

ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА *A* И В-ФИКОЭРИТРИНА В КУЛЬТУРЕ *PORPHYRIDIUM PURPUREUM* В УСЛОВИЯХ СВЕТОВОГО И УГЛЕРОДНОГО ЛИМИТИРОВАНИЯ

Ключкова В.С.¹, Лелеков А.С.², Гудвилович И.Н.²

¹ Севастопольский государственный университет
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, РФ; e-mail: viki-iki@mail.ru

² ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
просп. Нахимова, 2, г. Севастополь, 299011, РФ; e-mail: a.lelekov@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0556

Аннотация. Исследовано влияние интенсивности света и потока углерода на продукцию хлорофилла *a* и В-фикоэритрина, а также их соотношения в накопительной культуре *Porphyridium purpureum*. Показано, что с увеличением интенсивности света (в 2 раза) и скорости подачи воздуха (в 2 раза) значение максимальной продуктивности возрастает почти в 2 раза, концентрации хл *a* – в 1,8 раз, а В-ФЭ – в 1,6 раз. Содержание хлорофилла *a* и В-фикоэритрина во всех опытных вариантах на 3–4 сутки эксперимента (начало линейной фазы роста) достигло максимального значения. При световом лимитировании содержания хл *a* и В-ФЭ в биомассе не изменяется, однако при высокой интенсивности света на линейной фазе роста наблюдается уменьшение. Соотношение В-ФЭ/хл *a* при различном световом и углеродном обеспечении в проведённом эксперименте практически не изменяется и в среднем составляет 12,8.

Ключевые слова: порфиридиум, хлорофилл *a*, В-фикоэритрин, концентрация, соотношение пигментов, интенсивность света, углекислый газ.

ВВЕДЕНИЕ

Микроводоросли – это водные организмы, которые производят сложные органические соединения из неорганических молекул, используя углекислый газ в качестве источника углерода и солнечный свет для получения энергии. Свет является единственным источником энергии для их роста, а световые условия, в которых находятся микроводоросли, определяют все процессы биосинтеза, которые протекают в клетках. У микроводорослей выявлено три группы светособирающих и фотозащитных пигментов: хлорофиллы, каротиноиды и фикобилипротеины (ФБП). Хлорофиллы – пигменты, которые улавливают энергию солнечного света и передают её на реакционные центры фотосинтеза. Каротиноиды могут передавать поглощенную энергию на хлорофилл и, кроме того, обладают фотопротекторными свойствами. Фикобилипротеины входят в состав фикобилисом и участвуют в чрезвычайно эффективной цепи передачи энергии на реакционный центр ФСII [1]. Известно, что вся поглощённая энергия передаётся на реакционные центры фотосинтеза, являющимися молекулами хлорофилла *a* (хл *a*). Например, у цианобактерии *A. platensis* хлорофилл *a* входит в структуру светособирающего комплекса (ССК): на одну молекулу реакционного центра в накопительной культуре в среднем приходится 120–180 молекул антенного хлорофилла *a*, при этом 95% хлорофилла связано с первой фотосистемой [2]. В состав фикобилисом красной микроводоросли *Porphyridium purpureum* входят: В-фикоэритрин (В-ФЭ), R-фикоцианин (R-ФЦ) и аллофикоцианин (АФЦ). В прикладном аспекте наибольший интерес вызывает красный пигмент В-ФЭ, количество которого составляет около 85% от общей суммы ФБП. Относительное содержание В-ФЭ и его продукция варьируют в достаточно широком диапазоне в зависимости от условий культивирования *P. purpureum*, а скорость синтеза В-ФЭ может достигать 40–50 мг·л⁻¹·сут⁻¹ [3].

В литературе приводятся данные о влиянии концентрации углерода в среде (как в виде углекислого газа, так и в виде бикарбоната натрия) и интенсивности света на скорость роста, а также концентрацию и продукцию пигментов в культуре микроводорослей [1,4–6]. Однако для накопительной культуры *P. purpureum* в условиях углеродного и светового лимитирования, такого рода исследования немногочисленны и являются весьма актуальными, поскольку управление процессами её роста и синтеза пигментов является основой биотехнологии получения биологически ценных веществ.

В связи с вышеизложенным, целью данной работы являлось исследование влияния интенсивности света и потока углерода на продукцию хлорофилла *a* и В-ФЭ, а также их соотношения в накопительной культуре *P. purpureum*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования выполняли на базе отдела биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ ИнБЮМ (г. Севастополь). Объектом исследования являлась красная морская микроводоросль *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew et Ross (*Rhodophyta*) из коллекции Научно-образовательного центра коллективного пользования ФИЦ ИнБЮМ “Коллекция гидробионтов Мирового океана”.

Выращивание культуры *P. purpureum* проводили в накопительном режиме в культиваторах плоскопараллельного типа объёмом 1 л и толщиной слоя 2 см, используя среду для красных морских водорослей

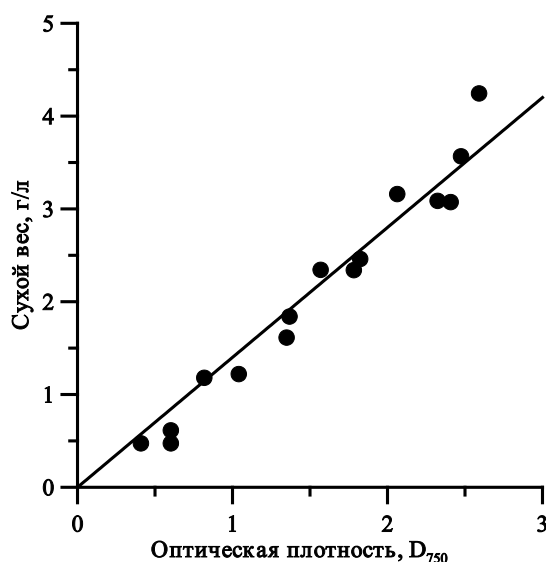


Рисунок 1. Зависимость сухого веса от оптической плотности накопительной культуры *P. purpureum*

[7]. В качестве источника освещения использовали световую решётку из холодных люминесцентных ламп Philips Daylight TL-D 54-765 6G мощностью 18 Вт. В трёх опытных вариантах (далее А, В, С) температуру культуры стабилизировали на уровне 25 ± 1 °С. Для варианта А средняя облучённость составляла $33 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, а скорость подачи воздуха $1 \text{ л} \cdot \text{л}^{-1}$ культуры в минуту; для В – $17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $1 \text{ л} \cdot \text{л}^{-1}$ культуры в минуту, для С – $17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$ и $0,5 \text{ л} \cdot \text{л}^{-1}$ культуры в минуту. Барботаж осуществляли аквариумным компрессором Hailea АСО-308 воздухом через аквариумный распылитель, представляющий собой пластиковую трубку длиной 5 см, диаметром 5 мм, у которой диаметр пор не превышает 0,1 мм. Дополнительного введения углекислого газа не производилось.

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 Unicо-2100 при длине волны 750 нм. Измерения проводили относительно дистиллированной воды. Кюветы (5 мм) 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), пробу разбавляли дистиллированной водой. Для определения сухого веса 5 – 10 мл суспензии центрифугировали в течение 10 минут при $3000 \text{ об} \cdot \text{мин}^{-1}$, сливали надосадочную жидкость, осадок промывали дистиллированной водой, повторно центрифугировали и сушили в течение суток при 60 °С. На рисунке 1 представлена линейная зависимость сухого веса от оптической плотности D_{750} , коэффициент пропорциональности составил $k = 1,4 \text{ г} \cdot \text{СВ} \text{ л}^{-1} \cdot \text{ед. опт. пл}^{-1}$ ($R^2 = 0,99$).

Пробы для определения содержания В-фикоэритрина и хлорофилла *a* отбирали ежедневно на различных фазах роста накопительной культуры после тщательного перемешивания. Образцы центрифугировали, надосадочную жидкость сливали, помещали в морозильную камеру при – 18 °С. Содержание В-фикоэритрина и хлорофилла *a* определяли спектрофотометрическим методом согласно [8]. Для этого проводили экстракцию фосфатным буфером (0,05 М; рН = 7–7,5) для В-ФЭ и 100% раствором ацетона в воде для хл *a*. Спектры экстрактов пигментов промеряли на регистрирующем спектрофотометре СФ-2000 в диапазоне длин волн 400 – 800 нм с шагом 0,1 нм. Регистрировали оптическую плотность полученных экстрактов в области характеристических максимумов поглощения В-фикоэритрина (545 нм) и хлорофилла *a* (680 нм), а также при 750 нм (для учёта неспецифического поглощения раствора). Концентрацию В-ФЭ определяли по [9], а хл *a* [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рисунке 2 представлены накопительные кривые роста *P. purpureum*. Начальная плотность культуры во всех опытных вариантах в среднем составляла $0,4 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$. Через 9 суток для всех вариантов эксперимента биомасса достигла максимальных значений: для варианта А она увеличилась в 11 раз, для варианта В – в 9,5 раза, а для варианта С – в 7 раз.

Через 8 суток для варианта А биомасса достигла максимального значения $4,5 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$; для В – $3,8 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$; для С – $2,9 \text{ г СВ} \cdot \text{л}^{-1}$.

Используемая питательная среда рассчитана на получение 4 г биомассы микроводоросли *P. purpureum* с 1 л культуры [7,11]. Таким образом, в вариантах А и В минеральные элементы питания среды были близки к исчерпанию.

Для определения влияния интенсивности света и потока углерода на скорость накопления биомассы и основных фотосинтетических пигментов удобно использовать продукционные характеристики роста: максимальную удельную скорость – в экспоненциальной фазе, а также максимальную продуктивность – на

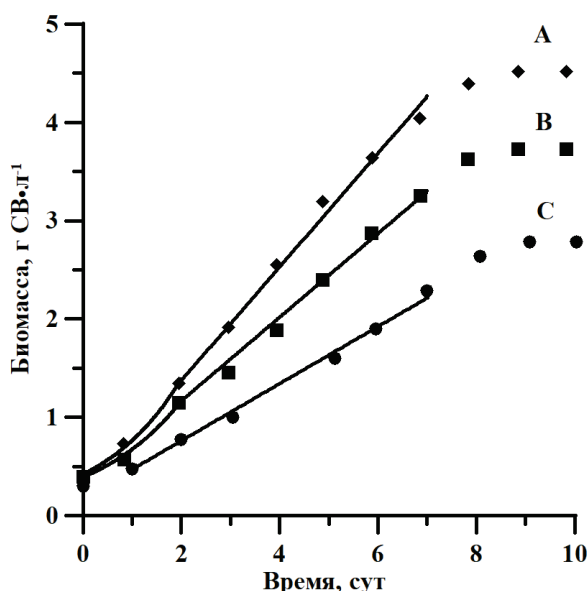


Рисунок 2. Накопительные кривые роста культуры *P. purpureum*: \blacklozenge – 33 Вт·м⁻², продувка – 1 л/л·мин⁻¹; \blacksquare – 17 Вт·м⁻², продувка – 1 л/л·мин⁻¹; \bullet – 17 Вт·м⁻², продувка – 0,5 л/л·мин⁻¹. Сплошные линии – аппроксимации экспоненциальной (0–2 сутки) и линейной (2–7 сутки) фаз. Значения коэффициентов в таблице 1

линейном участке накопительной кривой. Чтобы определить данные параметры, была проведена аппроксимация соответствующих фаз роста (рис. 2) следующими уравнениями [12]:

$$B = B_0 \cdot e^{\mu_m \cdot t},$$

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

где B_0 – начальная плотность культуры, г СВ·л⁻¹; μ_m – максимальная удельная скорость роста, сут⁻¹; B_l – плотность культуры момент начала линейного роста; P_m – максимальная продуктивность, г СВ·(л·сут)⁻¹.

Анализируя данные, представленные в таблице 1, можно сделать вывод о том, что поток CO₂, а также количество световой энергии, приходящейся на освещаемую поверхность культиватора, оказывают влияние на продукционные характеристики *P. purpureum*. Значение μ_m для варианта В составило 0,55 сут⁻¹. С ростом облучённости в 2 раза эта величина достигла 0,59 сут⁻¹. Согласно [12], в экспоненциальной фазе роста единственным лимитирующим фактором является световой поток, так как минерального и газового субстрата ещё достаточно для роста клеток. По-видимому, в варианте С, при 17 Вт·м⁻² и 0,5 л·(л·мин)⁻¹ потока CO₂ было недостаточно для достоверного экспоненциального роста культуры, линейная фаза начиналась с первых суток эксперимента. Следует отметить, что по [13], насыщающая облучённость, при которой удельная скорость роста достигает максимума 0,08 – 0,09 ч⁻¹, составляет около 50 Вт·м⁻² для *P. purpureum*. В проведённом эксперименте для варианта А поверхностная облучённость была в 1,5 раза меньше, чем насыщающая, однако полученное значение μ_m , равное 0,02 ч⁻¹ в 4 раза меньше, чем указано в [13]. Отметим, что максимальные скорости могут быть реализованы только при условии стабилизации биохимического состава клеток в плотносте. Для накопительной культуры с ростом плотности микроводорослей происходит изменение пигментного и биохимического состава клеток. Эти изменения вызваны метаболическим [14], либо энергетическим лимитированием продуктивности [15].

В линейной фазе роста лимитирующими факторами являются свет или углекислый газ [12]. Так в варианте С, при 17 Вт·м⁻², максимальная скорость роста культуры была ограничена потоком углерода, её значение составило 0,29 г СВ·(л·сут)⁻¹. С увеличением интенсивности света (в 2 раза) и скорости продувки воздуха (в 2 раза) в варианте А значение максимальной продуктивности возросло почти в 2 раза до 0,57 г СВ·(л·сут)⁻¹. Наблюдаемое увеличение может быть объяснено как увеличением концентрации углерода в среде (в результате увеличения объёма подаваемого воздуха), так и повышенным поглощением CO₂ культурой с ростом

Таблица 1. Продукционные характеристики накопительной культуры *P. purpureum* при различном световом и углеродном обеспечении

| Варианты | μ_m , сут ⁻¹ | P_m , г СВ·(л·сут) ⁻¹ |
|----------|-----------------------------|------------------------------------|
| А | 0,59 | 0,57 |
| В | 0,55 | 0,42 |
| С | – | 0,29 |

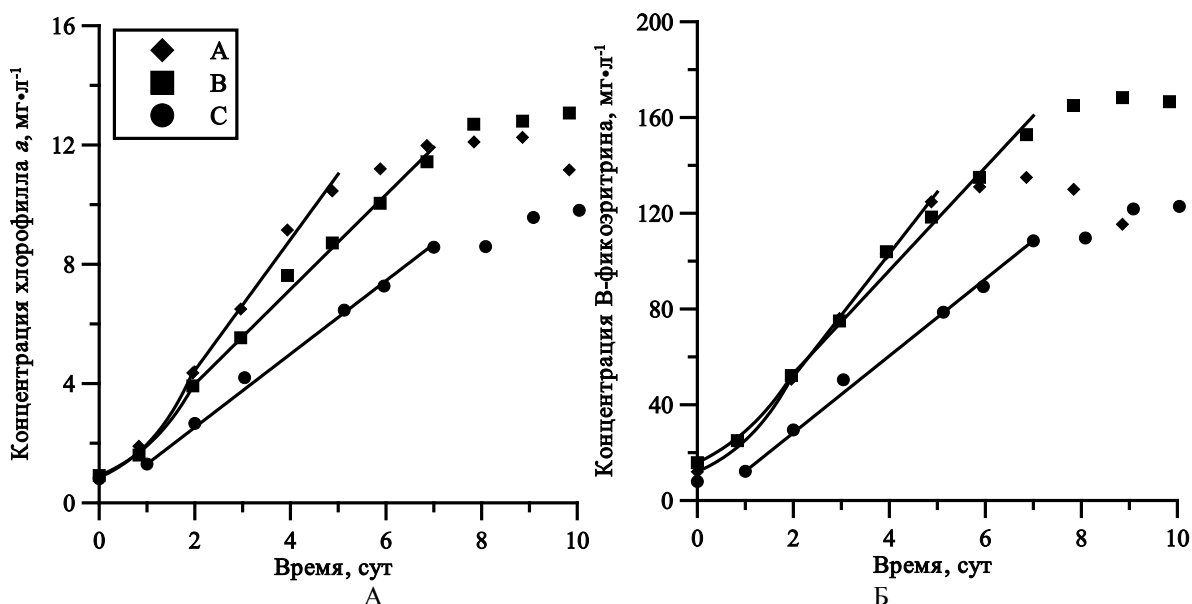


Рисунок 3. Динамика концентрации хлорофилла *a* (А) и В-фикоэритрина (Б) накопительной культуры *P. purpureum*. Сплошные линии – аппроксимации экспоненциальной (0–2 сутки) и линейной (2–7 сутки) фаз. Значения коэффициентов в таблице 2

интенсивности света. Известно, что некоторые виды микроводорослей [16] накапливают биогенные элементы в избытке (фосфор, углерод и т.д.) в своих внутриклеточных пулах для их последующего использования в период лимитирования. Однако при более высокой концентрации углекислого газа скорость биофиксации CO₂ снижается, поскольку среда для культивирования становится более кислой и неблагоприятной для роста микроводорослей, что приводит к тому, что микроводоросли оказываются в неблагоприятных условиях окружающей среды.

Согласно предложенным ранее базовым принципам моделирования роста культур микроводорослей [17], скорость синтеза биомассы в простейшем случае прямолинейно зависит от количества квантов света, поступающих на одну молекулу ключевого комплекса за время его оборота. Это обусловлено тем, что при увеличении концентрации клеток в фотобиореакторе происходит затенение одних клеток другими, что приводит к уменьшению количества поглощаемой световой энергии на клетку. Таким образом, скорость роста будет определяться поверхностной освещённостью культуры, её оптической плотностью и коэффициентом поглощения света. В свою очередь коэффициент поглощения определяется спектральными свойствами источника света и концентрацией светопоглощающих пигментов. На рисунке 3 представлена динамика концентрации фотосинтетических пигментов накопительной культуры *P. purpureum*. Начальная концентрация хлорофилла *a* во всех опытных вариантах составляла примерно 0,8 мг·л⁻¹, В-фикоэритрина – 7,9 мг·л⁻¹.

По данным таблицы 2 можно сказать, что характер изменения концентрации хлорофилла *a* и В-фикоэритрина при варьировании света и потока CO₂ аналогичен изменению биомассы *P. purpureum*. В случае варианта С, где скорость потока CO₂ была минимальна, продукция хл *a* и В-ФЭ была также минимальна: 1,23 и 16,06 мг·(л·сут)⁻¹ соответственно. При увеличении интенсивности света и потока углекислого газа в 2 раза, P_m для хл *a* в варианте А увеличилась в 1,8 раз, а для В-ФЭ – в 1,6 раз. Следует отметить, что на 5 сутки эксперимента в варианте А концентрация обоих пигментов начала уменьшаться, в то время как, в В и С после 6 суток концентрация пигментов не изменялась, что соответствует стационарной фазе. Это может быть связано с тем, что из-за большей интенсивности света (33 Вт·м⁻²) и скорости подачи углерода (1 л·л⁻¹ культуры в минуту) запас азота в среде был уже исчерпан, что подтверждается литературными данными [6].

Относительное содержание пигментов в клетках или биомассе микроводорослей является не только непостоянной величиной и может изменяться в десятки раз, но и характеризуется значительной нелинейностью в процессе роста культуры. Кроме того, постоянство продуктивности культуры обусловлено гиперболическим уменьшением содержания хлорофилла *a* [18]. На рисунке 4 представлена динамика содержания хлорофилла *a* и В-фикоэритрина для разных опытных вариантов. Содержание хлорофилла *a* (рис. 4А) во всех опытных вариантах

Таблица 2. Максимальная удельная скорость синтеза и продукция фотосинтетических пигментов культуры *P. purpureum* при различном световом и углеродном обеспечении

| Вариант | Хлорофилл <i>a</i> | | В-фикоэритрин | |
|---------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
| | μ_m , сут ⁻¹ | P_m , мг·(л·сут) ⁻¹ | μ_m , сут ⁻¹ | P_m , мг·(л·сут) ⁻¹ |
| А | 0,83 | 2,20 | 0,74 | 25,71 |
| В | 0,74 | 1,58 | 0,60 | 21,52 |
| С | – | 1,23 | – | 16,06 |

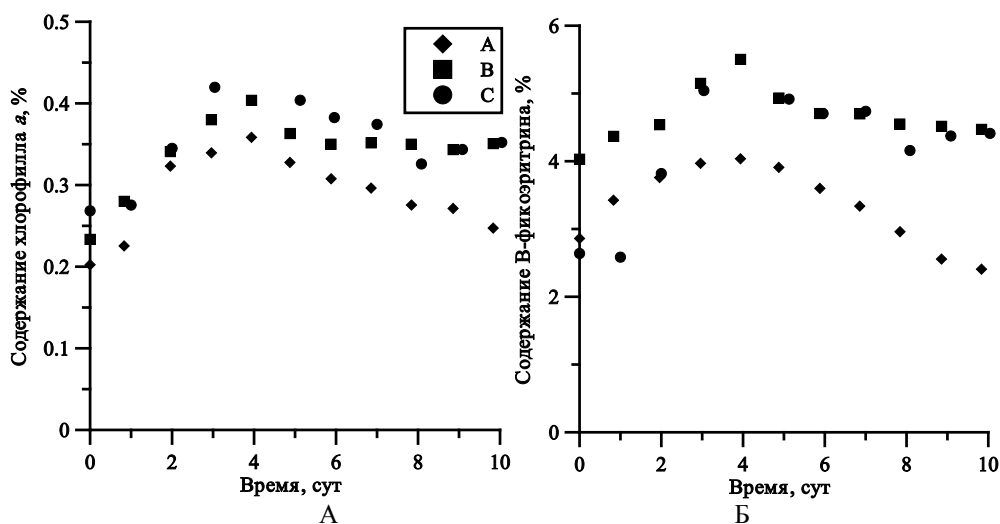


Рисунок 4. Динамика относительного содержания хлорофилла *a* и В-фикоэритрина в накопительной культуре *P. purpureum*

на 3–4 сутки эксперимента (начало линейной фазы роста) достигло максимального значения: в варианте А – 0,36%; в В – 0,40%; в С – 0,42%. В случае В и С, доля хлорофилла *a* от сухой биомассы далее стабилизировалась на уровне 0,35%, а в варианте А при 33 Вт·м⁻² наблюдается резкое снижение до значения 0,25%. В случае варианта С на 0–3 сутки наблюдается резкий скачок содержания В-фикоэритрина с 2,58 до 5,04% (рис. 4Б). В вариантах В и А максимум наступил на 4 сутки и составил 5,50% и 4,04% соответственно. При 33 Вт·м⁻² (А) наблюдается резкое снижение доли В-фикоэритрина с 4,04 до 2,41%. Это связано с переходом культуры на стадию замедления роста и стационарную, где концентрация основных биогенных элементов в питательной среде, по-видимому, была исчерпана. То есть, можно сказать, что при большом количестве света (33 Вт·м⁻²), а также при наличии потока углерода, значения содержания хлорофилла *a* и В-фикоэритрина меньше, чем при 17 Вт·м⁻², и при достижении своего максимума идёт на постепенное снижение. Также следует отметить, что при световом лимитировании наличие СО₂ не оказывает существенного влияния на содержание хл *a* и В-ФЭ. Признано, что содержание в клетках *P. purpureum* фотосинтетических пигментов, особенно В-ФЭ, ввиду его локализации в антеннах, может являться чувствительным индикатором уровня освещённости клеток [19,20]. Снижение содержания В-ФЭ, входящего в светособирающие комплексы ФС II, в клетках *P. purpureum* к 4-м суткам в варианте А с повышенной интенсивностью света до крайне низких величин на фоне остановки роста культуры, указывает на серьёзные нарушения процессов биосинтеза в клетках, что может приводить даже к гибели культуры. Повышение освещённости вместе с лимитом азота вызывает снижение относительного содержания светособирающего пигмента-белка.

Изменение световых условий и углеродного обеспечения в культуре *P. purpureum* отражалось не только на содержании фотосинтетических пигментов в биомассе, но и соотношении В-фикоэритрина и хлорофилла *a* (рис. 5).

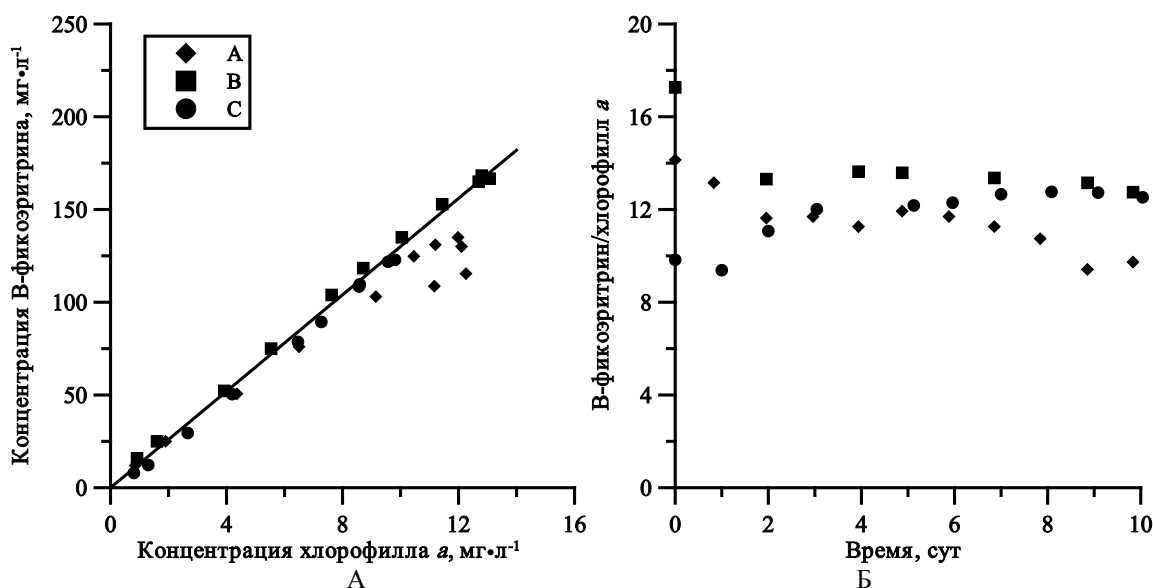


Рисунок 5. А – Зависимость концентрации В-фикоэритрина от хлорофилл *a*; Б – динамика соотношений В-ФЭ/хл *a* накопительной культуры *P. purpureum*

Показано, что в проведённом эксперименте зависимости содержания В-ФЭ от концентрации хл *a* культуре *P. purpureum* имеют линейный характер для всех вариантов. Анализируя рисунок 5Б, можно отметить, что в области линейной фазы роста (2–8 сутки) в опытных вариантах В и С, т. е. при 17 Вт·м⁻², соотношение В-ФЭ/хл *a* существенно не изменяется. В варианте С эта величина составляет 12,27, а при увеличении потока углекислого газа в 2 раза (вариант В) – 13,30. С увеличением освещённости до 33 Вт·м⁻² (вариант А) наблюдается постепенное понижение соотношения В-ФЭ/хл *a* после 6-х суток эксперимента, что совпадало с переходом культуры на стационарную фазу роста и исчерпанием нитратов в среде. Полученные результаты подтверждают сведения о том, что В-ФЭ у *P. purpureum* является более чувствительным к изменяющимся условиям среды, особенно к содержанию азота, по сравнению с более стабильным хл *a*, а увеличение концентрации углерода в среде приводит к повышению уровня данного пигмента [19,21].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано влияние интенсивности света и скорости потока углекислого газа на концентрацию хлорофилла *a* и В-фикоэритрина в накопительной культуре *P. purpureum*. Показано, что при 17 Вт·м⁻² и скорости подачи воздуха 1 л·л⁻¹ культуры в минуту наблюдается более высокая скорость синтеза и продукция пигментов, по сравнению с другими опытными вариантами. При высокой интенсивности света на линейной фазе роста наблюдается уменьшение содержания хл *a* и В-ФЭ в биомассе в то время, как при световом лимитировании эта величина практически не изменяется. Следует отметить, что соотношение В-ФЭ/хл *a* при различном световом и углеродном обеспечении в проведённом эксперименте практически не изменяется и в среднем составляет 12,8.

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.

Список литературы / References:

1. Cunningham F.X., Dennenberg R.J., Mustardy L., Jursinic P.A., Gantt E. Stoichiometry of photosystem I, photosystem II, and phycobilisomes in the red alga *Porphyridium cruentum* as a function of growth irradiance. *Plant Physiol.*, 1989, vol. 91, no. 3, pp. 1179-1187, doi: 10.1104/pp.91.3.1179.
2. Lestari Retno A.S., Nurlaili E.P., Priyono K. The effect of carbon dioxide concentration and the dimension of photobioreactor on the growth of microalgae *Nannochloropsis sp.* *AIP Conference*, 2019, vol. 2097, p. 030109, doi: 10.1063/1.5098284.
3. Боровков А.Б., Гудвилевич И.Н., Новикова Т.М., Климова Е.В. Продукционные характеристики полупроточной культуры *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew et Ross при низкой освещённости. *Морской биологический журнал*, 2022, т. 7, № 1, с. 3-13. [Borovkov A.B., Gudvilovich I.N., Novikova T.M., Klimova E.V. Production characteristics of the semi-flowing culture *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew et Ross under normal illumination. *Marine Biological Journal*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 3-13, doi: 10.21072/mbj.2022.07.1.01. (In Russ.)]
4. Заворуева Е.Н., Заворуев В.В., Крум С.П. Лабильность первой фотосистемы фототрофов в различных условиях окружающей среды. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011, 152 с. [Zavogueva E.N., Zavoruev V.V., Krum S.P. *Lability of the first photosystem of phototrophs under various environmental conditions*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2011, 152 p. (In Russ.)]
5. Xu Y., Shanshan W., Shengxin N., Jinglong L. A study on the synthesis and accumulation of phycoerythrin in *Porphyridium purpureum*. *AIP Conference*, 2019, vol. 2110, p. 020028, doi: 10.1063/1.5110822.
6. Гудвилевич И.Н., Лелеков А.С., Мальцев Е.И., Куликовский М.С., Боровков А.Б. Рост культуры *Porphyridium purpureum* (*Porphyridiales, Rhodophyta*) и продукция В-фикоэритрина при различной освещённости. *Физиология растений*, 2021, т. 68, № 1, с. 103-112. [Gudvilovich I. N., Lelekov A. S., Maltsev E. I., Kulikovskiy M. S., Borovkov A. B. Growth of *Porphyridium purpureum* (*Porphyridiales, Rhodophyta*) culture and production of В-phycoerythrin under different illumination. *Physiology of plants*, 2021, vol. 68, no. 1, pp. 103-112, doi: 10.31857/S0015330320060056. (In Russ.)]
7. 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. *Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Biological Sciences Series*, 1981, vol. 5, no. 1, pp. 75-82. (In Russ.)]
8. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. Киев: Наук. думка, 1975, 247 с. [Methods of physiological and biochemical study of algae in hydrobiological practice. Kyiv: Nauk. Dumka, 1975, 247 p. (In Russ.)]
9. Стадничук И.Н. Фикобилипротеины. *Биологическая химия*. М.: Мир, 1990, 196 с. [Stadnichuk I.N. *Phycobiliproteins. Biological chemistry*. M.: Mir, 1990, 196 p. (In Russ.)]
10. Jeffrey S.W., Mantoura R.F.C., Wright S.W. *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods*, UNESCO, 1997, 661 p.
11. Упитис В.В., Пакалне Д.С., Шульце И.Ф. Оптимизация минерального питания красной морской водоросли *Porphyridium cruentum*. *Известия АН Латвийской ССР*, 1989, т. 505, № 8, с. 95-104. [Upitis V.V.,

- Pakalne D.S., Schulce I.F. Optimization of the mineral nutrition of the red seaweed *Porphyridium cruentum*. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Latvian SSR*, 1989, vol. 505, no. 8, pp. 95-104. (In Russ.)
12. 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.)]
13. Белянин В.Н., Сидько Ф.Я., Тренкеншу А.П. *Энергетика фотосинтезирующей культуры микроводорослей*. Новосибирск: Наука, 1980, с. 136. [Belyanin V.N., Sidko F.Ya., Trenkenshu A.P. *Energy of photosynthetic microalgae culture*. Novosibirsk: Science, 1980, 136 p. (In Russ.)]
14. Sanchez-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.
15. Sathong S., Saego K., Kitrunloadjanaporn P., Nuttavut N. Modeling the effects of light sources on the growth of algae. *Sathong et al. Advances in Difference Equations*, 2019, doi: 10.1186/s13662-019-2112-6.
16. Liang Y., Sarkany N., Cui Y. Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. *Biotechnology Letters*, 2009, vol. 31, pp. 1043-1049, doi: 10.1007/s10529-009-9975-7.
17. 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.)]
18. Лелеков А.С., Чернышев Д.Н., Ключкова В.С. Количественные закономерности роста накопительной культуры *Arthrospira platensis*. *Математическая биология и биоинформатика*, 2022, т. 17, № 1, с. 156-170. [Lelekov A.S., Chernyshev D.N., Klochkova V.S. Quantitative patterns of growth of the accumulative culture *Arthrospira platensis*. *Mathematical biology and bioinformatics*, 2022, vol. 17, no. 1, pp. 156-170. (In Russ.)]
19. Velea S., Ilie L., Filipescu L. Optimization of *Porphyridium purpureum* culture growth using two variables experimental design: light and sodium bicarbonate. *U.P.B. Sci. Bull. Univ. "Politeh." Bucharest, Ser. B*, 2011, vol. 73, p. 81.
20. Algarra P., Ruediger W. Acclimation processes in the light harvesting complex of the red alga *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew et Ross, according to irradiance and nutrient availability. *Plant Cell Environ.*, 1993, vol. 16, p. 149, doi: 10.1111/j.1365-3040.1993.tb00856.x.
21. Li T., Xu J., Wu H., Jiang P., Chen Z., Xiang W. Growth and Biochemical Composition of *Porphyridium purpureum* SCS-02 under Different Nitrogen Concentrations. *Mar. Drugs*, 2019, vol. 17, p. 124, doi: 10.3390/md17020124.

DYNAMICS OF THE CONCENTRATION OF CHLOROPHYLL A AND B-PHYCOERYTHRIN IN CULTURE *PORPHYRIDIVM PURPUREUM* IN CONDITIONS OF LIGHT AND CARBON LIMITATION

Klochkova V.S.¹, Lelekov A.S.², Gudvilovich I.N.²

¹ Sevastopol State University

33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia; e-mail: viki-iki@mail.ru

² Federal Research Center A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of the RAS

Nachimov av., 2, Sevastopol, 299011, Russia

Received 30.07.2022. DOI: 10.29039/rusjbp.2022.0556

Abstract. The effect of light intensity and carbon flux on the production of chlorophyll a and B-phycoerythrin, as well as their ratios in the batch culture of *Porphyridium purpureum*, has been studied. It is shown that with an increase in light intensity (by 2 times) and air supply speed (by 2 times), the value of maximum productivity increases by almost 2 times, the concentration of chl a – by 1.8 times, and B-PE – by 1.6 times. The content of chlorophyll a and B-phycoerythrin in all experimental variants on the 3rd – 4th day of the experiment (the beginning of the linear growth phase) reached the maximum value. With light limiting, the content of chl a and B-PE in the biomass does not change, however, with high light intensity, a decrease is observed in the linear growth phase. The ratio of B-PE/chl a with different light and carbon support in the experiment practically does not change and averages 12.8.

Key words: *porphyridium, chlorophyll a, B-phycoerythrin, concentration, ratio of pigments, light intensity, carbon dioxide.*