

УДК 581.1.035.2

С.С. МЕЛЬНИКОВ, Т.В. САМОВИЧ, Е.Е. МАНАНКИНА, Е.А. БУДАКОВА

ГНУ Ин-т биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси,

ул. Академическая, 27, 220072 Минск, Респ. Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ЧЕРЕДОВАНИЯ СВЕТОВЫХ И ТЕМНОВЫХ ПЕРИОДОВ
НА ПРОДУКТИВНОСТЬ *SPIRULINA (ARTHROSPIRA) PLATENSIS*
(NORDST.) GEITLER**

Исследовано влияние постоянного освещения и 6 фотопериодических режимов разной продолжительности на продуктивность синезеленой водоросли *Spirulina (Arthrospira) platensis*. Установлено, что темновые периоды при выращивании водоросли способствуют накоплению биомассы, белка, каротиноидов, фикоцианина и хлорофилла. Скорость накопления биомассы, белка и пигментов за 14 сут культивирования при режимах 10 ч свет – 14 ч темнота и 12 ч свет – 12 ч темнота была почти вдвое выше, чем при постоянном освещении, а каждый затраченный на освещение киловатт-час электроэнергии использовался на накопление биомассы почти вдвое эффективнее, чем при постоянном освещении.

Ключевые слова: *Spirulina (Arthrospira) platensis*, режимы свет-темнота, продуктивность, белок, каротиноиды, фикоцианин, хлорофилл.

Введение

Биомасса нитчатой синезеленой водоросли спирулины обладает разными полезными свойствами и широко используется во многих странах мира как биологически активная пищевая добавка, а также для получения лекарственных и биохимических препаратов (Santillan, 1982; Ciferri, 1983; Henrikson, 1989). Биомасса спирулины – адаптогенный поливитаминный препарат, обладающий антиоксидантным, иммуномодулирующим, антистрессовым, гипохолестеринемическим, радиопротекторным и антиканцерогенным действием (Belay, 2002). Спирулина является профилактическим и лечебным средством для лечения детей с алопецией, вызванной свинцовой интоксикацией или лучевой болезнью (Евец и др., 1992, 1996), восполняет витаминную и минеральную недостаточность, выводит из организма тяжелые металлы, токсины и радионуклиды, нормализует обмен веществ, снижает артериальное давление и уровень холестерина в крови, служит профилактическим средством от атеросклероза, стабилизирует вес (Берестов, 1997). Ежегодное производство сухой биомассы водоросли биотехнологическими фирмами мира достигло в 2004 г. 8000 т, а рынок продаж составил 158 млн долларов США и продолжает увеличиваться (Чернова и др., 2009).

© **С.С. Мельников**, Т.В. Самович, Е.Е. Мананкина, Е.А. Будакова, 2012

В структуре затрат на выращивание спирулины около трети составляют расходы на освещение культуры даже в том случае, когда в течение суток световые и темновые периоды чередуются. Многие исследователи (Sasaki et al., 1995; Abd El-Baky, 2003; Геворгиз, 2005; Воронин, 2006; Chaiklahan, 2007; Каракис, 2008) выращивали спирулину при круглосуточном освещении. Естественно, что при таком освещении урожай биомассы, полученный в течение суток, будет большим, чем при чередующемся освещении, однако затраты на постоянное освещение будут непропорционально велики.

Цель данной работы – сопоставить продуктивность спирулины и содержание в биомассе белка, каротиноидов, фикоцианина и хлорофилла при непрерывном и чередующемся освещении, определив тем самым оптимальные, экономически наиболее выгодные режимы освещения при производстве биомассы.

Материалы и методы

Объектом исследования служила культура трихомной синезеленой водоросли *Spirulina (Arthrospira) platensis* штамм IBCE S-2 из коллекции Ин-та биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси. Водоросль выращивали в стеклянных конических колбах объемом 250 мл (рабочий объем 150 мл). Культивирование проводили при освещении светом ртутных люминесцентных ламп низкого давления холодного дневного света фирм Philips TL-D 36W/54-765 и Osram L36W/765 с интенсивностью $120 \text{ мкм/м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ в течение 14 сут для каждого фотопериода. Так как освещение осуществляли с помощью 4 ламп, общая потребляемая мощность составила 144 Вт. В табл. 1 приведены данные о режимах освещения культуры, количестве часов, в течение которых она освещалась при каждом периоде, и количестве киловатт-часов, затраченных на освещение при каждом фотопериоде.

Таблица 1

Условия освещения спирулины при выращивании в течение 14 суток

Режим освещения свет-темнота	Количество часов освещения	Расход электроэнергии кВт·ч
Постоянное освещение	336	48,4
14 ч св. – 10 ч темн.	196	28,2
10 ч св. – 14 ч темн.	140	20,2
12 ч св. – 12 ч темн.	168	24,2
8 ч св. – 8 ч темн.	168	24,2
7 ч св. – 5 ч темн.	196	28,2
2 ч св. – 25 мин темн.	280	40,3

Режимы освещения устанавливали с помощью программируемого циклического реле времени PCZ-522/COOO («Евроавтоматика ФиФ»),

г. Лида, РБ). Спирулину выращивали на питательной среде, содержащей глинисто-галитовые шламоотходы ПО «Беларуськалий», минеральные удобрения, ацетат натрия и пищевую соду (вместо используемого в стандартной среде Заррука бикарбоната натрия, что снижает стоимость новой среды вдвое). В процессе разработки Старобинского месторождения калийных солей ПО «Беларуськалий» образовались громадные залежи глинисто-галитовых шламоотходов, загрязняющих окружающую среду. Эти отходы содержат хлористый натрий (NaCl) – 15,99 %, хлористый калий (KCl) – 8,82 %, хлористый магний (MgCl_2) – 0,19 %, сернокислый кальций (CaSO_4) – 4,65 %, хлористый кальций (CaCl_2) – 0,04 % и в меньших количествах окислы кремния, железа, алюминия, титана, серы, кальция, магния, калия, натрия (данные Центральной лаборатории ПО «Беларуськалий»). Среда содержит (г/л водопроводной воды): шламоотходы – 10; пищевая сода – 12; натриевая селитра – 2,5; аммофос – 0,3; ацетат натрия – 0,15. Вместо стандартных растворов микроэлементов № 1 и 2, содержащих 12 солей, использовали раствор микроэлементов по Упитису (Упитис, 1989), содержащий 7 микроэлементов, что на 45 % снижает стоимость раствора. Вместо раствора сульфата железа (25 мг/л среды) использовали раствор цитрата железа (12 мг/л). Продуктивность спирулины на этой среде превосходит продуктивность на среде Заррука (Мельников, 2009; Пат. № 9416 РБ). Температура во время освещения 25–28 °С.

Продуктивность спирулины определяли по накоплению сухой биомассы в процессе ее роста, измеряя оптическую плотность при 750 нм (Минюк и др., 2000).

Количество сухой биомассы в суспензии (г/л) рассчитывали по формуле: $\text{АСБ} = (\text{ОП}_{750} + 0,08)/1,42$, где АСБ – абсолютно сухая биомасса, мг; ОП_{750} – величина оптической плотности суспензии, измеренная при 750 нм на спектрофотометре марки SP-830 plus (Metertech Inc., Taiwan).

Для определения содержания пигментов *in vivo* в клетках спирулины в процессе роста использовали упрощенный способ, основанный на особенностях ее пигментного состава, а следовательно, и спектра поглощения водоросли (см. рисунок). Поглощение световой энергии у спирулины обусловлено тремя группами пигментов – хлорофиллом *a* (основные максимумы поглощения в области 420 и 680 нм), фикоцианином (основной максимум 620 нм) и каротиноидами (490 нм).

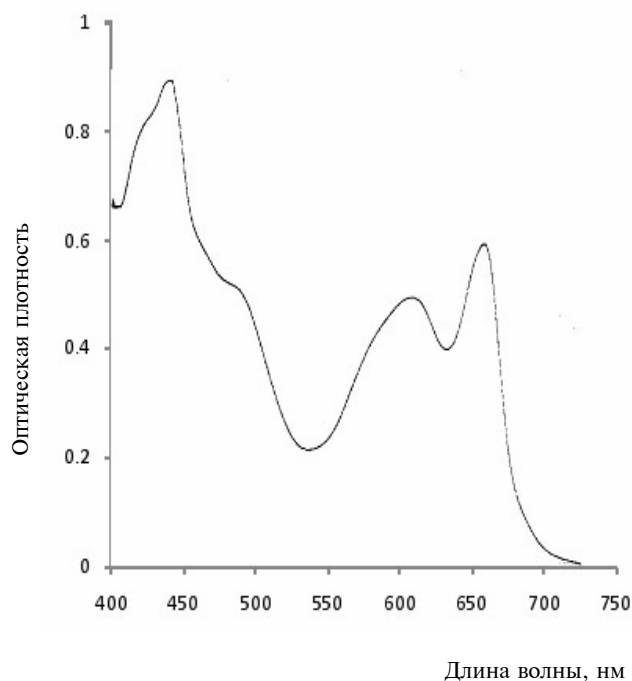
Единица оптической плотности при 490 нм соответствует содержанию 1,56 мг каротиноидов в 1 л культуры (Мельников, 1995), а поглощение при 620 и 680 нм обусловлено главным образом фикобилинами и хлорофиллом соответственно (Sasaki, 1995). Сопоставляя изменения величин оптических плотностей при этих длинах волн в процессе культивирования, оценивали изменения в содержании пигментов.

Для более точного измерения количества пигментов использовали способ определения каротиноидов и хлорофилла в растительных объектах по спектрам поглощения ацетоновых экстрактов. Для этого навеску

биомассы спирулины растирали в фарфоровой ступке в ацетоне с кварцевым песком. Ацетоновый экстракт фильтровали через стеклянный фильтр Шотта № 4, а осадок вновь промывали ацетоном до полного извлечения пигментов. Полученный экстракт анализировали на спектрофотометре (UVIKON 931, Kontron Instruments, ФРГ), измеряя поглощение при 452,5 и 663 нм, и рассчитывали содержание каротиноидов и хлорофилла по модифицированным формулам А.А. Шлыка (Шлык, 1971):

$$C_{\text{кар}}, \text{ мг/мл} = (4,75 \cdot \text{ОП}_{452,5} - 2,29 \cdot \text{ОП}_{663}) \cdot V; C_{\text{хл}}, \text{ мг/мл} = (10,12 \cdot \text{ОП}_{663}) \cdot V,$$

где ОП – оптическая плотность экстракта при длинах волн 452,5 и 663 нм; V – объем ацетонового экстракта.



Спектр поглощения нативной культуры спирулины, полученный на СФ-14 (ЛОМО) с интегрирующей сферой

Определение фикоцианина проводили следующим способом: осажденную центрифугированием и промытую дистиллированной водой биомассу спирулины замораживали в жидком азоте, а затем растирали в ступке (без песка) в К-На-фосфатном буфере (50 мМ, рН 7,0). Полученную суспензию оставляли в холодильнике на несколько часов, затем осаждали 3 мин при 13000 об/мин с помощью центрифуги Рісо 17 (Thermo Scientific). Полученный супернатант спектрофотометрировали (UVIKON 931) при 615 и 652 нм и рассчитывали содержание фикоциа-

нина по формуле (Sasaki, 1995): $C = (ОП_{615} - 0,474 \cdot ОП_{652})/5,34$, где ОП — оптическая плотность экстракта при длине волны 615 нм и 652 нм соответственно.

Количество белка определяли по методу Бредфорд (Bradford, 1976).

Для каждого режима освещения было проведено по 3–5 опытов в 3-кратной биологической повторности. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали статистические методы, принятые в области биологических исследований. Данные представлены как средние арифметические значения со стандартными отклонениями.

Результаты и обсуждение

Наличие данных о количествах биомассы, белка, фикоцианина, каротиноидов и хлорофилла, образовавшихся при выращивании спирулины в разных условиях освещения за 14 сут выращивания, позволили рассчитать среднюю скорость накопления биомассы, пигментов и определить их количество при затрате 1 киловатт-часа электроэнергии на освещение. В табл. 2 приведены результаты опытов с тремя режимами освещения, иллюстрирующие, как были получены сравнительные данные для этих и других фотопериодов. Очевидно, что количество биомассы, белка и пигментов, синтезированных культурой при постоянном освещении (24 ч в сутки), превышает аналогичные величины для фотопериодов 14 ч свет — 10 ч темнота и 12 ч свет — 12 ч темнота. Так, количество биомассы, фикоцианина, каротиноидов, хлорофилла и белка, полученных при постоянном освещении, превышало те же величины для фотопериода 14 ч свет — 10 ч темнота на 6,5; 21; 18,9; 18,9 и 16 % соответственно. Однако если определить, сколько образовалось биомассы, белка и пигментов за 1 ч освещения, эффективность использования световой энергии при фотопериоде 14 ч свет — 10 ч темнота будет выше на 63; 41; 43; 72 и 98 % для биомассы, фикоцианина, каротиноидов, хлорофилла и белка соответственно по сравнению с постоянным освещением.

Продуктивность спирулины при других фотопериодах рассчитывали таким же образом (мг/(ч·л) и мг/(л·кВт·ч) и сопоставляли с аналогичными величинами для постоянного освещения. Полученные данные, приведенные в табл. 3, позволили сделать вывод о целесообразности темновых периодов при выращивании спирулины, хотя общий урожай биомассы, белка и пигментов при этом уменьшается.

При всех шести режимах свет-темнота, исследованных нами при пересчете на 1 кВт·ч электроэнергии при чередовании 12 ч свет — 12 ч темнота получено больше биомассы, белка и пигментов, чем при постоянном освещении. В табл. 3 приведены соотношения количества АСБ, белка, пигментов и аналогичных величин при постоянном освещении.

Количество биомассы, белка и пигментов при трех режимах освещения в течение 14 сут выращивания

Показатель		Режим		
		14 ч св. – 10 ч темн.	12 ч св. – 12 ч темн.	24 ч св.
Сухая биомасса	мг/л	1520	1580	1620
	<i>V</i>	7,75	9,4	4,82
	<i>Y</i>	53,90	65,28	33,47
	<i>V</i> и <i>Y</i> , % к постоянному освещению	160,78 161,03	195,02 195,04	100
Фикоцианин	мг/л	132,6	135,3	160,7
	<i>V</i>	0,68	0,81	0,48
	<i>Y</i>	4,67	5,59	3,32
	<i>V</i> и <i>Y</i> , % к постоянному освещению	141,66 140,66	168,75 168,37	100
Каротиноиды	мг/л	4,81	4,22	5,72
	<i>V</i>	0,02	0,03	0,02
	<i>Y</i>	0,17	0,17	0,12
	<i>V</i> и <i>Y</i> , % к постоянному освещению	100 141,66	150,0 141,66	100
Хлорофилл	мг/л	11,25	9,87	13,38
	<i>V</i>	0,06	0,06	0,04
	<i>Y</i>	0,39	0,41	0,28
	<i>V</i> и <i>Y</i> , % к постоянному освещению	150 139,28	150 146,42	100
Белок	мг/л	332,6	300,0	286,2
	<i>V</i>	1,70	1,79	0,85
	<i>Y</i>	11,71	12,40	5,91
	<i>V</i> и <i>Y</i> , % к постоянному освещению	200 198,1	210,5 198,13	100

Обозначения: *V* – скорость накопления, мг/ч·л⁻¹; *Y* – количество на 1 кВт·ч, мг/л.

Преимущество в накоплении биомассы, белка и пигментов за 14 сут выращивания спирулины при постоянном освещении по сравнению с режимом свет-темнота было незначительным. Анализ проведенных опытов показал, что это превышение при постоянном освещении со-

ставляло не более 10–15 % (максимально в одном случае 23 % для АСБ и 39 % в одном случае для каротиноидов) по отношению к режиму свет-темнота. Однако скорость синтеза белка и пигментов при расчете на количество часов освещения или количество затраченной электроэнергии была существенно выше при периодическом освещении.

Таблица 3

Влияние режимов освещения на продуктивность спирулины в расчете на 1 кВт·ч электроэнергии, затраченной на освещение (% по отношению к постоянному освещению)

Режим освещения	АСБ	Белок	Фикоцианин	Каротиноиды	Хлорофилл
14 ч св. – 10 ч темн.	163±12	198±19	141±25	143±14	172±16
10 ч св. – 14 ч темн.	226±22	245±24	231±22	178±23	240±19
12 ч св. – 12 ч темн.	194±15	210±24	168±16	145±18	159±15
8 ч св. – 8 ч темн.	187±16	234±23	198±23	168±12	218±23
7 ч св. – 5 ч темн.	117±12	-	125±12	114±14	122±12
2 ч св. – 25 мин темн.	115±14	-	120±10	113±15	124±14

Из изученных режимов освещения наибольшая продуктивность в расчете на затраченный 1 кВт·ч электроэнергии обнаружена при режиме освещения 10 ч свет – 14 ч темнота и 12 ч свет – 12 ч темнота: 226 и 194 % соответственно по сравнению с постоянным освещением. Меньшая продуктивность в режиме 8 ч свет – 8 ч темнота и 14 ч свет – 10 ч темнота – 187 и 163 % соответственно. Даже режим 2 ч свет – 25 мин темнота на 15 % был лучше, чем постоянное освещение, хотя хуже всех остальных режимов. По-видимому, 25 мин темноты недостаточно для полного завершения темновых реакций и репарационных процессов фотосинтетического аппарата.

Интенсивность фотосинтеза автотрофов, а следовательно и спирулины, определяется интегральным показателем функционирования всех звеньев фотосинтетического аппарата, зависящих от скорости фотохимических реакций, интенсивности образования АТФ и НАДФН₂ и их соотношения, скорости осуществления различных (последовательных и конкурентных) реакций, пути СО₂ в фотосинтезе, интенсивности диффузионных процессов и т.д., т.е. от скорости как световых, так и темновых реакций фотосинтеза. Изменение интенсивности фотосинтеза может контролироваться даже одним из этих звеньев, и поиски этого звена для каждого конкретного случая и растительного организма являются важной задачей.

Следовательно, интенсивность фотосинтеза зависит от освещенности растений, а сам процесс состоит из световых (фотохимических) и

темновых (химических) реакций. При световом насыщении фотосинтеза процесс лимитируется малой скоростью темновых химических реакций и диффузионных процессов доставки CO_2 в тилакоиды и выведения из них образовавшихся продуктов фотосинтеза. В этих условиях продукты фотохимических реакций остаются неиспользованными. Следовательно, при световом насыщении фотосинтеза энергия части поглощенных квантов не будет использована на восстановление углекислого газа, в связи с чем квантовый выход фотосинтеза уменьшится. Длительные темновые интервалы могут улучшить использование световой энергии (при включении света), потому что за время темновых «периодов отдыха» автотрофный организм полностью восстановится от фотоповреждений, являющихся следствием интенсивного фотосинтеза.

Наивысшую продуктивность спирулины при световых периодах 10–12 ч и близких к ним по продолжительности темновых, видимо, можно объяснить адаптацией спирулины именно к такому режиму освещения в местах ее естественного распространения в экваториальной зоне Центральной Африки и Америки.

Таким образом, доказана экономическая необходимость чередования световых и темновых периодов при выращивании спирулины. При промышленном получении ее биомассы можно рекомендовать режимы освещения 10:14 и 12:12, при которых электроэнергия на освещение используется наиболее эффективно.

Выводы

При прерывистом освещении по сравнению с постоянным увеличивается скорость синтеза и количество биомассы, белка и пигментов, синтезированных в расчете на каждый киловатт-час затраченной на освещение электроэнергии. Из изученных 6 фотопериодов электроэнергия наиболее эффективно используется при фотопериодах 10 ч свет – 14 ч темнота, 12 ч свет – 12 ч темнота и 8 ч свет – 8 ч темнота – количество АСБ составляет 226, 194 и 187 по сравнению с постоянным освещением. Следовательно, при промышленном выращивании спирулины необходимо чередование световых и темновых периодов для более эффективной утилизации световой (электрической) энергии.

Берестов В.А. Спирулина – наше здоровье и долголетие. – Николаев, 1997. – 26 с.

Воронин А.В., Первушкин С.В., Шаталаев И.Ф. Влияние различных источников углерода на рост культуры *Spirulina platensis* // Вестн. Сам. ГУ. – 2006. – 42, № 2. – С. 161–167.

Геворкиз Р.Г., Алисиевич А.В., Шматок М.Г. Оценка биомассы *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. по оптической плотности культуры // Экол. моря. – 2005. – Вып. 70. – С. 96–106.

Евец Л.В., Ляликов С.А., Макарич А.В. и др. *Spirulina* как средство, нормализующее адаптационные возможности организма детей, подвергающихся длительному

- действию малых доз радиации // Здравоохран. Беларуси. – 1992. – № 7. – С. 11–12.
- Евец Л.В., Мадекин А.С., Ляликов С.А. и др. *Spirulina* в оздоровлении ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС // Экологическая антропология: Ежегодник. – Мн.: Изд-во Бел. комит. «Дзеці Чарнобыля». – 1996. – С. 83–88.
- Каракис С.Г., Карпов Л.М., Драгоева Е.Г. и др. Биохимический состав биомассы штаммов *Arthrospira (Spirulina) platensis* // Мікробіол. і біотехнол. – 2008. – № 1. – С. 58–62.
- Мельников С.С., Мананкина Е.Е., Будакова Е.А. Метод определения каротиноидов спирулины *in vivo* // Весці НАНБ, сер. біял. навук. – 1995. – № 3. – С. 102–104.
- Мельников С.С., Мананкина Е.Е., Будакова Е.А., Самович Т.В., Шальго Н.В. Разработка питательной среды для выращивания спирулины на основе отходов ПО “Беларуськалий” // Весці НАНБ, сер. біял. навук. – 2009. – № 3. – С. 51–56.
- Минюк Г.С., Тренкениш Р.П., Алисиевич А.В., Дробецкая И.В. Влияние селена на рост микроводоросли *Spirulina platensis* (Nordst.) в накопительной и квазинепрерывной культурах // Экол. моря. – 2000. – Вып. 54. – С. 42–49.
- Пат. РБ № 9416. Среда для выращивания спирулины / С.С. Мельников, Е.Е. Мананкина, Н.В. Шальго. – Оpubл. 2005, Бюл. № 22.
- Упитис В.В., Пакалне Д.С., Шульце И.Ф. Составы сред для интенсивного культивирования водоросли спирулина // Изв. АН Латв. ССР. – 1989. – 505, № 8. – С. 86–94.
- Чернова Н.И., Коробкова Т.П., Киселева С.В. Микроводоросль спирулина как объект биотехнологии. [Электронный ресурс]: <http://visionsmile.com/ru/medicinal-herbs/153-spirulina-maxima.html?start=1>. (дата обращения 03.01.2011).
- Шлык А.А. Определение хлорофиллов и каротиноидов в экстрактах зеленых листьев // Биохимические методы в физиологии растений. – М.: Наука, 1971. – С. 154–170.
- Abd El-Baky H. Over production of phycocyanin pigment in blue-green algae *Spirulina* sp. and its inhibitory effect on growth of Ehrlich ascites carcinoma cells // J. Med. Sci. – 2003. – 4, N 3. – P. 314–324.
- Belay A. The potential application of *Spirulina (Arthrospira)* as a nutritional and therapeutic supplement in health management // J. Amer. Nutr. Assoc. – 2002. – 5, N 2. – P. 27–48.
- Bradford M.A. Rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding // Anal. Biochem. – 1976. – 72, N 1. – P. 248–254.
- Chaiklahan R., Khonsara N., Chirasawan N. Response of *Spirulina platensis* C1 to temperature and high light intensity // Kasetsart J. (Nat. Sci.). – 2007. – 41, N 1. – P. 123–129.
- Ciferri O. *Spirulina*, the edible Microorganism // Microbiol. Rev. – 1983. – 47, N 4. – P. 551–78.
- Henrikson R. Earth Food *Spirulina*. – California: Ron. Interp. Inc. Laguna Beach, 1989.
- Santillan C. Mass production of *Spirulina* // Experientia. – 1982. – 38, N 1. – P. 40–43.
- Sasaki K., Marquez F., Nishio N., Nagai S. Promotive Effect of 5-aminolevulinic acid on the growth and photosynthesis of *Spirulina platensis* // J. Ferment. Bioeng. – 1995. – 79, N 5. – P. 453–457.

Получена 04.05.11

Рекомендовала к печати Е.И. Шнюкова

Inst. of Biophysics and Cell Engineering NAS of Belarus,
27, Akademicheskaya St., 220072 Minsk, Belarus

INFLUENCE OF LIGHT AND DARK PERIODS ALTERNATION
ON PRODUCTION OF *SPIRULINA* (ARTHROSPIRA) *PLATENSIS*
(NORDST.) GEITLER

The influence of constant illumination and six photoperiodic modes of different duration on production of blue-green alga *Spirulina (Arthrospira) platensis* was investigated. It was shown established, that dark the periods during alga cultivation were essential for effective biosynthesis of biomass, proteins, carotenoids, phycocyanin and chlorophyll. The highest rates of biomass, proteins and pigments biosynthesis were observed for 14 days at 10 h light to 14 h dark cycle and 12 h light to 12 h dark cycle. Under such conditions *Spirulina* synthesised almost twice as much biomass, proteins and pigments per kW·h, than under constant illumination.

К e y o r d s : *Spirulina (Arthrospira) platensis*, modes of light-darkness, productivity, protein, carotenoids, phycocyanin, chlorophyll.

Редакционная коллегия журнала «Альгология» получила печальное известие об уходе из жизни 22 февраля 2012 г. соавтора данной статьи к.б.н. Станислава Сергеевича Мельникова, который долгое время возглавлял лабораторию Института биофизики и клеточной инженерии НАН Беларуси.

Это был талантливый ученый с широкой эрудицией, разносторонними интересами, истинный профессионал с огромным опытом, тонкий, интеллигентный человек.

Редакция выражает глубокое соболезнование коллегам и семье известного ученого.
