

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 582.232-114:[57.083.13:551.521.16]

DOI: [10.21072/eco.2022.24.02](https://doi.org/10.21072/eco.2022.24.02)

ПРОДУКТИВНОСТЬ КУЛЬТУРЫ *ARTHROSPIRA PLATENSIS* GOMONT 1892
В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ОСВЕЩЕНИЯ *

Чекушкин А. А., Авсиян А. Л., Лелеков А. С.

ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН»,

г. Севастополь, Российская Федерация,

e-mail: chekushkin.78@mail.ru

Аннотация: Исследован рост накопительной культуры *Arthrospira platensis* в условиях естественного освещения при различной толщине слоя суспензии и различном количестве падающей на поверхность бассейна солнечной энергии. Эксперименты проводились в горизонтальном фотобиореакторе в течение 2021–2022 гг. в районе г. Севастополя. На линейном участке накопительной кривой проведён расчёт средней продуктивности культуры *A. platensis*, а также максимального значения биомассы в стационарной фазе роста. Показано, что при естественном освещении средняя продуктивность изменялась в пределах 2,8–12,2 г СВ • м⁻² • сут⁻¹, максимальная плотность культуры составляла от 43 до 120 г СВ • м⁻². С учётом частичного отражения света от поверхности альгобиотехнологического модуля определено суммарное значение солнечной энергии в области ФАР за световой день, которое варьировалось от 1,95 до 8,73 МДж • м⁻² в январе и июле соответственно. Отмечено, что при культивировании *A. platensis* в бассейнах с разной толщиной слоя суспензии величина урожая за 7 дней одинаковая и составляет 70–75 г СВ • м⁻². В контрольном опыте при искусственном освещении не выявлено влияние CO₂ на скорость роста *A. platensis*: средняя продуктивность с добавлением CO₂ (и без добавления) равнялась 13–14 г СВ • м⁻² • сут⁻¹, максимальное значение биомассы — 125 г СВ • м⁻². На основе анализа полученных нами экспериментально и ранее опубликованных данных показано, что зависимость средней продуктивности от облучённости описывается ломаной. В области светового лимитирования коэффициент пропорциональности составил 2,3 г СВ • МДж⁻¹. С учётом средней калорийности биомассы средняя эффективность усваивания световой энергии составила 5,3 %.

Ключевые слова: *Arthrospira platensis*, накопительная культура, продуктивность, облучённость, культивирование микроводорослей, открытый бассейн, биомасса.

Введение

Arthrospira platensis Gomont 1892 широко применяется в качестве пищевой добавки для человека, кормов для животных, а также в фармакологии и косметологии [Lafarga et al., 2020]. Множество работ посвящено исследованию её противовоспалительных и иммунорегуляторных свойств [Sotiroudis, Sotiroudis, 2013]. *A. platensis* содержит большое количество белка, полисахаридов, С-фикоцианина, полиненасыщенных жирных кислот, аминокислот и пигментов [Markou et al., 2013]. Разные виды рода *A. platensis* культивируются в промышленных масштабах с конца семидесятых годов XX века [Borowitzka, Borowitzka, 1998], при этом зачастую по исторически сложившейся традиции используется коммерческое

*Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Исследование механизмов управления продукционными процессами в биотехнологических комплексах с целью разработки научных основ получения биологически активных веществ и технических продуктов морского генезиса», № гос. регистрации 121030300149-0.

наименование *Spirulina* [Nowicka-Krawczyk, Mühlsteinová, Hauer, 2019]. Кроме того, культура *A. platensis* является модельным объектом при проведении гидробиологических исследований [Тренкеншу, Лелеков, 2017].

Промышленное культивирование *A. platensis* в условиях естественного освещения обычно осуществляется в накопительном режиме культивирования. Применяются различные фотобиореакторы: горизонтальные бассейны [Wu et al., 2021], тонкослойные проточные [Benavides et al., 2017] и трубчатые системы закрытого культивирования [Torzillo et al., 1996; Borowitzka, 1999]. Бассейны являются наиболее простыми в обслуживании системами выращивания микроводорослей, позволяющими получить высокие приросты биомассы. Кроме того, использование плоскопараллельных бассейнов значительно упрощает расчёт количества солнечной энергии, приходящейся как на его поверхность, так и на единицу биомассы.

Свет — главный фактор, который определяет продуктивность культуры, скорость фотосинтеза [Стельмах, 1985], а также скорость синтеза всех биохимических компонентов биомассы: белков [Torzillo et al., 1991; Jallet et al., 2016], жиров [Van Wageningen et al., 2012; Maltsev et al., 2021], углеводов [Freitas et al., 2017], пигментов [Минюк и др., 2002]. В лабораторных условиях при накопительном способе культивирования обычно поддерживается постоянный уровень освещённости поверхности фотобиореактора, что обуславливает постоянный уровень продуктивности микроводорослей и возможность управления их биосинтезом [Тренкеншу, Лелеков, Новикова, 2018]. При нахождении культуры в условиях естественного освещения количество световой энергии, получаемое клетками, периодически изменяется [Чекушкин, Лелеков, 2021]. Во многих источниках приводятся данные о скорости роста культуры *A. platensis* в условиях естественного освещения при её культивировании в горизонтальных бассейнах. Например, в работе [Минюк и др., 2002] продуктивность составляла $7,52 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, в работах [Torzillo et al., 1991; Benavides et al., 2017; Wu et al., 2021] продуктивность варьировала от 4 до $22 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Ни в одной из вышеуказанных работ не ставилась задача определения количественной закономерности между притоком солнечной энергии в области ФАР и скоростью роста культуры *A. platensis*. Кроме того, некоторые авторы не указывают световые условия, в которых производилось выращивание.

Целью данной работы является определение количественной закономерности влияния дневной инсоляции на скорость роста накопительной культуры *A. platensis* в условиях естественного освещения.

Материалы и методы

Объектом исследования служила альгологически чистая культура цианобактерии *Arthrospira platensis* Gomont 1892 (syn. *Spirulina platensis* (Gomont) Geitler 1925) — штамм IBSS-31 из ЦКП «Коллекция гидробионтов Мирового океана» Федерального исследовательского центра «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ). Работа выполнялась на базе отдела биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ. Культивирование микроводорослей осуществлялось на среде Заррук [Zarrouk, 1966] в условиях естественного освещения и накопительного режима культивирования в альгобиотехнологическом модуле (Севастополь — с. ш. $44^{\circ}61.564'$, в. д. $33^{\circ}50.463'$). Исследования проводились в течение 2021–2022 гг. В качестве фотобиореактора использовали прямоугольный бассейн $1 \times 0,5 \text{ м}$, выстеленный полиэтиленовой плёнкой, которая была уложена на выровненную поверхность грунта. В различных экспериментах высота рабочего слоя культуры *A. platensis* и объём культиваторов варьировались в диапазоне 6–14 см и 12–50 л соответственно. Перемешивание осуществлялось аквариумной помпой Homefish 1600 производительностью $1200 \text{ л} \cdot \text{ч}^{-1}$. Температуру стабилизировали на уровне $30 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ с помощью аквариумного обогревателя Atman AT-50W.

Для контроля культивирования *A. platensis* также осуществлялось при искусственном освещении в накопительном режиме в прямоугольном бассейне размером 1,28 × 0,6 м. Рабочий слой суспензии 10 см, объём культуры 75 л. Бассейн освещался круглосуточно лампой ДРЛ-700. Интенсивность поверхностной радиации в области ФАР в среднем составляла 250 мкмоль · м⁻² · с⁻¹, средняя освещённость 15 клк. Культивирование *A. platensis* выполнялось в двух вариантах: в первом — без дополнительной подачи CO₂, во втором — с добавлением CO₂ для стабилизации pH в диапазоне 9–9,5. CO₂ подавали непосредственно в суспензию. pH культуры измеряли pH-метром И-150, освещённость — люксметром Ю-116, а интенсивность света — квантометром LI-250A LI-COR. Для определения воздушно-сухого веса (СВ) сырую биомассу *A. platensis*, полученную на фильтре с диаметром поры 35 мкм, помещали в сушильный шкаф 2В-151 при температуре 50 °С. Взвешивание осуществляли на весах Sartorius L220.

Рост культуры регистрировали оптическим методом. Отбор проб для определения оптической плотности проводили из разных точек бассейна несколько раз в сутки: отбирали по 10 мл суспензии клеток водорослей, получая таким образом «среднюю пробу» объёмом 50 мл. В средней пробе после перемешивания величину оптической плотности определяли на фотометре UNICO-2100 при длине волны 750 нм, погрешность измерения не превышала 0,01 оптической плотности. При пересчёте единиц оптической плотности на сухую биомассу использовали эмпирический коэффициент $k = 0,575$ (рис. 1). Измерения проводили относительно дистиллированной воды в кювете с длиной оптического пути 1 см. Кюветы располагали максимально близко к фотоприёмнику, что позволяло снизить ошибку измерения оптической плотности культуры, связанную со светорассеянием. При показаниях прибора выше 0,4 единиц оптической плотности проба разбавлялась дистиллированной водой.

Для расчёта средней продуктивности использовали выражение [Тренкеншу, Лелеков, 2017]:

$$B = B_l + P_m(t - t_l), \quad (1)$$

где B — текущая биомасса, измеряемая в данный момент времени t , B_l — биомасса в момент начала линейной фазы роста t_l , P_m — средняя продуктивность.

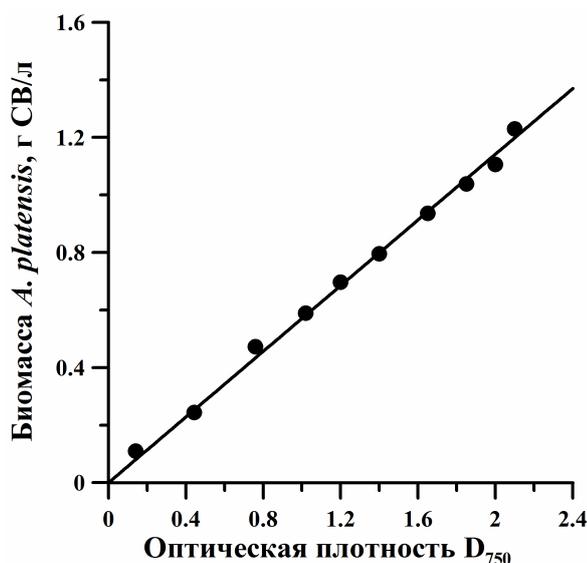


Рис. 1. Зависимость биомассы *A. platensis* от оптической плотности D_{750}

Для оценки энергии в области ФАР использовали идеализированное выражение, предложенное для поверхности озёр и океана [Golterman, 1975]:

$$I = \frac{I_{max}}{2} \cdot \left(1 + \cos \left(2\pi \frac{t - t_{max}}{t_{light}} \right) \right), \quad (2)$$

где I — интенсивность солнечного света, I_{max} — максимальное значение интенсивности, наблюдаемое в момент времени t_{max} , t_{light} — продолжительность светового дня.

Для нахождения суммарной энергии ФАР необходимо проинтегрировать выражение (2) с учётом долготы дня. Полученное выражение имеет вид:

$$E = \frac{I_{max}}{2} \cdot t_{light}, \quad (3)$$

где E — суммарная энергия ФАР, приходящаяся на поверхность бассейна за световой день, Дж.

Интенсивность солнечного света, выраженную в $\text{мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, пересчитывали в энергетические единицы $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$. Для этого использовали эмпирический коэффициент 3,8, определённый согласно методике [Геворгиз, Малахов, 2018]. Коэффициент перехода от единиц освещённости (клк) к единицам облучённости ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) составил 4,9 [Чекушкин, Лелеков, Геворгиз, 2020]. Отметим, что величины коэффициентов перехода в общем случае не зависели от высоты солнцестояния.

Расчёт КПД фотобиосинтеза производили согласно [Геворгиз, Шматок, Лелеков, 2005]:

$$\eta = \frac{E_{\Pi}}{E_{\chi}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где E_{χ} — запасённая энергия, E_{Π} — поглощённая энергия.

Результаты

При исследовании влияния света на скорость роста культуры *A. platensis* необходимо поддерживать в оптимальных пределах все факторы, влияющие на продуктивность. Примером питательной среды, которая рассчитана на получение достаточно высокого показателя биомассы ($4 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$), может быть среда Заррук [Zarrouk, 1966]. Поэтому в данной работе для получения плотной культуры *A. platensis* и достижения максимальной скорости роста внесли биогенные элементы по прописи среды Заррук. Данная среда предполагает барботаж суспензии газовой смеси, содержащей углекислый газ. Без дополнительной подачи CO_2 возможно получить достаточно высокую скорость роста [Минюк и др., 2002; Torzillo et al., 1991; Benavides et al., 2017; Wu et al., 2021]. Поэтому на первом этапе было проведено исследование влияния углекислоты на продуктивность культуры *A. platensis* при постоянном освещении. По имеющимся в литературе данным, за сутки в условиях естественного освещения (для широты г. Севастополя) количество энергии в области ФАР изменяется примерно от 2 до $11 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ [Справочник по климату ... , 1966]. Экспериментально определено, что при культивировании микроводорослей в тепличном модуле на поверхность бассейна приходится на 33 % меньше энергии, чем на открытом воздухе. Поэтому в лабораторных исследованиях была использована облучённость, соответствующая средней энергии, приходящейся на поверхность горизонтального фотобиореактора в теплице, которая составляет $5,68 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ за сутки.

На рисунке 2 представлены накопительные кривые роста культуры *A. platensis* при различном углеродном обеспечении. Начальная плотность культуры *A. platensis* без дополнительной подачи CO_2 составляла $27 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2}$. За 11 суток было достигнуто максимальное значение биомассы ($120 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2}$), при этом средняя продуктивность на линейном участке составляла $13 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, а pH суспензии изменялся от 9 до 11. При дополнительной подаче углекислого газа начальная плотность культуры *A. platensis* составляла $28 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. За 10 суток культивирования величина биомассы *A. platensis* достигла $125 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2}$, продуктивность — $14 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, pH стабилизировался в диапазоне 9–9,5.

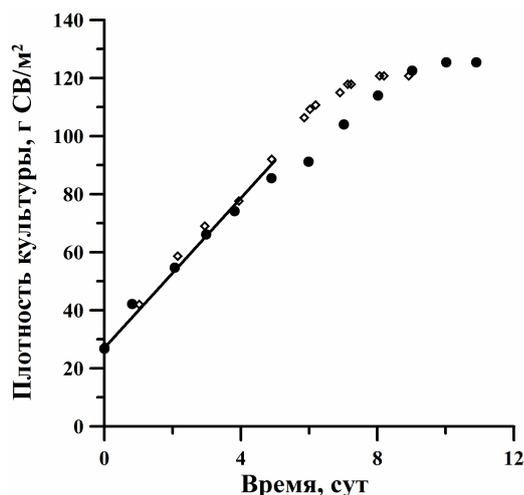


Рис. 2. Динамика плотности накопительной культуры *A. platensis* без добавления CO_2 (●) и с добавлением CO_2 (◇) в лабораторных условиях при искусственном освещении. Сплошная линия — аппроксимация линейного участка накопительной кривой без добавления CO_2 выражением (1)

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что скорость роста культуры *A. platensis* и максимальное значение биомассы в обоих случаях были примерно одинаковы. С учётом того что полученное максимальное значение биомассы в четыре раза меньше, чем по прописи среды Заррук, можно сделать вывод, что лимитирующим фактором является интенсивность света. Поэтому в дальнейших исследованиях в условиях естественного освещения подачу CO_2 не производили.

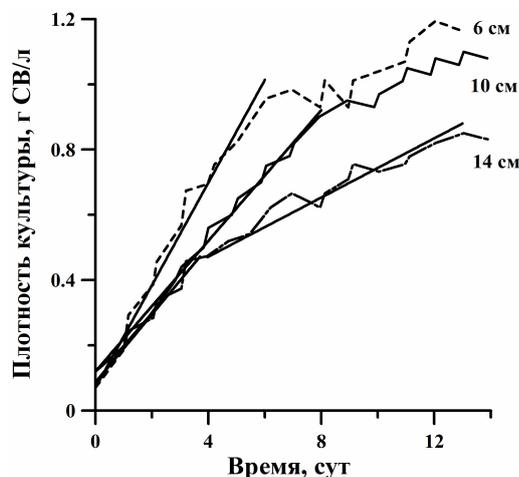


Рис. 3. Динамика плотности накопительной культуры *A. platensis* при различной толщине рабочего слоя и естественном освещении. Сплошные линии — расчётные выражения (5, 6, 7)

Для увеличения количества световой энергии ФАР, приходящейся на единицу биомассы, необходимо увеличить интенсивность энергии на поверхности фотобиореактора или уменьшить толщину рабочего слоя суспензии. Для этого исследовали рост культуры *A. platensis* в условиях естественного освещения при различной толщине слоя суспензии. Накопительные кривые плотности культуры при различной толщине рабочего слоя представлены на рисунке 3. Показано, что самая высокая скорость роста *A. platensis* наблюдалась при 6 см слоя суспензии, а самая низкая — при 14 см. Рост культуры описывался следующими выражениями (для 6-, 10- и 14-сантиметрового слоёв суспензии соответственно):

$$B = 0,07 + 0,16t, 0 \leq t < 6,5, \quad (5)$$

$$B = 0,12 + 0,1t, 0 \leq t < 8, \quad (6)$$

$$\begin{cases} B = 0,086 + 0,1t, 0 \leq t < 6,5 \\ B = 0,47 + 0,045t, 4 \leq t < 13 \end{cases} \quad (7)$$

Накопительная кривая роста культуры *A. platensis* при 14 см характеризовалась резким изменением продуктивности на четвёртые сутки эксперимента. Скорость роста снизилась более чем в два раза, что объясняется значительным уменьшением световой энергии, приходящейся на единицу биомассы [Тренкеншу, Лелеков, Новикова, 2018]. Кроме того, максимальное значение биомассы в этом случае было примерно на треть ниже, чем при 6 и 10 см рабочего слоя. При выращивании *A. platensis* в фотобиореакторах с толщиной слоя культуры 6 и 10 см максимальное значение биомассы было примерно одинаковым, однако максимальная продуктивность в 6-сантиметровом слое была выше в полтора раза и составила $0,16 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$. При этом продуктивность на единицу площади обоих фотобиореакторов составляла примерно $10 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Тем не менее при расчёте урожая на единицу площади можно предположить, что урожай за 7 дней во всех трёх случаях будет одинаков и составит около $70\text{--}75 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2}$. Однако 10-сантиметровый слой культуры более предпочтителен с точки зрения стабилизации температурного режима суспензии. Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования выполнялись при 10-сантиметровом слое.

На рисунке 4А представлены накопительные кривые роста *A. platensis* при естественном освещении в разное время года. По полученным экспериментальным данным определили среднюю продуктивность и максимальное значение биомассы в течение разных сезонов. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Продукционные характеристики культуры *A. platensis*: средняя продуктивность (P_m), максимальное значение биомассы (B_m), среднее значение количества световой энергии ФАР за световой день (E)

Культура	P_m , г СВ · м ⁻² · сут ⁻¹	B_m , г СВ · м ⁻²	E , МДж · м ⁻²
лаборатория	13	120	5,68
осень (октябрь)	5,3	60	3,11
зима (январь)	2,8	43	1,95
весна (март)	6,8	85	3,49
лето (июль)	12,2	120	8,73

Отметим, что в зимний период рост плотности культуры начинался на пятые сутки, поэтому расчёт средней продуктивности биомассы производили с пятых суток по пятнадцатые. Очевидно, что средняя продуктивность культуры *A. platensis* на линейном участке накопительных кривых зависит от количества световой энергии в области ФАР. На рисунке 4Б представлены типовые графики изменения облучённости на поверхности бассейна в течение светового дня за каждый исследуемый период, из которых видно, что количество энергии в летний период больше, чем в зимний, в 3,3 раза, а долгота дня — в 1,5 раза.

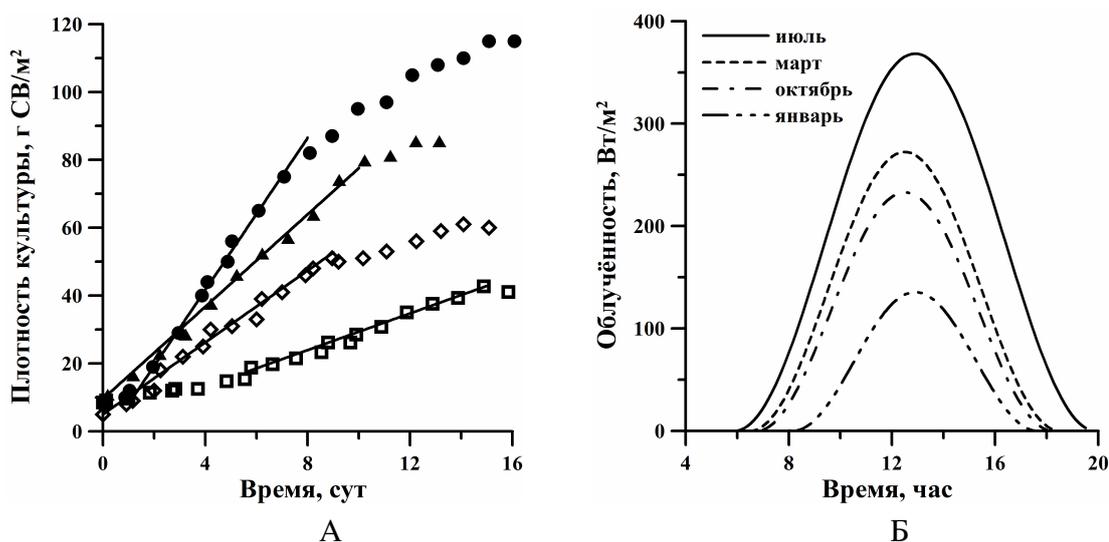


Рис. 4. А — динамика плотности накопительной культуры *A. platensis* при естественном освещении в разные сезоны года: октябрь (◇), январь (□), март (▲) и июль (●); сплошные линии — аппроксимация линейного участка выражением (1).
Б — изменение облучённости на поверхности бассейна

Обсуждение

В ссылках к статье приводятся немногочисленные работы, в которых рассматривается влияние условий культивирования на скорость роста *A. platensis*. Так, по данным [Wu et al., 2021], средняя продуктивность культуры в зимний период составляет 3,96, а максимальная — 11,33 г СВ · м⁻² · сут⁻¹ при контролируемом уровне pH и толщине рабочего слоя 15 см. Так как авторы не указывали количество энергии, падающей на поверхность бассейнов, воспользуемся данными NASA LaRC POWER Project [NASA Prediction ...]. Результаты расчётов показывают, что энергия в области ФАР зимой для данного региона составляет 5,27 МДж · м⁻² за световой день.

В работе [Benavides et al., 2017] максимальная продуктивность *A. platensis* при её выращивании в горизонтальном бассейне с рабочим слоем 10 см достигала 12 г СВ · м⁻² · сут⁻¹, при этом максимальная интенсивность света составляла 1740 мкмоль · м⁻² · с⁻¹, что с учётом спектра солнца равняется 458 Вт · м⁻² [Чекушкин, Лелеков, Геворгиз, 2020]. Таким образом, согласно формуле (3), для двенадцатичасового светового дня [Benavides et al., 2017] количество энергии в области ФАР составило 9,89 МДж · м⁻².

В работе [Минюк и др., 2002] показано, что при исследовании скорости роста культуры *A. platensis* в районе г. Сочи в мае на полной среде Заррук средняя продуктивность составила 7,52 г СВ · м⁻² · сут⁻¹ при максимальной освещённости 50 клк или 244 Вт · м⁻². Расчёты показывают, что с учётом десятичасового светового дня количество энергии, согласно (3), равняется 4,4 МДж · м⁻². Отметим, что указанная авторами освещённость не совпадает со средним многолетним значением для данного региона [Солнечная радиация ... , 1990] и примерно в два раза занижена. Это может быть обусловлено облачностью во время проведения эксперимента.

В работе [Torzillo et al., 1991] отмечено, что при культивировании *A. platensis* в летний период наибольшая продуктивность достигала $0,32 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$. Данный эксперимент проводился в трубчатом фотобиореакторе объёмом 51 л при толщине слоя культуры 4,85 см. Следовательно, в пересчёте на освещаемую площадь продуктивность *A. platensis* составляет около $16,5 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. Отметим, что г. Флоренция, где проводился эксперимент, находится на широте г. Севастополя и характеризуется сходной инсоляцией в летнее время — $11 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ за световой день в июне [Справочник по климату ... , 1966]. Несмотря на одинаковое количество энергии, в условиях настоящего эксперимента продуктивность культуры *A. platensis* была меньше примерно на 30 %. Это можно объяснить разной конструкцией фотобиореакторов: толщиной слоя, способом перемешивания суспензии, обеспеченностью углекислым газом. Согласно опубликованным данным максимальная продуктивность *A. platensis* в условиях естественного освещения (август, солнечные дни) достигает $22 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$ [Benavides et al., 2017] при толщине рабочего слоя культуры 1 см, с термостабилизацией и контролем рН в оптимальном диапазоне.

Резюмируя вышесказанное, можно получить зависимость средней продуктивности культуры *A. platensis* от суммарной энергии за световой день для различных времён года. Отметим, что полученные экспериментальные данные с высокой точностью ($R^2 = 0,96$) описываются ломаной. В области лимитирования коэффициент пропорциональности равен $2,3 \text{ г СВ} \cdot \text{МДж}^{-1}$. Это означает, что для синтеза $2,3 \text{ г}$ сухой биомассы необходимо $1 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ световой энергии в области ФАР. При суммарной энергии за световой день $5,8 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ скорость роста *A. platensis* достигает максимума и составляет $12 \text{ г СВ} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

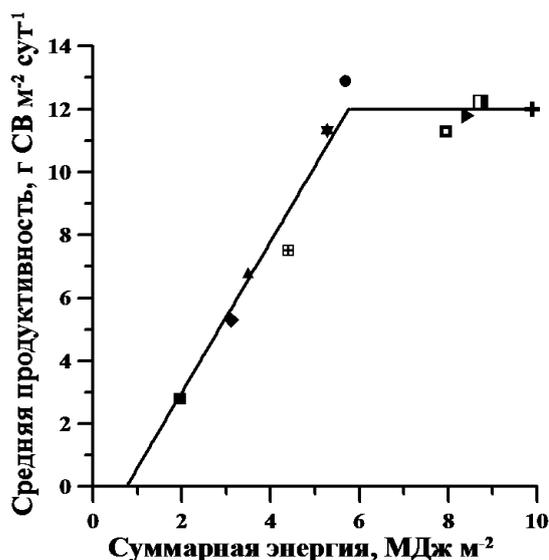


Рис. 5. Зависимость средней продуктивности культуры *A. platensis* от суммарной энергии ФАР при искусственном освещении (●), при естественном освещении в октябре (◆), январе (■), марте (▲), августе (□), июле (▣), июне (▶), по данным [Benavides et al., 2017] (✚), [Wu et al., 2021] (✱), [Минюк и др., 2002] (⊞)

Согласно данным [Wu et al., 2021; Zanolla et al., 2022] калорийность биомассы накопительной культуры *A. platensis* находится в диапазоне $22\text{--}24 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}$ как для условий искусственного, так и естественного освещения. Таким образом, среднее значение КПД фотобиосинтеза культуры *A. platensis* находится в диапазонах, характерных для данного вида [Белянин, Сидько, Тренкеншу, 1980; Hase et al., 2000; Геворгиз, Шматок, Лелеков, 2005], и составляет:

$$\eta = \frac{23 \text{ кДж} \cdot \text{г}^{-1}}{1/2,3 \text{ г} \cdot \text{МДж}^{-1}} \cdot 100\% \approx 5,3\%.$$

На рисунке 5 видно, что при энергии $0,77 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ за световой день наблюдается световой компенсационный пункт, при котором средняя продуктивность культуры *A. platensis* равна нулю, т. е. синтез биомассы компенсируется расходами на поддержание её структуры. По данным [Белянин, Сидько, Тренкеншу, 1980], компенсационный пункт фотосинтеза для полупоглощающей культуры *A. platensis* при постоянном освещении составляет $4,2 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ или $0,36 \text{ МДж} \cdot \text{м}^{-2}$ за сутки, что в два раза меньше полученного нами значения. Это можно объяснить тем, что чем меньше плотность культуры, тем меньше энергии необходимо для поддержания клеточных структур.

Заключение

В работе исследована сезонная динамика роста накопительной культуры *A. platensis* в горизонтальных фотобиореакторах (бассейнах) при её выращивании в условиях естественного освещения. Экспериментально определены максимальное значение биомассы и средняя продуктивность *A. platensis*. Установлено, что средняя продуктивность зависит от количества энергии ФАР, приходящейся на поверхность горизонтального бассейна, и описывается ломаной. Рассчитано среднее значение КПД фотобиосинтеза накопительной культуры *A. platensis*, которое составляет 5,3 %.

Отметим, что экспериментальные данные, представленные на рисунке 5, получены при культивировании *A. platensis* с рабочей толщиной слоя суспензии 10 см, который для наших условий является оптимальным. Кроме того, в данной работе не учтена суточная динамика плотности культуры, а также изменения биохимического состава биомассы. Учёт этих факторов позволит получить более точную зависимость скорости роста и биосинтеза от количества световой энергии. С другой стороны, полученное простое выражение в виде ломаной позволяет оценить скорость роста культуры *A. platensis* как в лабораторных, так и промышленных условиях в зависимости от притока световой энергии.

Список литературы

1. Белянин В. Н., Сидько Ф. Я., Тренкеншу А. П. Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей. – Новосибирск : Наука, 1980. – 136 с.
2. Геворгиз Р. Г., Малахов А. С. Пересчёт величины освещённости фотобиореактора в величину облучённости: учеб.-метод. пособие. – Севастополь : Колорит, 2018. – 58 с.
3. Геворгиз Р. Г., Шматок М. Г. Лелеков А. С. Расчёт КПД фотобиосинтеза у низших фототрофов. 1. Непрерывная культура // Экология моря : сб. науч. тр. / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – Вып. 70. – С. 31–36.
4. Минюк Г. С., Дробецкая И. В., Тренкеншу Р. П., Вялова О. Ю. Ростовые и биохимические характеристики *Spirulina (Arthrospira) platensis* (Nordst.) Geitler при различных условиях азотного питания // Экология моря : сб. науч. тр. / НАН Украины, Ин-т биологии юж. морей им. А. О. Ковалевского. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – Вып. 62. – С. 61–66.
5. Солнечная радиация и солнечное сияние // Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3, Многолетние данные. Ч. 1–6 / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии, Сев.-Кавказ. территор. упр. по гидрометеорологии. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. – Вып. 13. – С. 70–145.
6. Справочник по климату СССР. Вып. 10. Украинская ССР. Ч. 1. Солнечная радиация, радиационный баланс и солнечное сияние / Гл. упр. гидрометеорол. службы при Совете Министров СССР, Упр. гидрометеорол. службы УССР, Киев. гидрометеорол. обсерватория. – Москва : Гидрометеиздат, 1966. – 124 с.

7. *Стельмах Л. В.* Суточные изменения фотосинтеза морских планктонных водорослей : автореф. дис. ... канд. биол. наук : 03.00.18. – Севастополь, 1985. – 23 с.
8. *Тренкениш Р. П., Лелеков А. С., Новикова Т. М.* Линейный рост морских микроводорослей в культуре // *Морской биологический журнал*. – 2018. – Т. 3, № 1. – С. 53–60. – <https://doi.org/10.21072/mbj.2018.03.1.06>
9. *Тренкениш Р. П., Лелеков А. С.* Моделирование роста микроводорослей в культуре. – Белгород : Константа, 2017. – 152 с. – <https://doi.org/10.21072/978-5-906952-28-8>
10. *Чекушкин А. А., Лелеков А. С.* Продуктивность культуры *Phaeodactylum tricornutum* в условиях естественного освещения // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. – 2021. – Т. 6, № 4. – С. 591–596.
11. *Чекушкин А. А., Лелеков А. С., Геворгиз Р. Г.* Сезонная динамика предельной продуктивности в горизонтальном фотобиореакторе // *Актуальные вопросы биологической физики и химии*. – 2020. – Т. 5, № 3. – С. 405–411.
12. *Benavides A., Ranglová K., Malapascua J. R., Masojidek J., Torzillo G.* Diurnal changes of photosynthesis and growth of *Arthrospira platensis* cultured in a thin-layer cascade and an open pond // *Algal Research*. – 2017. – Vol. 28. – P. 48–56. – <https://doi.org/10.1016/j.algal.2017.10.007>
13. *Borowitzka M. A.* Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters // *Journal of Biotechnology*. – 1999. – Vol. 70, iss. 1/3. – P. 313–321. – [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(99)00083-8)
14. *Borowitzka M. A., Borowitzka L. J.* Microalgal biotechnology. – Cambridge : Cambridge Univ. Press, 1998. – 480 p.
15. *Freitas B., Cassuriaga A., Morais M. G., Costa J.* Pentoses and light intensity increase the growth and carbohydrate production and alter the protein profile of *Chlorella minutissima* // *Bioresource Technology*. – 2017. – Vol. 238. – P. 248–253. – <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.04.031>
16. *Golterman H. L.* Physiological limnology: an approach to the physiology of lake ecosystems. – Amsterdam [etc.] : Elsevier, 1975. – 489 p.
17. *Hase R., Oikawa H., Sasao C., Morita M., Watanabe Yo.* Photosynthetic production of microalgal biomass in a raceway system under greenhouse conditions in Sendai City // *Journal of Bioscience and Bioengineering*. – 2000. – Vol. 89, iss. 2. – P. 157–163. – [https://doi.org/10.1016/S1389-1723\(00\)88730-7](https://doi.org/10.1016/S1389-1723(00)88730-7)
18. *Jallet D., Caballero M. A., Gallina A. A., Youngblood M., Peers G.* Photosynthetic physiology and biomass partitioning in the model diatom *Phaeodactylum tricornutum* grown in a sinusoidal light regime // *Algal Research*. – 2016. – Vol. 18. – P. 51–60. – <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.05.014>
19. *Lafarga T., Fernandez-Sevilla J. M., Gonzalez-Lopez C., Acien-Fernandez F. G.* Spirulina for the food and functional food industries // *Food Research International*. – 2020. – Vol. 137. – [Art. nr] 109356. – <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109356>
20. *Maltsev Ye., Maltseva K., Kulikovskiy M., Maltseva S.* Influence of light conditions on microalgae growth and content of lipids, carotenoids and fatty acid composition // *Biology*. – 2021. – Vol. 10, iss. 10. – [Art. nr] 1060. – <https://doi.org/10.3390/biology10101060>
21. *Markou G., Angelidaki I., Nerantzis E., Georgakakis D.* Bioethanol production by carbohydrate-enriched biomass of *Arthrospira (Spirulina) platensis* // *Energies*. – 2013. – Vol. 6, iss. 8. – P. 3937–3950. – <https://doi.org/10.3390/en6083937>
22. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources : The POWER Project : [website] / Langley Research Center. – URL: <https://power.larc.nasa.gov> (date of access: 01.07.2022).
23. *Nowicka-Krawczyk P., Mühlsteinová R., Hauer T.* Detailed characterization of the *Arthrospira* type species separating commercially grown taxa into the new genus *Limnospira* (Cyanobacteria) // *Scientific reports*. – 2019. – Vol. 9. – [Art. nr] 694. – <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36831-0>

24. Sotiroudīs T. G., Sotiroudīs G. T. Health aspects of *Spirulina* (*Arthrospira*) microalga food supplement // Journal of the Serbian Chemical Society. – 2013. – Vol. 78, no. 3. – P. 395–405. – <https://doi.org/10.2298/JSC121020152S>
25. Torzillo G., Sacchi A., Materassi R., Richmond A. Effect of temperature on yield and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors // Journal of Applied Phycology. – 1991. – Vol. 3, iss. 2. – P. 103–109. – <https://doi.org/10.1007/BF00003691>
26. Torzillo G., Accolla P., Pinzani E., Masojidek J. In situ monitoring of chlorophyll fluorescence to assess the synergistic effect of low temperature and high irradiance stresses in *Spirulina* cultures grown outdoors in photobioreactors // Journal of Applied Phycology. – 1996. – Vol. 8, iss. 4/5. – P. 283–291. – <https://doi.org/10.1007/BF02178571>
27. Van Wagenen J., Miller T. W., Hobbs S., Hook P., Crowe B., Huesemann M., Effects of light and temperature on fatty acid production in *Nannochloropsis Salina* // Energies. – 2012. – Vol. 5, iss. 3. – P. 731–740. – <https://doi.org/10.3390/en5030731>
28. Wu H., Li T., Lv J., Chen Z., Wu J., Wang N., Wu H., Xiang W. Growth and biochemical composition characteristics of *Arthrospira platensis* induced by simultaneous nitrogen deficiency and seawater-supplemented medium in an outdoor raceway pond in winter // Foods. – 2021. – Vol. 10, iss. 12. – [Art. nr] 2974. – <https://doi.org/10.3390/foods10122974>
29. Zanolli V., Biondi N., Niccolai A., Abiusi F., Adessi A., Rodolfi L., Tredici M. Protein, phycocyanin, and polysaccharide production by *Arthrospira platensis* grown with LED light in annular photobioreactors // Journal of Applied Phycology. – 2022. – Vol. 34, iss. 3. – P. 1189–1199. – <https://doi.org/10.1007/s10811-022-02707-0>
30. 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*. – Paris : [s. n.], 1966. – 138 p.

PRODUCTIVITY OF *ARTHROSPIRA PLATENSIS* GOMONT 1892 CULTURE UNDER NATURAL LIGHT CONDITIONS

Chekushkin A. A., Avsiyan A. L., Lelekov A. S.

A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,
e-mail: chekushkin.78@mail.ru

Abstract: The growth of the *Arthrospira platensis* batch culture under natural and artificial illumination at different culture layer depth and the amount of photosynthetically active radiation (PAR) energy supplied to the pond surface were investigated. The experiments were conducted in horizontal photobioreactor during 2021–2022 in the Sevastopol area. The calculation of the average *A. platensis* culture productivity in the linear growth area and the maximum culture density at the stationary phase was carried out. It was shown that under natural illumination, the average *A. platensis* culture productivity in the linear growth phase varied between 2.8 and 12.2 g DW · m⁻² · day⁻¹, with a maximum culture density varying from 43 to 120 g DW · m⁻². Taking into account the partial light reflection from the surface of the algaobiotechnological unit, the total value of solar energy in the PAR area per day was determined, which ranged from 1.95 to 8.73 MJ · m⁻² in January and July, respectively. It was noted that *A. platensis* cultivated in the ponds with different culture layer depth yields in 7 days were the same and amounted to 70–75 g DW · m⁻². In the control experiment under artificial illumination, no effect of CO₂ on the growth rate of *A. platensis* was detected: average productivity was 13–14 g DW · m⁻² · day⁻¹ both with CO₂ addition and without it, the maximum culture density was 125 g DW · m⁻². Based on the analysis of the obtained experimental and published data, it was shown that the dependence of average productivity on irradiance in the PAR area can be described by a polygonal line. In the light limitation area, the slope ratio of the linear regression was 2.3 g · MJ⁻¹. Considering the average biomass caloric content, the average photosynthesis efficiency was 5.3 %.

Keywords: *Arthrospira platensis*, batch culture, productivity, irradiance, microalgae cultivation, outdoor pond, biomass.

Сведения об авторах

Чекушкин Анатолий Анатольевич	аспирант, ведущий инженер, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», chekushkin.78@mail.ru
Авсиян Анна Львовна	младший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», anna.l.avsiyan@gmail.com
Лелеков Александр Сергеевич	кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А. О. Ковалевского РАН», a.lelekov@yandex.ru

Поступила в редакцию 29.07.2022 г.

Принята к публикации 22.09.2022 г.