

Московское общество
испытателей природы
Секция гидробиологии
и ихтиологии

Московский государственный
университет имени
М. В. Ломоносова
Кафедра гидробиологии

БИОЛОГИЯ СИНЕ-ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРОСЛЕЙ

Под редакцией В. Д. Федорова и М. М. Телитченко

II

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
1969

85.

В. Е. Семенов, М. Г. Владимирова,
Н. И. Райков, *М. А. Игнатъевская

ИНТЕНСИВНАЯ КУЛЬТУРА ANACYSTIS NIDULANS

Сине-зеленые водоросли уже давно интересуют исследователей благодаря ряду особенностей: высокой термоустойчивости (Еленкин, 1936), промежуточному, по ряду признаков, положению между водорослями и бактериями (Голлербах, Куки, 1946), способности некоторых видов к фиксации азота атмосферы (Fogg, 1962; Штина, 1965), а также в связи с существенной ролью в трофике искусственных водоемов и особенно водохранилищ (Приймаченко, 1960; Телитченко, Гусев, 1964).

В последние годы интерес к изучению сине-зеленых водорослей возрос в связи с новыми возможными аспектами их применения: для удобрения (альгализации) почв и рисовых полей (Venkataraman, 1961; Штина, 1964; De Mangel, 1965; Мишустин, 1966), для использования в замкнутых экологических системах (Biget, 1962).

В связи с этим, естественно, встал вопрос и о массовых культурах сине-зеленых водорослей (Watanabe, 1959; Феоктистова, 1965; Смирнова и др., 1966). Определенный интерес представляет также изучение возможности выращивания сине-зеленых водорослей в условиях интенсивной культуры по типу культуры одноклеточных протококковых водорослей (Владимирова, Семенов, 1962; Ничипорович и др., 1962; Владимирова, 1966; Владимирова, Игнатъевская, Райков, 1966). При этом возникает ряд трудностей, связанных с выращиванием нитчатых и колониальных форм, имеющих к тому же сложный (по сравнению с протококковыми) цикл развития. Кроме того, некоторые опасения, с точки зрения возможности получения интенсивной культуры, вызывали данные по физиологии сине-зеленых водорослей, в частности ука-

зания на низкие насыщающие фотосинтез интенсивности света (Halldal, 1957), что может быть связано с иным пигментным комплексом сине-зеленых водорослей и его более низкой фотостойчивостью по сравнению с зелеными растениями.

Учитывая вышесказанное, для изучения физиологических особенностей интенсивной культуры сине-зеленых водорослей в качестве объекта исследования был взят наиболее простой представитель этой группы *Anacystis nidulans* — не фиксирующая свободный азот, одно-, четырехклеточная форма с простым, видимо, циклом развития.

Используемый штамм *A. nidulans*-625 был получен в 1962 г. от профессора Прата (Чехословацкая Академия наук) из коллекции автотрофных организмов и поддерживается в лаборатории в условиях коллекции на агаризованной среде № 6 Биологического института ЛГУ и на среде Кратца—Майерса, жидкой и агаризованной.

Исходя из представлений о сопряженном влиянии всех факторов среды на рост водорослей и о необходимости создания режима высокой напряженности (высокого уровня) этих факторов для получения интенсивной культуры водорослей индустриального типа (Владимирова, Семененко, 1962; Владимирова, Семененко, Ничипорович, 1962; Владимирова, 1966), для культивирования *A. nidulans* были приняты условия высоких температур, высокой интенсивности света, концентрации элементов минерального питания, снабжения углекислотой.

Поскольку известные максимальные температуры для выращивания *A. nidulans* лежат в пределах до 41° (Halldal, 1957; Biget, 1962), от 37 до 40° интенсивность света варьировала в зависимости от способа выращивания от $39 \cdot 10^3$ эрг/см²·сек до $580 \cdot 10^3$ эрг/см²·сек. Освещение культуры круглосуточное. Углекислота подавалась непрерывно в смеси с воздухом (1,5—1,8% CO₂ + воздух), который барботировался через культуру со скоростью от 60 до 208 л/мин суспензии в час, в зависимости от способа культивирования. Выращивание проводили на концентрированных питательных средах, возможность чего была показана в специальных опытах (Игнатъевская, Райков, 1967). Применяли модифицированную среду Тамия (с заменой KNO₃ на NaNO₃) и 400%-ную среду «Д» Кратца—Майерса, также с NaNO₃. Количество азота в среде составляло соответственно, 0,8 и 0,7 г/л среды. Водоросли выращивали в культиваторах трех типов: 1) в сосудах для лабораторной интенсивной культуры (Владимирова, Семененко, 1962; они же и Ничипорович, 1962) с применением люминесцентных ламп БС-30, ртутно-дуговых люминесцентных ламп ДРЛ-750 и ксеноновой трубчатой лампы ДКСТ-6000; 2) в полупроизводственной установке с реактором ротационного типа и освещением лампами ДРЛ-750 и

ДРЛ-1000; 3) в камере из органического стекла с плоскопараллельными стенками и освещением ксеноновой лампой (или двумя лампами) ДКСТ-6000.

Измерения освещенности проводили с помощью люксметра Ю-16, проградуированного в энергетических единицах индивидуально для каждого источника света.

О росте культуры судили по изменению оптической плотности суспензии на ФЭКМ-54 с оранжевым фильтром; по прямым измерениям сухого вещества (после центрифугирования и высушивания в бюксах при $+80^{\circ}$); по потреблению из среды нитратов (колориметрически, с сульфо-феноловым реактивом) и по накоплению общего азота в биомассе водорослей (по Кьельдалю).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Рост *Anacystis nidulans* в различных условиях интенсивной культуры

Как было показано (Владимирова, Кузнецов, 1964; Владимирова и др., 1966), у культуры хлореллы в условиях, обеспечивающих различную степень интенсификации наблюдается как различный темп роста водоросли, так и соответствующее интенсивности роста увеличение выноса азота из среды и накопления его в биомассе.

Опыты по выращиванию *A. nidulans* в условиях интенсивной лабораторной культуры (Владимирова и др., 1966; Игнатъевская, Райков, 1967) показали, что водоросли могут в этих условиях как на модифицированной среде Тамия, так и на четырехкратной среде «Д» Кратца — Майерса (Игнатъевская, Райков, 1967) давать продуктивность, сравнимую с таковой для одного из лучших штаммов хлореллы.

На рис. 1 приведены кривые накопления сухого веса растущими культурами *A. nidulans* в зависимости от условий культивирования (от культиватора и от состава среды). Из рисунка видно, что в одних и тех же условиях накопительного режима выращивания культура имеет близкую продуктивность как на среде Тамия с NaNO_3 , так и на 400%-ной среде «Д» Кратца—Майерса. Но темп накопления биомассы различается в зависимости от того, выращивается ли водоросль в сосуде, реакторе или камере.

Изменение рН среды на обеих средах и при всех условиях выращивания (рис. 2) имело одинаковый характер, стабилизируясь в процессе роста культур на уровне 8,0—8,5. Скорость изменения рН зависела от начального рН и от темпа роста культуры (в камере, соответственно росту, рН 8,5, в отдельных опытах до 9,0, достигался за двое суток).

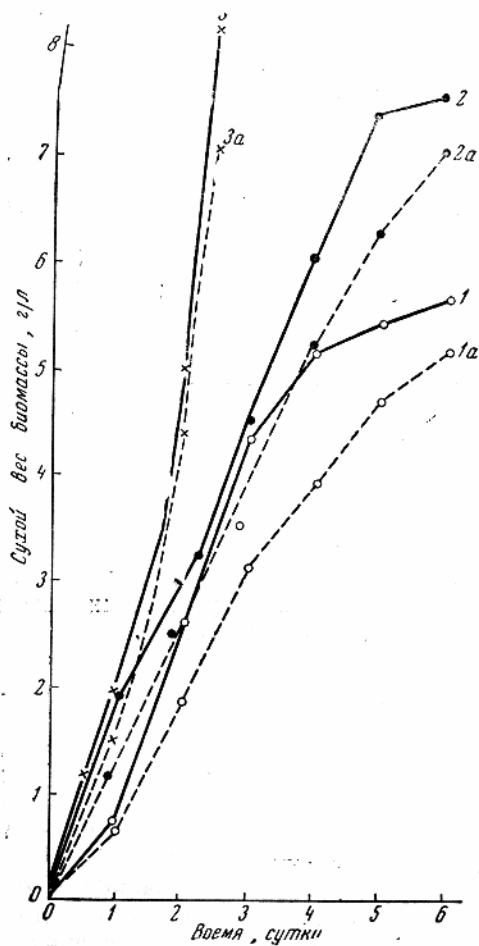


Рис. 1. Продуктивность культуры *A. nidulans* в зависимости от условий культивирования и от состава среды: 1, 1a — выращивание в культуральных сосудах; 2, 2a — выращивание в реакторе ротационного типа; 3, 3a — выращивание в тонкослойной камере с ксеноновой лампой; 1, 2, 3 — выращивание на среде Тамия с NaNO_3 ; 1a, 2a, 3a — на среде «Д» Кратца — Майерса (400%)

Определение нитратного азота в среде в различных условиях выращивания показало (табл. 1), что интенсификация, так же как и в культурах хлореллы, проявляется не только

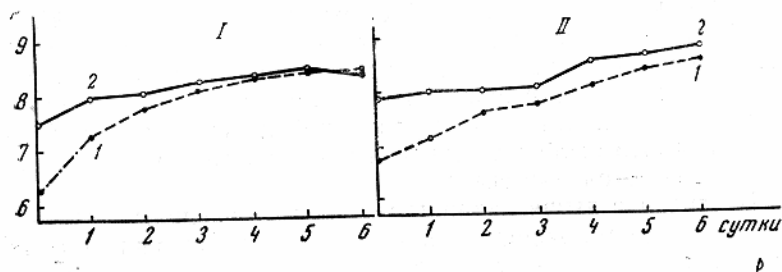


Рис. 2. Изменение pH среды по ходу роста *A. nidulans* в условиях интенсивной культуры: I — в сосудах; II — в реакторе; 1 — на среде Тамия с NaNO_3 ; 2 — на среде Кратца — Майерса «Д» (400%)

в повышении продуктивности, но и в потреблении большего количества нитратного азота на единицу биомассы.

Таблица 1

Скорость накопления биомассы и потребления нитратного азота культурой *Anacystis nidulans* в зависимости от условий выращивания

Условия выращивания		Среднесуточный прирост биомассы, г/л	Вывос азота, мг сухого веса
Культиватор	Среда		
Сосуды	Кратца—Майерса	1,01	0,079
	Тамия с NaNO_3	1,20	0,063
Реактор	Кратца —Майерса	1,31	0,139
	Тамия с NaNO_3	1,40	0,100

Интересно отметить, что на вынос нитратного азота оказали влияние не только факторы, определяющие степень интенсификации роста культуры (форма культиватора, интенсивность света и характер его распределения в суспензии, способ перемешивания и т. д.), но и состав питательной среды. Так, на среде Тамия потреблялось меньшее количество азота на единицу биомассы, чем на среде Кратца—Майерса, как при выращивании в сосудах, так и в реакторе (см. также ниже, рис. 3), хотя, как видно из рис. 1, табл. 1, а также рис. 3, продуктивность в этих вариантах или близка или даже выше на среде Тамия.

Таким образом, на основании проведенных опытов можно видеть с одной стороны, что применение различных мето-

дов культивирования определяет интенсивность роста культуры. Можно было предполагать, что в первую очередь это определяется интенсивностью падающего света и способом его распределения в суспензии, т. е. средней облученностью клетки в культуре. С другой стороны, в зависимости от условий культивирования, находится и метаболизм водорослей, интенсивность потребления азота из среды, что одновременно зависит и от состава применяемой среды. Эти результаты могут определяться как различной интенсивностью света, так и тем, что были использованы различные по качественному составу источники света.

В связи с вышесказанным были проведены опыты по сравнению роста водорослей в зависимости от качественного состава света и серии опытов по изучению зависимости роста *A. nidulans* от интенсивности света.

2. Продуктивность и потребление азота *Apacystis nidulans* на источниках света разного качественного состава

Для изучения этого вопроса культуру *A. nidulans* выращивали в одинаковых по форме культиваторах (в сосудах) на среде Тамия с NaNO_3 и на среде Кратца—Майерса «Д» (400%). В качестве источников света использовали как и ранее люминесцентные лампы БС-30, ДРЛ-750 и ДКСТ-6000, различающиеся по спектру излучения. Облученность на поверхности сосудов была одинакова во всех вариантах и равнялась $39 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$.

Как видно из рис. 3, рост культуры на всех трех источниках света и на обеих средах практически одинаков и находится на уровне продуктивности, характерном для *A. nidulans*, выращиваемом в сосудах на люминесцентных лампах (см. также рис. 1).

Таким образом, очевидно, что наиболее существенная роль при интенсификации роста *A. nidulans* в данном случае должна быть отведена количеству света, падающего на каждую клетку водоросли.

Некоторое влияние спектрального состава света можно видеть в данных по содержанию общего азота в биомассе водорослей (рис. 3, столбики). По этому признаку культуры, выращенные на ксеноновой лампе на обеих средах резко отличаются от культур, росших на люминесцентных лампах БС и ДРЛ. У культур на люминесцентных лампах максимальное содержание азота 0,046 г, а на ксеноновой лампе — 0,06 на 1 г биомассы. С другой стороны, при выращивании на лампах БС и ДРЛ некоторые различия в содержании азота обнаруживаются не столько от источников света, сколько

от применяемой среды. Так из данных рис. 3, так же как и из приведенных ранее (табл. 1), видно, что при использовании среды Тамия на обоих видах люминесцентных ламп в биомассе накапливается несколько меньшее количество азота, чем на среде Кратца—Майерса. В то же время различия в

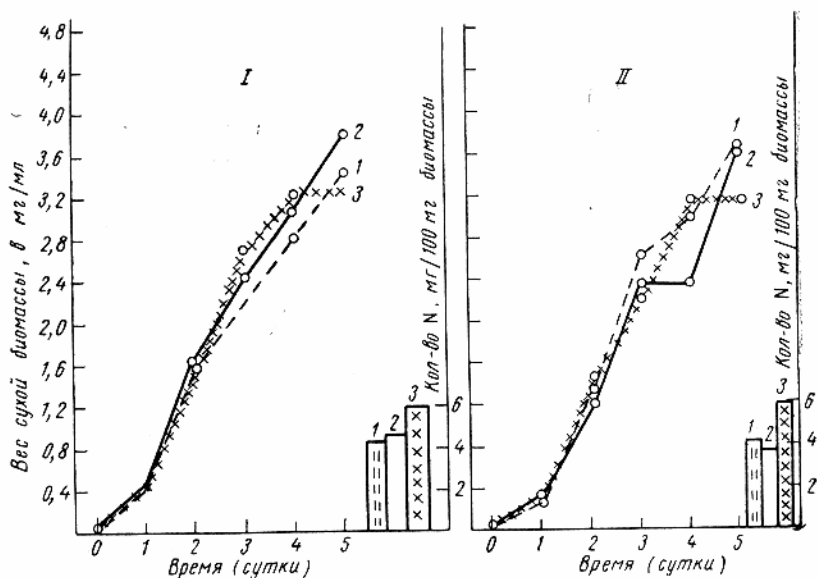


Рис. 3. Продуктивность и накопление азота в биомассе при культивировании *A. nidulans* на разных источниках света (1, 2, 3) и на разных питательных средах (I, II):

I — на среде Кратца—Майерса «Д» (400%); II — на среде Тамия с NaNO₃; 1 — на люминесцентных лампах БС-30; 2 — на лампе ДРЛ-750; 3 — на ксеноновой лампе ДКСТ-6000

люминофорах этих ламп также играют некоторую роль в связи с применяемой средой. Если на люминесцентных лампах БС-30 уровень накопления азота почти одинаков на обеих средах и соответствует 0,042—0,044 г биомассы, то на ДРЛ-750 эти различия довольно заметны: на среде «Д» в 1 г биомассы содержится 0,046 г, а на среде Тамия — 0,039 г азота.

Рассмотрение полученных данных показывает, что наиболее существенным фактором в интенсификации роста культуры *A. nidulans* является, видимо, увеличение интенсивности света, а также толщина слоя суспензии и конструкция культиватора, определяющих распределение света в культуре и величину облученности каждой клетки.

3. Рост водорослей в условиях интенсивной культуры в зависимости от интенсивности света

Как показали опыты, культура *A. nidulans*, аналогично хлорелле, поддается интенсификации. Наиболее высокие показатели продуктивности получены (см. рис. 1) при выращивании в камере с тонким слоем суспензии с ксеноновой лампой, т. е. в условиях, при которых были получены наиболее

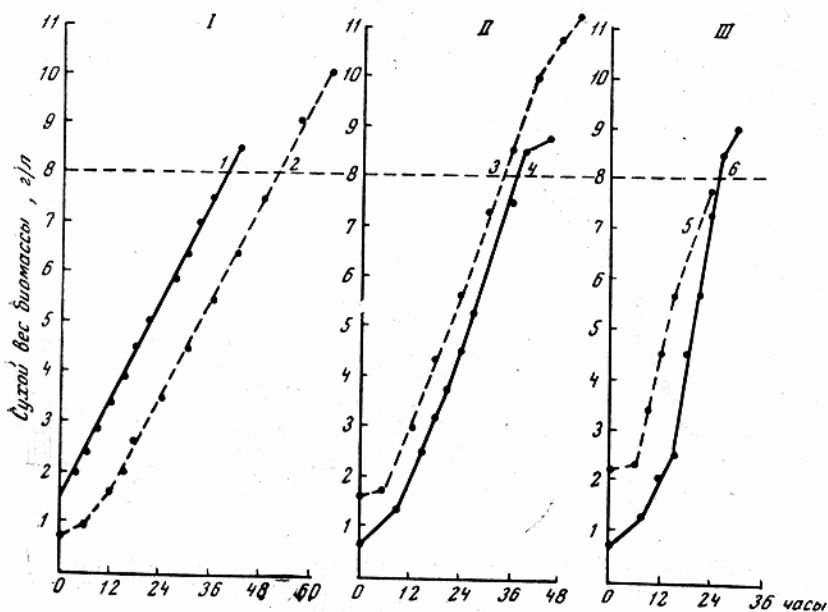


Рис. 4. Скорость накопления биомассы культурой *A. nidulans* в зависимости от интенсивности освещения, при выращивании в камере из оргстекла с тонким слоем суспензии и освещением от мощной ксеноновой лампы ДКСТ-6000:

I—1 и 2 — рост культур при $280 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$; 1 — на среде Тамия; 2 — на среде Кратца — Майерса; II. 3 — рост культуры при постоянной освещенности $505 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$; 4 — при постепенном увеличении облученности от $280 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ до $505 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$; III — рост культуры при высоких интенсивностях света: 1 — при постоянной освещенности $580 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$; 2 — при постепенной адаптации к большим освещенностям от $280 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$ до двухстороннего освещения камеры с интенсивностью $505 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2\text{сек}$

высокие выходы фотосинтетической продуктивности хлореллы (Семененко и др., 1966). Однако для хлореллы высокие выходы биомассы (10—11 г/л суспензии в сутки) при культивировании в камере с ксеноновой лампой в накопительном режиме были получены при двустороннем освещении при интенсивности падающего на каждую из поверхностей света

420 · 10³ эрг/см² · сек (Владимирова, Игнатъевская, Райков, 1966).

У *A. nidulans*, как видно из рис. 1, несмотря на общую интенсификацию роста по сравнению с выращиванием в сосудах и в реакторе, содержание биомассы доходит до 8 г/л суспензии только после более чем 2 суток культивирования.

Рассмотренные в предыдущем разделе опыты привели к выводу, что достигнутая активация фотосинтетической продуктивности, видимо, прежде всего связана с увеличением интенсивности освещения. В связи с этим и с целью получения еще более высоких темпов роста были проведены опыты по культивированию *A. nidulans* при различных интенсивностях света. Выращивание проводили в условиях, обеспечивающих возможности широкого изменения диапазона освещенностей в плоскостенной камере с освещением ксеноновой лампой.

На рис. 4 и в табл. 2 приведены результаты этих опытов. Как видно из рис. 4, уже при облученности культуры 280 · 10³ эрг/см² · сек 8 г биомассы в 1 л суспензии накапливается за более короткий, чем было получено ранее, срок: 40—46 ч (в зависимости от величины засева). При 505 · 10³ эрг/см² · сек эта же продуктивность была достигнута за 34—38 ч культивирования, а при 580 · 10³ эрг/см² · сек или при 2 лампах, дающих освещенность с двух сторон по 505 · 10³ эрг/см² · сек — за 24 ч (см. табл. 2).

Таблица 2
Зависимость скорости роста культуры *Anacystis nidulans* от освещенности и от плотности суспензии при выращивании на ксеноновой лампе ДКСТ-6000 (в приросте сухого вещества за час: $\frac{\Delta P}{\Delta t}$)

Облученность на поверхности камеры эрг/см ² · сек · 10 ³	Прирост биомассы, г/л суспензии в ч	Плотность культуры, г биомассы/л суспензии	
		в начале опыта	в конце опыта
280	0,13	0,6	2,5
	0,15	2,4	6,0
	0,18	4,5	6,0
350	0,16	4,5	7,35
	0,18	1,25	2,5
	0,19	1,7	4,0
	0,23	2,5	5,25
505	0,23	4,8	6,7
	0,25	2,5	8,5
	0,24	4,5	7,35
	0,27	5,25	8,5
580	0,35	2,3	7,5

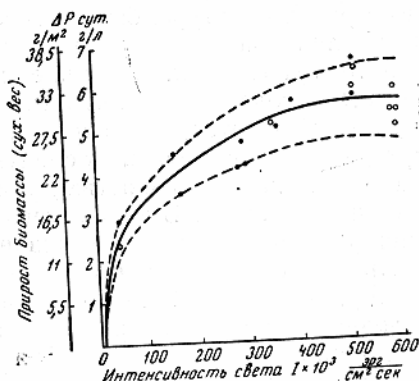


Рис. 5. Зависимость величины прироста биомассы (ΔP суточный) от интенсивности освещения культуры *A. nidulans* (при плотностях суспензии от 1 г/л и выше)

В табл. 2 и на рис. 5 приведены величины приростов, рассчитанные для различных опытов и при различном уровне

плотности культуры. В таблице указаны в каждом варианте взятые для расчета пределы плотности линейного участка роста культуры. Из рис. 5 видно, что величина прироста биомассы зависит от интенсивности света. Из таблицы, кроме того, видно, что при различных уровнях плотности суспензии темп роста культуры повышается при увеличении интенсивности света. Однако в пределах одной и той же освещенности при более низких концентрациях биомассы приросты, как правило, оказываются ниже, чем приросты при более высоком начальном содержании биомассы в среде, что свидетельствует о некотором подавлении роста культуры при высоких облученностях каждой клетки в случае разбавленных суспензий.

Таким образом, благодаря повышению интенсивности света на фоне нелимитированного снабжения углекислотой и элементами минерального питания, можно получать до 8 г биомассы с 1 л суспензии в сутки, что уже приближается к результатам, полученным в этих же условиях для *Chlorella* sp. K. За больший срок может быть получено до 11 г/л.

В то же время, в отличие от *Chlorella* sp. K., имеющей высокую продуктивность в большом диапазоне освещенностей (Владимирова и др., 1966), *A. nidulans* свойственна повышенная чувствительность и отрицательная реакция на высокие освещенности. Так, при освещенностях $505 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$ от одной или двух ламп (кривые 4 и 6 на рис. 4) высокий темп роста культуры был получен при постепенной адаптации к увеличивающимся интенсивностям света, начиная от $280 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$. В случае же освещения культуры сразу светом высокой интенсивности ($505 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^2 \cdot \text{сек}$, кривые 3 и 5) наблюдается, несмотря на высокую плотность культуры при засеве, лаг-фаза и последующий рост происходит с несколько меньшей скоростью, чем у культуры, адаптированной к сильному свету. В то же время следует отметить, что в наших условиях при более низких освещенностях никогда не наблюдалось отмечаемой некоторыми исследователями (Смирнова и др., 1966) длительной лаг-фазы, так же, как и в условиях перехода от режима накопительного культивирования к проточной культуре. Для правильной организации проточной интенсивной культуры *A. nidulans* необходимо специальное изучение пигментного комплекса в условиях интенсивного роста, так как в растущей культуре наблюдается выцветание фикоцианина и изменение цвета культуры от синезеленого к интенсивно-зеленому. Однако уже теперь удается повысить продуктивность культуры при переходе к проточному способу. Так, если в накопительном режиме прирост биомассы составлял 0,14, то в проточной культуре 0,21 г/л суспензии в час.

Таким образом, приведенные данные свидетельствуют о

возможности культивирования *A. nidulans* в плотных популяциях в интенсивном режиме с выходом биомассы близким к получаемым у протококковых (*Chlorella*). При этом перво-степенное значение для повышения продуктивности имеет оптимизация светового режима клеток.

INTENSIVE CULTURE OF ANACYSTIS NIDULANS

V. E. Semenenko, M. G. Vladimirova,
N. I. Raykov, M. A. Ignatevskaya

Summary

Growth, photosynthetic productivity and excretion of nitrogen were studied in the blue-green alga *Anacystis nidulans* in relation to light intensity and conditions of intensive cultivation. Experiments with an accumulative regime of cultivation show that the diurnal productivity of *A. nidulans* may approach values obtained for *Chlorella* grown under similar conditions: about 8g of dry biomass per litre of suspension. A light curve of the productivity of *A. nidulans* was taken and it was established that intensification of growth is determined mainly by the intensity of light.

It is shown that it is possible to grow the culture under conditions of very high light intensities, but a lesser photoresistance of *A. nidulans* was observed, as compared with *Chlorella* and it was found that the culture must be gradually adapted to highly intensive light.

ЛИТЕРАТУРА

- Владимирова М. Г. 1966. Изучение физиологических характеристик одноклеточных водорослей в условиях интенсивной культуры. Автореф. дисс. на соиск. уч. степени канд. биол. наук. М.
- Владимирова М. Г., Игнатъевская М. А., Райков Н. И. 1966. Характеристика продуктивности штаммов одноклеточных водорослей в условиях интенсивной лабораторной и полупроизводственной культуры». Сб. «Управляемый биосинтез». М., «Наука».
- Владимирова М. Г., Кузнецов Е. Д. 1964. Динамика изменений содержания азота и фосфора в среде в различных условиях интенсивного выращивания хлореллы. «Физиол. растений», 11, вып. 5.
- Владимирова М. Г., Семененко В. Е. 1962. Интенсивная культура одноклеточных водорослей. М., Изд-во АН СССР.
- Владимирова М. Г., Семененко В. Е., Жукова Т. С., Кованова Е. С. 1966. Сравнительное изучение зависимости роста и фотосинтетической продуктивности мезофильного и термофильного штаммов хлореллы от интенсивности света и температуры. Сб. «Управляемый биосинтез». М., «Наука».
- Владимирова М. Г., Семененко В. Е., Ничипорович А. А. 1962. Сравнительное изучение продуктивности различных форм одноклеточных водорослей. В сб.: «Пробл. космической биологии», 2. М., Изд-во АН СССР.

- Владимирова М. Г., Таутс М. И., Феохтистова О. И., Семеновенко В. Е. 1966. Некоторые физиологические особенности водорослей *Chlorella* в связи с их длительным интенсивным культивированием. Сб. «Биология автотрофных микроорганизмов». Изд-во МГУ.
- Голлербах М. М., Кукк Э. Г. 1964. Положение сине-зеленых водорослей в системе растительного мира и их филогенетические связи. В сб. «Биология сине-зеленых водорослей». Изд-во МГУ.
- Еленкин А. А. 1936. Сине-зеленые водоросли СССР. Общая часть. М.—Л., Изд-во АН СССР.
- Игнатъевская М. А., Райков Н. И. 1967. Влияние концентраций среды на физиологию *Anacystis nidulans* в условиях интенсивной культуры. «Физиол. растений», 14, вып. 2.
- Мишустин Е. Н. Роль сине-зеленых водорослей в повышении плодородия почвы. В сб.: «Современное состояние и перспективы изучения почв. водорослей в СССР». Тезисы докладов межвузовской конференции. Киров, 15—19 ноября 1966. Изд. Кировск. сельхоз. ин-та.
- Ничипорович А. А., Семеновенко В. Е., Владимирова М. Г. 1962. Интенсификация фотосинтетической продуктивности культуры одноклеточных водорослей. «Изв. АН СССР» сер. биол., 2.
- Приймаченко А. Д. 1960. Состав и основные закономерности распределения биомассы фитопланктона в водохранилищах рек СССР. «Тр. Ин-та биологии водохранилищ АН СССР», 3, 6. М., Изд-во АН СССР.
- Семеновенко В. Е., Владимирова М. Г., Цоглин Л. Н., Таутс М. М., Филипповский Ю. Н. и др. 1966. Непрерывное управляемое проточное культивирование водорослей и физиолого-биохимическая характеристика продуктивности и эффективности утилизации лучистой энергии хлореллой при длительном интенсивном ее выращивании. В сб.: «Управляемый биосинтез». М., «Наука».
- Смирнова М. Н., Ратушная М. Я., Канцелярук Р. М., Жарова Л. Г. 1966. Изучение роста и азотфиксации некоторых термофильных сине-зеленых водорослей. В сб.: «Управляемый биосинтез». М., «Наука».
- Телитченко М. М., Гусев М. В. 1964. Взаимоотношения некоторых сине-зеленых водорослей с бактериями, ракообразными и рыбами. В сб.: «Биология сине-зеленых водорослей». Изд-во МГУ.
- Феохтистова О. И. 1965. Сине-зеленые водоросли как объект массовой культуры. В сб.: «Экология и физиология сине-зеленых водорослей». М., «Наука».
- Штина Э. А. 1964. Роль сине-зеленых водорослей в почвообразовательных процессах. В сб.: «Биология сине-зеленых водорослей». Изд-во МГУ.
- Штина Э. А. 1965. Азотфиксация у сине-зеленых водорослей. В сб.: «Экология и физиология сине-зеленых водорослей». М.—Л., «Наука».
- Biget P. Z. 1962. Les systemes biologiques regeneratifs d'oxygene «J. physiol.» (France), 54, No. 1.
- De P. K. Mangel Z. N. 1965. Fixation of nitrogen by algae in rice soils. «Soil sci», No. 6.
- Fogg G. E. 1962. Nitrogen fixation in «Physiology and Biochemistry of Algae», ed. R. Lewin.
- Haldal P. 1957. Effect of light and temperature on pigment ratiens in blue-green algae. «Carnegie Inst. Wash. Year Book.», No. 56.
- Venkataraman G. S. 1961. «Sci. and Culture.», 27, No. 1.
- Watanabe A. 1959. On the mass culturing of a nitrogen-fixing blue-green alga *Tholypothrix tenuis*. «J. General a Appl. Microbiol.», 5.