Температура культуральной среды составляла $24 \pm 2^\circ\text{C}$.

В условиях накопительного культивирования исследователи отмечают наличие линейной фазы, характеризующейся постоянством продуктивности. Этот участок имеет относительно большую протяженность 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 [15].

В ходе эксперимента получены накопительные кривые роста цианобактерии *A. platensis*, представленные на рисунках 3.1-3.5.

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

$$B = B_0 + P_m \cdot t,$$

где B_0 – начальная плотность культуры.

При наименьшей освещённости в 1,8 клк график зависимости прироста биомассы от времени принимает линейный вид. Начальное значение плотности культуры составило 0,19 гСВ/л, увеличивающееся на протяжении 12 суток до значения 0,9 гСВ/л. Для определения максимальной продуктивности P_m на данном графике, провели аппроксимацию уравнением: $B=0,19+0,06 \cdot t$ (см. табл. 3.1, рис. 3.1).



Рис. 3.1 Накопительная кривая роста *A. platensis* при освещённости 1,8 клк

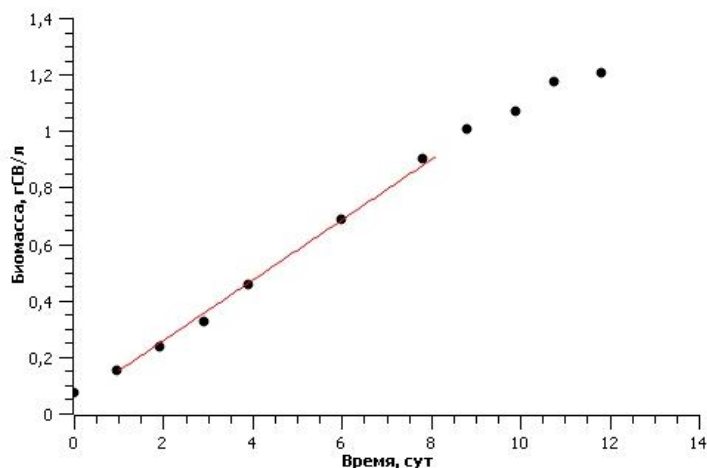


Рис. 3.2 Накопительная кривая роста *A. platensis* при освещённости 3,2 клк

При смене освещённости на 3,2 клк зависимость биомассы от времени меняется. Начало линейного роста отмечаем только через сутки и наблюдаем на протяжении 7 суток до значения 0,9 гСВ/л. Уравнение для линейного участка принимает вид: $V=0,15+0,11*t$ (см. табл. 3.1, рис. 3.2).

При освещённости 4,6 клк линейный участок начинается через 2 суток. Начальная плотность (0,21 гСВ/л) увеличивается на протяжении 7 суток до значения 1,14 гСВ/л. Уравнение линейного участка: $V=0,25+0,15*t$ (см. табл. 3.1, рис. 3.3).

При освещённости в 6,5 клк линейный участок продолжается только 3 суток. Начальное значение плотности культуры – 0,18 гСВ/л, увеличивающееся 0,98 гСВ/л на 6 сутки. Уравнение графика данной линейной зависимости: $V=0,18+0,19*t$ (см. табл. 3.1, рис. 3.4).

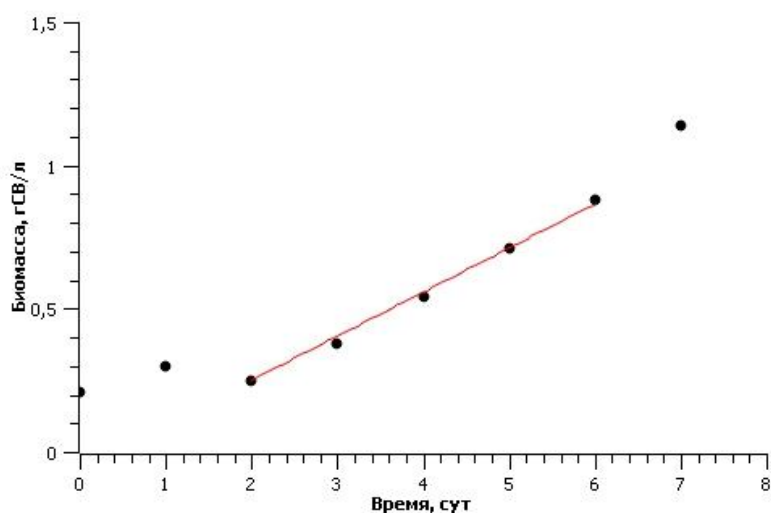


Рис. 3.3 Накопительная кривая роста *A. platensis* при освещённости 4,6 клк

При смене освещённости на 8,3 клк культура адаптируется в течении 2 суток, при этом линейной участок продолжается 4 суток до значения 1,4 гСВ/л. Начальное значение плотности культуры – 0,1 гСВ/л. Уравнение графика на линейном участке: $V=0,36+0,26*t$ (см. табл. 3.1, рис. 3.5).

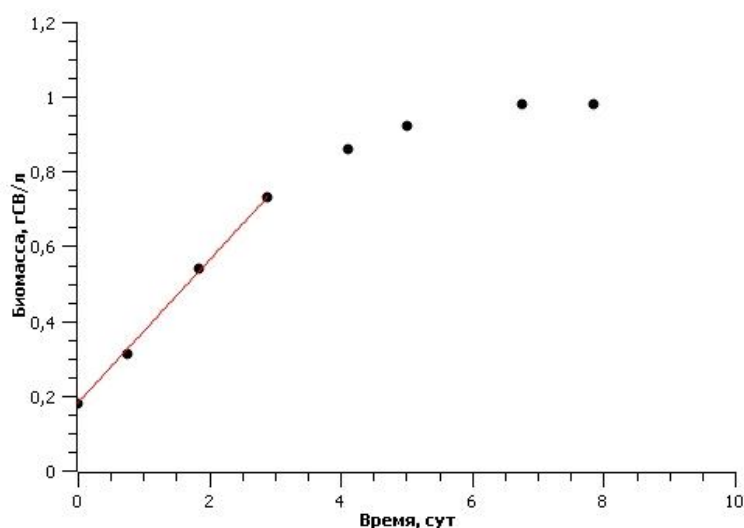


Рис. 3.4 Накопительная кривая роста *A. platensis* при освещенности 6,5 клк

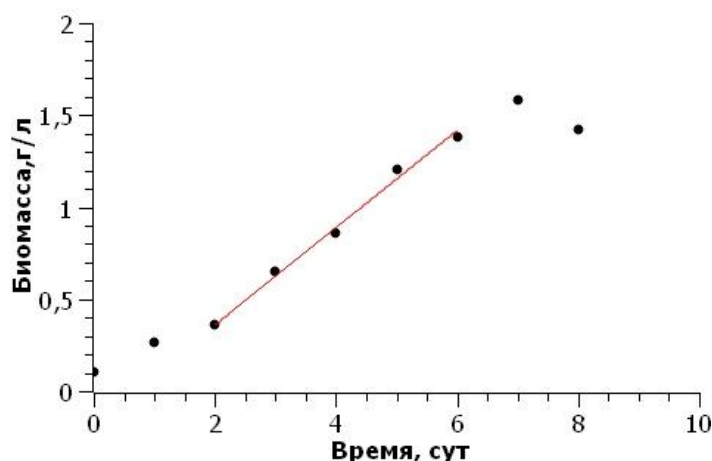


Рис. 3.5 Накопительная кривая роста *A. platensis* при освещенности 8,3 клк

3.2. Максимальная продуктивность спирулины и её зависимость от освещенности

Полученные данные максимальной продуктивности P_m определены в г/(л•сут), а с учётом толщины культиватора в г/(м²•сут), и представлены в таблице 3.1.

В процессе фотосинтеза поглощённая энергия ФАР запасается клетками микроводорослей в виде макроэргов АТФ и НАДФ·Н [16].

Фотометрические величины освещенности, перевели в энергетические единицы облученности освещаемой поверхности фотобиореактора (энергии ФАР) (см. табл. 3.1) с учётом спектра излучения используемых люминесцентных ламп согласно формуле [17]:

$$\text{Вт/м}^2 = 3,35 * \text{клк}$$

Для выявления зависимости между максимальной продуктивностью (скоростью роста) и интенсивностью освещения, построим график по данным таблицы 3.1.

Таблица 3.1

Максимальная продуктивность исследуемых объектов при разных значениях облучённости

Е, клк	1,8	3,2	4,6	6,5	8,3
P_m , г/(л·сут)	0,06	0,11	0,15	0,19	0,26
Е, Вт/м ²	6,0	10,7	15,4	21,8	27,8
P_m г/(м ² ·сут)	1,2	2,2	3,0	3,8	5,2

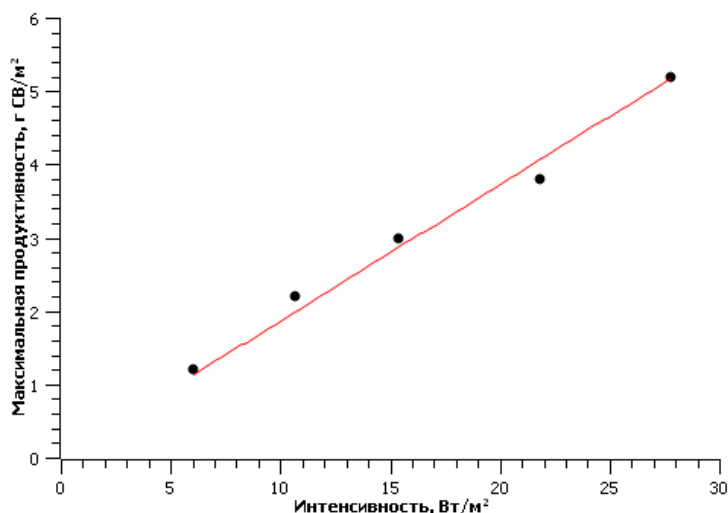


Рис. 3.6 График зависимости максимальной продуктивности прироста биомассы от интенсивности освещения

Получившийся линейный график выражает зависимость максимальной продуктивности прироста биомассы *A. platensis* (увеличения плотности культуры) P_m в г СВ/м² от интенсивности освещения, выражающей количество энергии света E , поступающей к биомассе за секунду, т.е. Вт/м².

Уравнение этой зависимости с высокой точностью ($R^2 = 0,98$) имеет вид $P_m = 0,2 * E$, где 0,2 – коэффициент, несущий в себе биологический смысл. Этот коэффициент является обобщённым параметром, указывающим на способность различных видов микроводорослей усваивать световую энергию. При этом коэффициент пропорциональности связан с калорийностью биомассы. Выразив коэффициент, подставляя единицы размерности P_m и E , определили, что в 1 г спирулины содержится 17280 Дж, что близко к данным встречающимся в [18]. Известно, что в среднем для микроводорослей в 1 г биомассы содержится 21000 Дж.

Кроме того, очень важной информацией является калорийность продуктов. Микроводоросли не являются исключением. Принимая, что 1 кал=4,2 Дж, определили, что 1 г спирулины – это 4 ккал. Таким образом, биомасса спирулины является достаточно калорийным продуктом. В сравнении с шоколадом, например, её калорийность ниже всего лишь на 150 ккал. Однако пользу переоценить не возможно!

ВЫВОДЫ

1. Освоена методика культивирования в накопительном режиме *A. platensis* при различной освещённости и исследован линейный участок накопительных кривых.

2. Определены величины максимальной продуктивности на линейном участке накопительных кривых *A. platensis*.

3. Проведено сравнение скоростей роста цианобактерии *Arthrospira platensis* при различных значениях поверхностной облучённости (1,8 клк– 8,3 клк). Максимальную скорость наблюдали при максимальной облучённости 8,3 клк.

4. Определена калорийность биомассы *A. platensis*, которая составила 4 ккал/г.

5. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вне зависимости от количества световой энергии, падающей на поверхность фотобиореактора, на линейном участке накопительной кривой наблюдается линейная взаимосвязь максимальной продуктивности с облучённостью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Минюк Г. С., Дробецкая И. В., Чубчикова И. Н. и др. Одноклеточные водоросли как возобновляемый биологический ресурс: обзор // МЭЖ. – 2008. – Т.8, №2. – С. 5–23.
2. Тренкеншу Р. П. Одноклеточные водоросли: массовое культивирование и практическое использование // Прикл. альг. – 1999. – Т.1 – С. 7–10.
3. <https://ru.wikipedia.org/wiki/Arthrospira>
4. Кедик С.А., Ярцев Е.И., Гультяева Н.В. Спирулина – пища XXI века.– Москва: «Фарма Центр», 2006. – 166 с.
5. Тренкеншу Р. П. Ростовые и фотозенергетические характеристики морских микроводорослей в плотной культуре: автореф. дисс. на соискание научн. степени канд. биол. наук: спец. 03.00.02 «Биофизика» /Р. П. Тренкеншу. – Красноярск, 1984 – 28 с.
6. Боровков А. Б., Гудвилевич И.Н. Продукционные характеристики квазинепрерывной культуры *Dunaliella salina* Teod. при различной освещенности // Учен. зап. Таврического нац. ун-та им. В.И.Вернадского. Сер. Биология, химия – 2014. – т.27 (66), №1.– С. 29–38.
7. Чернова Н. И., Коробкова Т. П., Киселева С. В. Микроводоросль спирулина как объект биотехнологии // Биология в школе. – 2006. – № 13. – С. 12–14.
8. Водоросли: справочник. – К., 1989 – 608 с.
9. Курс низших растений. – М.: Высшая школа, 1981 – 520 с.
10. Брянцева Ю.В., Дробецкая И.В., Харчук И.А. Характеристика цианобактерии *Spirulina (Arthrospira) platensis* // Экология моря. – 2005, т.70. – С. 24–30.
11. Меледина Т.В., Иванова В.А., Федоров А.В. Аппаратурно-методическая база экспериментов в области пищевой биотехнологии продуктов из растительного сырья. Учебное пособие. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017 – 60 с.
12. Экологическая микробиология: учеб.-метод. пособие /М. И. Чернявская [и др.]. – Минск: БГУ, 2016 – 63 с.
13. Ильяшенко Н.Г., Шабурова Л.Н. Микроорганизмы и окружающая среда. – Инфра-М, 2017 – 195 с.
14. 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.
15. 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.
16. Холл Д., Рао К. Фотосинтез. М.: Мир, 1983 – 134 с.
17. Чекушкин А.А., Лелеков А.С. Определение КПД фотобиосинтеза при различных плотностях культуры *Spirulina (Arthrospira) platensis* //

Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2017. – № 2-1. – С. 55–58.

18. Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. Новосибирск: Наука, 1980 – 136 с.