

А.А. Усербаева , А.Е. Бейсембек , Б.Д. Косалбаев ,  
К. Рысбекулы , К. Болатхан , А.Б. Какимова , Б.К. Заядан 

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы,  
e-mail: zbolatkhan@gmail.com

## ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ CO<sub>2</sub> НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ШТАММОВ ЦИАНОБАКТЕРИЙ

**Аннотация.** Накопление углекислого газа (CO<sub>2</sub>) в атмосфере, а также загрязнение водных объектов тяжелыми металлами являются экологическими проблемами, связанными с многочисленными воздействиями на экосистемы. Выращивание фотосинтетических микроорганизмов, эффективно поглощающих CO<sub>2</sub>, представляется перспективным решением, так как биомасса цианобактерий может быть использована для получения ценных биопродуктов. Интерес к влиянию высоких концентраций CO<sub>2</sub> на активность цианобактерий растет в связи с исследованиями очистки атмосферы от промышленных загрязнений с помощью цианобактерий как биофильтров, благодаря их способности к интенсивному росту в условиях повышенного содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере. Цианобактерии являются удобным объектом для исследований благодаря высокой скорости роста и управляемости их биосинтеза. В данной статье представлены результаты влияния различных концентраций углекислого газа на продуктивность штаммов цианобактерий. Устойчивость к ингибирующим концентрациям CO<sub>2</sub> является видоспецифичной и изменяется в широком диапазоне значений. Изучено влияние углекислого газа в концентрации 2%, 4% и 8% на скорость роста цианобактерий, а также проведена сравнительная оценка воздействия повышенной концентрации углекислого газа на прирост биомассы по показаниям оптической плотности и флуоресцентной активности. Определено, что концентрации углекислого газа 2–4% оказывают положительное влияние на продуктивность исследуемых культур цианобактерий. Установлено, что повышение концентрации CO<sub>2</sub> до 8% ведет к снижению показателей роста цианобактерий. Было установлено, что штамм *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 был отобран как наиболее продуктивный штамм из изученных цианобактерий по выходу сухой биомассы, флуоресцентной активности и характеризуется активным ростом при концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%.

**Ключевые слова:** углекислый газ, цианобактерии, продуктивность биомассы, активность флуоресценции.

A.A. Userbayeva, A.E. Beisembek, B.D. Kossalbayev,  
K. Rysbekuly, K. Bolatkhan, A. Kakimova, B. K.Zayadan  
Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,  
e-mail: zbolatkhan@gmail.com

### Effects of various CO<sub>2</sub> concentrations on the productivity of cyanobacterial strains

**Abstract.** The accumulation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) in the atmosphere, as well as pollution of water objects with heavy metals, are environmental problems associated with numerous impacts on ecosystems. The cultivation of photosynthetic microorganisms that efficiently absorb CO<sub>2</sub> is a promising solution, since the biomass of cyanobacteria can be used to produce valuable bioproducts. Interest in the effect of high concentrations of CO<sub>2</sub> on the activity of cyanobacteria is growing in connection with studies of cleaning the atmosphere from industrial pollution using cyanobacteria as biofilters, due to their ability to grow rapidly in conditions of high CO<sub>2</sub> content in the atmosphere. Cyanobacteria are a convenient object for research due to the high growth rate and controllability of their biosynthesis. This article presents the results of the influence of different concentrations of carbon dioxide on the productivity of strains of cyanobacteria. Resistance to inhibitory concentrations of CO<sub>2</sub> is species-specific and varies over a wide range of values. The effect of carbon dioxide at a concentration of 2%, 4%, and 8% on the growth rate of cyanobacteria was studied, and a comparative assessment of the effect of increased carbon dioxide concentrations on biomass growth from the readings of optical density and fluorescence activity was carried out. It was determined that carbon dioxide concentrations of 2–4% have a positive

effect on the productivity of the studied cultures of cyanobacteria. It was found that increasing the concentration of CO<sub>2</sub> to 8% leads to a decrease in growth rates of cyanobacteria. It was determined that the strain *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 was selected as the most productive strain from the studied cyanobacteria according to the yield of dry biomass, fluorescence activity and characterized by active growth at a concentration of CO<sub>2</sub> in air – 4%.

**Key words:** Carbon dioxide, cyanobacteria, biomass productivity, fluorescence activity

А.А. Усербаева, А.Е. Бейсембек, Б.Д. Қосалбаев,  
К. Рысбекулы, К. Болатхан, А.Б. Какимова, Б.Қ. Заядан  
әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,  
e-mail: zbolatkhan@gmail.com

### Әр түрлі CO<sub>2</sub> концентрациясының цианобактерия штамдарының өнімділігіне әсері

**Аңдатпа.** Атмосферада көмірқышқыл газының (CO<sub>2</sub>) артық мөлшерде жинақталуы, сондай-ақ су объектілерінің ауыр металдармен ластануы – күрделі экологиялық мәселелер болып табылады. Осы тұрғыда, CO<sub>2</sub>-ны тиімді сіңіретін фототрофты микроорганизмдерді өсіру перспективті әрекет болып табылады, өйткені алынған биомассаны пайдалы биоөнімдер алу үшін қолдануға болады. CO<sub>2</sub> жоғары концентрациясының цианобактериялардың өсу көрсеткішіне әсер етуіне деген қызығушылық цианобактерияларды биофилтрлер ретінде өнеркәсіптік орындарынан атмосфераға шыққан қалдық заттардан тазарту тұрғысындағы зерттеулерге байланысты арту үстінде. Цианобактериялар – өсу жылдамдығы және биосинтез процесінің оңай басқарылуының арқасында зерттеуге ыңғайлы нысан болып табылады. Бұл мақалада цианобактерия штамдарының өнімділігіне көмірқышқыл газының әртүрлі концентрацияларының әсер ету нәтижелері берілген. Цианобактериялардың CO<sub>2</sub> газының концентрациясына деген сезімталдығы түрлік ерекшеліктеріне байланысты әртүрлі болып келеді. 2%, 4% және 8% концентрациясында көмірқышқыл газының цианобактериялардың өсу көрсеткішіне әсері зерттелді және оптикалық тығыздық пен флуоресценция белсенділігі тіркеліп, көміртегі диоксиді мөлшерінің жоғарылауы биомасса өнімділігіне әсерін салыстырмалы түрде зерттеу жүргізілді. Көмірқышқыл газының 2-4% концентрациясы цианобактериялардың штамдарының өнімділігіне оң әсер ететіндігі анықталды. CO<sub>2</sub> концентрациясын 8%-ға дейін арттыру цианобактериялардың өсу қарқынының төмендеуіне әкелетіні байқалды. *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 штаммы құрғақ биомасса, флуоресценция қарқындылығы бойынша зерттелген цианобактериялармен салыстырғанда ең өнімді штамм ретінде таңдалынып, ауада CO<sub>2</sub> – 4% концентрациясында белсенді өсетіндігі анықталды.

**Түйін сөздер:** көмірқышқыл газы, цианобактерия, биомасса өнімділігі, флуоресценция активтілігі.

### Введение

С тенденцией увеличения концентрации углекислого газа в атмосфере, вызванного не только в локальных но и в глобальных масштабах, исследования в аспектах влияния углекислого газа на окружающую среду приобретают всю большую актуальность. Признанные недостатки в области устойчивого развития, а также серьезное ухудшение состояния окружающей среды и проблемы глобального потепления, вызванное антропологическими выбросами CO<sub>2</sub>, являются основными проблемами, стоящими сегодня перед миром [1]. Так же, изменения условий окружающей среды вызывают дисбаланс темновых и световых реакций фотосинтеза, что приводит к нарушению функциональной активности растительной клетки. Важнейшими факторами окружающей среды являются свет

и углекислый газ – основные субстраты для световых и темновых реакций фотосинтеза [2]. Адаптационные изменения в структурно-функциональном состоянии фотосинтетического аппарата, а также изменения в клеточном метаболизме растений происходят в ответ на изменения освещенности [3]. Однако, цианобактерии играют важную роль в фиксации CO<sub>2</sub>, поэтому, культивируя их можно уменьшить выброс CO<sub>2</sub>, и в тоже время получить биомассу микроводорослей, представляющую большую ценность в биоэнергетике. Однако в этом подходе процесс культивирования микроводорослей играет важную роль, поскольку он напрямую связан с механизмом фиксации микроводоросли и цианобактерии – CO<sub>2</sub> и характеристиками производства их биомассы [4]. Необходимо отметить, что в отличие от широких исследований действия углекислого газа на организм человека и животных,

влияние углекислого газа на метаболические процессы растительной клетки изучено гораздо в меньшей степени. Механизмы ингибирования фотосинтеза избыточной концентрацией CO<sub>2</sub> на сегодняшний день остаются не достаточно освещенными [4]. Угнетение роста фототрофных микроорганизмов при высоких концентрациях CO<sub>2</sub> связывали с его отрицательным влиянием на интенсивность фотосинтеза. В более поздних работах ингибирование фотосинтеза объясняли с точки зрения подкисления цитоплазмы в результате образования кислых продуктов гидратации диоксида углерода [5]. Микроводоросли и цианобактерии обладают гораздо более высокой устойчивостью к высоким концентрациям CO<sub>2</sub> по сравнению с высшими растениями. Увеличение концентрации CO<sub>2</sub> в окружающей среде до 1-5% активизирует рост и фотосинтез микроводорослей [6]. Устойчивость к ингибирующим концентрациям CO<sub>2</sub> является видоспецифичной и изменяется в широком диапазоне значений. Последнее, возможно, связано с участием этих организмов в изменении газового состава атмосферы из аноксической, богатой CO<sub>2</sub>, в кислородную и в становлении биосферы [6,7]. Показано, что экстремально высокая концентрация CO<sub>2</sub> являясь стрессовым фактором, вызывает глубокие изменения в структуре и метаболизме микроводорослей, приводя к переходу клеток к специализированным биосинтезам и гипертрофированному накоплению липидов и углеводов [8]. Интерес к влиянию высоких концентраций углекислого газа на активность микроводорослей цианобактерий возник в последние 30 лет, в том числе, в связи с проектами очистки атмосферы от промышленных загрязнений с помощью микроводорослей как биофильтров, благодаря их способности к интенсивному росту в условиях повышенного содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере [8]. Микроводоросли и цианобактерии обладают огромным потенциалом в рециркуляции и биоремедиации CO<sub>2</sub>, а также в производстве химической энергии в виде биомассы [9]. И поскольку, одним из основных направлений работ по охране природных ресурсов является внедрение новых безотходных технологических процессов, используя штаммы цианобактерий, являющиеся активными продуцентами жирных кислот в очистке воздушных ресурсов от CO<sub>2</sub>, предоставляется возможность попутного получения дешевой биомассы микроводорослей [10], обладающей высокой ценностью для получения альтернативных видов биотоплива. Однако подобные исследования требуют предварительного исследования влияния углекислого газа на

выживаемость культур и подбора его концентраций, благоприятных для роста микроводорослей [11,12].

В связи с этим, целью данного исследования было подобрать концентрации CO<sub>2</sub>, оптимальные для культивирования штаммов цианобактерий – продуцентов жирных кислот.

### Материалы и методы исследования

Объектами данной работы являлись коллекционные штаммы цианобактерий *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200, *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201, *Synechococcus elongatus* 7942, *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220 из коллекции фототрофных микроорганизмов КазНУ им. аль-Фараби.

Выращивание накопительной культуры проводили на жидких средах BG-11, Заррука [13,14,15]. Для проведения эксперимента клетки исследуемых цианобактерий непрерывно выращивали в сосудах емкостью 500 мл со стеклянными барботерами при температуре 25°C при искусственном освещении с интенсивностью света 300 мкмоль/м<sup>2</sup> и аэрацией стерильным газом и смесью воздуха, обогащенной 2%, 4%, 8 % CO<sub>2</sub> [15]. Аэрация осуществлялась с помощью воздушного компрессора BOYU с воздушным насосом S-4000B (Китай). Концентрация CO<sub>2</sub> регулировалась ротаметром PMA-0,063 Г (Россия). Рост культур был измерен как изменение оптической плотности на спектрофотометре PD – 303UV (Япония). Продуктивность биомассы культур определяли по методу Сиренко [16], клетки осаждали с помощью центрифуги 5810R (Eppendorf, Германия).

Коэффициент скорости роста культур цианобактерий рассчитывали по приросту численности клеток в экспериментальных сосудах по уравнению (1):

$$k = \frac{1}{t} \ln \frac{N_t}{N_0} \quad (1)$$

где N<sub>0</sub> – исходная численность клеток; N<sub>t</sub> – численность клеток через время t.

Постоянную флуоресценцию хлорофилла а (F<sub>0</sub>) в клетках исследуемых цианобактерий измеряли с помощью *флуориметра* AquaPen AP 100 (Чехия). Полученные данные флуоресценции разделили на 10000 единиц, значения представлены на относительных единицах (о.е.). Определение сухого веса осуществляли в два этапа. На первом этапе определяли общий сухой вес (цианобактерии + соли), для этого клетки осаждали центрифугированием при 5000

оборотов в минуту. Культуру высушивали при 80°C в течение трех дней. После выпаривания и сушки материала чашки вновь взвешивали на аналитических весах и по разнице веса определяли общий сухой вес (г/л). На втором этапе сухой остаток заливали небольшим количеством дистиллированной воды. После полного растворения соли раствор перемешивали и вместе с нерастворимой частью помещали в мерную пробирку, где дистиллированной водой доводили до объема, равного объему образца на первом этапе, и далее подвергали центрифугированию. После центрифугирования отбирали часть раствора над осадком и тем же методом, что и для определения общего сухого веса, определяли сухой вес соли в исследуемом образце (г/л). По разнице между общим сухим весом образца и сухим весом соли определили сухой вес цианобактерий [16].

### Результаты и обсуждение

Для изучения способности поглощения углекислого газа штаммами цианобактерий – продуцентами жирных кислот, нами проведен сравнительный анализ показателей постоянной флуоресценции, скорости роста клеток и накопление сухого веса у коллекционные штаммов цианобактерий: *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200, *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220, *Synechococcus elongatus* 7942, *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201.

Скрининг экспериментальных культур цианобактерий проводился на основе результатов сравнительного анализа продуктивности, который включал определение скорости роста, флуоресценции и сухого веса. Для проведения эксперимента клетки исследуемых цианобактерий непрерывно выращивали в колбах в лабораторных условиях при искусственном освещении с интенсивностью света 300 мкмоль/м<sup>2</sup> и аэрацией смесью воздуха, обогащенной 2%, 4%, 8 % CO<sub>2</sub> в течении 8-ми суток. В качестве контроля использовали воздух, обогащенный CO<sub>2</sub> – 0,02%. Начальная оптическая плотность во всех вариантах составляла 0,03. Измерение оптической плотности клеток опытных штаммов проводилось каждые сутки. Активный рост с первого дня культивирования наблюдался у штамма *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 с концентрацией CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%. Расчетные данные коэффициентов скорости роста для цианобактерий представлены на рисунке 1. Полученные данные свидетельствует, что влияние углекислого газа на рост данных штаммов сильно разнится. При

концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 2%, культуры *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220 и *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201 имеют относительно высокие коэффициенты скорости роста, в то время как для штаммов *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 и *Synechococcus elongatus* 7942 такие показатели отмечены при концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%. Следует отметить, что при повышенной концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 8%, наблюдается угнетение роста всех исследуемых штаммов.

Помимо оптической плотности исследуемых культур, показатель постоянной флуоресценции (F<sub>0</sub>) используется для определения концентрации цианобактерий в суспензии и оценки скорости их роста. Данное измерение помогает точнее определить фотосинтетическую активность культур при разной концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе. Измерение F<sub>0</sub> проводили параллельно во всех исследованных штаммах в течение 8 дней культивирования. Полученные результаты представлены на рисунке 2.

Из полученных данных видно, что наибольшая фотосинтетическая активность наблюдалась у цианобактерий *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220 (CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%) и *Cyanobacterium* sp. B-1200 (CO<sub>2</sub> в воздухе – 2%) показатели F<sub>0</sub> составляют 7,92 и 8,91 относительных единиц. Однако для штаммов *Synechococcus elongatus* 7942 и *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201, даже при повышенных концентрациях углекислого газа, показатели фотосинтетической активности понижаются уже после 6-7 суток культивирования. Для штамма *Synechococcus elongatus* 7942, самый высокий показатель фотосинтетической активности наблюдался при концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%, и составил 3,82 относительных единиц. Что касается штамма *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201, то наивысший показатель фотосинтетической активности, равный 5,4 о.е., наблюдался при концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 2%.

Способность цианобактерий к фотосинтезу, возможность культивирования их на средах, содержащих только минеральные элементы в основе среды позволяют получать большие объемы биомассы в кратчайшие сроки. В конце эксперимента, на 8 день определен выход сухой биомассы исследуемых штаммов цианобактерий во всех вариантах опыта. Для этого плотную культуральную суспензию концентрировали с помощью центрифуги и сушили при +150 °C в течение 3 дней. Результаты, полученные в эксперименте, представлены на рисунке 3.

Влияния различных концентраций CO<sub>2</sub> на продуктивность штаммов цианобактерий

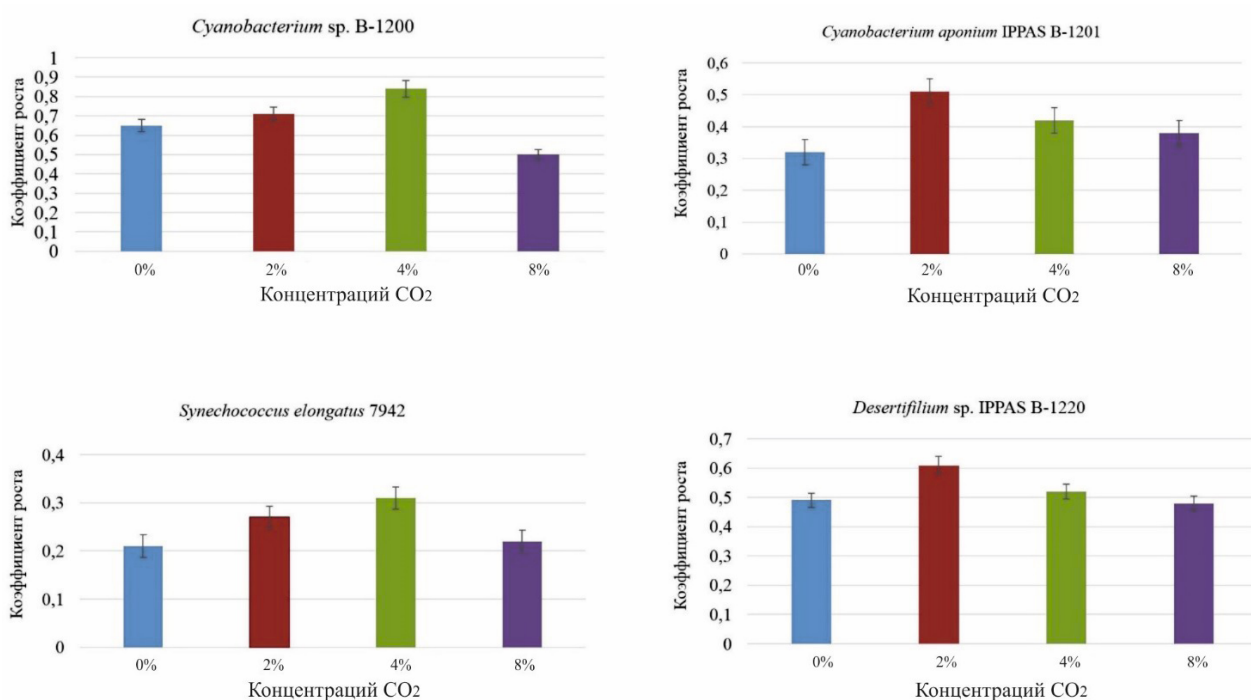


Рисунок 1 – Коэффициенты скорости роста штаммов цианобактерий при влиянии различных концентраций CO<sub>2</sub>

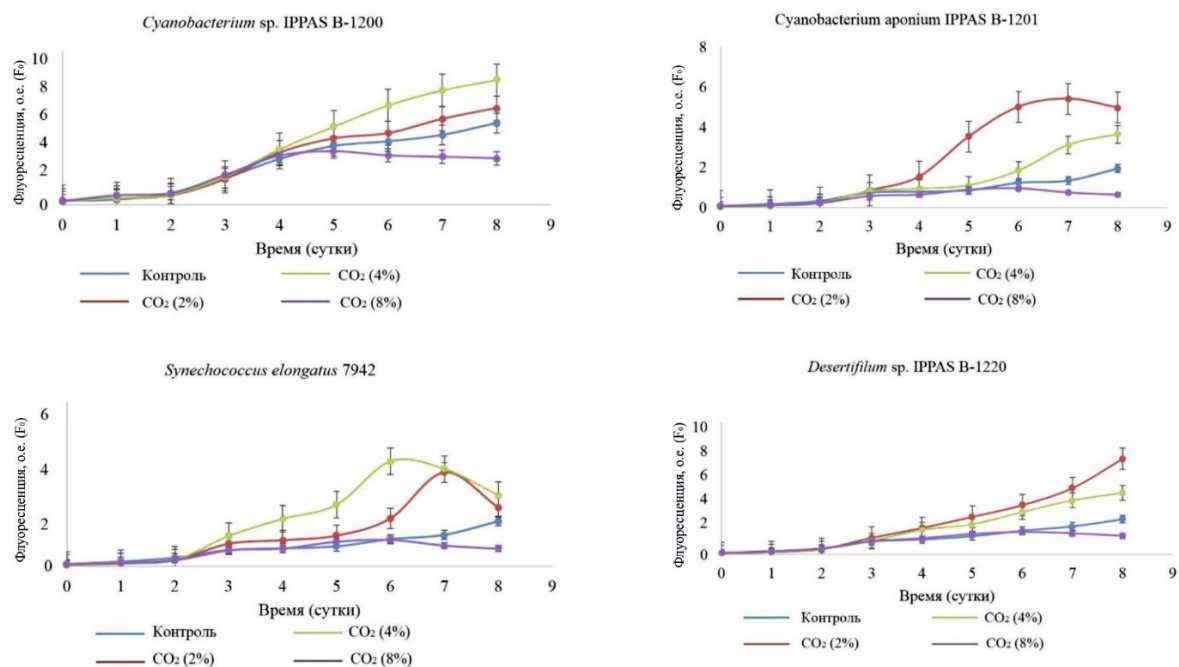


Рисунок 2 – Кривые постоянной флуоресценции (F<sub>0</sub>) штаммов цианобактерий при влиянии различных концентраций CO<sub>2</sub>

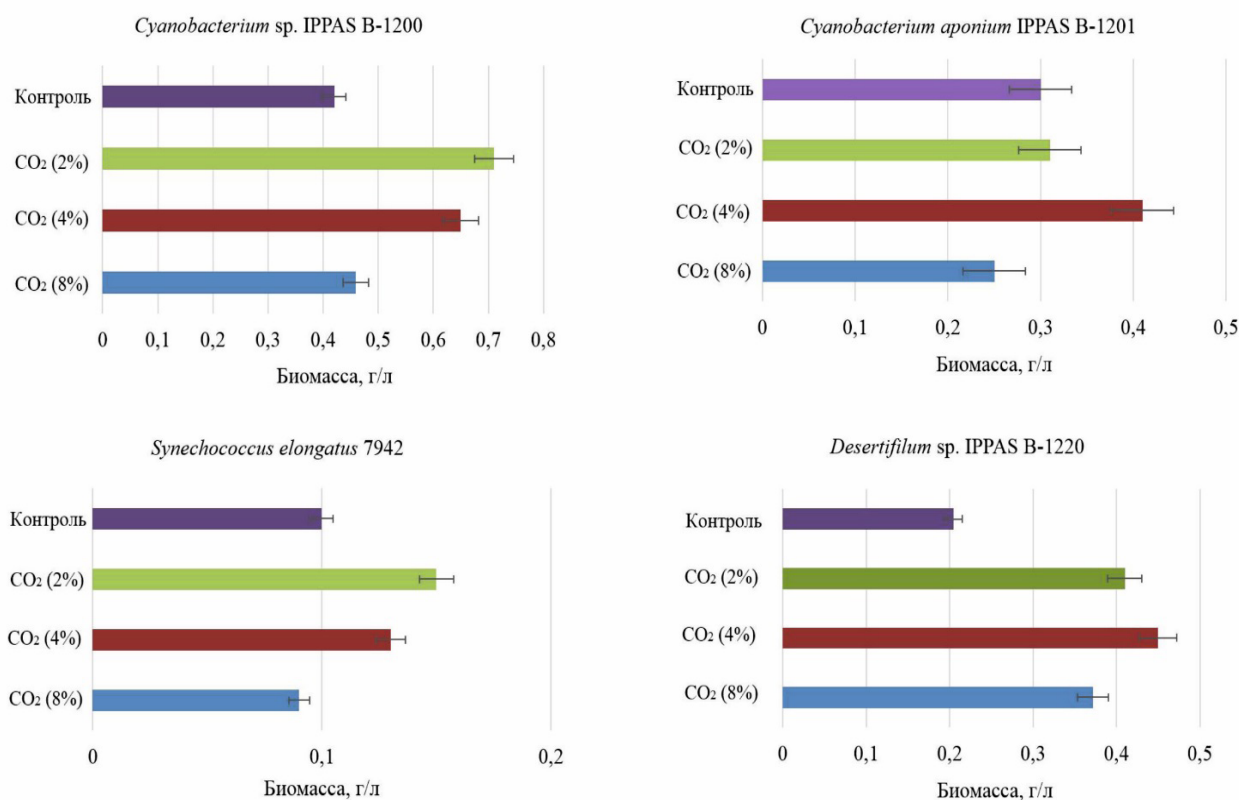


Рисунок 3 – Накопление биомассы различных штаммов цианобактерии на 8-й день культивирования

Культивирование в условиях различных концентраций углекислого газа показало влияние CO<sub>2</sub> на накопление биомассы. Относительно высокое накопление сухой биомассы было обнаружено у *Cyano bacterium sp. IPPAS B-1200* (от 0,65 до 0,71 г/л) при концентрации CO<sub>2</sub> 2-4% соответственно. При данных концентрациях углекислого газа в воздухе наблюдается высокое накопление биомассы и у штамма *Desertifilum sp. IPPAS B-1220* – 0,41-0,45 г/л, в то время как для штамма *Synechococcus elongatus 7942* данные показатели составили 0,13-0,15 г/л. У штамма *Cyano bacterium aponium IPPAS B-1201* накопление биомассы наблюдалось только при культивировании при концентрации CO<sub>2</sub> – 2%, которое при этом составило 0,41 г/л.

Полученные нами результаты согласуются с литературными данными. Так, аналогичные результаты получены Yunes et al. [17], которые, определяя влияние CO<sub>2</sub> на гетероцистную цианобактерию *Anabaena variabilis* ATCC 29413, отметили значительное увеличение интенсивности роста данной культуры, ими установлено, что увеличение CO<sub>2</sub> (от 0,035% до 5%) вызывало быстрое поглощение нитритов, независимо от того, были ли культуры инкубированы на свету или в

темноте, и стимулировал эволюцию фотосинтетического O<sub>2</sub>, активность глутаминсинтетазы и активность нитрогеназы. Согласно полученным ими результатам, наличие CO<sub>2</sub> является важным фактором в контроле усвоения нитритов и согласуется с регулирующими взаимодействиями, включающими продукты усвоения CO<sub>2</sub> и азота.

Положительное влияние возрастающих концентраций (до 5%) CO<sub>2</sub> на показатели роста микроводоросли *Chlorella vulgaris* отмечено и в исследованиях Goncalves et al. [18], где ими изучались кинетические параметры роста данной микроводоросли, выращенной в воздушных потоках, содержащих различные концентрации CO<sub>2</sub>. При этом ими отмечено отсутствие фазы адаптации у микроводоросли, клетки *Chlorella vulgaris* начали экспоненциально расти с начала эксперимента, что свидетельствует об их устойчивости к высоким уровням CO<sub>2</sub>. Аналогичные данные о положительном влиянии концентраций CO<sub>2</sub> – 6 % на удельную скорость роста *Spirulina sp.* и *Scenedesmus obliquus* были получены Morais et al. [19].

Таким образом, на основе полученных результатов установлено, что оптимальной концентрацией CO<sub>2</sub> для культивирования циано-



бактерий *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200, *Synechococcus elongatus* 7942 является 2%, в то время как для штаммов *Cyanobacterium aponium* IPPAS B-1201 и *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220 оптимальное значение CO<sub>2</sub> для роста – 4%.

Следует отметить, что из исследуемых штаммов цианобактерий *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200 и *Desertifilum* sp. IPPAS B-1220 имеют сравнительно высокие показатели скорости роста, флуоресценции и выхода биомассы, определяющие их высокую продуктивность.

### Заключение

Проведена сравнительная оценка продуктивности разных штаммов цианобактерий под воздействием повышенных концентраций углекислого газа. Показано, что концентрации углекислого газа 2-4 % оказывают положительное

влияние на продуктивность исследуемых культур цианобактерий. Установлено, что повышенные концентрации CO<sub>2</sub> до 8% ведет к снижению показателей роста цианобактерий.

Наиболее продуктивным штаммом из исследованных цианобактерий по выходу сухой биомассы отобран штамм *Cyanobacterium* sp. IPPAS B-1200, характеризующийся активным ростом при концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе – 4%. Использование данного штамма с заложенными в нем возможностями биологической очистки атмосферного воздуха от углекислого газа позволяет изменить экологическую обстановку и создать надежную систему оздоровления воздушных природных ресурсов. При этом дополнительно появляется возможность получения биомассы цианобактерии, которая является потенциальным продуцентом жирных кислот и представляет большой интерес в биоэнергетике.

### Литература

- 1 Zeng X., Danquah M.K., Chen X.D., Lu Y. Microalgae bioengineering: From CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15. – P. 3252–3260.
- 2 Gonçalves A.L., Rodrigues C.M., Pires J.S., Simões V. The effect of increasing CO<sub>2</sub> concentrations on its capture, biomass production and wastewater bioremediation by microalgae and cyanobacteria // *Algal Research*. – 2016. – Vol. 14. – P. 127–136.
- 3 Rodionova M.V., Poudyal R.S., Tiwari I., Voloshin R.A., Zharmukhamedov S.K., Nam H.G., Zayadan B.K., Bruce B.D., Hou H.J.M., Allakhverdiev S.I. Biofuel production: Challenges and opportunities // *Int J Hydrogen Energy*. – 2017. – Vol. 42. – P. 8450–8461.
- 4 Zhao B., Su Y. Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 31. – P. 121–132.
- 5 Eloka-Eboka A.C., Inambao F.L. Effects of CO<sub>2</sub> sequestration on lipid and biomass productivity in microalgal biomass production // *Applied Energy*. – 2017. – Vol. 195. – P. 1100–1111.
- 6 Серебрякова Л.Т., Трошина О.Ю., Шереметьева М.Е. Продукция молекулярного водорода одноклеточной цианобактерией *Gloeocapsa alpicola* // *От современной фундаментальной биологии к новым наукоемким технологиям*. – 2001. – 98-99 с.
- 7 Razaghifard R. Algal biofuels // *Photosynth Res*. – 2013. – Vol. 117. – P. 207-219.
- 8 Raeesossadati M.J., Ahmadzadeh H., McHenry M.P., Moheimani N.R. CO<sub>2</sub> bioremediation by microalgae in photobioreactors: Impacts of biomass and CO<sub>2</sub> concentrations, light, and temperature // *Algal Research*. – 2014. – Vol. 6. – P. 78–85.
- 9 Martins J., Peixe L., Vasconcelos V.M. Unraveling cyanobacteria ecology in wastewater treatment plants // *Microb Ecol*. – 2011. – Vol. 62, No 2. – P. 241–256.
- 10 Razzak S.A., Ali S.A.M., Hossain M.M., deLasa H. Biological CO<sub>2</sub> fixation with production of microalgae in wastewater // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 76. – P. 379–390.
- 11 Tang D., Han W., Li P., Miao X., Zhong J. CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels, *Bioresour. Technol.* – 2011. – Vol. 102. – P. 3071–3076.
- 12 Olguin E.J. Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products // *Biorefinery Biotechnol Adv*. – 2012. – Vol. 30. – P. 1031–1046.
- 13 Семененко В.Е. Каталог культур микроводорослей в коллекциях СССР. (ред.) – М.: Изд-во РАН. – 1991. – 228 с.
- 14 Заядан Б.К., Садвакасова А.К., Акмуханова Н.Р., Болатхан К., Сарсекеева Ф.К., Бауенова М.О. Коллекция микроводорослей и цианобактерий КазНУ имени аль-Фараби и перспективы ее использования // *Experimental Biology*. – 2016. № 66. – С. 206-215.
- 15 Владимирова М.Г., Семененко В.Е. Интенсивная культура одноклеточных водорослей. – М.: АН СССР. – 1962. – 60 с.
- 16 Сиренко Л.А., Сакевич А.И. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике. – Киев: Наукова думка, – 1975. – 248 с.
- 17 Yunes J.S. Effects of light and CO<sub>2</sub> on nitrite liberation by the heterocystous cyanobacterium *Anabaena variabilis* // *J. Plant Physiol*. – 1995. – Vol. 147. – P. 313–320.

- 18 Gonçalves A.L., Rodrigues C.M., Pires J.C.M., Simões M. The effect of increasing CO<sub>2</sub> concentrations on its capture, biomass production and wastewater bioremediation by microalgae and cyanobacteria // *Algal Research*. – 2016. – Vol. 14. – P. 127–136.
- 19 Morais M.G.D., Costa J.A.V. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor // *J. Biotechnol.* – 2007. – Vol. 129. – P. 439–445.

### References

- 1 Zeng, X., Danquah, M.K., Chen, X.D., Lu, Y. “Microalgae bioengineering: From CO<sub>2</sub> fixation to biofuel production.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, (2011): 3252-3260.
- 2 Gonçalves, A.L., Rodrigues, C.M., Pires, J.C.M., Simões, M. “The effect of increasing CO<sub>2</sub> concentrations on its capture, biomass production and wastewater bioremediation by microalgae and cyanobacteria.” *Algal Research* 14, (2016): 127-136.
- 3 Rodionova, M.V., Poudyal, R.S., Tiwari, I., Voloshin, R.A., Zharmukhamedov, S.K., Nam, H.G., Zayadan B.K., Bruce, B.D., Hou, H.J.M., Allakhverdiev, S.I. “Biofuel production: Challenges and opportunities.” *Int J Hydrogen Energy* 42, (2017): 8450-8461.
- 4 Zhao, B., Su, Y. “Process effect of microalgal-carbon dioxide fixation and biomass production: A review.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31, (2014): 121-132.
- 5 Eloka-Eboka, A.C., Inambao, F.L. Effects of CO<sub>2</sub> sequestration on lipid and biomass productivity in microalgal biomass production.” *Applied Energy* 195, (2017): 1100-1111.
- 6 Serebryakova, L.T., Troshina, O.Y., Sheremetyeva, M.Y. “Produktsiya molekulyarnogo vodoroda odnokletochnoy tsianobakteriyey *Gloeocapsa alpicola*.” [“Molecular hydrogen production by unicellular cyanobacterium *Gloeocapsa alpicola*”] *Ot sovremennoy fundamental'noy biologii k novym naukoymkim tekhnologiyam*, (2001): 98–99. (In Russian).
- 7 Razaghifard, R. “Algal biofuels.” *Photosynth Res* 117, (2013): 207-219.
- 8 Raeesossadati, M.J., Ahmadzadeh, H., McHenry, M.P., Moheimani, N.R. “CO<sub>2</sub> bioremediation by microalgae in photobioreactors: Impacts of biomass and CO<sub>2</sub> concentrations, light, and temperature.” *Algal Research* 6, (2014): 78-85.
- 9 Martins, J., Peixe, L., Vasconcelos, V.M. “Unraveling cyanobacteria ecology in wastewater treatment plants.” *Microb Ecol* 62, (2011): 241-256.
- 10 Razzak, S.A., Ali, S.A.M., Hossain, M.M., deLasa, H. “Biological CO<sub>2</sub> fixation with production of microalgae in wastewater.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76, (2017): 379-390.
- 11 Tang, D., Han, W., Li P., Miao, X., Zhong, J. “CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels.” *Bioresour. Technol* 102, (2011): 3071-3076.
- 12 Olguin, E.J. “Dual purpose microalgae-bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products.” *Biorefinery Biotechnol Adv* 30, (2012): 1031-1046.
- 13 Semenenko, V.Y. *Katalog kul'tur mikrovdorosley v kollektsiyakh SSSR*. [Catalog of microalgae cultures in the collections of the USSR.] *Izd-vo RAN*, 1971. (In Russian).
- 14 Zayadan, B.K., Sadvakasova, A.K., Akmukhanova, N.R., Bolatkhan, K., Sarsekeyeva, F.K., Bauyenova, M.O. “Kollektsiya mikrovdorosley i tsianobakteriy KazNU imeni al'-Farabi i perspektivy yeye ispol'zovaniya.” [“The collection of microalgae and cyanobacteria of KazNU named after al-Farabi and the prospects for its use”] *Experimental Biology* 66, (2016): 206-215. (In Russian).
- 15 Vladimipova, M.G., Cemenenko, V.E. *Intencivnaya kul'tupa odnokletochnykh vodopocley*. [Intensive culture of unicellular algae.] *M.: AN CCCP*, 1962. (In Russian).
- 16 Sirenko, L.A., Sakevich, A.I. *Metody fiziologo-biokhimicheskogo issledovaniya vdorosley v gidrobiologicheskoy praktike*. [Methods of physiological and biochemical study of aquatic areas in hydrobiological practice.] *Kiyev: Naukova dumka*, 1975. (In Russian).
- 17 Yunes, J.S. “Effects of light and CO<sub>2</sub> on nitrite liberation by the heterocystous cyanobacterium *Anabaena variabilis*.” *J. Plant Physiol* 147, (1995): 313–320.
- 18 Gonçalves, A.L., Rodrigues, C.M., Pires, J.S., Simões, V. “The effect of increasing CO<sub>2</sub> concentrations on its capture, biomass production and wastewater bioremediation by microalgae and cyanobacteria.” *Algal Research* 1, (2016): 127-136.
- 19 Morais, M.G.D., Costa, J.A.V. “Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor.” *J. Biotechnol* 129, (2007): 439-445.