## БИОЛОГИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ, БИОТЕХНОЛОГИЯ И АКВАКУЛЬТУРА

УДК 576.34.042:519.6

DOI: 10.21072/eco.2026.11.2.08

# ОСНОВЫ МЕТАБОНОМИКИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ [*]

**Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С., Боровков А. Б.**

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

*г. Севастополь, Российская Федерация,*

*e-mail: biotex@ibss-ras.ru*

**Аннотация:** В статье рассматривается накопленный авторами опыт работ с культурами микроводорослей в свете современных понятий и терминологии метаболических процессов, происходящих в клетках в их связи с внешними условиями. Внешние условия, в которых находятся микроводоросли, определяют как конкретный набор метаболитов в клетке в данный момент времени (метаболом), так и скорость преобразования метаболитов из одной формы в другую (метабономика) в последовательности биосинтетических реакций в клетках. Конечный результат этих превращений — рост биомассы, развитие и цитокинез.

**Ключевые слова:** микроводоросли, биокинетика, лимитирование роста, узкое место, метаболом, метабономика

## Введение

Микроводоросли являются ключевыми компонентами биосферы: они выполняют функцию первичных продуцентов кислорода и органического вещества. Исследование микроводорослей в естественной среде обитания сопряжено со значительными трудностями, обусловленными высокой вариабельностью абиотических факторов. Применение метода культивирования позволяет элиминировать влияние фоновых условий и изучать воздействие отдельных факторов на ростовые и метаболические характеристики клеток в контролируемых условиях. Широкое внедрение данного подхода способствовало накоплению фундаментальных данных и установлению ряда закономерностей, описывающих рост и метаболизм микроводорослей [Тренкеншу, 2005; Лелеков, Тренкеншу, 2018].

Одной из основных проблем в изучении микроводорослей остаётся количественная оценка воздействия абиотических факторов на клеточный метаболизм. Решение этой задачи требует разработки кинетической теории роста, устанавливающей взаимосвязь между параметрами внешней среды и физиологическим состоянием клеток. Базис подобной теории должен составлять комплекс фундаментальных принципов, интегрированных в единую парадигму, которая обеспечивает возможность математического моделирования кинетических процессов в культуре микроводорослей. Оперируя данным инструментарием, можно математически описать световые и темновые реакции фотобиосинтеза, что позволяет определить видоспецифические коэффициенты моделей, выявить ключевые закономерности их взаимосвязи, а значит получить новые знания о росте микроводорослей [Тренкеншу, Лелеков, 2017]. При этом математическая строгость

[*]Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме «Комплексное исследование механизмов функционирования морских биотехнологических комплексов с целью получения биологически активных веществ из гидробионтов» (№ гос. регистрации 124022400152-1).

теории должна быть дополнена конкретными примерами возможности её упрощения для практического использования в анализе экспериментальных данных [Borovkov et al., 2023] и построения прогностических моделей роста микроводорослей при заданных начальных условиях культуры и внешней среды.

В свете представлений об инновационных траекториях развития современных подходов в биокинетике как научной дисциплине о метаболических трансформациях в организме необходимо определиться с используемой терминологией. Наиболее часто употребляется термин «метаболом» [Saini et al., 2024]. Согласно общепринятой терминологии метаболом — это совокупность всех низкомолекулярных метаболитов (М < 1 кДа), присутствующих в клетке (организме) в данный момент времени. Впервые термин «метаболом» был применён в микробиологии [Tweeddale, Notley-McRobb, Ferenci, 1998]. К метаболитам относят аминокислоты, органические кислоты, сахара, нуклеотиды, липиды (низкомолекулярные), вторичные метаболиты и т. п.

Принципиальным отличием метабономики от метаболомики является то, что метабономика по терминологическому определению изучает динамический ответ живых систем на внешние условия, приводящие к изменению их метаболома [Wang et al., 2023]. Этот ответ требует знания набора правил (законов), которым подчиняется кинетика изменений. Исторически метабономический подход был одной из первых попыток применить приёмы системной биологии для изучения метаболизма [Nicholson, Lindon, Holmes, 1999].

## Основные положения метабономики микроводорослей

Одним из главных обобщений биологии, определяющих подход к разработке теоретических основ роста, является положение о том, что синтез органического вещества (соответственно и рост организма) происходит за счёт биохимических реакций с участием ферментов, каждый из которых контролируется отдельным геном [Вилли, Детье, 1974]. Последовательность в виде схемы записывается как: «один ген — один фермент — одна биохимическая реакция». Каждый компонент этой схемы для процесса роста клетки или организма требует наличия энергии и биогенных элементов для их синтеза, т. е. потока из внешней среды для восполнения расхода на синтез.

Другой основной принцип, лежащий в основе метабономики микроводорослей, — это принцип минимума, или лимитирующих факторов (принцип Либиха) [Liebig, 1847]. Он относится к минеральному питанию. Блэкман [Blackman, 1905] обобщил принцип на другие факторы внешней среды и на смену лимитирующих факторов.

Позднее был сформулирован принцип узкого места метаболизма [Monod, 1949], появление которого обусловлено новыми методами и техникой выращивания микроорганизмов (хемостат), обеспечивающих непрерывный рост культур и получения динамически равновесных (стационарных) состояний с воспроизводимыми результатами. По аналогии со стационарными характеристиками в ферментативной кинетике Михаэлиса — Ментен [Michaelis, Menten, 1913], Моно предложил математическую модель зависимости удельной скорости роста от концентрации лимитирующего субстрата в виде гиперболы с максимальной скоростью (узкое место). Применительно к ферментативной кинетике этот принцип формулируется как определяющее звено в цепи ферментативных реакций [Романовский, Степанова, Чернавский, 1975].

Развитие этого подхода привело к фундаментальному открытию в молекулярной биологии, объясняющему механизм регуляции экспрессии генов у прокариотов (гипотеза оперона). Оперон позволяет бактериям быстро адаптироваться к изменениям среды: включать синтез нужных ферментов при появлении субстрата и прекращать его при исчезновении, экономя ресурсы клетки [Jacob, Monod, 1961]. Вместе с принципом смены лимитирующих факторов [Blackman, 1905]

принцип «узкого места» не только даёт возможность количественно описать рост микроводорослей (в тех или иных внешних условиях среды), но и позволяет использовать положение о разделении лимитирующих факторов и лимитирующих звеньев в последовательности метаболических реакций в клетках. Появляется возможность редуцировать системы уравнений, т. е. сделать это с помощью минимального числа относительно простых уравнений [Тренкеншу, 2005; Дроздов-Тихомиров, Дороднов, 1991].

Помимо вышеперечисленных положений, в основу метабономики микроводорослей имеет смысл положить вероятностный подход для оценки влияния внешних условий на скорость метаболических превращений, рост и развитие культуры. Это связано с тем, что во внеклеточной среде световые квантовые потоки и потоки биогенных элементов можно рассматривать как простейшие, подчиняющиеся закону Пуассона. Однако после поглощения и дальнейшей биотрансформации внутриклеточные потоки вещества и энергии имеют строгую направленность, которая определяется структурной организацией метаболических систем клетки. В математическом отношении появляется возможность использовать формальный аппарат теории массового обслуживания [Тренкеншу, 2005]. В цитируемой работе представлен понятийный аппарат гетерогенных ферментативных реакций в клетке, учитывающий структурную и временную организацию метаболических систем. Это позволяет сформулировать задачи метабономики в терминах теории массового обслуживания и использования соответствующих математических приёмов.

Такой подход позволяет четко разделить понятия лимитирующего фактора и лимитирующего звена (узкого места) в цепи метаболических процессов преобразования биогенов в структурные формы биомассы микроводорослей. Кроме того, в более общем смысле появляется возможность количественно выделить в биомассе клеток ресурсную и структурную формы [Тренкеншу, Лелеков, 2017]. Важным моментом в теории массового обслуживания являются понятия очереди в последовательности преобразований и количества мест ожидания, т. е. в контексте метаболических реакций эти понятия напрямую количественно связаны с метаболомом и играют существенную роль в характере формы зависимости скорости синтеза структуры клеток от потока лимитирующего субстрата в клетку.

Неотъемлемой частью метабономики микроводорослей также необходимо считать методические приёмы, разработанные для управления ростом культуры.

## Динамически равновесная культура микроводорослей

Чаще всего микроводоросли изучают в периодической культуре, которая в динамике имеет различные фазы роста. Кинетические характеристики роста — удельная скорость и продуктивность — выражены через плотность культуры в начале и конце фазы роста. Такие общепринятые представления о периодической культуре микроводорослей имеют существенный недостаток, связанный с некоторой условностью границ фаз роста и развития популяции клеток. Соответственно, весьма условными становятся и границы, внутри которых наблюдается периодическая культура в целом. Особенно это касается первоначальных условий процесса культивирования: количества вносимого инокулята и способов обеспечения энергией и элементами питания.

Совсем иная картина будет наблюдаться при вмешательстве в процессы роста в любой фазе развития периодической культуры, например, при разбавлении культуры питательной средой. Процедуру разбавления можно повторять неоднократно, в результате чего в культиваторе будет наблюдаться стационарный рост культуры. Подбирая относительные объёмы и моменты разбавления, можно управлять процессами роста микроводорослей. Разбавление культуры представляет собой основу управления ростом микроводорослей. Причём управление ростом в культуре может осуществляться только по плотности культуры и времени, что следует из определения кинетических характеристик роста. Действительно, выбирая относительный объём разбавления,

можно уменьшать плотность культуры до необходимой величины, а изменяя промежуток времени между разбавлениями, можно повышать плотность до необходимой за счёт роста культуры. Ясно, что регулирование имеет пределы, определяемые внешними условиями среды и предельными видоспецифическими характеристиками роста микроводорослей. Эти предельные параметры определяются природными или искусственными генетическими свойствами [Fiehn, 2001; Челебиева и др., 2024].

Энергия, необходимая для протекания биосинтетических реакций у микроводорослей, может быть получена как за счёт фотосинтеза, так и за счёт процесса метаболизации органических веществ из водной среды. Кроме энергии, для поддержания роста и развития водорослей необходимы макро- и микроэлементы (биогены), источниками которых могут служить как минеральные, так и органические вещества. Эти элементы питания могут усваиваться водорослями в различной форме, но для перехода от одной формы питания к другой в клетках должна сформироваться необходимая транспортная и ферментативная система [Tanner, Grünes, Kandler, 1969]. Показано, что такое формирование происходит при экспрессии соответствующих генов [Wan et al., 2011].

Для получения динамически равновесного роста микроводорослей в культуре необходимо непрерывно пополнять расход энергии и биогенных элементов на рост биомассы клеток. Это пополнение обеспечивается протоком питательной среды путём слива части культуры и долива такого же объёма свежей среды, при этом объём культуры не должен изменяться.

## Основные показатели роста и состава биомассы микроводорослей

Обычно культура микроводорослей характеризуется концентрацией клеток или плотностью (концентрацией биомассы), $B$ г/л. Удельная скорость продукции биомассы, по определению, записывается следующим образом:

$$\mu = \frac{dB}{Bdt}, \tag{1}$$

где t — время.

При динамически равновесном росте культуры (здесь и далее этот случай помечен надстрочным индексом $^*$) плотность культуры устанавливается на постоянном уровне $B^*$, а удельная скорость роста культуры ($\mu$) становится равной удельной скорости протока среды ($\omega$):

$$\begin{aligned} &\mu^* = \omega, \\ &\frac{dB^*}{dt} = \omega B^*. \end{aligned} \tag{2}$$

Скорость накопления любой химической составляющей биомассы ($B_i^*$):

$$\frac{dB_i^*}{dt} = \mu^* B_i^* = \omega B_i^*. \tag{3}$$

Сравнивая с выражением для продуктивности, имеем:

$$\frac{B_i^*}{B^*} = \frac{dB_i^*}{dt} \Big/ \frac{dB^*}{dt}. \tag{4}$$

Последнее выражение показывает, что содержание любой химической составляющей в общей биомассе динамически равновесной культуры определяется отношением скорости её накопления в клетках к продуктивности культуры.

Здесь необходимо отметить важнейшее свойство динамически равновесного процесса роста в культуре: все удельные скорости любых составляющих биомассы равны и равны удельной скорости протока среды.

*Структурная и ресурсная формы клеточной биомассы.*

Поступающие в клетку элементы питания проходят множество последовательных метаболических реакций, протекающих в структурно-функциональных образованиях (мембраны, мультиферментные комплексы, транспортные системы и т. д.), и в итоге приводят к увеличению структурных образований в клетке и росту биомассы в целом. Рассматривая рост микроводорослей как процесс синтеза клеточных структур, необходимо выделить в биомассе клетки две основные макромолекулярные составляющие клеток: структурную ($B^*_{str}$) и ресурсную части ($B^*_{res}$).

Ресурсная часть биомассы представляет собой питательные вещества — метаболом, из которого в процессе метаболизма формируется структура клетки:

$$B^* = B^*_{res} + B^*_{str}. \tag{5}$$

## Кинетика поглощения лимитирующего элемента клетками

Механизмы транспорта биогенных элементов в микроводорослевую клетку рассматривают цитоплазматическую мембрану в качестве основного регулятора транспортного потока [Nielsen, Villadsen, Liden, 2003]. При этом выделяются разные типы переноса биогенов в клетку: от простой диффузии до активного транспорта с помощью ферментов (пермеаз). Возможна также облегчённая диффузия за счёт наличия на внешней стороне мембранной оболочки ферментов, катализирующих транслокацию неорганических катионов и их комплексов ЕС 7.2 и неорганических анионов ЕС 7.3 [Enzyme Nomenclature].

Таким образом, скорость потока в клетки будет определяться количеством транспортных систем в клеточной мембране ($F_s$), их активностью ($\mu_s$) и приведённой плотностью потока элементов ($\lambda$) из внешней среды [Тренкеншу, 2005]:

$$\left(\frac{dS_{cell}}{dt}\right)_{inc} = \mu_s F_s \left| \begin{array}{ll} \lambda, & \lambda \le 1; \\ 1, & \lambda \ge 1. \end{array} \right. , \tag{6}$$

где $S_{cell}$ — концентрация поглощённого субстрата, г л$^{-1}$, индекс inc (including) указывает на поток субстрата в клетку, $\lambda$ — приведённая плотность потока лимитирующих элементов — количество поглощённого субстрата на единицу транспортной системы $F_s$ за время её оборота.

В первом приближении приведённая плотность потока лимитирующих элементов, попадающих в клетки за счёт диффузии или транспортной системы клеток, пропорциональна (коэффициент $k$) концентрации данного вещества во внеклеточной среде:

$$\lambda = kS. \tag{7}$$

При некоторой пороговой концентрации $S_1$ в среде поток становится единичным и величину приведённой плотности потока элемента в клетку можно выразить через эту величину, а уравнение для скорости потока в клетки записать в виде:

$$\begin{gathered}\lambda = 1, kS_1 = 1, k = \frac{1}{S_1}, \lambda = \frac{S^*}{S_1}, \\ \left(\frac{dS_{cell}}{dt}\right)_{inc} = \frac{\mu_s F_s}{S_1} \left| \begin{array}{ll} S^*, & S^* \le S_1; \\ S_1, & S^* \ge S_1. \end{array} \right.\end{gathered} \tag{8}$$

При единичном потоке из культуральной (околоклеточной) среды поток в клетки становится максимальным и не зависящим от концентрации данного лимитирующего элемента в среде:

$$\begin{gathered}S^* = S_1, \\ \left(\frac{dS_{cell}}{dt}\right)_{inc}^{max} = \mu_s F_s.\end{gathered} \tag{9}$$

*Кинетика внутриклеточной трансформации лимитирующего элемента из ресурсной формы в структурную.*

Огромное количество актов биохимических преобразований метаболома предполагает их учёт для построения полной динамической модели этих процессов, что приведёт к огромному количеству уравнений и бессмысленности моделирования в целом. В то же время для корректного описания биохимических трансформаций при стационарном росте достаточно учесть ключевые параметры, определяющие конечные скорости процессов. Это позволяет свести к минимуму количество уравнений.

Скорость преобразования ресурсного элемента в структурную форму будет определяться как концентрацией ресурсных форм элемента, так и концентрацией структурных форм. Последнее связано с концентрацией ключевого фермента или транспортного соединения, отвечающего за окончательное включение элемента в структуру клетки и являющегося их обязательным компонентом.

Кинетика внутриклеточной организации метаболического процесса трансформации элемента может быть количественно описана с помощью представлений о лимитирующем факторе (потоке субстрата) и ключевом звене (ферменте), изложенных в работе [Тренкеншу, 2005]. В данном случае лимитирующим фактором является поток ресурсной формы элемента, а узким местом (ключевым звеном) — структурный фермент. Согласно предположению о пропорциональности всех структурных компонентов клеток [Лелеков, 2023], концентрация ключевого конститутивного фермента ($F_{rs}$) прямо пропорциональна (коэффициент $f_{rs}$) его содержанию в структуре клеток. Это позволяет выразить концентрацию $F_{rs}$ через общий пул структурного субстрата:

$$f_{rs} = \frac{F_{rs}}{S^*_{str}}, \tag{10}$$

где $S_{str}{}^*$ — стационарная концентрация структурного субстрата, г л$^{-1}$.

Скорость образования структурной формы лимитирующего элемента из ресурсной можно записать в виде ферментативной реакции с константой $k_{rs}$:

$$\frac{dS^*_{str}}{dt} = k_{rs} f_{rs} S^*_{str} S^*_{res}. \tag{11}$$

С увеличением концентрации ресурсной формы лимитирующего субстрата до некоторой величины ($S^*_{res1}$) скорость реакции становится максимальной, определяемой новым лимитирующим фактором, и уже не зависит от рассматриваемого внутриклеточного лимитирующего ресурсного субстрата:

$$\begin{array}{l} S^*_{res} = S^*_{res1}, \\ \left(\dfrac{dS_{str}}{dt}\right)_m = k_{rs} f_{rs} S^*_{res1} S^*_{str}. \end{array} \tag{12}$$

Скорость изменения концентрации резервной формы лимитирующего элемента в клетках будет равна разности между скоростью поступления элемента в клетки и скоростью его расхода на синтез структурных форм:

$$\frac{dS^*_{res}}{dt} = \left(\frac{dS_{cell}}{dt}\right)_{inc} - \frac{dS^*_{res}}{dt} = \mu_s f_s S^*_{str} \frac{1}{S_1} \left| \begin{array}{ll} S^*, & S^* \le S_1; \\ S_1, & S^* \ge S_1, \end{array} \right. - k_{rs} f_{rs} S^*_{str} S^*_{res}. \tag{13}$$

В результате имеем систему уравнений, описывающую динамику внутриклеточных переходов одной формы лимитирующего элемента в другую:

$$\begin{cases} \dfrac{dS^*_{res}}{dt} = \mu_s f_s S^*_{str} \dfrac{1}{S_1} \left| \begin{array}{ll} S^*, & S^* \le S_1; \\ S_1, & S^* \ge S_1, \end{array} \right. - k_{rs} f_{rs} S^*_{str} S^*_{res}, \\ \dfrac{dS^*_{str}}{dt} = k_{rs} f_{rs} S^*_{str} S^*_{res}. \end{cases} \tag{14}$$

Необходимо отметить, что коэффициенты параметрических уравнений имеют строгий физико-химический смысл и могут быть измерены независимым образом. Выбор прямо пропорциональной зависимости скорости транспортных и метаболических превращений от потока лимитирующих факторов в виде ломаных Блэкмана подкрепляется наличием относительно большого количества интермедиатов (метаболом) перед ключевым ферментом. В математическом отношении это положение связано с асимптотическими методами в теории массового обслуживания [Боровков, 1980]. Такой подход значительно облегчает моделирование технологии производства микроводорослей [Лелеков, 2023].

## Заключение

В работе сформулированы основные положения метабономики микроводорослей, позволяющие дать количественную оценку скоростей метаболических реакций и соотношений любых химических составляющих клеточной биомассы микроводорослей. Рассмотрены основные понятия и принципы, позволяющие описать закономерности субстратзависимого роста культуры микроводорослей. Внешние и внутриклеточные потоки субстрата записаны линейными сплайнами, что позволяет достичь оптимального сочетания точности описания экспериментальных данных и возможности расчёта коэффициентов модели, каждый из которых имеет биологический смысл. Получены базовые уравнения, позволяющие описать динамический ответ живых систем на внешние условия, приводящие к изменению их метаболома.

## Список литературы


1. *Боровков А. А.* Асимптотические методы в теории массового обслуживания. – Москва : Наука, 1980. – 381 с.
2. *Вилли К., Детье В.* Биология : (Биологические процессы и законы). – Москва : Мир, 1974. – 823 с.
3. *Дроздов-Тихомиров Л. Н., Дороднов А. В.* Оптимальная структура полиферментной системы // Молекулярная биология. – 1991. – Т. 25, № 5. – С. 1382–1390.
4. *Лелеков А. С.* Количественные закономерности роста микроводорослей в культуре и параметры управления процессом фотобиосинтеза : автореф. дис. … д-ра биол. наук : 1.5.2. – Севастополь, 2023. – 45 с.
5. *Лелеков А. С., Тренкеншу Р. П.* Фундаментальные принципы моделирования фотобиосинтеза микроводорослей // Вопросы современной альгологии. – 2018. – № 3. – С. 1–10. – https://elibrary.ru/vqstdg
6. *Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С.* Математическое моделирование в биофизике. – Москва : Наука, 1975. – 344 с.
7. *Тренкеншу Р. П.* Кинетика субстратзависимых реакций при различной организации метаболических систем. – Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – 89 с.
8. *Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С.* Моделирование роста микроводорослей в культуре. – Белгород : Константа, 2017. – 152 с.
9. *Челебиева Э. С., Кладченко Е. С., Данцюк Н. В., Боровков А. Б., Водясова Е. А.* Генетическая инженерия в биотехнологии микроводорослей: достижения и перспективы // Биоразнообразие и устойчивое развитие. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 53–76. – https://doi.org/10.21072/eco.2024.09.1.04
10. *Blackman F. F.* Optima and limiting factors // Annals of Botany. – 1905. – Vol. 19. – P. 281–295.
11. *Borovkov A. B., Gudvilovich I. N., Lelekov A. S., Avsiyan A. L.* Effect of specific irradiance on productivity and pigment and protein production of *Porphyridium purpureum* (Rhodophyta) semi-continuous culture // Bioresource Technology. – 2023. – Vol. 374. – Art. 128771. – https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128771
12. Enzyme Nomenclature : world wide web version prepared by G. P. Moss / Nomenclature Committee of the Intern. Union of Biochemistry and Molecular Biology. – URL: https://iubmb.qmul.ac.uk/enzyme/ (date of access: 16.02.2026).
13. *Fiehn O.* Combining genomics, metabolome analysis, and biochemical modelling to understand metabolic networks // Comparative and Functional Genomics. – 2001. – Vol. 2, iss. 3. – P. 155–168. – https://doi.org/10.1002/cfg.82
14. *Jacob F., Monod J.* Genetic regulatory mechanisms in the synthesis of proteins // Journal of Molecular Biology. – 1961. – Vol. 3, iss. 3. – P. 318–356. – https://doi.org/10.1016/S0022-2836(61)80072-7
15. *Liebig J.* Chemistry in its application to agriculture and physiology. – London : Taylor and Walton, 1847. – 320 p.
16. *Michaelis L., Menten M. L.* Die kinetik der invertinwirkung // Biochemische Zeitschrift. – 1913. – Vol. 49. – P. 333–369.
17. *Monod J.* The growth of bacterial cultures // Annual Review of Microbiology. – 1949. – Vol. 3. – P. 371–394. – https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103
18. *Nicholson J. K., Lindon J. C., Holmes E.* «Metabonomics»: understanding the metabolic responses of living systems to pathophysiological stimuli via multivariate statistical analysis of biological NMR spectroscopic data // Xenobiotica. – 1999. – Vol. 29, iss. 11. – P. 1181–1189. – https://doi.org/10.1080/004982599238047
19. *Nielsen J., Villadsen J., Liden G.* Bioreaction engineering principles. – 2nd ed. – New York [et al.] : Kluwer Academic/Plenum Publ., 2003. – 528 p.

20. *Saini D. K., Manchanda G., Chaudhary R. G., Singh R. P.* Microalgal metabolomes and recent biotechnological advances for their industrial application // Microbiology Research. – 2024. – Vol. 15, no 4. – P. 2056–2069. – https://doi.org/10.3390/microbiolres15040138
21. *Tanner W., Grünes R., Kandler O.* Spezifität und turnover des induzierbaren hexoseaufnahmesystems von chlorella // Zeitschrift für Pflanzenphysiologie. – 1969. – Vol. 62. – P. 376–386.
22. *Tweeddale H., Notley-McRobb L., Ferenci T.* Effect of slow growth on metabolism of Escherichia coli, as revealed by global metabolite pool ("metabolome") analysis // Journal of Bacteriology. – 1998. – Vol. 180. – P. 5109–5116. – https://doi.org/10.1128/JB.180.19.5109-5116.1998
23. *Wan M., Liu P., Xia J., Rosenberg J. N., Oyler G. A., Betenbaugh M. J., Nie Z., Qiu G.* The effect of mixotrophy on microalgal growth, lipid content, and expression levels of three pathway genes in *Chlorella sorokiniana* // Applied Microbiology and Biotechnology. – 2011. – Vol. 91, iss. 3. – P. 835–844. – https://doi.org/10.1007/s00253-011-3399-8
24. *Wang Y., Ning W., Li S., Gao C., Cui R., Guo W., Chang J. S., Ho S. H.* Metabonomics analysis of microalga *Scenedesmus obliquus* under ciprofloxacin stress // Environmental Research. – 2023. – Vol. 237, pt. 2. – Art. 116974. – https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116974

## BASICS OF MICROALGAE METABONOMICS

**Trenkenshu R. P., Lelekov A. S., Borovkov A. B.**

*A. O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS, Sevastopol, Russian Federation,*
*e-mail: biotex@ibss-ras.ru*

**Abstract:** The paper discusses the experience gained by the authors in working with microalgae cultures in the light of modern concepts and terminology of metabolic processes occurring in cells in their connection with external conditions. The external conditions in which microalgae are located determine both the specific set of metabolites in the cell at a given moment (metabolome) and the rate of conversion of metabolites from one form to another (metabonomics) in the sequence of biosynthetic reactions in the cells. The final result of these transformations is the growth of biomass, development, and cytokinesis.

**Keywords:** microalgae, metabolome, metabonomics, limiting factor, specific growth rate, linear splines

Сведения об авторах

| | |
|---|---|
| Тренкеншу Рудольф Павлович | кандидат биологических наук, научный консультант ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация |
| Боровков Андрей Борисович | кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, руководитель отдела биотехнологий и фиторесурсов ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация |
| Лелеков Александр Сергеевич | доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского РАН», просп. Нахимова, 2, Севастополь, 299011, Российская Федерация, e-mail: a.lelekov@ibss-ras.ru |

*Поступила в редакцию 18.02.2026*
*Принята к публикации 21.04.2026*