

DOI 10.33952/2542-0720-2021-4-28-110-118

УДК 581.1:57.032:57.033

Лукьянов В. А.¹, Горбунова С. Ю.²

ПРОДУКТИВНОСТЬ МИКРОВОДОРОСЛИ *CHLORELLA SOROKINIANA* ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ НА КУРИНОМ ПОМЁТЕ В РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ОСВЕЩЕНИЯ

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Курский федеральный аграрный научный центр»;

²Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»

Реферат. Производство биомассы микроводорослей на отходах сельского хозяйства имеет высокий потенциал, который связан не только с решением ряда экологических проблем, но и с получением коммерческого эффекта. Цель исследований – определение продукционных характеристик микроводоросли *Chlorella sorokiniana* при выращивании в разных световых условиях на питательной среде, приготовленной на основе куриного помёта. Исследования проводили в лабораториях ФГБНУ «Курский ФАНЦ» в 2020–2021 гг. Объект исследования – культура микроводоросли *Chlorella sorokiniana* (IPPAS C-1). Куриный помёт в пересчете на сухой вес содержал 3,82 % общего азота, 1,93 % фосфора, 55,26 % органического вещества. Токсичные элементы находились в допустимых пределах. Отличительной особенностью способа приготовления питательной среды на основе помёта являлось его использование без предварительного сбраживания в дозе 7 г/л. Для работы использовали фотобиореакторы объёмом 5 л закрытого типа с постоянным искусственным освещением и 20 л открытого типа с естественным освещением. Слой культуры для всех вариантов эксперимента составлял 0,15 м. Искусственное освещение было представлено газоразрядными лампами ДНАТ 150 Вт и энергосберегающими светодиодными лампами LED Aquael 10 Вт. Освещённость при искусственном освещении составляла 20 и 40 кЛк, при естественном – 36 и 70 кЛк. При сравнительной оценке разных источников освещения было установлено, что использование питательной среды на основе куриного помёта позволило получить культуру *Chlorella sorokiniana* с плотностью клеток от 38,67 до 62,66 млн мл⁻¹ при LED освещении, от 43,67 до 76,67 млн мл⁻¹ при ДНАТ освещении и от 17,33 до 41,33 млн мл⁻¹ при естественном освещении. Рассматривая три вида освещения, следует отметить, что наиболее оптимальным способом можно считать культивирование *Chlorella sorokiniana* на курином помёте с естественным и LED освещением. Варианты с ДНАТ системой освещения были более энергозатратны несмотря на то, что в них наблюдалась более высокая плотность клеток.

Ключевые слова: хлорелла, микроводоросли, продуктивность, освещённость, ДНАТ, LED, куриный помёт, утилизация сельскохозяйственных отходов, органические удобрения.

Для цитирования: Лукьянов В. А., Горбунова С. Ю. Продуктивность микроводоросли *Chlorella sorokiniana* при выращивании на курином помёте в разных условиях освещения // Таврический вестник аграрной науки. 2021. № 4(28). С. 110–118. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-110-118.

For citation: Lukyanov V. A., Gorbunova S. Yu. Productivity of microalgae *Chlorella sorokiniana* when growing on chicken manure under different lighting conditions // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2021. No. 4(28). P. 110–118. DOI: 10.33952/2542-0720-2021-4-28-110-118.

Введение

С ростом населения и, соответственно, увеличением спроса на сельскохозяйственную продукцию, возникает необходимость в улучшении способов

переработки производственных отходов и поиске оптимальных методов их утилизации. Несанкционированные зоны хранения куриного помёта являются существенным источником не только загрязнения почв, водоёмов и подземных вод, но и причиной возникновения и распространения резкого неприятного запаха, а также ускоренного роста и развития возбудителей опасных заболеваний. Куриный помёт запрещено использовать без предварительной переработки. Например, при попадании в почву свежего помёта, она обсеменяется микрофлорой, что создает экологическую и санитарную опасность [1, 2].

Сегодня куриный помёт используется как органическое удобрение. Согласно государственному каталогу пестицидов и агрохимикатов в РФ уже зарегистрировано около 10 органических удобрений на его основе. Существует относительно немного технологических способов переработки куриного помёта, и они имеют разную экономическую эффективность. Среди них выделяют: компостирование с применением различных бактериальных препаратов, вермикомпостирование с использованием определённых видов червей, переработка личинками мух, сушка с термообработкой, термическая деполимеризация, сжигание, пиролиз, плазменная газификация, анаэробное сбраживание с образованием биогаза и др. [3, 4].

Одним из эффективных способов является использование микроводорослей, так как они способны при определённых условиях использовать элементы питания, которые содержит куриный помёт – азот, фосфор, калий, медь, марганец, цинк, кобальт, бор и др. Его применение в качестве питательной среды позволяет значительно снизить затраты на производство микроводорослей [5, 6]. Зная кинетические характеристики роста и потребности микроводорослей в том или ином элементе питания, можно контролировать степень ассимиляции этих элементов.

Биомасса микроводоросли *Chlorella* содержит в своём составе (в пересчете на сухое вещество) 50–55 % белка, из них около 10–15 % занимают аминокислоты, 5–10 % углеводов, 15–30 % липидов, в том числе ненасыщенные жирные кислоты, макро- и микроэлементы, витамины, пигменты. Она может быть использована в разных отраслях экономики – в животноводстве, аквакультуре, растениеводстве, некоторые виды подходят для производства биотоплива и биополимеров [7–9]. Например, микроводоросль *Chlorella* применяют в органических и органоминеральных удобрениях, так как она способствует накоплению органических и минеральных форм азота в почве, выделению биологически активных веществ, которые стимулируют жизнедеятельность многих полезных почвенных микроорганизмов и сельскохозяйственных культур [10–12]. В животноводстве и рыбоводстве её применяют с целью стимуляции иммунитета, повышения продуктивности, сохранности, снижения конверсии кормов [13–15].

Таким образом, использование отходов птицефабрик для культивирования микроводорослей позволяет с одной стороны получить ценную по составу биомассу фотосинтезирующих организмов, а с другой стороны – утилизировать отходы, за счёт снижения в их составе уровня азота, фосфора, железа и других веществ. Поэтому учёные всего мира уделяют большое внимание разработке новых и усовершенствованию существующих методов утилизации куриного помёта и очистки сточных вод благодаря ассимиляционным способностям разных видов микроводорослей, в частности *Chlorella* [16–18]. Но не стоит забывать, что микроводоросли являются светозависимыми микроорганизмами, их культивирование сопряжено с высокими энергетическими затратами на освещение. Поэтому в настоящее время возможность снижения энергетических затрат при выборе источника освещения для культивирования микроводорослей может быть рассмотрена в научно-практическом аспекте, как один из способов повышения их производственных характеристик.

Цель исследований – определение продукционных характеристик микроводоросли *Chlorella sorokiniana* при выращивании в разных световых условиях на питательной среде, приготовленной на основе куриного помёта.

Материалы и методы исследований

Исследования проводили в лабораториях ФГБНУ «Курский ФАНЦ» в 2020–2021 гг. Объектом исследования являлась культура микроводоросли *C. sorokiniana* (IPPAS C-1) из коллекции Института физиологии растений РАН.

Для исследований использовали фотобиореакторы двух типов. Первый – закрытого типа, который представлял собой прозрачную ёмкость из полиэтилентерефталата (ПЭТ) объёмом 5 л, размерами 0,15×0,15×0,30 м, с постоянным вертикальным искусственным освещением (ФБР 5 л). В качестве второго использовали бассейн открытого типа, объёмом 20 л, выстланный полиэтиленовой плёнкой размером 0,6×0,25×0,15 м, с естественным поверхностным освещением (ФБР 20 л). Освещаемый слой культуры микроводорослей для всех вариантов эксперимента был одинаковым и составлял 0,15 м.

Искусственное освещение (круглосуточное) было представлено газоразрядными лампами ДНАТ 150 Вт и энергосберегающими светодиодными лампами LED Aquael 10 Вт, спектр которых включает красный и синий свет, необходимый для процесса фотосинтеза. Регулировку источника освещения до необходимой интенсивности корректировали путём приближения/отдаления фотобиореактора, а при естественном освещении выбирали определённые солнечные дни согласно прогнозу погоды, с дальнейшим определением освещённости люксметром. Естественное освещение включало 16 часов светового дня, при этом максимальная освещённость приходилась на период времени с 12:00 до 17:00 часов. В таблице 1 представлены средние значения интенсивности освещения на поверхности фотобиореакторов для шести вариантов эксперимента.

Таблица 1 – Источник и интенсивность освещения микроводоросли *Chlorella sorokiniana* при выращивании на курином помёте

№ эксперимента	Вид фотобиореактора	Объём фотобиореактора, л	Мощность освещения, Вт	Освещённость, клк
1	закрытого типа	5	10 (LED)	20
2				40
3			150 (ДНАТ)	20
4				40
5	открытого типа	20	естественное освещение	36
6				70

В течение всего эксперимента температура в ФБР 5 л закрытого типа (при искусственном освещении) находилась в диапазоне 26–27 °С, а в ФБР 20 л открытого типа (при естественном освещении) она изменялась от 21 до 27 °С.

Отличительной особенностью способа приготовления питательной среды на основе куриного помёта являлось его использование без предварительного сбраживания, в течение всех циклов культивирования он находился в фотобиореакторах. Высушенный при температуре 85–90 °С помёт использовали в дозе 7 г/л воды, что обеспечивало относительно оптимальную кислотность культуральной среды с *C. sorokiniana*: показатель рН в ФБР 5 л изменялся от 7,05 до 8,14, в ФБР 20 л – от 7,56 до 8,81 ед.

Следует отметить, что дозу куриного помёта можно изменить в соответствии с его составом, так как куриный помёт в зависимости от рациона питания птицы, может иметь разное количество основных элементов питания. Поэтому в ФГБУ ГСАС «Курская» проведен химический анализ используемого в эксперименте куриного помёта (таблица 2).

Таблица 2 – Химический состав куриного помёта (в пересчёте на сухое вещество)

Показатель	Нормативные документы (НД) на методы испытаний	Результаты испытаний
Водородный показатель рН, ед.	ГОСТ 27979	8,11
Массовая доля органического вещества, %	ГОСТ 27980	55,26
Общий азот, %	ГОСТ 26715	3,82
Общий фосфор, %	ГОСТ 26717	1,93
Общий калий, %	ГОСТ 26718	2,79
Свинец, млн ⁻¹	РД 52.18.289-90	<20
Кадмий, млн ⁻¹	РД 52.18.289-90	<1,0
Ртуть, мг/кг	ПНД Ф 16.1:2:3:3.10-98	<0,1
Мышьяк, мг/кг	ПНД Ф 16.1:2:2:3.17-98	<0,2

Куриный помёт в пересчете на сухой вес в достаточном количестве содержал основные элементы питания для развития микроводоросли *C. sorokiniana*. Токсичные элементы находились в допустимых пределах.

Микробиологические показатели определяли в ОБУ «Курская облветлаборатория»: *Pseudomonas aeruginosa* по ГОСТ Р 54755-2011, энтеропатогенные типы *Escherichia* по ГОСТ 31747-2012, анаэробы по ГОСТ 32012-2012, бактерии рода *Salmonella* по ГОСТ 31659-2012.

Продуктивность культуры оценивали путём подсчёта плотности (численности) клеток в камере Горяева по ГОСТ Р 54496-2011 (ISO 8692:2004).

Рост микроводорослей во всех вариантах эксперимента имел линейный характер, который описан уравнением прямой ($R_{sq} = 0,99$) для концентрации клеток микроводорослей [19]:

$$N = N_0 + P_n \cdot t,$$

где N_0 , N – начальная и конечная концентрации клеток;

t – время от начала культивирования, сутки;

P_n – скорость увеличения концентрации клеток (продуктивность культуры) (млн кл. мл⁻¹ сут⁻¹).

В таблицах представлены средние значения и рассчитанные доверительные интервалы ($\bar{x} \pm \Delta \bar{x}$).

Результаты и их обсуждение

Общеизвестно, что значения продуктивности микроводорослей на курином помёте и других сельскохозяйственных отходах имеют широкий диапазон, который в большинстве случаев зависит от способа предварительной подготовки помёта, от биологических особенностей используемого штамма микроводорослей, источника и интенсивности освещения, наличия или отсутствия дополнительного источника углекислого газа, режима культивирования, конструкции фотобиореактора.

Согласно данным, представленным в работах [19, 20], культивирование микроводорослей на органических отходах позволяет увеличить их продуктивность не только потому что в них имеются доступные формы азота, фосфора, железа и др. питательных вещества, но и за счёт присутствия в них разнообразных бактерий, которые часто встречаются в органических отходах. Например, бактерии рода *Bacillus* в симбиозе с микроводорослями способствуют разложению органических соединений и образованию углекислого газа (CO₂), что в значительной степени определяет продуктивность микроводорослей. С целью снижения экономических затрат в нашем случае во всех вариантах эксперимента выращивание микроводорослей осуществляли без дополнительной подачи углекислого газа.

При анализе помёта на микробиологические показатели в начале и конце эксперимента, патогенных микроорганизмов *Pseudomonas aeruginosa*, энтеропатогенных типов *Escherichia*, анаэробов, бактерий рода *Salmonella* не обнаружено.

Начальная концентрация клеток *C. sorokiniana* в среднем для всех вариантов эксперимента составляла 5 млн кл. мл⁻¹ ± 5 %, цикл культивирования – пять суток. Серия предварительно проведённых экспериментальных исследований показала, что такие циклы культивирования, с периодом не более пяти суток, являются наиболее экономически эффективными при культивировании микроводоросли *Chlorella* в промышленных масштабах на курином помёте.

Полученные результаты позволяют судить о возможности использования куриного помёта для производства биомассы *C. sorokiniana*. При использовании LED освещения с интенсивностью 20 кЛк конечная концентрация её клеток составила 38,67 млн кл. мл⁻¹, с интенсивностью 40 кЛк – 62,66 млн кл. мл⁻¹ (таблица 3).

Таблица 3 – Кинетические характеристики микроводоросли *C. sorokiniana*, выращенной на курином помёте

Источник освещения	Интенсивность освещения, кЛк	P_n , млн кл. мл ⁻¹ сут ⁻¹ ($R_{sq}=0,99$)	* B_m , млн кл. мл ⁻¹
Лампа LED 10 Вт	20	7,65	38,67 ± 2,70
	40	12,40	62,66 ± 4,38
ДНАТ 150 Вт	20	8,61	43,67 ± 3,48
	40	15,17	76,67 ± 4,58
Естественное освещение	36	3,43	17,33 ± 1,37
	70	8,18	41,33 ± 2,10

Примечание. * B_m – конечная концентрация клеток в фотобиореакторе (млн кл. мл⁻¹).

Интересно отметить, что с освещением ДНАТ максимальные концентрации клеток микроводорослей при тех же интенсивностях оказались выше на 11,5 и 18,3 % соответственно. Принимая во внимание, что мощность ламп LED значительно (в 15 раз) ниже по сравнению с системой освещения ДНАТ, можно считать, что в данных условиях освещение LED оказалось более экономически эффективным. С другой стороны, применение ДНАТ освещения возможно и целесообразно, если при производстве микроводорослей стоит задача в освещении суспензии совместно с подогревом, а также при использовании светоотражателей для лучшего светораспределения по освещаемой поверхности фотобиореактора.

При использовании естественного освещения в качестве единственного источника света значения максимальной концентрации клеток составили 17,33 млн кл. мл⁻¹ при интенсивности освещения 36 кЛк и 41,33 млн кл. мл⁻¹ при 70 кЛк. По сравнению с искусственным освещением LED, продуктивность *C. sorokiniana* при естественном свете снизилась в 2,2 и 1,5 раза по интенсивности освещения соответственно. Это связано с изменениями температуры воздуха в ночное время суток, которая снижалась до 21 °С, а также неравномерностью интенсивности падающего света в утреннее, дневное и вечернее время. Логично полагать, что, решив вопрос по термостабилизации суспензии *C. sorokiniana* в фотобиореакторе, возможно увеличение её продуктивности. Учитывая полученные значения и исключение затрат на освещение, такой способ выращивания является наиболее экономически привлекательным из трёх рассмотренных.

Согласно представленному на мировом рынке ассортименту продукции на основе микроводоросли *Chlorella*, мы можем дать рекомендации по возможным вариантам её использования (таблица 4).

Таблица 4 – Перечень возможной продукции на основе *C. sorokiniana*, выращенной на курином помёте

Продукт	Отрасль применения	Способ применения	Решение проблемы
Кормовая добавка	животноводство, рыбоводство	добавление в комбикорм	повышение неспецифической резистентности, привесов, сохранности, снижение конверсии корма
Органическое, органоминеральное удобрение	растениеводство	некорневая подкормка, внесение в почву	увеличение микробиологической активности почвы, урожайности сельскохозяйственных культур

Биомассу микроводоросли *C. sorokiniana*, произведенной на курином помёте, можно использовать в сельском хозяйстве или других отраслях промышленности. Например, её выгодно применять в отраслях животноводства или в аквакультуре. Благодаря высокой жизнеспособности биомассу этой микроводоросли можно использовать как органическое или органоминеральное удобрение в жидкой и сухой форме для внесения в почву и некорневой подкормки.

Принимая во внимание тот факт, что куриный помёт может содержать различные формы патогенных микроорганизмов, необходимо разработать технологию производства продукции на основе микроводорослей, которая будет отвечать современным требованиям качества и безопасности.

Выводы

Продуктивность микроводорослей, в частности *C. sorokiniana* зависит от условий культивирования и, в первую очередь, она лимитирована интенсивностью освещения и доступными формами углерода. Предлагаемый авторами способ позволяет производить *C. sorokiniana* без использования углекислого газа. Куриный помёт, подготовленный по технологии авторов с содержанием азота 3,82 % и фосфора 1,93 % в дозе 7 г/л позволил получить продуктивность микроводоросли *C. sorokiniana* при LED освещении от 38,67 млн кл. мл⁻¹ до 62,66 млн кл. мл⁻¹, при ДНАТ освещении от 43,67 до 76,67 млн кл. мл⁻¹ (при 20 и 40 кЛк соответственно), при естественном освещении от 17,33 до 41,33 млн кл. мл⁻¹ (36 и 70 кЛк соответственно).

Рассматривая три вида освещения, наиболее эффективным является способ культивирования *C. sorokiniana* на курином помёте с естественным освещением, так как затраты на освещение при промышленном культивировании занимают весомую часть в общей структуре производственных затрат. Освещение LED целесообразно использовать там, где нет условий для естественного освещения, а также, когда основной задачей является получение максимально высоких продуктивностей микроводорослей в короткие сроки. Наиболее энергозатратной оказалась система освещения ДНАТ, однако, при оптимальном светораспределении, она может быть использована на предприятиях с невысокими объёмами производства.

Микроводоросль *C. sorokiniana*, выращенную на курином помёте, можно с высокой степенью эффективности использовать в сельском хозяйстве, при этом готовая продукция должна отвечать современным требованиям по показателям качества и безопасности.

Исследования являются логическим продолжением ряда работ авторов и соответствуют программе исследований по теме государственного задания ФИЦ ИнБЮМ, номер государственной регистрации 121030300149-0».

Литература

1. Антонова О. И., Калпокас В. В. Удобрительная, токсикологическая и ветеринарно-санитарная характеристика органического модифицированного удобрения на основе куриного помёта // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2020. № 6 (188). С. 58–63.
2. Теучеж А. А. Применение птичьего помёта в качестве органического удобрения // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2017. № 128. С. 914–931.
3. Попов В. Н., Корнеева О. С., Искусных О. Ю., Искусных А. Ю. Инновационные способы переработки биоотходов птицеводства // Вестник ВГУИТ. 2020. Т. 82. № 1. С. 194–200.
4. Лысенко В. П., Титов О. Н. Переработка помёта в фермерских птицеводческих хозяйствах // Птицеводство. 2014. № 7. С. 48–52.
5. Slocombe S. P., Benemann J. R. Microalgal production for biomass and high-value products // Boca Raton, FL.: CRC Press/Taylor & Francis Group. 2016. 334 p.
6. Dobrojan S. Obținerea substanțelor biologice active din biomasa microalgei *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl crescută pe ape reziduale / Mediul Ambient. 2010. № 2 (50). P. 24–28.
7. Tan H. L., Lam M. K., Cheng W. Yo., Lim W. J., Tan I. S., Foo H., Show P. Heterotrophic and mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using chicken waste compost as nutrients source for lipid production // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 721(1). P. 012011. DOI:10.1088/1755-1315/721/1/012011.
8. Iyovo G. D., Guocheng D., Chen J. Poultry manure digestate enhancement of *Chlorella vulgaris* biomass under mixotrophic condition for biofuel production // Journal of Microbial and Biochemical Technology. 2010. Vol. 2 (2). P. 051-057. DOI:10.4172/1948-5948.1000023.
9. Engin I. K., Cekmecelioglu D., Yücel A. M., Oktem H. A. Evaluation of heterotrophic and mixotrophic cultivation of novel *Micractinium* sp. ME05 on vinasse and its scale up for biodiesel production // Bioresource Technology. 2018. Vol. 251. P. 128–134. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.023.
10. Вильданова Г. И., Минахметова И. И., Порхун М. Ю., Чумак В. А., Черноусова О.В., Гайсина Л.А. Использование суспензии водоросли *Chlorella Vulgaris* при выращивании огурца посевного методом гидропонии // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. 2020. № S1 (54). С. 20–24.
11. Stifeev A. I., Bessonova E. A., Lukyanov V. A. Microalgae as innovative object in organic agriculture // Вестник Орловского государственного аграрного университета. 2013. Т. 43. № 4. С. 26–27.
12. Alvarez A. L., Weyers S. L., Goemann H., Peyton B. M., Gardner R. D. Microalgae, soil and plants: A critical review of microalgae as renewable resources for agriculture // Algal Research. 2021. Vol. 54(5). P. 102200. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200.
13. Петраков Е. С., Лукьянов В. А., Наумов М. М., Овчарова А. М., Софронова В. Г., Полякова М. Л., Петракова Н. С. Применение добавки на основе микроводорослей *Chlorella vulgaris* в кормлении цыплят-бройлеров // Проблемы биологии продуктивных животных. 2016. №1. С. 96–104.
14. Садомов Н. А. энергия роста цыплят-бройлеров при использовании кормовой добавки «Альгавет» на основе микроводоросли *Chlorella vulgaris* // Актуальные проблемы интенсивного развития животноводства. 2017. № 20 (1). С. 316–326.
15. Сычёва М. В., Торшков А. А., Зобиков А. Е., Немцева Н. В. Физиолого-биохимический статус цыплят-бройлеров при введении в рацион *Chlorella Vulgaris* Beijer. IPPASC-2014/1 // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. № 3 (77). С. 219–222.
16. Nur M. M. A., Buma A. G. J. Opportunities and challenges of microalgal cultivation on wastewater, with special focus on palm oil mill effluent and the production of high value compounds // Waste and Biomass Valorization. 2019. Vol. 10 (8). P. 2079–2097. DOI: 10.1007/s12649-018-0256-3.
17. Kamarudin K. F., Yaakob Z., Takriff M. S., Tasirin S. M. Bioremediation of palm oil mill effluents (POME) using *Scenedesmus dimorphus* and *Chlorella vulgaris* // Advanced Science Letters. 2013. Vol. 19(10). P. 2914-2918. DOI: 10.1166/asl.2013.5044.
18. Lowrey J., Brooks M. S., McGinn P. J. Heterotrophic and mixotrophic cultivation of microalgae for biodiesel production in agricultural wastewaters and associated challenges - a critical review // Journal of Applied Phychology. 2015. Vol. 27. P. 1485–1498. DOI: 10.1007/s10811-014-0459-3.
19. Тренкеншу Р. П., Лелеков А. С., Новикова Т. М. Линейный рост морских микроводорослей в культуре // Морской биологический журнал. 2018. Т. 3. № 1. С. 53–60. DOI: 10.21072/mbj.2018.03.1.06.
20. Muñoz R., Guieysse B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review // Water Res. 2006. Vol.40. P. 2799–2815. DOI: 10.1016/j.watres.2006.06.011.
21. Ji X., Li H., Zhang J., Saiyin H., Zheng Z. The collaborative effect of *Chlorella vulgaris*-*Bacillus licheniformis* consortia on the treatment of municipal water // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 365. P. 483–493. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.039.

References

1. Antonova O. I., Kalpokas V. V. Fertilizing, toxicological and veterinary-sanitary characteristics of organic modified fertilizer based on chicken manure // Bulletin of Altai State Agricultural University. 2020. No. 6 (188). P. 58–63.
2. Teuchezh A. A. Poultry manure and its use as an organic fertilizer // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2017. No. 128. P. 914–931.
3. Popov V. N., Korneeva O. S., Iskusnykh O. Yu., Iskusnykh A. Yu. Innovative ways to process poultry waste // Proceedings of VSUET. 2020. Vol. 82. No. 1. P. 194–200.
4. Lysenko V. P., Ageichkin A.P., Titov O. N. Processing of manure at small-scale poultry farms // Ptitsevodstvo. 2014. No. 7. P. 48–52.
5. Slocombe S. P., Benemann J. R. Microalgal production for biomass and high-value products // Boca Raton, FL.: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2016. 334 p.
6. Dobrojan S. Obținerea substanțelor biologice active din biomasa microalgei *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl crescută pe ape reziduale / Mediul Ambient. 2010. No. 2 (50). P. 24–28.
7. Tan H. L., Lam M. K., Cheng W. Yo., Lim W. J., Tan I. S., Foo H., Show P. Heterotrophic and mixotrophic cultivation of *Chlorella vulgaris* using chicken waste compost as nutrients source for lipid production // IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 721(1). P. 012011. DOI:10.1088/1755-1315/721/1/012011.
8. Iyovo G. D., Guocheng D., Chen J. Poultry manure digestate enhancement of *Chlorella vulgaris* biomass under mixotrophic condition for biofuel production // Journal of Microbial and Biochemical Technology. 2010. Vol. 2 (2). P. 051–057. DOI:10.4172/1948-5948.1000023.
9. Engin I. K., Cekmecelioglu D., Yücel A. M., Oktem H. A. Evaluation of heterotrophic and mixotrophic cultivation of novel *Micractinium* sp. ME05 on vinasse and its scale up for biodiesel production // Bioresource Technology. 2018. Vol. 251. P. 128–134. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.12.023.
10. Vildanova G. I., Minakhmetova I. I., Porkhun M. Yu., Chumak V. A., Chernousova O. V., Gaisina L. A. The use of a suspension of *Chlorella vulgaris* algae in the cultivation of cucumber by hydroponics // Vestnik Bashkirskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. M. Akmully. 2020. No. S1 (54). P. 20–24.
11. Stifeev A. I., Bessonova E. A., Lukyanov V. A. Microalgae as innovative object in organic agriculture // Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2013. Vol. 43. No. 4. P. 26–27.
12. Alvarez A. L., Weyers S. L., Goemann H., Peyton B. M., Gardner R.D. Microalgae, soil and plants: a critical review of microalgae as renewable resources for agriculture // Algal Research. 2021. Vol. 54(5). P. 102200. DOI: 10.1016/j.algal.2021.102200.
13. Petrakov E. S., Lukyanov V. A., Naumov M. M., Ovcharova A. N., Sofronova O.V., Polyakova L. L., Petrakova N. S. The using of microalgae *Chlorella vulgaris* for chicken-broilers feeding // Problemy biologii productivnykh zhitovnykh [Problems of Productive Animal Biology]. 2016. No. 1. P. 96–104.
14. Sadomov N. A. The growth energy of broiler chickens when using Algaevet feed additive based on *Chlorella vulgaris* microalgae // Aktual'nye problemy intensivnogo razvitiya zhivotnovodstva. 2017. No. 20 (1). P. 316–326.
15. Sycheva M. V., Torshkov A. A., Zobikov A. E., Nemtseva N. V. Physiological and biochemical status of broiler chickens fed diets supplemented with *Chlorella vulgaris* Beijer. IPPASC-2014/1 // Izvestia Orenburg State Agrarian University. 2019. No. 3 (77). P. 219–222.
16. Nur M. M. A., Buma A. G. J. Opportunities and challenges of microalgal cultivation on wastewater, with special focus on palm oil mill effluent and the production of high value compounds // Waste and Biomass Valorization. 2019. Vol. 10 (8). P. 2079–2097. DOI: 10.1007/s12649-018-0256-3.
17. Kamarudin K. F., Yaakob Z., Takriff M. S., Tasirin S. M. Bioremediation of palm oil mill effluents (POME) using *Scenedesmus dimorphus* and *Chlorella vulgaris* // Advanced Science Letters. 2013. Vol. 19(10). P. 2914–2918. DOI: 10.1166/asl.2013.5044.
18. Lowrey J., Brooks M. S., McGinn P. J. Heterotrophic and mixotrophic cultivation of microalgae for biodiesel production in agricultural wastewaters and associated challenges - a critical review // Journal of Applied Phychology. 2015. Vol. 27. P. 1485–1498. DOI: 10.1007/s10811-014-0459-3.
19. Trenkenshu R. P., Lelekov A. S., Novikova T. M. Linear growth of marine microalgae culture // Marine Biological Journal. 2018. Vol. 3. No. 1. P. 53–60. DOI: 10.21072/mbj.2018.03.1.06.
20. Muñoz R., Guieysse B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review // Water Res. 2006. Vol.40. P. 2799–2815. DOI: 10.1016/j.watres.2006.06.011.
21. Ji X., Li H., Zhang J., Saiyin H., Zheng Z. The collaborative effect of *Chlorella vulgaris*-*Bacillus licheniformis* consortia on the treatment of municipal water // Journal of Hazardous Materials. 2019. Vol. 365. P. 483–493. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2018.11.039.

UDC 581.1:57.032:57.033

Lukyanov V. A., Gorbunova S. Yu.

PRODUCTIVITY OF MICROALGAE *CHLORELLA SOROKINIANA* WHEN GROWING ON CHICKEN MANURE UNDER DIFFERENT LIGHTING CONDITIONS

Summary. *The production of microalgae biomass on agricultural waste has a high potential, which is associated both with solving a number of environmental problems and also with obtaining a commercial effect. The purpose of the research is to determine the production characteristics of Chlorella sorokiniana microalgae when grown under different light conditions on a nutrient medium prepared on the basis of chicken manure. The research was carried out in the laboratories of the Federal Agricultural Kursk Research Center in 2020–2021. The object of the study is a culture of microalgae Chlorella sorokiniana (IPPAS C-1). Chicken manure in terms of dry weight contained 3.82 % of total nitrogen, 1.93 % – phosphorus, 55.26 % – organic matter. The toxic elements were within acceptable limits. A distinctive feature of the method of preparing a nutrient medium based on manure was its use without preliminary fermentation at a dose of 7 g/l. Photobioreactors with a volume of 5 liters of closed type with constant artificial lighting and 20 liters of open type with natural lighting were used for work. The culture layer for all variants of the experiment was 0.15 m. Artificial lighting was represented by HPS 150 W and energy-saving LED Aquael 10 W lamps. Illumination under artificial lighting was 20 and 40 klx, under natural lighting – 36 and 70 klx. When comparing different lighting sources, it was found that the use of a nutrient medium based on chicken manure made it possible to obtain a culture of Chlorella sorokiniana with a cell density from 38.67 to 62.66 million ml⁻¹ under LED lighting, from 43.67 to 76.67 million ml⁻¹ under HPS lighting and from 17.33 to 41.33 million ml⁻¹ under natural lighting. Considering the three types of lighting, it should be noted that the most optimal way of Chlorella sorokiniana cultivation is on chicken manure under natural and LED lighting. Variants with a HPS lighting system were more energy-intensive even though they had a higher cell density.*

Keywords: *chlorella, microalgae, productivity, illumination, HPS, LED, chicken manure, agricultural waste disposal, organic fertilizers.*

Лукьянов Вячеслав Анатольевич, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории адаптивных агротехнологий и средств их механизации ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр»; 305021, Россия, г. Курск, ул. Карла Маркса, 70Б; e-mail: lukyanov27@mail.ru.

Горбунова Светлана Юрьевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник отдела Биотехнологий и фиторесурсов ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»; 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2; e-mail: svetlana8423@mail.ru.

Lukyanov Vyacheslav Anatolyevich, Cand. Sc. (Biol.), researcher, Laboratory of adaptive agricultural technologies and means of their mechanization, Federal Agricultural Kursk Research Center; 70B, Karl Marks str., Kursk, 305021, Russia; e-mail: lukyanov27@mail.ru.

Gorbunova Svetlana Yurievna, Cand. Sc. (Biol.), senior researcher, Department of Biotechnologies and Phytoresources, FRC “Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS”; 2, Nakhimov ave., Sevastopol, 299011, Russia; e-mail: svetlana_8423@mail.ru.

Дата поступления в редакцию – 27.08.2021.

Дата принятия к печати – 30.09.2021.