

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ КУЛЬТУРЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ НА БАЗЕ ARDUINO NANO

Чекушкин А.А.¹, Гаврилов П.Е.², Лелеков А.С.¹

¹ ФГБУН ФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН
пр. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, РФ; e-mail: chekushkin.78@mail.ru

² Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: havrilovpyotr@gmail.com

Поступила в редакцию: 26.07.2019

Аннотация. Предложен автоматический датчик измерения оптической плотности культуры микроводорослей на базе платформы Arduino Nano. Выбор данного микроконтроллера обусловлен его широкой доступностью, наличием свободного программного обеспечения, низкой стоимостью. Анализ литературных данных показал, что при разработке подобных датчиков обычно используется проточная кювета, в качестве источника света используются различные светодиоды. Использование приведённых в литературе датчиков невозможно, так как авторами не указываются монтажные схемы подключения элементов к микроконтроллеру, программная среда, на которой написан алгоритм сбора данных и т. д. В данной работе поставлена задача предложить схему разработки датчика оптической плотности из стандартных широкодоступных комплектующих. Например, в данной работе использовался зелёный светодиод с максимумом светимости на длине волны 520 нм, в качестве фотоприёмника – фоторезистор GL12516. При калибровке использовали культуру цианопрокариоты *Spirulina platensis*. Получены кривые зависимости коэффициента пропускания и поглощения от сухой биомассы *S. platensis*. Показано, что в диапазоне плотностей культуры от 0,07 до 1,38 г СВ/л данные с высокой степенью точности ($R^2 = 0,99$) описываются уравнением Бугера-Ламберта-Бера. Выполнена апробация датчика при культивировании *S. platensis* в плоскопараллельных фотобиореакторах различной толщины.

Ключевые слова: датчик оптической плотности, *Spirulina platensis*, коэффициент поглощения, моделирование, плоскопараллельный фотобиореактор.

ВВЕДЕНИЕ

Оптический метод контроля роста культуры микроводорослей является наиболее простым в применении и широко распространен среди исследователей. К достоинствам данного метода следует отнести возможность непрерывного наблюдения за ростом культуры посредством автоматических датчиков оптической плотности. На сегодняшний день разработано множество подобных устройств. Так, например, в [1] предложена конструкция датчика оптической плотности, состоящего из светодиода с максимумом светимости 880 нм и пары фотодиодов, установленных на противоположной стороне проточной кюветы диаметром 10 мм. Датчик позволяет оценить сухой вес культуры зелёных водорослей *Nannochloropsis oceanic* до 2,0 г·л⁻¹. В работе [2] разработан автоматизированный проточный датчик плотности для системы сбора урожая при промышленном выращивании *Nannochloropsis* sp. Светодиоды в паре с фотодатчиками использовались для измерения светопропускания суспензии микроводорослей при 470, 518, 630 и 940 нм. Для оценки концентрации биомассы путём сопоставления показаний напряжения каждого фотодатчика с концентрацией клеток, измеренной по количеству клеток, была использована нейронная сеть. Максимальная ошибка измерений в интервале от 5 до 145·10⁶ кл. мл⁻¹ не превышала 9%. В работе [3] описано непрерывное наблюдение за изменением концентрации хлорофилла и плотности цианобактериальной суспензии. Для определения фикобилипротеинов использовали синие 455 нм и оранжевые светодиоды 627 нм. Оптическая плотность суспензии измерялась на 680 нм и 735 нм. Количество клеток и концентрация хлорофилла были пропорциональны оптической плотности культуры на длине волны 680 нм в диапазоне 0,1-1,2 г СВ·л⁻¹. В [4] предложена биореакторная система для культивирования *Synechocystis* sp. Сухую массу микроводорослей оценивали путем измерения оптической плотности суспензии при 870 нм. В [5] разработан датчик оптической плотности, который позволил состоянием оценить концентрацию биомассы в диапазоне от 0,05 г СВ·л⁻¹ до 0,5 г СВ·л⁻¹. Авторы акцентировали внимание, что работе датчика в условиях естественного освещения наблюдались значительные отклонения от полученных калибровочных кривых, обусловленные влиянием температуры на сенсорный блок.

Таким образом, несмотря на однотипность конструкции, любой из предложенных датчиков оптической плотности имеет следующие недостатки: 1. Датчики разрабатываются под задачи конкретного исследователя или под какую-либо конструкцию фотобиореактора; 2. Калибровочные кривые, представленные в указанных работах, выполнены для исследуемых видов микроводорослей и в определённом диапазоне плотностей; 3. Авторами не приводятся монтажные схемы подключения элементов датчика к микроконтроллеру, не указывается программная среда, на которой написан алгоритм сбора данных и т. д. В данной работе сделана попытка разработки датчика оптической плотности культуры микроводорослей, который бы удовлетворял следующим требованиям: 1. Простота, надёжность, минимальная стоимость конструкции; 2. Все составные части должны быть стандартного фабричного производства; 3. Все составные элементы системы разработаны

на основе теоретических представлений о росте микроводорослей в культуре [6]. Поставленная задача является логическим продолжением наших предыдущих исследований по разработке унифицированной установки для исследования роста микроводорослей [7], с последующим её оснащением автоматическими системами сбора информации [8].

В качестве устройства сбора и обработки информации была выбрана платформа Arduino Nano, построенная на микроконтроллере ATmega168. К достоинством данного устройства следует отнести имеет небольшие размеры, малую стоимость, возможность использования в научных исследованиях, а также открытое программное обеспечение Arduino (<http://arduino.cc>). Микроконтроллер ATmega168 поставляется с записанным загрузчиком, облегчающим компиляцию новых программ без использования внешних программаторов.

Целью данной работы являлась разработка, сборка и калибровка автоматического датчика оптической плотности культуры микроводорослей на базе Arduino Nano.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Работа выполнялась на базе отдела биотехнологий и фиторесурсов ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского», а также на базе кафедры «Физика» ФГАОУ «Севастопольский государственный университет». Объектом исследования являлась цианобактерия *Arthrospira (Spirulina) platensis* (Nordstedt) Gomont из коллекции ФИЦ ИнБЮМ. Культура выращивалась в унифицированной лабораторной установке [7] на питательной среде Заррук [9] в лабораторных фотобиореакторах плоскопараллельного типа толщиной 2 см и 3 см при круглосуточном искусственном освещении лампами дневного света General Electric F18W/54-765. Средняя освещённость на поверхности фотобиореакторов составляла 5 клк. Барботаж культур осуществляли аквариумным компрессором, скорость подачи воздуха составляла 1 л/л культуры в минуту. Фотобиореакторы были оснащены системой охлаждения, температура поддерживалась на постоянном уровне 28 – 30°C.

В эксперименте проводили измерение температуры, освещённости, сырого и сухого веса (СВ). Температуру суспензии измеряли ртутным термометром непосредственно в фотобиореакторе, абсолютная погрешность измерений составляла 0,5°C. Освещённость поверхности фотобиореактора определяли люксметром Ю-116 ПО «Вибратор» (СССР). Спектр излучения светодиода измеряли на спектрофотометре СФ-2000. Сырой и сухой вес определяли на лабораторных электронных весах L220S (200 г) 2го класса точности, погрешность измерения составляла 0,001 г. Напряжение на светодиоде и фоторезисторе измеряли с помощью цифрового мультиметра Mastech M832. Обработку экспериментальных данных осуществляли в Libre Office и Scidavis. Воздушно сухую биомассу *S. platensis* получали из пасты в сушильном шкафу при 40 °С в течение суток.

Основным элементом датчика оптической плотности являлась платформа Arduino Nano (рис. 1), которая может получать питание через USB-подключение или от регулируемого 6 – 20 В внешнего источника. В нашей схеме использовался импульсный понижающий регулируемый стабилизатор постоянного напряжения DC-DC LM2596. В качестве источника питания использовали стандартное зарядное устройство для мобильного телефона, выходное напряжение которого составляет 5 В. Запись данных, полученных с аналоговых выходов, осуществлялась в текстовый файл на 2 Gb SD-карту памяти, которая подключалась с помощью модуля MicroSD Card к контактам платы: CS к D4, SCK к D13, MOSI к D11, MISO к D12.

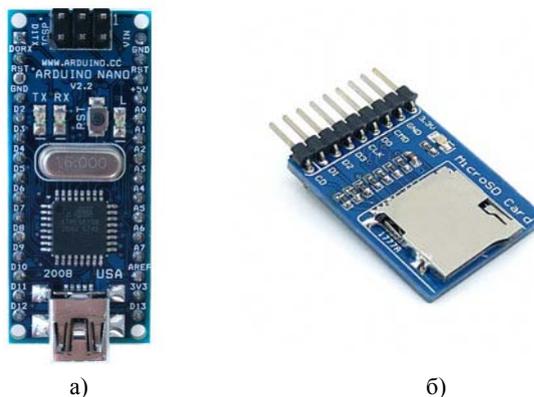


Рисунок 1. Платформа Arduino Nano. (а) – внешний вид; (б) – Модуль MicroSD Card

КОНСТРУКЦИЯ ДАТЧИКА ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ

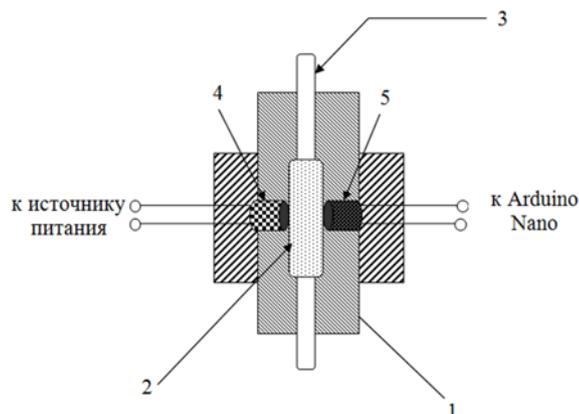


Рисунок 2. Схема датчика оптической плотности (вид сбоку). 1 – корпус датчика, 2 – кювета 1 см, 3 – силиконовая трубка, 4 – зеленый светодиод, 5 – фоторезистор

На рисунке 2 представлены основные элементы датчика оптической плотности. Корпус 1 выполнен из напечатанного на 3D принтере ANET A6 из ABS пластика черного цвета, имеющего форму параллелепипеда размерами $50 \times 10 \times 10$ мм. Чёрный цвет корпуса 1 обеспечивает непроницаемость датчика для внешнего света. В поперечное отверстие вставлена силиконовая трубка 3 диаметром 5 мм, которая обеспечивает проток суспензии клеток водорослей через датчик. Концы трубки 3, выступающие за корпус датчика 1, также окрашены в чёрный цвет с целью нивелирования влияния внешней освещённости на показания прибора. В продольное отверстие корпуса с противоположных сторон встроен светодиод 4 и фоторезистор 5 таким образом, чтобы силиконовая трубка 3 и кювета 2 находились между ними.

Поглощение света суспензией микроводорослей на разных длинах волн связано с различным пигментным составом клеток. Например, у *S. platensis* основной фотосинтетический пигмент хлорофилл а имеет два пика в синей и красной области спектра на 430 нм и 660 нм, каротиноиды – 440 нм, С-фикоцианин – 620 нм, реакционный центр P700 – 700 нм [10]. Поэтому для измерения поглощения биомассы в целом необходимо выбрать такую длину волны, на которой поглощение пигментов не является определяющим – дальняя красная (730 – 750 нм) либо зелёная (520 нм) область спектра. В качестве светодиода нами выбран зелёный светодиод с максимумом светимости при 520 нм (рис. 3).

В качестве приёмника света использовали фоторезистор GL5539, имеющий диапазон чувствительности в области от 400 до 850 нм с максимумом, приходящимся на 540 нм. Стоит отметить, что вместо указанного фоторезистора возможно использование любого фоторезистора с аналогичными параметрами. На рисунке 4 представлен внешний вид, спектральная чувствительность и зависимость сопротивления резистора от температуры.

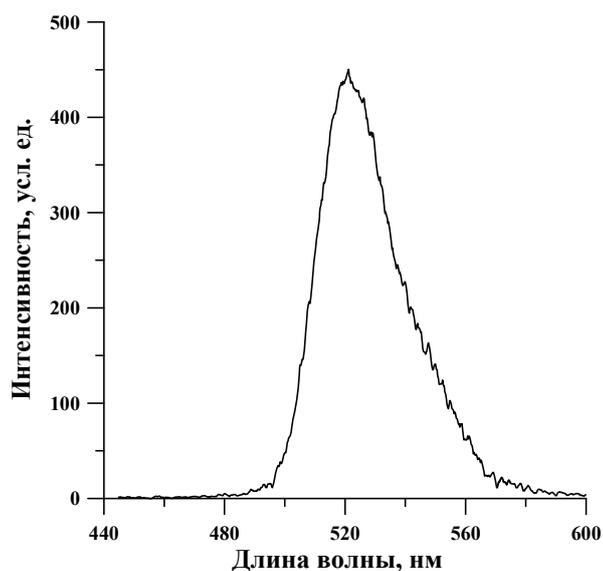


Рисунок 3. Спектр излучения зеленого светодиода

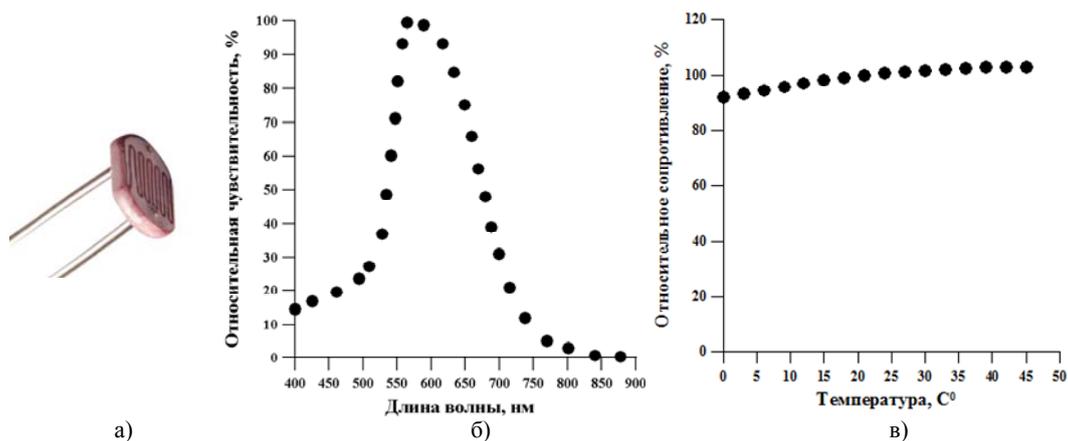


Рисунок 4. Фоторезистор GL12516 12 мм (а) – внешний вид; (б) – спектральная характеристика; (в) – зависимость сопротивления от температуры [11]

КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ

Экспериментально определено, что напряжение, выводимое на мониторе порта компьютера в программной среде Arduino и на Micro CD CARD, разное (рис. 5). Для удобства использования датчика был определён коэффициент перехода между показаниями на мониторе порта и Micro CD CARD. Полученная зависимость описывается линейной регрессией ($R^2 = 0,99$), тангенс угла наклона равен 1,37.

Для калибровки датчика использовали культуру *S. platensis*, которую выращивали в течение 5 суток в накопительном режиме. Профильтровав суспензию, получили сырую биомассу, которую развели в 1 л среды Заррук. Полученный маточный раствор с плотностью культуры $1,38 \text{ г СВ}\cdot\text{л}^{-1}$ разбавляли и проводили измерения напряжения на фоторезисторе. Результаты представлены в таблице 1. В качестве "нулевой" точки использовали питательную среду Заррук, при этом напряжение на фоторезисторе составило $U_0 = 1,9 \text{ В}$. Светимость светодиода зависит от напряжения питания. Экспериментально было подобрано напряжение питания светодиода 2,25 В, при котором датчик позволял проводить измерения как разбавленной, так и оптически плотной культуры *S. platensis*. Коэффициент пропускания T определяли по формуле:

$$T = \frac{U}{U_0}.$$

Коэффициент поглощения α определяли по формуле:

$$\alpha = \frac{U_0 - U}{U_0} = 1 - T.$$

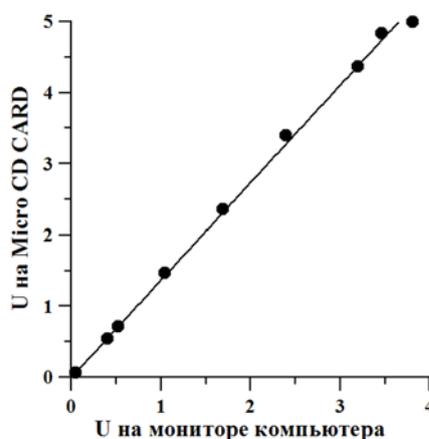


Рисунок 5. Зависимость напряжения на Micro CD CARD от напряжения на мониторе порта в программной среде Arduino. Линия – аппроксимация экспериментальных данных описывается линейным сплайном, тангенс угла наклона равен 1,37

Таблица 1. Экспериментальные данные калибровки датчика оптической плотности

Коэффициент разбавления	Биомасса, г СВ/л	Напряжение на фоторезисторе, U, В	U ₀ , В	Коэффициент пропускания, T	Коэффициент поглощения, α
1	1,38	0	1,9	0	1
1,5	0,92	0,085		0,04	0,95
2	0,69	0,19		0,1	0,9
3	0,46	0,52		0,27	0,72
4	0,35	0,64		0,33	0,66
5	0,28	0,84		0,44	0,55
6	0,23	1		0,52	0,47
7	0,2	1,03		0,54	0,45
8	0,17	1,2		0,63	0,36
10	0,14	1,32		0,69	0,3
13	0,11	1,44		0,75	0,24
21	0,07	1,6		0,84	0,15

На рисунке 6 представлена зависимость коэффициента поглощения α и пропускания T от биомассы *S. platensis*. Экспериментальные данные в диапазоне плотностей культуры от 0,07 до 1,38 г СВ/л с высокой степенью точности ($R^2 = 0,99$) описываются законом Бугера-Ламберта-Бера:

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot B},$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от толщины кюветы и коэффициента экстинкции.

Полученные результаты позволяют использовать линейную зависимость между оптической плотностью культуры на датчике и биомассой микроводорослей. Оптическая плотность D , по определению, есть десятичный логарифм коэффициента пропускания. На рисунке 7 представлена зависимость биомассы от оптической плотности культуры *S. platensis*. Для используемой в датчике 1 см кюветы коэффициент пропорциональности составил 0,71.

АППРОБАЦИЯ ДАТЧИКА ОПТИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ ПРИ НАКОПИТЕЛЬНОМ КУЛЬТИВИРОВАНИИ *S. PLATENSIS*

Ключевым фактором, влияющим на фотобиосинтез микроводорослей, является свет. Поверхностная освещённость, в совокупности с условиями перемешивания и формой освещаемой поверхности, определяет скорости синтеза тех или иных биохимических составляющих клеток, а также скорость роста культуры в целом, характер накопительной кривой роста [12]. Обычно при культивировании микроводорослей в плоскопараллельных системах накопительная культура характеризуется наличием линейного участка (линейная фаза роста) [13]. Механизм явления линейного роста описан только для бактериальных культур [14]. Для культур микроводорослей линейный рост может быть связан с газовым обеспечением [6], либо как показано в работе [12] со светолимитированием

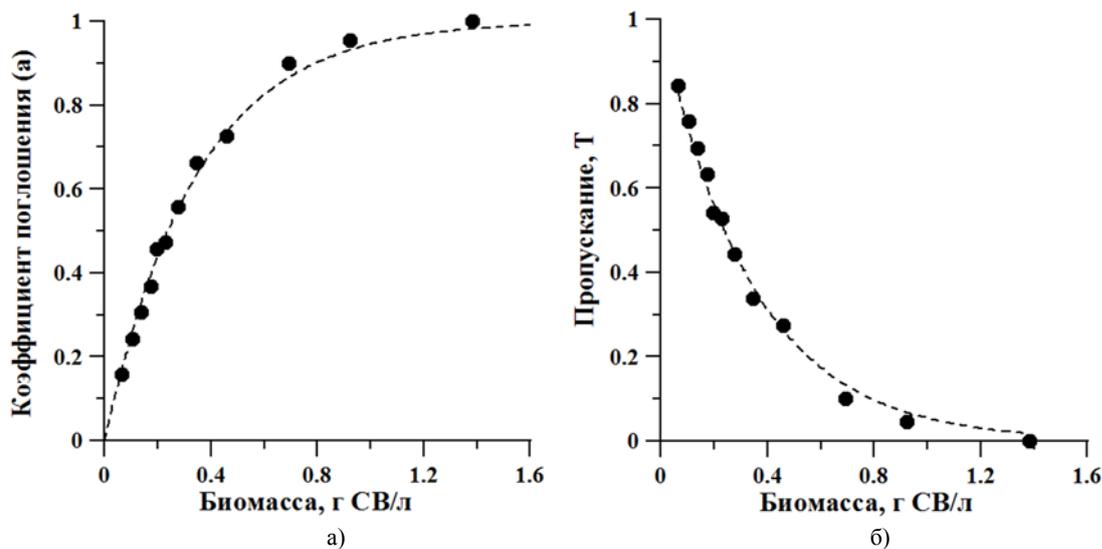


Рисунок 6. Зависимость коэффициента поглощения (а) и коэффициента пропускания T (б) от биомассы *S. platensis*. Пунктирная линия – аппроксимация экспериментальных данных уравнением Бугера-Ламберта-Бера, $k=2,9$

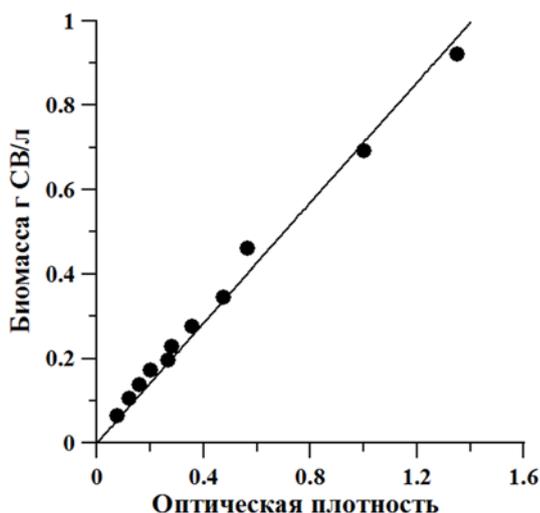


Рисунок 7. Корреляционная зависимость биомассы от оптической плотности. Линия – аппроксимация экспериментальных данных описывается линейным уравнением, тангенс угла наклона равен 0,71

Независимо от механизма, обеспечивающего линейный рост, 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.

Исследования линейного роста *S. platensis* проводили с использованием предложенного в данной работе автоматического датчика оптической плотности. На рисунке 8 представлены накопительные кривые для 2 и 3 см фотобиореактора. Временной интервал между двумя последующими измерениями составлял 10 минут. На третьи – пятые сутки эксперимента отмечено значительный разброс экспериментальных данных, что обусловлено обрастанием кюветы датчика водорослями. В 3 см фотобиореакторе на 7 сутки отмечено резкое увеличение скорости роста культуры *S. platensis*, что также связано с обрастанием. Следовательно, при работе с датчиком необходимо промывка измерительной кюветы не реже чем раз в 2-3 дня.

Были определены кинетические параметры роста культуры *S. platensis*: максимальная плотность и продуктивность. Результаты представлены в таблице 2. Максимальная продуктивность была рассчитана аппроксимацией линейного участка накопительной кривой уравнением:

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

где B_0 – начальное значение биомассы, P_m – максимальная продуктивность культуры.

Полученные результаты свидетельствуют о двукратном росте максимальной продуктивности *S. platensis* при уменьшении слоя культуры на 1 см. Полученные данные могут быть использованы при расчётах среднепространственной облучённости и её влияния на рост оптически плотных культур микроводорослей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день любые исследования микроводорослевых культур оптическим методом предполагают отбор пробы из культиватора с их последующим спектрофотометрированием. При этом часто интервал между отбором пробы и измерением на приборе составляет десятки минут, а то и часы. За такой промежуток времени в клетках могут происходить значительные изменения биохимического состава [6]. Кроме того, сам процесс отбора пробы из культиватора носит субъективный характер: агглютинация клеток микроводорослей, их оседание на стенках фотореактора и т. д. могут вносить значительные ошибки. Также по сложившейся в альгологии традиции измерения проводятся в лучшем случае 1-2 раза в сутки, при этом скорости роста микроводорослей могут достигать $0,3-0,4 \text{ ч}^{-1}$, т. е. время генерации составляет часы [15]. Вызывает множество вопросов применение стандартных спектрофотометров, у которых луч идёт перпендикулярно измерительной кювете: из-за оседания клеток в кювете результаты измерения оптической плотности могут оказаться сильно заниженными.

Таблица 2. Экспериментальные данные максимальной скорости роста и максимальной продуктивности культуры *S. platensis* для 2 см и 3 см культиватора

Толщина культиватора	P_m , г СВ/л·час	P_m , г СВ/л·сут	V_m , г СВ/л
2 см	0,01	0,24	1,5
3 см	0,005	0,12	1,6

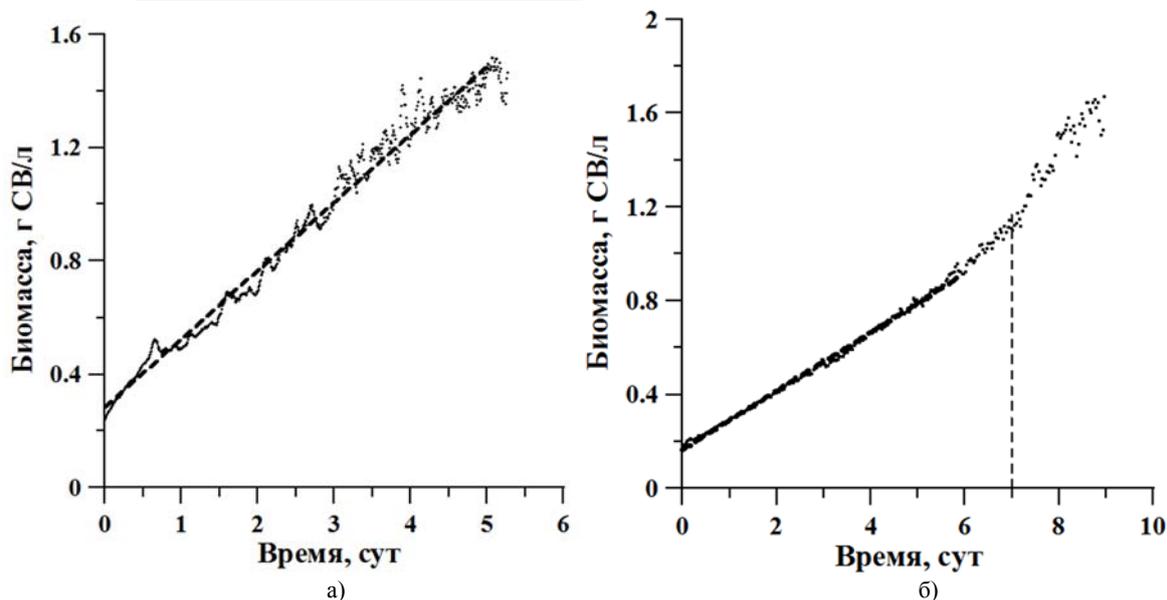


Рисунок 8. Зависимость биомассы *S. platensis* от времени в 2 (а) и 3 см (б) культиваторе. Линия – аппроксимация экспериментальных данных линейным уравнением, максимальная продуктивность $P_m = 0,24$ г СВ/л·сут и $0,12$ г СВ/л·сут соответственно

Указанные недостатки оптического способа контроля за ростом микроводорослей можно исключить, используя автоматические проточные системы. Предложенный в данной работе автоматический датчик оптической плотности позволяет определять биомассу микроводорослей в режиме реального времени с любым требуемым интервалом, не требует (кроме технического обслуживания) вмешательства исследователя в процессы роста культуры, исключает оседание клеток благодаря проточной кювете. Данная работа может служить некоторым шаблоном для последующих разработок в области автоматизации водорослевых исследований. В работе указаны ключевые моменты, на которые необходимо обратить внимание: 1. Типовая конструкция проточной кюветы и использование стандартных фабричных комплектующих позволяет значительно снизить стоимость конечного изделия и упростить его эксплуатацию; 2. При выборе источника света и фотоприёмника следует обращать внимание на их спектральные и температурные характеристики; 3. При калибровке датчика оптической плотности необходимо указывать область рабочей плотности, так как известно, что могут наблюдаться значительные отклонения экспериментальных данных от уравнения Бугера-Ламберта-Бера [16].

Работа выполнена в рамках госзадания по теме НИР ФИЦ ИнБЮМ № 0828-2019-0004.

Список литературы / References:

1. Sandnes J.M., Ringstad T., Wenner D., Heyerdahl P.H., Källqvist T., Gíslérød H.R. Real-time monitoring and automatic density control of large-scale microalgal cultures using near infrared (NIR) optical density sensors. *J. Biotech.*, 2006, vol. 122, pp. 209-215. DOI: 10.1016/j.jbiotec.2005.08.034.
2. Briassoulis D., Panagakis P., Chionidis M., Tzenos D., Lalos A., Tsinos C., Berberidis K., Jacobsen A. An experimental helical-tubular photobioreactor for continuous production of *Nannochloropsis* sp. *Bioresour. Technol.*, 2010, vol. 101, pp. 6768-6777. DOI: 10.1007/s00253-015-6876-7.
3. Nedbal L., Trtílek M., Červený J., Komárek O., Pakrasi H.B. A photobioreactor system for precision cultivation of photoautotrophic microorganisms and for high-content analysis of suspension dynamics. *Biotechnol. Bioeng.*, 2008, vol. 100, pp. 902-910.
4. Marxen K., Vanselow K., Lippemeier S., Hintze R., Ruser A., Hansen U. A photobioreactor system for computer controlled cultivation of microalgae. *J. Appl. Phycol.*, 2005, vol. 17, pp. 535-549.
5. Yao Y., Thommasson J.A., Ge Y., Sui R. Improvement of an optical density sensor for algae pond monitoring and process control. *ASABE*, 2012. DOI:10.13031/2013.42323.
6. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С. *Моделирование роста микроводорослей в культуре*. Белгород: ООО "Константа", 2017, 152 с. DOI: 10.21072/978-5-906952-28-8. [Trenkenshu R.P., Lelekov A.S. *Modelling of microalgae growth in culture*. Belgorod: Konstanta, 2017, 152 p. (In Russ.)]

7. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С., Боровков А.Б., Новикова Т.М. Унифицированная установка для лабораторных исследований микроводорослей. *Вопросы современной альгологии*, 2017, № 1, вып. 13. URL: <http://algology.ru/1097> [Trenkenshu R.P., Lelekov A.S., Borovkov A.B., Novikova T.M. Unified installation for laboratory studies of microalgae. *Questions of modern algology*, 2017, no. 1, iss. 13. URL: <http://algology.ru/1097>. (In Russ.)]
8. Гаврилов П.Е., Азаров А.А., Лелеков А.С. Проточный датчик для определения оптической плотности культуры микроводорослей. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*, 2016, т. 1, с. 101-105. [Gavrilov P.E., Azarov A.A., Lelekov A.S. Flow sensor for determining the optical density of a microalgae culture, *Actual problems of biological physics and chemistry*, 2016, vol. 1, pp. 101-105. (In Russ.)]
9. Zargouck C. *Contribution a l'etude d'une cyanophycee. Influence de divers physiques et chimiques sur la croissance et la photosynthese de Spirulina maxima*. Ph.D. thesis, Paris, 1966, 138 p.
10. Хол Д., Пао К. *Фотосинтез: пер. с англ.* М.: Мир, 1983, 134 с. [Hol D., Rao K. *Photosynthesis: trans. from english*. M.: Mir, 1983, 134 p. (In Russ.)]
11. *CdS Photoresistor Manual. GL125 Series Photoresistor*. URL: <https://opencircuit.nl/ProductInfo/1000662/GL12528-Datasheet.pdf>.
12. 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. DOI: 10.21072/mbj.2018.03.1.06 [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.)]
13. Naumann T., Çebi Z., Podola B., Melkonian M. Growing microalgae as aquaculture feeds on twin-layers: a novel solid-state photobioreactor. *J. Appl. Phycol.*, 2013, vol. 25, pp. 1413-1420. DOI 10.1007/s10811-012-9962-6.
14. Марьин В.А., Харитонов Д.В. Линейный рост и пассивация активных клеток растущей культуры микроорганизмов. *Техника и технология пищевых производств*, 2014, № 4, с. 97-106. [Mar'in V.A., Haritonov D.V. Linear growth and passivation of active cells of a growing culture of microorganisms. *Technique and technology of food production*, 2014, no. 4, pp. 97-106. (In Russ.)]
15. Беянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. *Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей*. Новосибирск: Наука, 1980, 136 с. [Belyanin V.N., Sid'ko F.YA., Trenkenshu A.P. *Energy photosynthetic culture of microalgae*. Novosibirsk: Nauka, 1980, 136 p. (In Russ.)]
16. Тренкеншу Р.П., Лелеков А.С., Гаврилов П.Е., Набойщиков В.С. Математическая модель зависимости оптической плотности культуры от биомассы микроводорослей. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*, 2016, т. 1, с. 77-82. [Trenkenshu R.P., Lelekov A.S., Gavrilov P.E., Nabojschchikov V.S. Mathematical model of the dependence of the optical density of the culture on the biomass of microalgae. *Actual problems of biological physics and chemistry*, 2016, vol. 1, p. 77-82. (In Russ.)]

AUTOMATIC OPTICAL DENSITY SENSOR OF MICROALGAE CULTURE ON THE ARDUINO NANO BASIS

Chekushkin A.A.¹, Gavrilov P.E.¹, Lelekov A.S.¹

¹ A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS,
Nachimov av., 2, Sevastopol, 299011, Russia; e-mail: chekushkin.78@mail.ru

² Sevastopol State University

Universitetskaya str., 33, Sevastopol, 299053, Russia; e-mail: havrilovpyotr@gmail.com

Abstract. An automatic sensor for measuring the optical density of microalgae culture on the Arduino Nano basis is proposed. The choice of this microcontroller is due to its wide availability, availability of free software, low cost. It is shown that in the development of such sensors a flow cell is applied, various LEDs are used as a light source. The use of the sensors given in the literature is impossible since the authors do not specify the wiring diagrams of the sensor elements, the software environment on which the algorithm of data collection is written, etc. In this work, the task is to offer a scheme for the development of an optical density sensor from standard widely available components. For example, the proposed sensor used a green led with a maximum luminosity at a wavelength of 520 nm, as a photodetector – photoresistor GL12516. During calibration of the sensor used culture of the cyanoprokaryota *Spirulina platensis*. The curves of the transmittance and absorption dependence on the dry biomass of *S. platensis* are obtained. It is shown that in the range of culture densities from 0.07 to 1.38 g DW/l the data with a high degree of accuracy ($R^2 = 0.99$) are described by the Booger-Lambert-Ber equation. Performed testing of the sensor during the cultivation of *S. platensis* in a plane-parallel photobioreactors of varying thickness.

Key words: optical density sensor, *Spirulina platensis*, absorption coefficient, modelling, plane parallel photobioreactor.