ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2469
https://elibrary.ru/WXUYQA

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Технология культивирования *Limnospira fusiformis* из озера Соленого (г. Омск)

Е. А. Молибога*, О. П. Баженова

Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина, Омск, Россия

Поступила в редакцию: 23.03.2023
Принята после рецензирования: 13.04.2023
Принята к публикации: 02.05.2023

**Е. А. Молибога: ea.moliboga@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-7226-5962*
О. П. Баженова: https://orcid.org/0000-0003-2406-4319

© Е. А. Молибога, О. П. Баженова, 2023

Аннотация.
При поиске альтернативных источников продовольствия среди возобновляемых биоресурсов большое внимание уделяется изучению пищевой ценности микроводорослей, в том числе нитчатых цианопрокариот. Фитомасса является источником протеинов и биологически активных веществ и может быть использована в качестве биодобавки, т. к. обладает ценными питательными свойствами. Цель исследования – разработать технологию культивирования штамма *Limnospira fusiformis* O9.13F, выделенного из воды озера Соленого (г. Омск, Россия), для получения наибольших объемов экологически чистой фитомассы, пригодной для пищевых целей.
Объект исследования – нитчатая цианопрокариота *L. fusiformis* штамма O9.13F. Выделение чистой культуры штамма *L. fusiformis* O9.13F проводили микропипеточным способом из проб воды, отобранных в озере Соленом после окончания цветения воды. Культивирование осуществляли в климатической камере тепла и влажности UT-6070 на различных средах, основанных на сочетании среды Заррука и стерильной озерной воды в разных соотношениях.
Штамм *L. fusiformis* O9.13F показал наибольшую скорость нарастания фитомассы при температуре культивирования 20 ± 2 °C и интенсивности света 10–30 μмоль фотонов/м^{2}с (режим чередования света и темноты 12:12 ч). Оптимальной средой для культивирования штамма была среда, состоящая из минеральной жидкой среды Заррука и стерилизованной воды из озера в соотношении 5:5. При длительном культивировании (более 20 суток) для предотвращения оседания фосфатов из минеральной среды необходимо применять механическое перемешивание или использовать культиватор КВ-06 Европолитест. Оптимальная частота пересевов культуры – один раз в 5–7 суток. При меньшей частоте пересева отметили, что лимноспира не успевала сформировать полноценные трихомы, и наращивание объема фитомассы замедлялось.
Предлагаемая технология культивирования штамма *L. fusiformis* O9.13F позволяет получать большой объем фитомассы в короткие сроки с незначительными финансовыми затратами. Дальнейшие исследования авторов направлены на изучение возможности использования экологически чистой фитомассы *L. fusiformis* как самостоятельного биологического компонента в питании человека, а также в качестве функционально значимого рецептурного компонента пищевых продуктов.

Ключевые слова. *Limnospira fusiformis*, цианопрокариоты, культивирование, фитомасса, пищевая добавка, Западная Сибирь

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (РНФ) № 22-26-20108, https://rscf.ru/project/22-26-20108

Для цитирования: Молибога Е. А., Баженова О. П. Технология культивирования *Limnospira fusiformis* из озера Соленого (г. Омск) // Техника и технология пищевых производств. 2023. Т. 53. № 4. С. 689–697. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2469

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2469
https://elibrary.ru/WXUYQA

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Cultivating *Limnospira fusiformis* from Lake Solenoye, Omsk

Elena A. Moliboga*, Olga P. Bazhenova

P.A. Stolypin Omsk State Agrarian University, Omsk, Russia

Received: 23.03.2023
Revised: 13.04.2023
Accepted: 02.05.2023

**Elena A. Moliboga: ea.moliboga@omgau.org, https://orcid.org/0000-0001-7226-5962*
Olga P. Bazhenova: https://orcid.org/0000-0003-2406-4319

© E.A. Moliboga, O.P. Bazhenova, 2023

Abstract.
Global food shortages make it necessary to look for alternative renewable bioresources. In the south of Western Siberia, the filamentous cyanoprokaryote *Limnospira fusiformis* triggers seasonal algae bloom in hypergaline alkaline Lake Solenoye. The species has valuable nutritional properties, and its phytomass is a potential source of proteins and biologically active substances. The O9.13F strain of *L. fusiformis* has a good potential as a bioadditive in animal feeding. The article offers a technology for cultivating O9.13F of *L. fusiformis*, isolated from Lake Solenoye. The research objectives were to establish the optimal cultivation conditions, medium, and periodicity.
The study featured strain O9.13F of filamentous cyanoprokaryote *L. fusiformis*. The micropipette method made it possible to isolate pure culture from water samples taken from Lake Solenoye, Omsk, Russia, at the end of algae bloom. The cultivation involved a UT-6070 climatic chamber under uniform illumination with light intensity 10–30 μmol photons/m^{2}s and 12-h light-dark circle at 20 ± 2°C on various media: natural habitat – water from the Solenoye Lake; mineral medium – liquid Zarrouk's medium; agarized Zarrouk's medium; composite variants, where the ratio of mineral medium vs. water varied from 1:9 to 9:1.
Lake water inhibited the culture growth: the trichomes died and sank on day 10–15. Zarrouk's agarized medium stopped the culture growth as early as on day 2. The most intensive growth and development of the culture was observed in the samples with Zarrouk's mineral liquid medium and a composite mix of Zarrouk's medium and sterilized water at a ratio of 5:5. Without stirring, full-fledged trichomes had no time to develop, and the increase in phytomass volume slowed down. O9.13F showed the highest rate of phytomass growth at a cultivation temperature of 20 ± 2°C and a light intensity of 10–30 μmol photons/m^{2}s. The recommended light-dark circle was12:12 h. Zarrouk's mineral liquid medium and a composite medium of Zarrouk's medium and sterilized water proved to be optimal in a UT-6070 environmental chamber. Europolitext KV-06 or mechanical mixing could prevent sedimentation of phosphates after 20 days of cultivation. The optimal recultivation frequency was once every 5–7 days.
The new cultivation technology made it possible to obtain a significant volume of *L. fusiformis* phytomass in a short time and with low financial expenses.

Keywords. *Limnospira fusiformis*, cyanoprokaryotes, cultivation, phytomass, food additive, Western Siberia

Funding. The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF), grant No. 22-26-20108, https://rscf.ru/project/22-26-20108

For citation: Moliboga EA, Bazhenova OP. Cultivating *Limnospira fusiformis* from Lake Solenoye, Omsk. Food Processing: Techniques and Technology. 2023;53(4):689–697. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2023-4-2469

Введение

Сегодня человечество испытывает воздействие нескольких крупных проблем, т. н. глобальных вызовов, заставляющих искать новые пути их разрешения для устойчивого развития цивилизации. Одна из острейших мировых проблем – дефицит продовольствия. Ведущие эксперты Международного валютного фонда предупреждают: «Проблема с голодом грозит обостриться, и последствия могут быть крайне тяжелыми». Еще сильнее отдалилась поставленная ООН цель в области устойчивого развития – ликвидация голода к 2030 г.

Сложившаяся мировая ситуация требует поиска альтернативных источников продовольствия, относящихся к возобновляемым биоресурсам [1–3]. Кроме традиционной продукции сельского хозяйства, рыбного промысла и пр., пристальное внимание сегодня уделяется изучению пищевой ценности микроводорослей, среди которых одно из первых мест занимают нитчатые цианопрокариоты родов

Arthrospira Sitzenberger ex Gomont 1892 и *Limnospira* Nowicka-Krawczyk, Mühlsteinová et Hauer 2019 [4]. Эти водоросли широко распространены в различных водоемах и реках по всему миру, преимущественно в странах с теплым климатом [5, 6]. Питательная ценность этих видов цианопрокариот известна с древних времен. Сегодня они широко используются во всем мире как диетический продукт или биологически активная добавка к пище, входят в состав косметических и лечебно-профилактических препаратов, а также могут использоваться для получения биотоплива [5, 7–13]. Помимо своих питательных свойств, водоросли *Arthrospira*/*Limnospira* обладают терапевтическим и промышленным потенциалом [14, 15].

Limnospira fusiformis (Voronichin) Nowicka-Krawczyk, Mühlsteinová et Hauer 2019 встречается в водах с разным уровнем солености. Данная цианопрокариота способна адаптироваться к пресноводным щелочным условиям, а также к соленым щелочным и даже гипергалинным средам [16–19].

При проведении биомониторинга водоемов г. Омска (юг Западной Сибири) в гипергалинном щелочном озере Соленом была найдена цианопрокариота *L. fusiformis*, вызывающая в летне-осенний период цветение воды [17]. Позднее новый штамм лимноспиры из озера Соленого получил название O9.13F. На основании молекулярно-генетических и физиологических исследований была дана полная характеристика его генома и физиологических особенностей [20].

Штамм O9.13F показал самый высокий относительный индекс роста и наибольшее накопление белков и фотосинтетических пигментов в биомассе при культивировании при 20 °C, что ниже температуры 35 °C, которая считается оптимальной для штаммов *Arthrospira/Limnospira* [20]. Штамм O9.13F способен расти при 15 °C, самый высокий индекс роста в среде Заррука при этой температуре был отмечен при солености 200 г/л. Кроме того, штамм O9.13F может сохраняться при температуре около 9 °C в течение нескольких месяцев.

Состав жирных кислот, белков и фотосинтетических пигментов в биомассе штамма O9.13F, выращенного при разных температурах, продемонстрировал его потенциальную пригодность для выращивания в зоне умеренного климата. Сибирский штамм *Arthrospira/Limnospira* O9.13F является первым представителем новой клады III на основе гена 16S рРНК, геномная последовательность которого доступна в общедоступных базах данных (PKGD00000000) [20].

Изучение вида *L. fusiformis* из озера Соленого позволило определить запасы фитомассы в водоеме, оценить ее кормовую и биологическую ценность, дать токсикологическую оценку и установить возможности ее использования в качестве биодобавки при кормлении животных. Фитомасса лимноспиры служит богатым источником таких ценных веществ, как протеины, оксиды магния, кальций, железо и др., и полностью соответствует установленным нормативам содержания токсикантов и иных веществ в случае ее применения для кормления сельскохозяйственных животных [17].

Важное направление дальнейших работ по изучению лимноспиры из озера Соленого – это изучение возможности ее использования в производстве продуктов для питания человека в качестве источника необходимых организму нутриентов и биологически активных веществ. Фитомасса лимноспиры может быть использована как обогащающая добавка в составе пищевой продукции [9]. Для применения фитомассы лимноспиры в непрерывном производстве пищевой продукции необходим ее постоянный запас. Однако в озере достаточные объемы фитомассы формируются только в теплое время года в период цветения воды, которое в условиях юга Западной Сибири длится 2–3 месяца. Для обеспечения потребностей пищевого производства необходимо разработать технологию культивирования штамма O9.13F.

Цель исследования – разработать технологию культивирования штамма *L. fusiformis* O9.13F, выделенного из озера Соленого, для получения наибольших объемов экологически чистой фитомассы.

Задачи исследования:

– установить оптимальные условия культивирования штамма;
– определить оптимальную периодичность пересева штамма;
– выбрать оптимальный вариант среды для культивирования.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – нитчатая цианопрокариота *Limnospira fusiformis* штамма O9.13F из озера Соленого, расположенного на территории г. Омска в зоне умеренного климата (юг Западной Сибири).

Начальной стадией в процессе культивирования штамма O9.13F являлся отбор из озера лимноспиры. Планктонные пробы отбирали на открытых прибрежных участках озера Соленого 01 ноября 2022 г. зачерпыванием воды в стерильные контейнеры. Затем их транспортировали в лабораторию и хранили при постоянной температуре 20 °C. Это позволило обеспечить сохранение жизнеспособности лимноспиры. Отбор и пересадку трихомов с помощью микропипетки производили в течение получаса, поскольку время является важным фактором в процессе выделения водорослей. Успешный рост выделенных водорослей зависит от условий или состояния клеток во время сбора образцов, сам забор объекта из водоема может привести к повреждению клеток.

Рисунок 1. Трихомы лимноспиры в придонных слоях воды озера Соленого, 01.11.2022 г.

Figure 1. Limnospira trichomes in the bottom layers of Lake Solenoye, November 1, 2022

В указанное время отбора цветение воды в озере уже подошло к концу, температура воды составляла 5 °C. При микроскопировании проб в них наблюдались трихомы лимноспиры и незначительное количество криптомонад. Представители зоопланктона и другие организмы отмечены не были (рис. 1).

При проведении пересадки отобранных водорослей в благоприятную среду может проявиться быстрое размножение вредных микроорганизмов, также водоросли могут внезапно погибнуть. Поэтому наблюдение за культурой и отслеживание чужеродных микроорганизмов проводилось каждые 1–2 дня. Зафиксированы случаи, когда некоторые организмы, которые не обнаруживаются в процессе сбора образцов, появляются спустя недели или месяцы. В нашем исследовании таких фактов не наблюдалось. В единичных случаях чужеродные организмы проявляли симптомы жизнедеятельности до 5 дней культивирования, а потом погибали.

Выделение чистой культуры штамма *L. fusiformis* O9.13F и его дальнейшее культивирование осуществляли в климатической камере тепла и влажности UT-6070. Для получения требуемых объемов фитомассы лимноспиры использовали культиватор КВ-06 Европолитест. Это обусловлено тем, что штамм лимноспиры для нормального роста требует движения воды, т. к. трихомы погибают при длительном выращивании в обычных сосудах.

Водоросли в условиях стресса (отбор и пересадка образцов) плохо адаптируются к специфическим питательным средам и могут изменить свою морфологию. Поэтому при культивировании проводился постоянный контроль роста и размножения культуры на световом микроскопе Levenhuk MED D 20 T LCD, фиксируя ее состояние с помощью фотонасадки Eakins – 34MP Microscope Camera.

Обычным способом сохранения культур является постоянное их поддерживание в контролируемых условиях, наиболее приближенных к природным. Выбор оптимальной среды является важным условием успешного культивирования водорослей. Поэтому культивирование лимноспиры осуществляли в следующих вариантах: естественная среда обитания – вода из озера Соленого, минеральная среда – жидкая среда Заррука, агаризованная среда Заррука, композиционные варианты – соотношение минеральной среды с водой из водоема варьировалось от 1:9 до 9:1 соответственно. Для приготовления минеральной, агаризованной и композиционных вариантов среды использовали стерильные компоненты.

При культивировании штамма на различных средах исследовали следующие показатели: активная реакция среды (pH), количество трихомов в определенном объеме среды (0,02 мкл), оптическая плотность культуры, наличие метаболических признаков роста и развития.

Экспериментальное определение условий для оптимального роста штамма O9.13F проходило за счет параллельного запуска установок для культивирования (камеры и культиватора) с использованием различных вариантов среды.

Освещение. Культивирование штамма O9.13F осуществляли при равномерном освещении с интенсивностью света 10–30 μмоль фотонов/м^{2}с. Ранее в исследованиях было установлено, что такая интенсивность света в комбинации с соответствующей температурой (20–25 °C) оптимальна для культивирования водорослей. Кроме того, умеренное освещение при культивировании *L. fusiformis* увеличивает производство фикоцианина, а высокая интенсивность света подавляет его [21]. Чтобы сократить стресс для культуры от постоянного освещения, чередование света и темноты осуществлялось в режиме 12:12 ч. Другая периодичность чередования света и темноты не применялась из-за возможного нежелательного фотопериодического эффекта, например, формирование цист.

Температурный режим влияет на водоросли при культивировании. Хотя данный вид культур толерантен к изменению температуры, отмечено, что на верхних ярусах климатической камеры происходит фотоингибирование и повреждение клеток. Поэтому температура выше 20 °C не подходит для культивирования большинства водорослей. Кроме того, при повышении температуры увеличивается интенсивность испарения среды. Ранее было установлено, что штамм O9.13F показывает самый высокий относительный индекс роста при культивировании при 20 °C [20]. Поэтому в наших экспериментах температура в камере и культиваторе поддерживалась на уровне 20 ± 2 °C.

Частота пересевов. Для получения чистой культуры пересадку трихомов осуществляли в чашках Петри, затем посев был произведен в колбы. Этот

вид лабораторной посуды удобен для обеспечения стерильных условий культивирования. Для лучшего газообмена в колбах использовали ватные пробки. В дальнейшем их заворачивали в металлическую фольгу для предотвращения испарения.

Основополагающим условием культивирования штамма являлось поддержание метаболически активной культуры с целью сохранения запаса трихомов, достигнувших устойчивого морфологического и физиологического статуса и перехода к массовому культивированию.

Постоянные пересевы в сочетании с использованием асептических микробиологических методик, включающих в себя перемещение водорослей, которые находятся в стационарной фазе роста, на свежую стерилизованную среду, позволяют получить метаболически активную культуру в короткие сроки. Целью этой процедуры является сохранение жизнеспособной и физиологически, морфологически и генетически репрезентативной популяции. Ключевым фактором является разный возраст субкультуры, который может обеспечивать различные стадии жизненного цикла. При постоянном культивировании основной целью является сохранение организма в конце экспоненциальной фазы роста. Исследуемый штамм O9.13F подвергался пересадке каждые 5–7 суток роста, поскольку более частый пересев не позволял нарастить нужного объема.

Результаты и их обсуждение

Все образцы *Limnospira fusiformis* штамма O9.13F через 24 ч культивирования при одинаковых условиях (20 ± 2 °C, 10–30 μмоль фотонов/м^{2}с) на различных средах показали стабильное состояние (рис. 2).

На 7-е сутки культивирования на всех средах отмечен рост трихомов, их удлинение и закручивание в спирали, что говорит о благоприятных условиях для жизнедеятельности *L. fusiformis* (рис. 3).

На 15-е сутки культивирования процесс роста лимноспиры усилился. Культура лимноспиры, выращиваемая на естественной среде обитания, продолжает активно расти и размножаться, формируя типичные спирально закрученные трихомы (рис. 4).

При культивировании лимноспиры на минеральной среде Заррука на 15-е сутки происходит ускорение роста и закручивания трихомов по сравнению с исходной средой (рис. 5).

При культивировании лимноспиры на композиционной смеси 5:5 на 15-е сутки рост и развитие культуры происходит интенсивнее (рис. 6).

На 20-е сутки культивирования лимноспиры на минеральной среде Заррука отмечен активный рост и удлинение трихомов. При отсутствии периодического перемешивания в минеральной среде происходит выпадение фосфатов в осадок, на котором накапливаются трихомы. При перемешивании среды осадок растворяется (рис. 7).

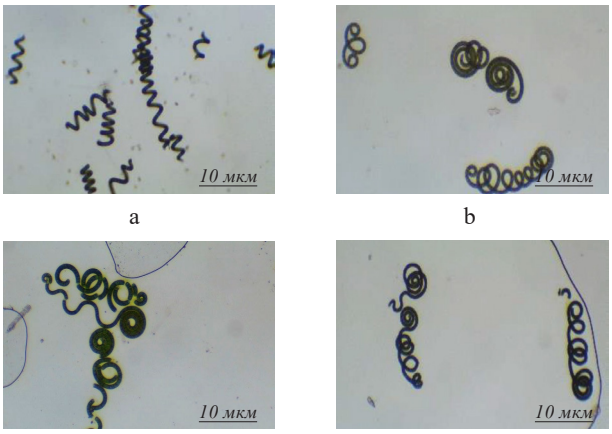


Рисунок 2. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* в первые сутки культивирования на разных средах: a, b – естественная среда обитания; c – минеральная среда (жидкая среда Заррука); d – композиционная смесь (минеральная среда:вода водоема, 1:1)

Figure 2. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 1 in different media: a, b – natural habitat; c – mineral medium (Zarrouk's medium); and d – composite mix (mineral medium:water, 1:1)

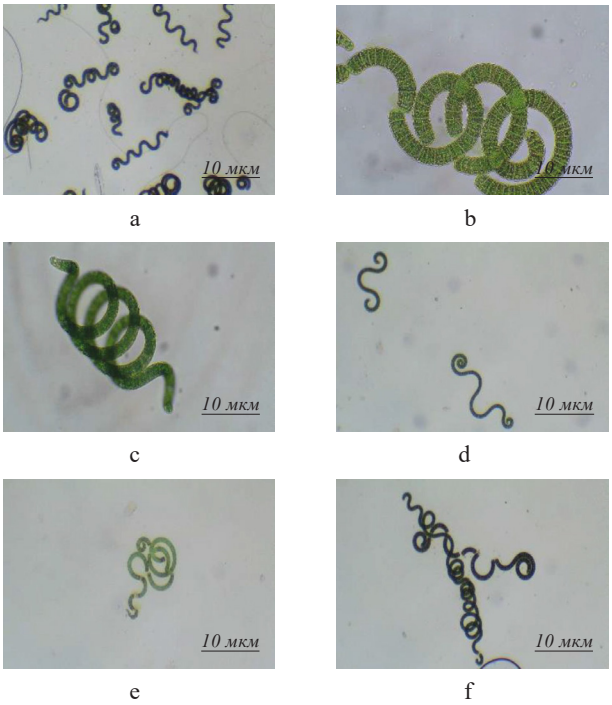


Рисунок 3. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* на 7-е сутки культивирования на разных средах: a, b, c – естественная среда обитания; d, e – минеральная среда (среда Заррука); f – композиционная смесь (минеральная среда:вода водоема, 1:1); масштабная линейка – 10 мкм

Figure 3. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 7 in different media: a, b, c – natural habitat; d, e – mineral environment (Zarrouk's medium); and f – composite mix (mineral medium: water, 1:1). Scale bar – 10 μm

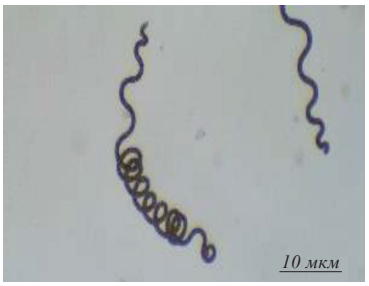


Рисунок 4. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* на 15-е сутки культивирования на естественной среде обитания

Figure 4. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 15, natural habitat

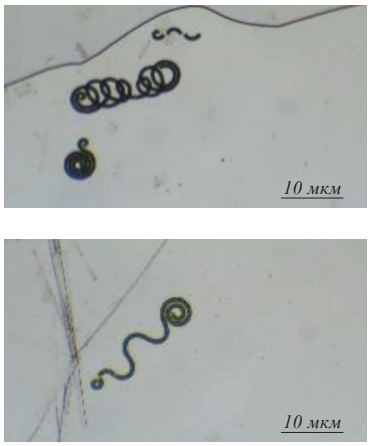


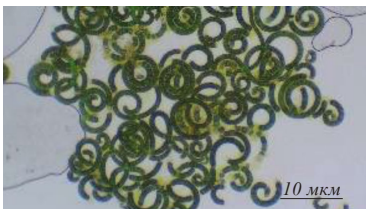
Рисунок 5. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* на 15-е сутки культивирования на минеральной среде

Figure 5. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 15, mineral medium

Рисунок 6. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* на 15-е сутки культивирования на композиционной смеси 5:5

Figure 6. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 15, composite mix 5:5

a



b

Рисунок 7. Микрофотографии *Limnospira fusiformis* на 20-е сутки культивирования на минеральной среде: a – трихомы во взвеси; b – оседание трихомов

Figure 7. *Limnospira fusiformis* on cultivation day 20, mineral medium: a – trichomes in suspension; b – sedimentation of trichomes

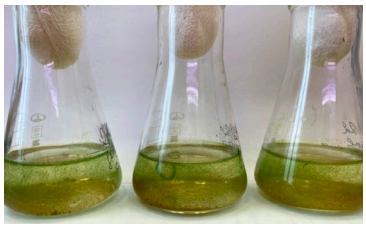


Рисунок 8. Рост культуры лимноспиры на воде озера Соленое на 10–15-е сутки культивирования

Figure 8. Limnospira culture in Solenoye Lake water, cultivation days 10–15

При выращивании лимноспиры на воде из озера Соленого рост и развитие культуры постепенно замедлялись, и на 10–15-е сутки происходило отмирание трихомов и их оседание на дно сосуда (рис. 8).

Изучение роста культуры на различных вариантах композиционной среды происходило в течение 5–10 суток. При увеличении объема воды из озера в композициях 2:8, 4:6 и 5:5 в течение 5 суток происходит активный рост фитомассы. Наибольшая оптическая плотность культуры отмечена на композиционной среде 5:5.

На 10-е сутки культивирования в композиционных средах 2:8 и 4:6 происходит оседание трихомов, потерявших жизнеспособность. В композиционных средах с наибольшим количеством минеральной питательной среды (композиции 6:4 и 8:2) отмечено оседание трихомов, но не такое активное, как на средах 2:8 и 4:6. Как и на 5-е сутки культивирования, отмечена высокая оптическая плотность культуры и

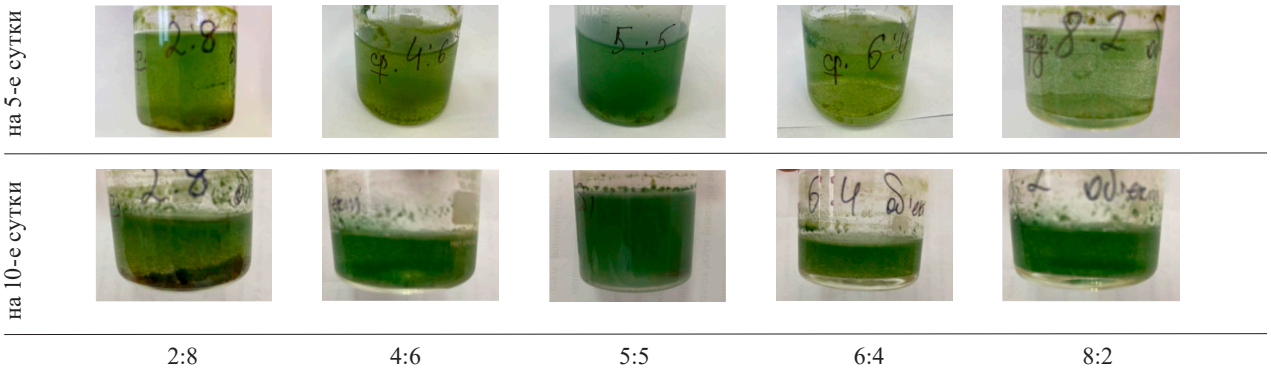


Рисунок 9. Динамика роста культуры лимноспиры на различных композиционных вариантах среды

Figure 9. Limnospira culture on various composite mixes

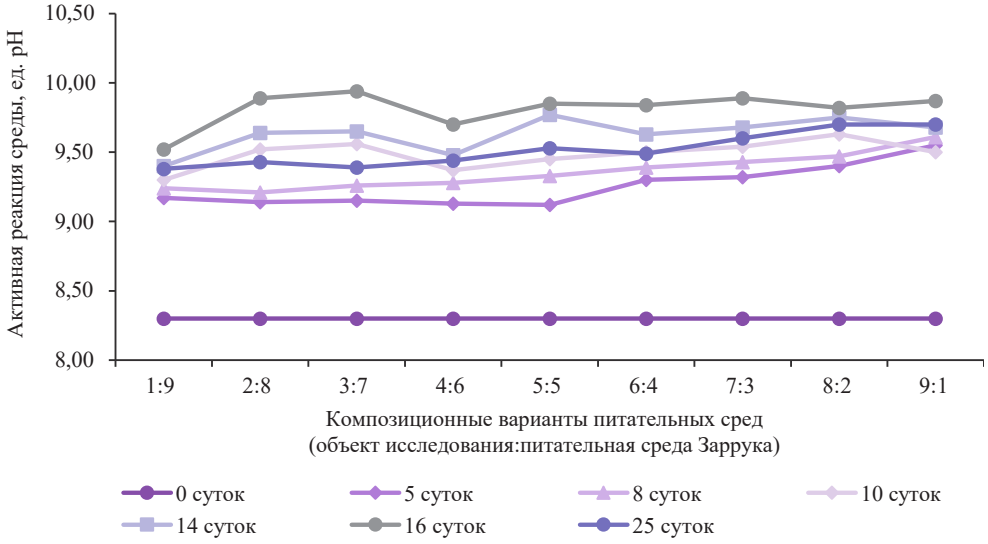


Рисунок 10. Изменение pH среды на различных композиционных вариантах

Figure 10. pH in various composite mixes

отсутствие оседания трихомов на композиционной среде 5:5. Выборка микрофотографий культуры лимноспиры на различных вариантах композиционной среды приведена на рисунке 9.

При выращивании культуры на различных средах наблюдалось увеличение активной реакции среды (pH) от 8,33 в начале культивирования (pH среды Заррука) до 9,94 в конце, что соответствует данным из исследования A. E. Misztak и др. [20]. Максимальные показатели pH на всех вариантах среды (9,52–9,94) достигаются на 16-е сутки культивирования. Это является оптимальными для штамма показателями и отражает наилучшее состояние культуры. На 25-е сутки культивирования на всех средах pH снижается, колеблясь в пределах 9,38–9,70 (рис. 10).

На всех композиционных средах на 15–16-е сутки культивирования наблюдаются хорошо сформированные трихомы лимноспиры, но наиболее ярко выраженные морфологические признаки трихомов формируются при культивировании на композиционной смеси 5:5 (рис. 6).

При проведении экспериментальных исследований, направленных на определение наилучшей питательной среды для культивирования лимноспиры, производили подсчет количества трихомов в единице объема (0,02 мкл). Исходное количество трихомов, подвергнутых пересадке на выбранные среды, было одинаково, а их состояние удовлетворительное. На 5-е сутки культивирования на питательной среде «вода озера» количество жизнеспособных трихомов было выше, чем на композиционной среде 5:5. Начиная с 15-х суток культивирования на композиционной питательной среде 5:5, наблюдался более интенсивный рост лимноспиры, чем на воде из озера. При этом происходит фрагментация трихомов, быстрый рост и спирализация фрагментов (рис. 11).

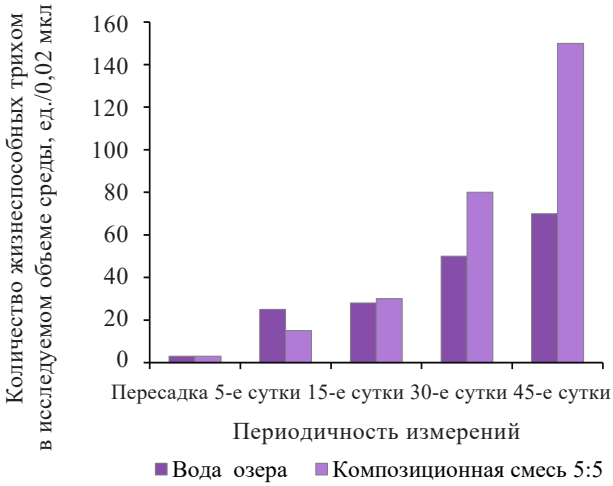


Рисунок 11. Динамика прироста трихомов лимноспиры на разных питательных средах

Figure 11. Growth dynamics of Limnospira trichomes on different nutrient media

Выводы

Исследуемый штамм *Limnospira fusiformis* O9.13F показал наибольшую скорость нарастания фитомассы при температуре культивирования 20 ± 2 °C и интенсивности света 10–30 μмоль фотонов/м^{2}с. Рекомендуемый режим чередования света и темноты 12:12 ч.

Оптимальными средами для культивирования штамма *L. fusiformis* O9.13F являются минеральная жидкая среда Заррука и композиционная среда (среда Заррука:стерилизованная вода из водоема в соотношении 5:5). На агаризованной среде Заррука рост культуры прекращается на вторые сутки.

Для культивирования штамма O9.13F рекомендовано использование климатической камеры тепла и влажности UT-6070. Для предотвращения оседания фосфатов из минеральной среды при длительном культивировании (более 20 суток) рекомендуется применение культиватора КВ-06 Европолитест или механическое перемешивание минеральной среды.

Рекомендуемая частота пересевов культуры – один раз в 5–7 суток. При меньшей частоте пересева лимноспира не успевает сформировать полноценные трихомы, и наращивание объема фитомассы замедляется.

Разработанная технология культивирования штамма *L. fusiformis* O9.13F для использования в качестве пищевой добавки позволяет получать большой объем фитомассы в короткие сроки с незначительными финансовыми затратами. При использовании разработанной технологии в промышленных масштабах рекомендуется проводить постоянный контроль процесса культивирования, что позволит избежать элементов «сезонности» при использовании данного вида сырья в пищевой и перерабатывающей промышленности.

Критерии авторства

Е. А. Молибога – руководитель проекта РНФ: практическое проведение научно-исследовательских работ, связанных с отработкой технологии культивирования *Limnospira fusiformis*. О. П. Баженова – проведение сравнительного анализа полученных данных на основе кабинетных исследований.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Выражаем благодарность Российскому научному фонду за предоставленную возможность провести полноценный цикл экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности культивирования штамма *Limnospira fusiformis* O9.13F.

Contribution

E.A. Moliboga supervised the project and performed the laboratory procedures. O.P. Bazhenova compared the desk research data.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their gratitude to the Russian Science Foundation for the opportunity to conduct a full cycle of experimental studies.

References/Список литературы

1. Kaledin AP, Stepanova MV. Bioaccumulation of trace elements in vegetables grown in various anthropogenic conditions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):10–16. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-551

2. Flyurik EA, Ermakova OS. *Medusomyces gisevii* L.: cultivation, composition, and application. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):152–161. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-563

3. Dmitrieva AI, Faskhutdinova ER, Drozdova MYu, Kutuzov SS, Proskuryakova LA. Phylogenetic diversity of microorganisms from the Abakan Arzhan thermal spring: Potential producers of microbial energy. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):458–468. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2384

4. Asyakina LK, Vorob'eva EE, Proskuryakova LA, Zharko MYu. Evaluating extremophilic microorganisms in industrial regions. Foods and Raw Materials. 2023;11(1):162–171. https://doi.org/10.21603/2308-4057-2023-1-556

5. Bortolini DG, Maciel GM, Fernandes IAA, Pedro AC, Rubio FTV, Branco IG, *et al.* Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends. Food Chemistry: Molecular Sciences. 2022;5. https://doi.org/10.1016/j.fochms.2022.100134

6. Hassan FM, Mahdi WM, Al-Haideri HH, Kamil DW. Identification of new species record of Cyanophyceae in Diyala River, Iraq based on 16S rRNA sequence data. Biodiversitas. 2022;23(10):5239–5246. https://doi.org/10.13057/biodiv/d231033

7. de Morais MG, Alvarengaa AGP, Vaz BS, Costa JAV. Nanoencapsulation of Spirulina biomass by electrospraying for development of functional foods – A review. Biotechnology Research and Innovation. 2021;5(2). https://doi.org/10.4322/biori.21050204

8. El-Baky NA, Rezk NMF, Amara AA. *Arthrospira platensis* variants: A comparative study based on c-phycocyanin gene and protein, habitat, and growth conditions. Journal of Marine Science and Engineering. 2023;11(3). https://doi.org/10.3390/jmse11030663

9. Pogorelova NA, Boyko TV, Moliboga EA. Intensity of blood lipidiperoxidation when added spirulin-containing processed analogue cheese in the diet (experimental study). Agricultural Bulletin of Stavropol Region. 2018;31(3):15–20. (In Russ.). https://doi.org/10.31279/2222-9345-2018-7-31-15-20

10. Bogdanov VD, Simdiankin AA, Pankina AV, Mostovoi VD. New functional formulations for dry seafood concentrates and their properties. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):707–716. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-707-716

11. Ainas M, Hasnaoui S, Bouarab R, Abdi N, Drouiche N, Mameri N. Hydrogen production with the cyanobacterium *Spirulina platensis*. International Journal of Hydrogen Energy. 2017;42(8):4902–4907. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.056

12. Krishnan A, Qian X, Ananyev G, Lun DS, Dismukes GC. Rewiring of cyanobacterial metabolism for hydrogen production: synthetic biology approaches and challenges. In: Zhang W, Song X, editors. Synthetic biology of cyanobacteria. Singapore: Springer; 2018. pp. 171–213. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0854-3_8

13. Suzuki S, Yamaguchi H, Kawachi M. The draft genome of a hydrogen-producing cyanobacterium, *Arthrospira* platensis NIES-46. Journal of Genomics. 2019;7:56–59. https://doi.org/10.7150/jgen.38149

14. Andrade G, Labarca TF, Llanca V, Morales P, Sabando K, Ortuno D. Using Spirulina as an adjuvant to the treatment of Periodontitis: A systematic review of clinical trials. Research Square. 2023. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2539298/v1

15. Furmaniak MA, Misztak AE, Franczuk MD, Wilmotte A, Waleron M, Waleron KF. Edible cyanobacterial genus *Arthrospira*: Actual state of the art in cultivation methods, genetics, and application in medicine. Frontiers in Microbiology. 2017;8. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02541

16. Dadheech PK, Ballot A, Casper P, Kotut K, Novelo E, Lemma B, *et al.* Phylogenetic relationship and divergence among planktonic strains of *Arthrospira* (Oscillatoriales, Cyanobacteria) of African, Asian and American origin deduced by 16S–23S ITS and phycocyanin operon sequences. Phycologia. 2010;49(4):361–372. https://doi.org/10.2216/09-71.1

17. Bazhenova OP, Konovalova OA. Phytoplankton of lake Solenoye (Omsk) as a promising source of bioresources. Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal. 2012;19(3):375–382. (In Russ.). [Баженова О. П., Коновалова О. А. Фитопланктон озера соленого (г. Омск) как перспективный источник биоресурсов // Сибирский экологический журнал. 2012. Т. 19. № 3. С. 375–382.]. https://elibrary.ru/OZLGQR

18. Makeeva EG, Osipova NV. Algae of the salt Lake Altaiskoye (Republic of Khakassia): Taxonomic composition and ecological features. Inland Water Biology. 2022;(2):118–126. (In Russ.). https://doi.org/10.31857/S0320965222020073

19. Nowicka-Krawczyk P, Mühlsteinová R, Hauer T. Detailed characterization of the *Arthrospira* type species separating commercially grown taxa into the new genus *Limnospira* (Cyanobacteria). Scientific Reports. 2019;9. https://doi.org/10.1038/s41598-018-36831-0

20. Misztak AE, Waleron M, Furmaniak M, Waleron MM, Bazhenova O, Daroch M, *et al.* Comparative genomics and physiological investigation of a new *Arthrospira/Limnospira* strain O9.13F isolated from an alkaline, winter freezing, Siberian Lake. Cells. 2021;10(12). https://doi.org/10.3390/cells10123411

21. Kareem HA, Alghanmi HA. Effects of various light intensities on phycocyanin composition of cyanobacterium *Limnospira fusiformis* (Voronichin) Nowicka-Krawczyk, Mühlsteinová et Hauer. Malaysian Journal of Science. 2023;42(1). https://doi.org/10.22452/mjs.vol42no1.1