

УДК 582.251.001.57

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА АВТОСЕЛЕКЦИИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ В УСЛОВИЯХ ПРОТОЧНОГО КУЛЬТИВИРОВАНИЯ

Л. Н. ЦОГЛИН, М. Г. ВЛАДИМИРОВА, В. Е. СЕМЕНЕНКО

Институт физиологии растений им. К. А. Тимирязева Академии наук СССР, Москва

Рассматриваются результаты экспериментальной проверки разработанной ранее теории автоматического конкурсного отбора продуктивных штаммов микроводорослей из многокомпонентной популяции при проточном культивировании.

Изучали динамику развития и изменение соотношения численности форм многокомпонентной популяции, состоящей из четырех культур: *Chlorella* sp. K, *Chlorella* CO-10, *Scenedesmus Obliquus* 125, *Chlorella vulgaris* 7-23-1, для которых предварительно определялись ростовые характеристики. Проточное культивирование велось при плотностях, соответствующих различным стадиям роста (экспоненциальной и линейной), и при различных исходных концентрациях штаммов.

Обнаружено, что при засеве культур микроводорослей из менее активных условий в культиватор с высокой напряженностью внешних параметров изменение величины удельного коэффициента размножения отстает от изменения фотосинтетической активности форм на время, равное периоду генерации данного штамма, что необходимо учитывать при построении процесса автоселекции на ранних стадиях.

Различие в средних размерах клеток штаммов, входящих в популяцию, не сказывается на кинетике отбора.

Изучение газообмена CO_2 в процессе автоселекции показало увеличение фотосинтетической активности многокомпонентной популяции за счет изменения ее качественного состава.

Полученная сравнительно высокая совпадемость экспериментальных данных с процессом разделения, построенным по теоретическим соотношениям для различных стадий роста, показала, что выведенные ранее авторами математические соотношения достаточно полно описывают реально наблюдаемый процесс автоселекции и могут быть использованы в практической работе.

В практике работ с микроводорослями часто возникает необходимость подбора форм, обладающих наибольшей продуктивностью в конкретных условиях. Решение этой задачи представляет значительную трудность в связи с громадным разнообразием штаммов, отличающихся по фотосинтетической продуктивности, оптимальному сочетанию параметров культивирования, степени устойчивости к тем или иным воздействиям и по ряду других свойств.

Ранее нами [1] на основе математического анализа динамики роста многокомпонентной популяции были разработаны теоретические основы принципа автоматического конкурсного отбора и показана возможность выделения продуктивных штаммов на заданные условия при проточном культивировании микроводорослей.

Скорость протока при турбидистатном культивировании многокомпонентной популяции определяется суммарным приростом числа клеток всех штаммов, а вынос клеток отдельных составляющих зависит от их относительной концентрации. В результате происходит уменьшение чи-

сленности штаммов, скорость прироста которых ниже скорости выноса, определяемой как $\frac{\Delta N}{n_j}$ (ΔN — суммарный прирост, n_j — относительная концентрация данного штамма).

Уменьшение концентрации малопродуктивных штаммов в свою очередь приводит к возрастанию скорости протока. Процесс продолжается до полного выделения в культиваторе наиболее продуктивной в данных условиях формы.

Рисунок 1 иллюстрирует процесс выделения продуктивного штамма в случае культивирования смеси из двух форм, отличающихся по удельным скоростям размножения на $0,05 \text{ час}^{-1}$, $0,1 \text{ час}^{-1}$ и $0,2 \text{ час}^{-1}$. Кривые построены для четырех начальных концентраций ($n=0,01, 0,1, 0,2$ и $0,3$). Видно, что процесс образования монокультуры идет тем быстрее, чем больше различие в удельных скоростях роста и чем выше начальная концентрация продуктивной формы.

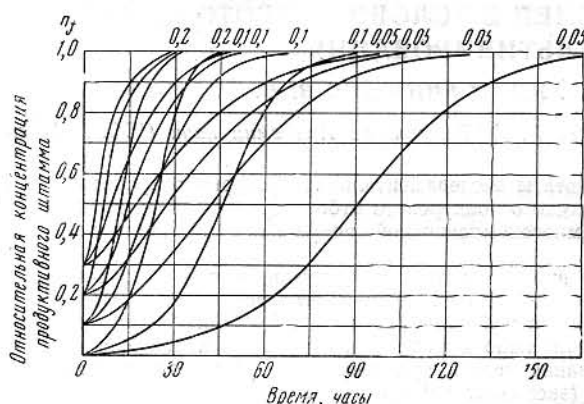


Рис. 1. Разделение культур при различных сочетаниях коэффициентов удельного размножения и начальных концентраций штаммов [1]

но и детально Швытов и Гинзбург [4, 5] показали, что этот метод позволяет не только значительно сократить трудоемкость и время отбора новых форм, но и выделять весьма малые количества образовавшихся продуктивных мутантов.

Изменение численности любого штамма при проточном культивировании многокомпонентной популяции можно представить в виде уравнения:

$$n_j = n_{0j} \frac{e^{n_a \mu_j t}}{\sum_{i=1}^m e^{n_a \mu_i t} n_{0i}} \quad \left| \begin{array}{l} n_a = 1 \text{ для экспоненциального участка роста} \\ n_a < 1 \text{ для линейного участка} \end{array} \right.$$

В этом уравнении n_j обозначает относительную концентрацию интересующего штамма, определяемую как отношение числа клеток данного штамма к общей численности популяции $N_j/N_{\text{общ}}$; n_{0i} — относительные концентрации форм от 1-й до m -й в начальный момент проточного культивирования; n_a — коэффициент замедления, определяемый как отношение числа клеток, при котором начинается линейная стадия кривой роста, к общей плотности популяции; μ_j — удельный коэффициент размножения интересующего штамма¹; μ_i — удельные коэффициенты размножения каждого из штаммов, входящих в популяцию; e — основание натурального логарифма.

употребимым для обозначения удельного коэффициента размножения является μ .

¹ В работе [1] эта величина была обозначена символом k . В настоящее время более

При стабилизации плотности суспензии в точке, соответствующей линейной стадии кривой роста, приведенное уравнение дает приближенную картину разделения. Наличие в культиваторе слоев суспензии, находящихся в режиме светового ограничения, приводит к замедлению отбора. Этот эффект отражается коэффициентом n_a , однако в уравнении не учитывается изменение n_a в процессе разделения, вызываемое различными размерами и оптическими свойствами клеток, входящих в популяцию штаммов. Более точно процесс отбора отражается соотношением (14) в работе [1], но громоздкость и сложность расчетов затрудняют использование этого уравнения.

Указанные выше работы [1, 4, 5] рассматривают теорию вопроса с разных точек зрения, однако при проведении математического анализа делается ряд допущений, которые могут повлиять на окончательные решения и привести к результатам, отличным от действительной динамики развития многокомпонентной популяции. Так, например, принимаются по строго экспоненциальному закону с постоянными удельными коэффициентами размножения и заранее оговаривалось отсутствие взаимного влияния различных форм.

Единственная экспериментальная работа по этому вопросу [6] не ставит задачу сравнения теоретических решений с экспериментом, а лишь доказывает в принципе существование автоматического отбора продуктивных штаммов на заданные условия.

Цель данной работы — проведение экспериментальной проверки теоретических решений не только по конечным результатам, а по всей кинетике процесса.

МЕТОДИКА

Опыт проводили на установке для интенсивного проточного выращивания микроводорослей с автоматической стабилизацией плотности суспензии по принципу турбидистата [7]. Реактор — термостатированная камера с плоскопараллельными стенками и освещением с одной стороны от ксеноновой лампы ДКСТВ-6000. Освещенность на поверхности камеры — $350 \cdot 10^6$ эрг/см²·сек. Объем суспензии в реакторе — 1 л при толщине слоя 6 мм. Температуру суспензии поддерживали на уровне $36 \pm 0,3^\circ$. В реактор подавали газоздушную смесь с коэффициентом вентиляции 300 л/час на 1 л суспензии с концентрацией CO₂, равной 1,7%. В качестве питательной среды использовали среду Тамия с нитратным азотом.

В ходе эксперимента контролировали следующие параметры: число клеток (суммарное и отдельно для каждого штамма) — прямым подсчетом под микроскопом в камере Горяева и фотосинтез — по поглощению CO₂ оптикоакустическим газоанализатором ОА-2209 в сочетании с командным прибором КЭП-12у [8].

Для эксперимента были подобраны четыре культуры (*Chlorella* sp. К, *Chlorella* СО-10, *Scenedesmus obliquus* 125 и *Chlorella vulgaris* 7-23-1, которые помимо различной продуктивности, значительно отличались морфологически [9]. Различия в размерах, форме клеток и степени пигментации позволило с большой достоверностью следить за количественным соотношением клеток выбранных штаммов на различных этапах развития популяции, а также определить влияние этих факторов на ход автоселекции.

С целью проведения теоретических расчетов процессов разделения на различных стадиях были сняты кривые роста и определены удельные коэффициенты размножения культур в заданных условиях. Для этого выбранные формы после предварительного подращивания при люминесцентном освещении поочередно засеивали в культиватор и выращивали до плотностей линейного участка кривой роста.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Изучение кинетики роста и определение удельных коэффициентов размножения культур. Кривые роста, представленные на рис. 2, позволяют определить основные характеристики культур. Так, на рис. 2, Б пунктирные линии на кривых 1, 2 и 4, соответствующие малой скорости изменения числа клеток, показывают, что выбранные штаммы при заданном режиме культивирования имеют различной длительности лаг-фазы. Затем культуры начинают развиваться по экспоненциальному закону (на рис. 2, Б прямые линии). На-

клон этих прямых определяется величиной удельного коэффициента размножения штамма (μ).

Все графики роста культур, представленные в логарифмическом масштабе, имеют излом, определяемый резким изменением μ , причем время от конца лаг-фазы до момента изменения μ примерно совпадает со временем генерации данного штамма.

Поскольку отмеченные изменения удельных коэффициентов размножения происходят в первом цикле после засева культуры в условиях ин-

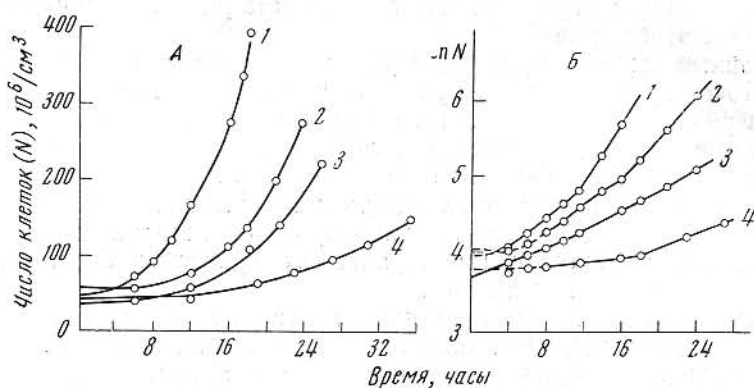


Рис. 2. Динамика роста различных культур микроводорослей
1 — *Chlorella* sp. K, 2 — *Chlorella* CO-10, 3 — *Scenedesmus obliquus* 125, 4 —
Chlorella vulgaris 7-23-1; А — в линейном масштабе, Б — в логарифмическом

тенсивного роста и имеют скачкообразный характер, явление это может быть обусловлено адаптивной реакцией, связанной с дискретным процессом, каковым, вероятнее всего, является изменение числа автоспор в последующем ряде поколений. На это указывает и тот факт, что в описываемых опытах среднее число автоспор в материнских клетках в период после изменения μ резко возрастало. Активность фотосинтетического аппарата до и после изменения μ остается постоянной, соответствующей заданным параметрам культивирования. Это приводит к увели-

Таблица 1

Ростовые характеристики выбранных культур

Культура	Длительность лаг-фазы, часы	Время от конца лаг-фазы до изменения μ , часы	μ		Относительный средний размер клеток
			μ_1	μ_2	
			час ⁻¹		
<i>Chlorella</i> sp. K	4	7	0,095	0,21	1
<i>Chlorella</i> CO-10	9	9	0,085	0,155	1,55
<i>Scenedesmus obliquus</i> 125	0	10	0,042	0,09	2,55
<i>Chlorella vulgaris</i> 7-23-1	8	18	0,036	0,065	1,9

чению размеров клеток в начальный период роста популяции. Через некоторое время, когда число автоспор в материнских клетках возрастет, средний размер клеток приходит в норму.

Полученные характеристики культур представлены в табл. 1.

Поскольку штаммы развиваются с пониженным коэффициентом μ_1 только в начальной после засева период культивирования, при расчетах нами использовался коэффициент μ_2 , соответствующий стабильному состоянию ростовых характеристик культур.

Кинетика выделения продуктивного штамма из многокомпонентной популяции на экспоненциальной стадии роста. Для выяснения возможности выделения про-

дуктивного штамма, содержащегося в многокомпонентной популяции в относительно малом количестве, был поставлен эксперимент, плотности засева культур в котором находились в следующем соотношении: *Chlorella* sp. К — 1 млн. клеток/см³ (1,6%), *Chlorella* CO-10 — 25 млн./см³ (40,7%), *Scenedesmus obliquus* 125 — 10 млн./см³ (16%), *Chlorella vulgaris* 7-23-1 — 25,5 млн./см³ (41,7%). Суммарное число клеток засева — 61,5 млн./см³. Популяция была переведена на проточный режим по достижении плотности 2,6 мг/см³ биомассы в расчете на сухой вес.

Рисунок 3 иллюстрирует процесс разделения культур. Несмотря на малый засев, относительная концентрация *Chlorella* sp. К через 24 часа достигла 35%. Увеличение концентрации *Scenedesmus obliquus* 125 и резкое падение концентрации *Chlorella* CO-10 в начальный период можно объяснить отсутствием у первой заметной лаг-фазы и очень большой лаг-фазой у *Chlorella* CO-10.

Для сопоставления динамики роста многокомпонентной популяции с процессом, получаемым из теоретических соотношений, был проведен второй эксперимент, плотность суспензии в котором, так же как и в первом, стабилизировалась на уровне экспоненциальной стадии.

Поскольку первый опыт показал возможность выделения наиболее продуктивной культуры *Chlorella* sp. К при ее малых начальных концентрациях, то для уменьшения длительности эксперимента второй засев был сделан с большей концентрацией этого штамма. Кроме того, медленно размножающаяся в данных условиях *Chlorella vulgaris* 7-23-1, не оказывающая заметного влияния на процесс отбора, была исключена из опыта.

Засев был произведен со следующим соотношением концентраций культур: *Chlorella* sp. К — 9 млн. клеток/см³ (8,8%), *Chlorella* CO-10 — 56 млн./см³ (55%), *Scenedesmus obliquus* 125 — 37 млн./см³ (36,2%). Суммарное число клеток в засеве — 102 млн./см³.

Учитывая, что скорость выделения в основном зависит от отношения концентраций наиболее близких по продуктивности штаммов [1], засев культуры *Chlorella* CO-10 был выбран высоким. К тому же значительная разница в концентрациях, близких по продуктивности культур, сделала бы заметнее их взаимное влияние, если бы таковое имелось.

Проточное культивирование велось при концентрации биомассы (сухой вес) 3 мг/см³.

Необходимо отметить, что в наших экспериментах при проточном режиме культивирования стабилизировалась концентрация биомассы микроводорослей. При турбидистатом выращивании монокультуры средней размер клеток не меняется и, соответственно, при стабильной концентрации биомассы остается постоянным число клеток. Выбранные же нами штаммы имеют значительное различие в средних размерах клеток (см. табл. 1). Это привело к увеличению численности популяции по мере выделения культуры *Chlorella* sp. К, имеющей наименьший средний размер клетки (рис. 4, А, кривая 5).

Средний размер клеток популяции в момент начала проточного культивирования, взятый по отношению к *Chlorella* sp. К равнялся 1,9. Число клеток при той же концентрации биомассы к концу опыта пропорционально возросло примерно в два раза (со 158 до 310 млн./см³), причем

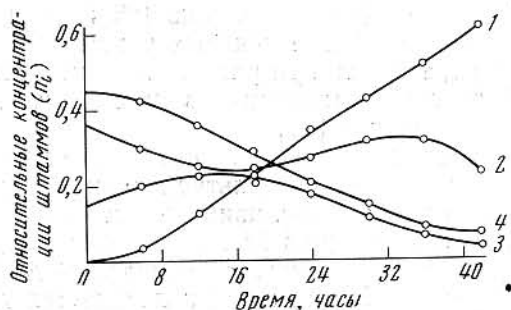


Рис. 3. Разделение культур при малой концентрации засева наиболее продуктивного штамма

1—4 — см. рис. 2

увеличение числа клеток шло наиболее быстро в течение первых 40 час до момента почти полного выхода из популяции *Scenedesmus obliquus* 125.

Рисунок 4, А (сплошные линии) наглядно показывает экспериментально полученный процесс достаточно быстрого разделения форм водорослей при проточном культивировании многокомпонентной популяции на экспоненциальной стадии роста. Пунктирными линиями на этом же рисунке нанесены кривые, полученные теоретически по приведенному выше соотношению.

Как видно из рис. 4, А, конечный результат эксперимента с достаточной точностью совпадает с расчетным. Максимальное расхождение в конце эксперимента составляет 6%. Однако для культур *Chlorella* CO-10 и *Scenedesmus obliquus* 125 (кривые 2 и 3) расхождение теоретических и экспериментальных кривых весьма значительно и вызвано, очевидно, тем, что при расчете не учитывалось изменение удельного коэффициента размножения в начале культивирования и различная длительность лаг-фаз.

В табл. 2 приведены временные характеристики коэффициентов μ на начальной стадии культивирования популяции. Видно, что в первый период от 0 до 4 час. наибольшим коэффициентом μ характеризуется *Scenedesmus obliquus* 125, не имеющая лаг-фазы концентрирования этой культуры увеличивается. В период от 4 до 9 час. заканчивается лаг-фаза у штамма *Chlorella* sp. К и начинается увеличение его численности с коэффициентом $\mu=0,095$, большим чем у *Scenedesmus*. Концентрация *Chlorella* CO-10, имеющей наибольшую длительность лаг-фазы, в эти периоды резко падает. Только после 18-часового культивирования процесс разделения начинает соответствовать теоретическим построениям.

Таблица 2

Временные характеристики коэффициентов μ

Культура	Периоды времени, часы					
	0—4	4—9	9—10	10—11	11—18	18 и далее
<i>Chlorella</i> sp. К	0	0,095	0,095	0,095	0,21	0,21
<i>Chlorella</i> CO-10	0	0	0,085	0,085	0,085	0,155
<i>Scenedesmus obliquus</i> 125	0,042	0,042	0,042	0,09	0,09	0,09

Из данных, представленных в табл. 2, следует, что в случае применения метода последовательных разведений для выделения продуктивного штамма из многокомпонентной популяции, культивируемой в накопительном режиме [2], необходимо соблюдать определенную осторожность в выборе условий разбавления и не допускать при этом значительных изменений внешних параметров. Изменение такого параметра, как световое обеспечение клеток при резких разбавлениях суспензии, может вызвать адаптационные эффекты у культур, входящих в популяцию, и привести к выделению штамма, не обладающего наибольшей продуктивностью, а имеющего более короткую лаг-фазу по сравнению с остальными формами. Так, например, в нашем случае при разбавлениях суспензии через каждые 7 час. с изменением светового режима выделится *Scenedesmus obliquus* 125, имеющий наибольший средний коэффициент μ за этот период. При культивировании смеси из *Chlorella* CO-10 и *Scenedesmus*, несмотря на значительную разницу в продуктивностях между ними, время между разбавлениями должно быть не менее 27—30 час., чтобы получить выделение *Chlorella* CO-10.

Влияние указанных факторов на динамику развития многокомпонентной популяции при проточном культивировании подтверждается еще и тем, что построение теоретических кривых с учетом временных из-

менений и дает очень близкое совпадение с экспериментально наблюдаемым ходом процесса на всех его этапах (см. рис. 4, Б).

Из этого, в свою очередь, можно сделать вывод, что пренебрежение такими факторами, как различие в размерах клеток и их оптической плотности, не искажает результатов расчета. Совпадение теоретических и экспериментальных кривых свидетельствует также об отсутствии вза-

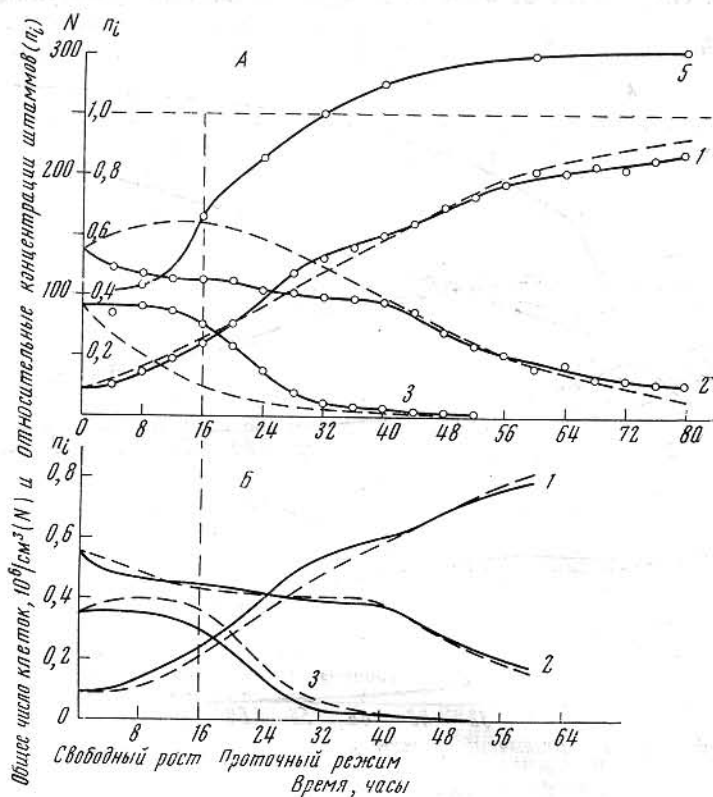


Рис. 4. Динамика процесса автоселекции микроводорослей на экспоненциальной стадии роста

Сплошные линии — экспериментальные кривые, пунктирные — теоретические, 1—3 — см. рис. 2, 5 — суммарное число клеток популяции; А — без учета изменения коэффициента μ , Б — с внесением соответствующих поправок

имного влияния в условиях интенсивного роста между wybranнми культурами, хотя в популяцию входили представители не только различных видов, но и различных родов (*Chlorella* и *Scenedesmus*).

Кинетика автоселекции штаммов на линейной стадии роста многокомпонентной популяции микроводорослей. При экспериментальном моделировании процесса автоселекции на линейной стадии роста, засев *Chlorella* sp. К был проведен при значительно большей плотности, так как стабилизация плотности суспензии на высоком уровне вызывает уменьшение скорости отбора и увеличивает длительность эксперимента.

Засев был проведен со следующим соотношением концентраций штаммов: *Chlorella* sp. К — 10 млн. клеток/см³ (17%), *Chlorella* CO-10 — 33 млн./см³ (55%), *Scenedesmus obliquus* 125 — 17 млн./см³ (28%). Суммарная плотность засева — 60 млн./см³.

Культиватор был переведен в режим турбидистата при концентрации биомассы (сухой вес) 7,2 мг/см³, при этом число клеток равнялось 408 млн./см³.

Как видно из рис. 5, через 104 часа в реакторе произошло практически полное разделение культур и образовавшаяся популяция на 94% состояла из *Chlorella* sp. К. При этом численность популяции возросла с 408 до 690 млн/см³, т. е. в 1,7 раза, что соответствует отношению среднего размера клеток популяции в момент включения протока к среднему размеру клеток выделившейся культуры *Chlorella* sp. К (кривая 5, рис. 5, А). На участке от 0 до 14 час., когда плотность популяции была

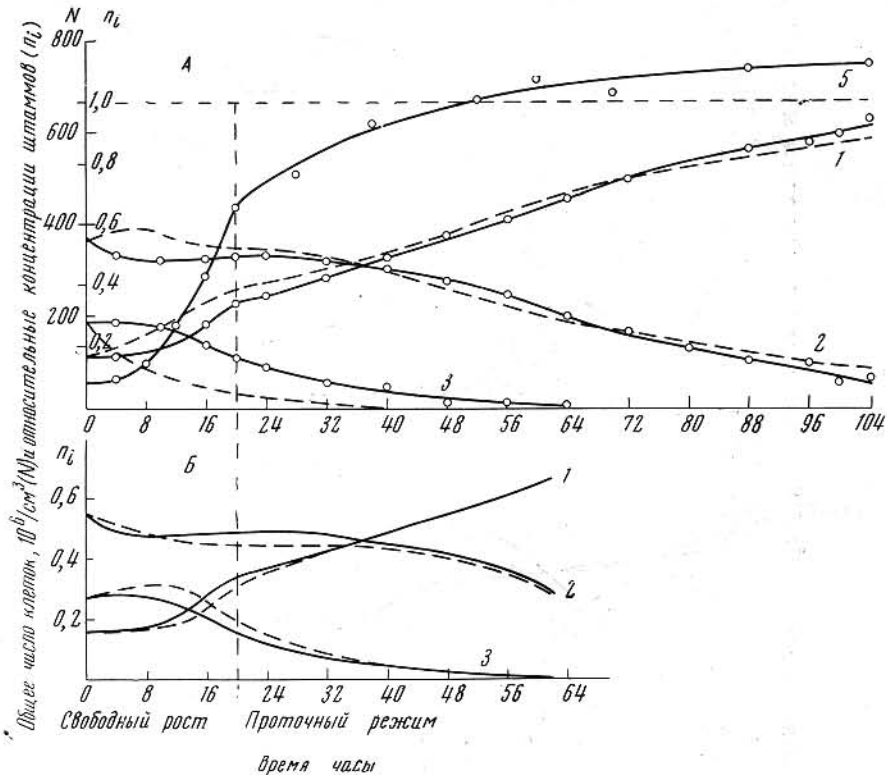


Рис. 5. Динамика процесса выделения продуктивной формы на линейной стадии роста
Сплошные линии — экспериментальные кривые, пунктирные — теоретические, 1—3 — см. рис. 2, А и Б — см. рис. 4.

мала, построение велось по уравнению отбора экспоненциальной стадии ($n_a=1$). Затем от 14 до 22 час. в уравнение был введен переменный уменьшающийся коэффициент n_a после 22 час. этот коэффициент был принят постоянным, равным 0,5, так как плотность суспензии в эксперименте стабилизировалась на уровне двойной плотности конца экспоненциальной стадии.

Рисунки показывают, что применение приближенной формулы при расчете процессов отбора на линейной стадии не приводит к значительным ошибкам. Максимальное расхождение в нашем опыте в конце культивирования составило 9%. Естественно, эта величина не является постоянной и зависит от форм, входящих в популяцию, и условий культивирования. Важно отметить, что ошибка в определении необходимого времени выделения (как и предполагалось в работе [1]) получается в большую сторону, т. е. процесс выделения на линейном участке идет несколько быстрее расчетного.

Изменение интенсивности фотосинтеза популяции в процессе автоселекции и отбора продуктивной штамма. Временные характеристики (фотосинтез отдельных культур приведены на рис. 6. Минимальная величина 0,1 л СО₂/л суспен-

зии в час определяется разрешающей способностью аппаратуры измерения. Плотность засевов штаммов была выбрана такой, что при нормальной фотосинтетической активности клеток суммарная величина газообмена суспензии превышала эту величину, однако только у *Scenedesmus* фотосинтез был зафиксирован почти сразу после засева. У других культур фотосинтез начинался через несколько часов, довольно точно согласуясь с длительностями лаг-фаз, указанными в табл. 1.

Выход кривых фотосинтеза на плато происходит по достижении культурами плотности линейной стадии. Число клеток, соответствующее этой плотности, зависит от размеров и оптических свойств клеток и различно для разных форм. В табл. 3 приведены данные, характеризующие фотосинтетическую актив-

тивность использованных в опытах культур микроводорослей при напряженности внешних параметров, которые задавались в экспериментах.

Естественно, что при развитии многокомпонентной популяции интенсивность фотосинтеза должна возрастать по мере отбора продуктивного штамма. На экспоненциальном участке роста культуры возрастание фотосинтеза обуславливается двумя причинами: ростом численности популяции и процессом отбора. На линейном участке, где изменение чис-

Таблица 3

Характеристики фотосинтетической активности культур при достижении линейной стадии роста

Культура	Численность популяции при достижении линейной стадии роста, число клеток · 10 ⁸	Максимальная интенсивность фотосинтеза, л СО ₂ /л суспензии в час
<i>Chlorella</i> sp. К	375	0,44
<i>Chlorella</i> CO-10	275	0,38
<i>Scenedesmus obliquus</i> 125	150	0,29
<i>Chlorella vulgaris</i> 7-23-1	180	0,27

начала проточного культивирования. Поскольку точка стабилизации плотности суспензии в опыте на линейной стадии была высока, то увеличение фотосинтеза после перевода реактора на проточный режим можно объяснить только увеличением концентрации продуктивной культуры *Chlorella* sp.-К.

Несколько меньшая величина максимального уровня фотосинтеза в эксперименте на линейной стадии объясняется, очевидно, высокой плотностью суспензии и наличием в связи с этим затененных слоев. Этот максимальный уровень достигается не к концу эксперимента, когда подавляющее большинство популяции составляет наиболее продуктивный штамм, а значительно раньше, когда концентрация малопродуктивной в данных условиях культуры *Scenedesmus* близка к 0. В опыте на экспоненциальной стадии это происходит через 30 час. при относительной концентрации *Chlorella* sp. К, *Chlorella* CO-10 и *Scenedesmus* соответственно 0,62, 0,34 и 0,04, в опыте на линейной стадии — через 40 час.

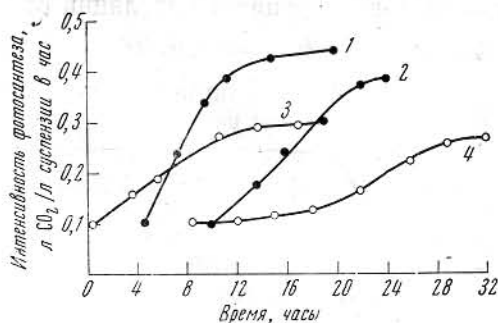


Рис. 6. Изменение интенсивности фотосинтеза популяции при накопительном росте культур на экспоненциальной стадии

1—4 — см. рис. 2

ла клеток не влияет на суммарный фотосинтез популяции [7], рост интенсивности фотосинтеза объясняется чисто качественными изменениями, происходящими в суспензии в процессе отбора.

Это иллюстрируется рис. 7, где приведены кривые изменения фотосинтетической активности многокомпонентной популяции в экспериментах на экспоненциальной и линейной стадиях роста микроводорослей.

Стрелками отмечены моменты

при отношении 0,55, 0,43 и 0,02. Дальнейший выход из культиватора *Chlorella* CO-10 мало сказывается на увеличении фотосинтеза, поскольку величины наибольшей активности этой культуры и *Chlorella* sp. К в данных условиях отличаются только на 16%, а изменение относительных их концентраций в популяции от 0,5 и 0,5 до 1,0 и 0 должно привести к увеличению фотосинтеза только на 8%. Это изменение не заметно на фоне обычных 10÷15%-ных колебаний фотосинтеза, свойственных любой популяции микроводорослей в высокоактивных условиях.

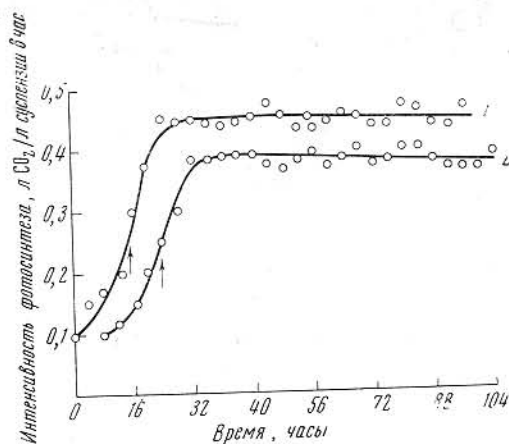


Рис. 7. Изменение интенсивности фотосинтеза многокомпонентной популяции в процессе роста и отбора продуктивного штамма
1 — эксперимент на экспоненциальной стадии роста, 2 — эксперимент на линейной стадии роста

Анализируя результаты проведенных экспериментов, можно сказать, что выведенные в работе [1] соотношения с достаточной точностью описывают процесс автоселекции штаммов как при стабилизации плотности суспензии на уровне экспоненциальной стадии роста микроводорослей, так и на линейной. При этом следует, однако, учитывать, что для получения полной картины разделения культур на всех этапах развития многокомпонентной популяции необходим учет изменений ростовых характеристик форм в первый период после засева. Если интерес представляет лишь окончательный результат, можно пренебречь в расчетах указанными изменениями, не вводя значительной погрешности.

Интенсивность фотосинтеза многокомпонентной популяции достигает максимального уровня значительно раньше, чем происходит полное разделение культур, и потому не может служить критерием образования в реакторе монокультуры продуктивной формы.

Интенсивность фотосинтеза многокомпонентной популяции достигает максимального уровня значительно раньше, чем происходит полное разделение культур, и потому не может служить критерием образования в реакторе монокультуры продуктивной формы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цоглин Л. Н., Семенов В. Е., Поляков А. К. *Биофизика* 12, 704, 1967.
2. Ваулина Э. Н. В сб. *Генетические основы селекции микроорганизмов*, 228. «Наука», 1969.
3. Дарг В. А., Ковров Б. Г., Лисовский Г. М. В сб. *Проблемы создания замкнутых экологических систем*. «Наука», 1967.
4. Швытов И. А. Тезисы III Всесоюзного совещания по управляемому биосинтезу и биофизике популяций 53, Красноярск, 1969.
5. Гинзбург Л. Р., Швытов И. А. *Бюллетень НТИ*, 14, 86, «Гидрометеиздат», 1970.
6. Лисовский Г. М., Сыпневская Э. К., Ян Н. А. В сб. *Биология и культивирование микроорганизмов* 89, Красноярск, 1969.
7. Семенов В. Е., Владимирова М. Г., Цоглин Л. Н., Таутс М. И., Филипповский Ю. Н., Клячко-Гурвич Г. Л., Кузнецов Е. Д., Кованова Е. С., Райков Н. И. В сб. *Управляемый биосинтез*, 75. «Наука», 1966.
8. Семенов В. Е., Владимирова М. Г., Ничипорович А. А. *Проблемы космической биологии*, 326, изд-во АН СССР, 1962.
9. Владимирова М. Г. *Изучение физиологических характеристик одноклеточных водорослей в условиях интенсивной культуры*. Канд. дис., М., 1966.

Поступила в редакцию
22.VI.1970

**MATHEMATICAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION
OF MICROALGAL AUTOSELECTION UNDER CONDITIONS
OF CONTINUOUS CULTIVATION**

L. N. ZOGLIN, M. G. VLADIMIROVA, V. E. SEMENENKO

K. A. Timiriazev Institute of Plant Physiology, USSR Academy of Sciences, Moscow

The paper presents the results of the experimental test of the theory considering automatic competitive selection of productive microalgal strains from the multicomponent population during continuous cultivation.

The dynamics of growth and changes in the ratio between different forms were studied in the multicomponent population containing four cultures, *Chlorella* sp. K, *Chlorella* CO-10, *Scenedesmus obliquus* 125, *Chlorella vulgaris* 7-23-1, which growth characteristics were preliminary determined. Continuous cultivation was performed at densities corresponding to different growth stages (exponential and linear) and at various starting concentrations of the strains.

The change of the specific growth coefficient was found to differ from the change of the photosynthetic activity by a time lapse equal to the generation period of the strain, when the cultures of microalgae were transferred from the less active conditions into a cultivator with a high intensity of external parameters, this should be taken into account during the early stages of autoselection.

The difference in the cell average size of the population strains did not influence the kinetics of selection.

A study on CO₂ gas exchange during autoselection has shown that photosynthetic activity of the multicomponent population increased at the expense of modification of its qualitative composition.

These experimental data coincided with theoretical calculations for different growth stages. Therefore, mathematical correlations, obtained by the authors, describe with a good approximation the process of autoselection and can be used in practice.