Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Том 76, № 2. С. 164–175.

РЫБНОЕ ХОЗЯЙСТВО, АКВАКУЛЬТУРА И ПРОМЫШЛЕННОЕ РЫБОЛОВСТВО

Научная статья
УДК 639.2+639.3+574.58 DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2026-76-18 EDN: RNBPVG

Синергетический эффект фитогормонов разных классов на рост и биохимический состав *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898)

Евгений Валерьевич Михеев [1], Светлана Евгеньевна Лескова [2], Николай Николаевич Ковалев [3]

[1, 3] Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
[2, 3] Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия
[1] zhenyasuper79@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3433-5653
[2] svetaleskova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7058-3449
[3] kovalevnn61@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7100-7208

Аннотация. Приводится результат одновременного введения в культуральную среду, в процессе выращивания микроводоросли *Chaetoceros muelleri*, двух фитогормонов - салициловой и индол-3-масляной кислот. В ходе исследования рассмотрено воздействие использованных гормонов на содержание основных биохимических элементов, белка, углеводов, липидов и хлорофилла в культуре микроводоросли. Установлено, что введение смеси исследованных фитогормонов не приводило, в сравнении с контрольной группой, к увеличению пролиферации клеток. В работе показано, что одновременное внесение двух фитогормонов приводило как к росту, так и к снижению содержания рассмотренных биохимических компонентов в культуре *Chaetoceros muelleri*. Стимуляция синтеза углеводов отмечена на 3-и сутки культивирования. Дальнейшее культивирование приводило к снижению содержания углеводов в экспериментальной группе, по сравнению с контролем. Установлено, что внесение смеси фитогормонов приводило к увеличению содержания липидов в культуре микроводоросли в 1,7 раза по истечении 7 дней выращивания, по сравнению с контрольной группой. При этом содержание липидов в экспериментальной группе превышало их содержание в контрольной группе на протяжении всего времени эксперимента. Внесение фитогормонов ингибировало накопление белка и хлорофилла в течение всего времени культивирования. Также в статье проведено сравнение влияния введения как смеси рассмотренных гормонов, так и каждого гормона в отдельности на рост и константы продуктивности культуры микроводоросли *Chaetoceros muelleri*.

Ключевые слова: *Chaetoceros muelleri*, биохимический состав, фитогормоны, салициловая кислота, индол-3-масляная кислота

Для цитирования: Михеев Е. В., Лескова С. Е., Ковалев Н. Н. Синергетический эффект фитогормонов разных классов на рост и биохимический состав *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898) // Научные труды Дальрыбвтуза. 2026. Т. 76, № 2. С. 164–175.

© Михеев Е. В., Лескова С. Е., Ковалев Н. Н., 2026

Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2026. Vol. 76, no. 2. P. 164–175.

FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

Original article

Synergistic effect of phytohormones of different classes on growth and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898)

Evgeny V. Mikheev [1], Svetlana E. Leskova [2], Nikolai N. Kovalev [3]
[1, 3] Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
[2, 3] Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia
[1] zhenyasuper79@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3433-5653
[2] svetaleskova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7058-3449
[3] kovalevnn61@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7100-7208

Abstract. This article presents the results of the simultaneous introduction of two phytohormones - salicylic acid and indole-3-butyric acid - into the culture medium during cultivation of the microalga *Chaetoceros muelleri*. The study examined the effects of the hormones on the levels of key biochemical elements - protein, carbohydrates, lipids, and chlorophyll - in the microalgae culture. It was found that the introduction of the studied phytohormones did not result in increased cell proliferation compared to the control group. The study demonstrated that the simultaneous application of two phytohormones resulted in both an increase and a decrease in the levels of the biochemical components examined in the *Chaetoceros muelleri* culture. Stimulation of carbohydrate synthesis was observed on the third day of cultivation. Further cultivation resulted in a decrease in carbohydrate content in the experimental group compared to the control. It was found that the addition of a phytohormone mixture resulted in a 1.7-fold increase in lipid content in the microalgae culture after 7 days of cultivation, compared to the control group. Furthermore, lipid content in the experimental group exceeded that in the control group throughout the entire experiment. The addition of phytohormones inhibited protein and chlorophyll accumulation throughout the entire cultivation period. The article also compares the effects of both a mixture of the hormones examined and each hormone individually on the growth and productivity of the microalgae culture *Chaetoceros muelleri*.

Keywords: *Chaetoceros muelleri*, biochemical composition, phytohormones, salicylic acid, indole-3-butyric acid

For citation: Mikheev E. V., Leskova S. E., Kovalev N. N. Synergistic effect of phytohormones of different classes on growth and biochemical composition of *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898). *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2026; 76(2):164–175. (In Russ.).

Введение

На сегодняшний день некоторые виды микроводорослей являются центральным кормовым компонентом в процессе культивирования различных представителей двустворчатых моллюсков, таких как гребешок, мидии, устрицы, а также ракообразных и рыб в аквакультурных хозяйствах.

Такой вид, как *Chaetoceros muelleri*, за счет повышенного содержания липидов с уникальным жирнокислотным составом нашел широкое применение в качестве корма для объектов марикультуры на ранних стадиях развития [1, 2, 3, 4].

C. muelleri также была признана одной из наиболее подходящих микроводорослей для крупномасштабного культивирования в бассейнах открытого типа для коммерческого использования [5, 6].

Технология производства биомассы микроводорослей – многоступенчатый и экономически затратный процесс. Одним из путей повышения продуктивности процесса культивирования является использование экзогенных фитогормонов [7].

Фитогормоны играют важную роль в метаболизме растительных клеток, стимулируя их деление и эффективность фотосинтеза, тем самым увеличивая плотность культуры, содержание липидов, белка и пигментов [8].

Оценке влияния отдельных фитогормонов на рост и биохимический состав *Chaetoceros muelleri* посвящено мало работ. В ранее проведенных исследованиях установлено влияние салициловой кислоты (СК) на увеличение количества клеток в культуре *Ch. muelleri,* по сравнению с контрольной группой, а также на повышение содержания белка и липидов [9]. Использование индол-3-уксусной кислоты также приводило к увеличению содержания клеток в культуре. При этом введение индол-3-масляной кислоты (3ИМК) в культуру *Ch. muelleri* обуславливало увеличение содержания белка, углеводов и липидов, по сравнению с контрольной группой, на различных временных отрезках культивирования [10].

Стоит отметить, что остаются мало изученными процессы модерации в микроводорослевых клетках, что обуславливает углубление исследований в отношении фитогормонов эндогенного происхождения [11].

При этом синергический эффект фитогормонов различной химической структуры, их влияние на рост микроводорослей и продукционные характеристики носит спорадический характер [12].

Необходимо рассмотреть сочетанное воздействие стимуляторов на плотность клеток и содержание основных биохимических компонентов в культуре микроводорослей в сравнении с воздействием раздельного внесения.

Цель работы заключалась в определении влияния совместного действия двух фитогормонов разных классов на показатели увеличения плотности клеток, а также на содержание биохимических компонентов в культуре *Chaetoceros muelleri* в процессе выращивания.

Объекты и методы исследований

В работе использовали культуру микроводоросли *Chaetoceros muelleri* из коллекции НПДМ ФГБОУ ВО «Дальрыбвтуз». Водоросль выращивали в накопительном режиме на питательной среде f/2, которую готовят на основе фильтрованной и стерилизованной морской воды с добавлением растворов основных минеральных солей ($NaNO_3$; $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$; $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$), микроэлементов ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$; $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$; $MnCl_2 \cdot 4H_2O$; $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$; ЭДТА-Na_2; $FeCl_3 \cdot 6H_2O$) и витаминов (B1; B7; B12) [13]. Культура водорослей содержалась при постоянных условиях: температуре 21–23 °C, освещенности 8–10 клк, фотопериоде 8 : 16 ч (свет : темнота) и периодическом перемешивании (4–5 раза в сутки).

В качестве стимуляторов роста использовали салициловую (СА) и индол-3-масляную- (3ИМК) кислоты (Hebei Guanlang Biotechnology Co., Ltd, China). Эффективные концентрации стимуляторов были определены в ранее проведенных исследованиях [9, 10] и составляли для культуры *Chaetoceros muelleri* $2{,}8 \times 10^{-7}$ М в случае салициловой кислоты и $0{,}4 \times 10^{-5}$ М в случае индол-3-масляной кислоты.

В качестве культиваторов использовались стерильные стеклянные термостойкие конические колбы объемом 1 л. В колбы в начале эксперимента наливали 400 мл фильтрованной и стерилизованной морской воды, 100 мл культуры водорослей и стимулятор в исследуемых концентрациях. Одна колба была контрольной, т.е. культура росла без добавления стимулятора роста.

Культивирование осуществляли в монокультуре. Динамику роста клеточных культур исследовали с помощью светового микроскопа. Рост плотности культуры водорослей определяли по увеличению числа клеток, просчитанных в каждом опыте в камере Горяева под световым микроскопом. Продолжительность эксперимента составляла 14 дней.

Общее содержание углеводов оценивали методом кислотного гидролиза проб взвеси водорослей, за счет чего образовавшиеся моносахаридные единицы переходят в фурфурольные производные, которые при добавлении в раствор L-триптофана образуют окрашенные комплексы, поглощающие свет при длине волны 540 нм [14].

Пробоподготовку для определения белка проводили согласно [15]. Определение содержание белка проводили методом [16].

Общее содержание липидов проводили методом, в основе которого лежит цветная реакция ванилина в кислой среде с липидами с образованием интенсивного окрашивания. Хромогенными группами выступают гидроксильные и карбонильные [17].

Сумму хлорофиллов выделяли методом экстракции ацетоном из предварительно замороженной биомассы водорослей [18]. Количественное содержание хлорофиллов определяли спектрофотометрически при длинах волн 630, 647, 664 и 750 нм. В качестве контроля использовали 90 % ацетон [19].

Расчет скорости роста популяции (R), количества делений в сутки (K) и времени удвоения популяции (T2) производили, как указано в [20].

Расчет продуктивности проксимального состава определяли, как описано в [21], отнесенную на 1 млн клеток культуры.

Обработка результатов проводилась с использованием программного обеспечения Excel и STATISTICA® 7.0, определяя стандартное отклонение и доверительный интервал в трех повторениях экспериментов. Среднюю квадратичную ошибку определяли с учетом доверительного интервала $\Delta = \pm 5$ % и надежности $p \leq 0{,}05$.

Результаты и их обсуждение

На начальном этапе исследования определено влияние на плотность культуры *Chaetoceros muelleri* внесения двух различных фитогормонов. Рассматриваемые фитогормоны (салициловая кислота и индол-3-масляная кислота) вводились в культуру одновременно на старте эксперимента, продолжительность которого составляла 14 дней. Графики изменения плотности клеток микроводоросли *Ch. muelleri*, культивируемой в среде без фитогормонов и в среде с внесением двух рассмотренных фитогормонов, представлены на рис. 1.

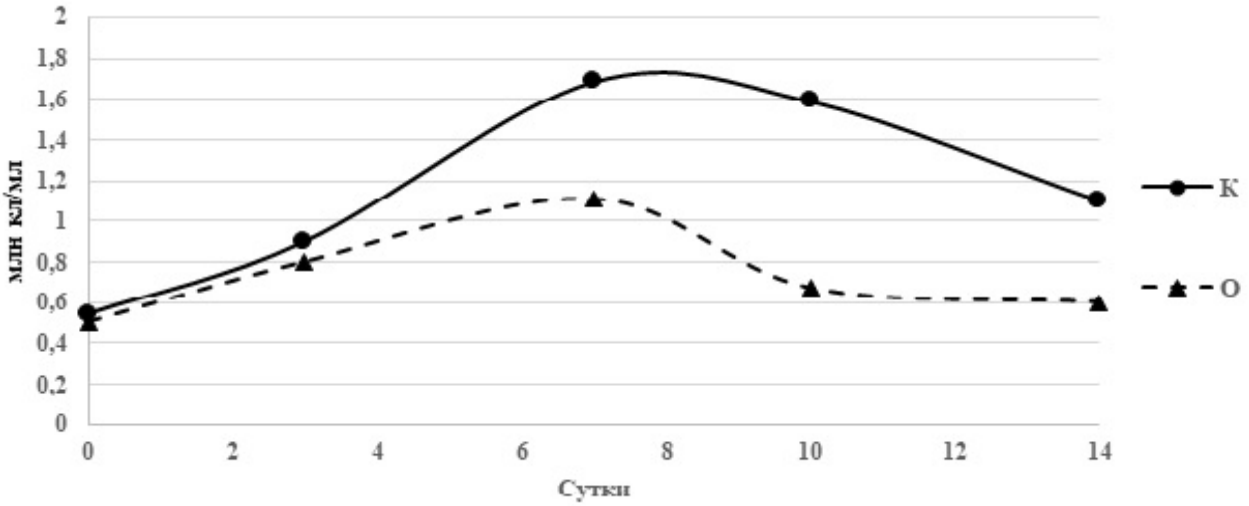

Рис. 1. Влияние на динамику плотности микроводоросли *Chaetoceros muelleri* в накопительной культуре внесения $2{,}8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты и $0{,}4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 1. Effect on the dynamics of the density of the microalgae *Chaetoceros muelleri* in the accumulation culture of the addition of $2{,}8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid and $0{,}4 \times 10^{-5}$ M indole-3-butyric acid (O), compared to the control (K). Compiled by the authors

Следует отметить, что рост плотности культуры в контрольной группе наблюдался в течение 7 сут эксперимента. Количество клеток в культуре к данному отрезку времени в 3,1 раза превышало стартовое значение и составляло 1,69 млн клеток в миллилитре культуры. Затем наблюдалось снижение количества клеток в культуре *Ch. muelleri* и к моменту завершения времени эксперимента, 14 дней, оно составляло 1,1 млн клеток в миллилитре культуры (см. рис. 1). Возможно предположить, что такое колебание плотности культуры связанно со сменой генераций.

В культуре, выращенной в среде с внесением фитогормонов, также отмечен рост плотности клеток в течение первых 7 сут исследования. Количество клеток в культуре после 7 сут эксперимента составляло 1,1 млн клеток в миллилитре культуры, что в 2,2 раза выше стартового показателя.

Дальнейшее культивирование сопровождалось резким снижением плотности культуры до практически исходных значений (рис. 1).

Следует отметить, что максимальное подавление роста культуры на 7-е сут культивирования составило 65,7 %, а на 10-е сут – на 42,1 %.

Влияние смеси двух гормонов на константы роста культуры представлено в табл. 1.

Таблица 1

Влияние на константы роста в накопительной культуре *Chaetoceros muelleri* внесения $2{,}8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты и $0{,}4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К)

Table 1

Effect on growth constants in the accumulative culture of Chaetoceros muelleri of the introduction of $2{,}8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid and $0{,}4 \times 10^{-5}$ M indole-3-butyric acid (O), compared with the control (K)

	Период, сут	R (Удельная скорость роста, сутки $^{-1}$)	K (количество делений в день)	T2 (время удвоения популяции)
К	0–3	0,18	0,26	3,8
	3–7	0,16	0,23	4,3
	0–7	0,17	0,24	4,1
О	0–3	0,14	0,2	4,9
	3–7	0,08	0,12	8,7
	0–7	0,11	0,16	6,3

Расчет констант роста опытной и экспериментальной культур (табл. 1) показывает, что смесь фитогормонов оказывает ингибирующее влияние на процесс деления клеток (К) и время удвоения популяции (Т2) в период активного роста (7 сут).

В ходе эксперимента также проводилась оценка влияния сочетанного воздействия салициловой кислоты и индол-3-масляной кислоты на содержание основных биохимических компонентов в культуре *Ch. muelleri*.

На рис. 2 представлены данные по содержанию белка в экспериментальной и контрольной культурах *Ch. muelleri* в процессе исследования.

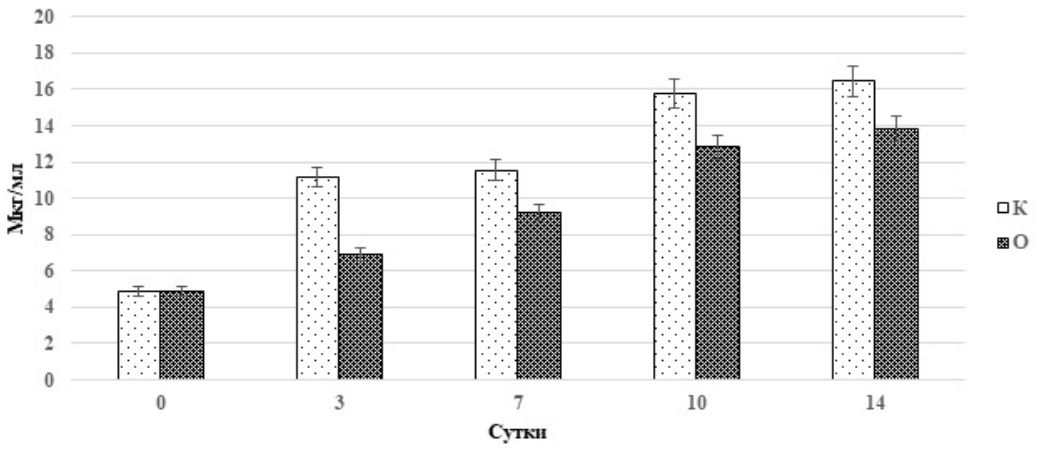

Рис. 2. Динамика накопления белка в культуре *Chaetoceros muelleri* при внесении 2,8 × 10^{-7} М салициловой кислоты и 0,4 × 10^{-5} М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 2. Dynamics of protein accumulation in *Chaetoceros muelleri* culture upon addition of 2,8 × 10^{-7} M salicylic acid and 0,4 × 10^{-5} M indole-3-butyric acid (O), compared to the control (C). Compiled by the authors

Исходя из данных, полученных в процессе исследования, следует отметить, что рост концентрации белка наблюдался как в контрольной, так и в опытной группах на протяжении всего времени эксперимента, 14 сут. Увеличение данного показателя в контрольной группе составило 3,4 раза, в группе, выращенной с добавлением смеси фитогормонов, 2,8 раза, по сравнению со стартовыми значениями. При этом концентрация белка в обеих экспериментальных группах возрастала с 10-х по 14-е сут незначительно. Следует отметить, что в контрольной группе концентрация белка на 3-и и 7-е, а также на 10-е и 14-е сут была практически одинаковой, в то время как в опытной группе увеличение содержания белка в культуре было более выражено.

Динамика накопления углеводов в контрольной группе показывает рост их концентрации в первые 10 сут культивирования в 3,1 раза по сравнению с концентрацией в исходной культуре и снижение до исходных значений к 14-м сут культивирования (рис. 3).

Смесь фитогормонов оказывала стимулирующий эффект на накопление углеводов только в первые трое суток культивирования. Выражением этого эффекта стало увеличение их содержания в 2,3 раза, по сравнению с контрольной группой (рис. 3).

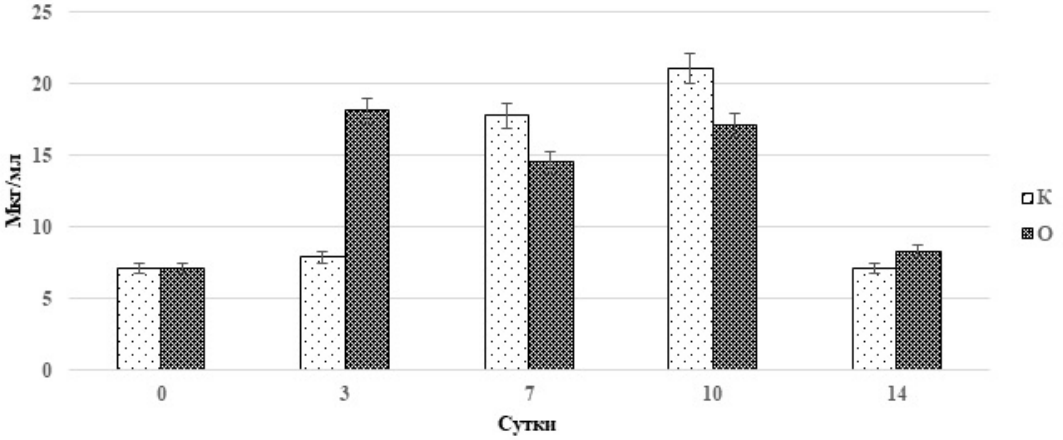

Рис. 3. Динамика накопления углеводов в культуре *Chaetoceros muelleri* при внесении 2,8 × 10^{-7} М салициловой кислоты и 0,4 × 10^{-5} М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 3. Dynamics of carbohydrate accumulation in *Chaetoceros muelleri* culture upon application of 2,8 × 10^{-7} M salicylic acid and 0,4 × 10^{-5} M indole-3-butyric acid (O), compared to the control (C). Compiled by the authors

Дальнейшее культивирование не приводило к значительным различиям концентрации углеводов между контрольной и опытной группами, и на момент окончания эксперимента значение данного показателя снижалось в обеих группах практически до стартовых значений (рис. 3).

Концентрация липидов в сухой массе микроводорослей составляет 20–50 % и может значительно увеличиваться в условиях стресса и воздействия стимуляторов [22].

Данные проведенного исследования показывают, что максимальный рост, в 3,5 раза по сравнению с начальными значениями, содержания липидов в контрольной группе отмечен на 3-и сут эксперимента. Однако дальнейшее культивирование показывает тенденцию к снижению данного показателя практически до значений стартовой культуры (рис. 4).

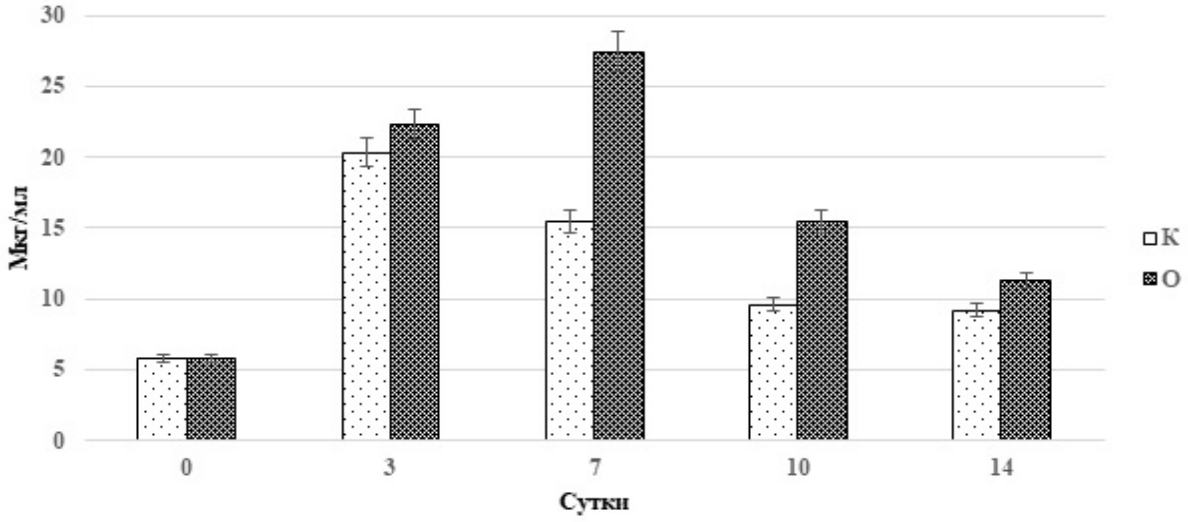

Рис. 4. Динамика накопления липидов в культуре *Chaetoceros muelleri* при внесении $2{,}8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты и $0{,}4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 4. Dynamics of lipid accumulation in *Chaetoceros muelleri* culture upon addition of $2{,}8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid and $0{,}4 \times 10^{-5}$ M indole-3-butyric acid (O), compared to the control (C). Compiled by the authors

Выявлено стимулирующее влияние смеси фитогормонов на концентрацию липидов. Так, к 7-м сут культивирования концентрация липидов в опытной группе составила 27,5 мкг/мл, что на 77,6 % больше, чем в контрольной группе. В остальные временные точки культивирования достоверных различий между контрольной и опытной группами не выявлено (рис. 4).

В ходе исследований проведена оценка динамики содержания хлорофилла как важного показателя метаболической активности растительных клеток в культуре, исследуемой микроводорсли.

Экспериментально выявлено, что динамика концентрации хлорофилла в контрольной группе имеет 2 пика на 7-й и 14-й день культивирования (рис. 5).

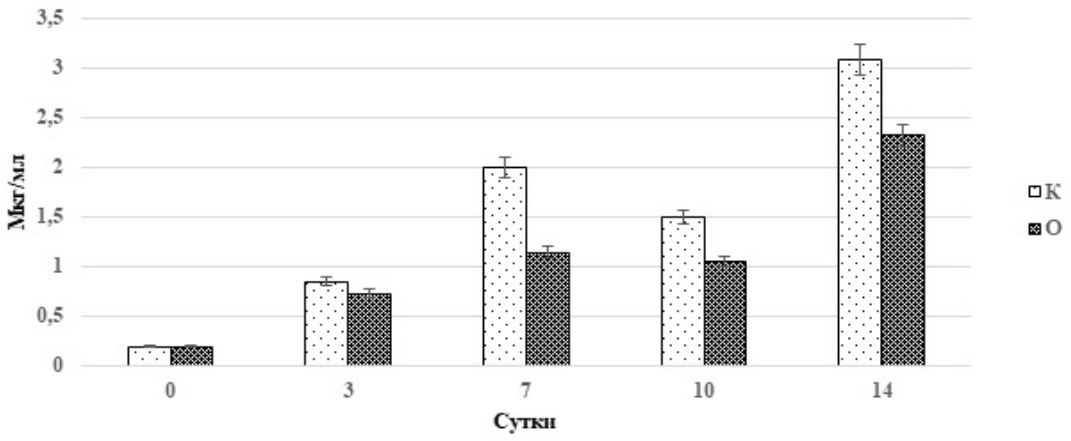

Рис. 5. Динамика накопления хлорофилла в культуре *Chaetoceros muelleri* при внесении $2,8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты и $0,4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 5. Dynamics of chlorophyll accumulation in *Chaetoceros muelleri* culture upon application of $2,8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid and $0,4 \times 10^{-5}$ M indole-3-butyric acid (O), compared to the control (K). Compiled by the authors

Оба пика соответствуют снижению плотности культуры. По-видимому, это связано с обогащением питательной среды отмершими клетками, т.е. со сменой генерации микроводоросли. Причем концентрация хлорофилла на 14-й день культивирования в 1,5 раза больше, чем на 10-й день (рис. 5).

Из полученных данных видно, что смесь салициловой и индол-3-масляной кислот приводила к снижению концентрации хлорофилла в культуре *Ch. muelleri*, по сравнению с контрольной группой. На момент окончания эксперимента содержание данного элемента в опытной группе было в 1,3 раза ниже, чем в контроле (рис. 5).

На рис. 6 приведено сравнение влияния как совместного, так и индивидуального воздействия добавления рассмотренных фитогормонов на концентрацию клеток в культуре *Chaetoceros muelleri.*

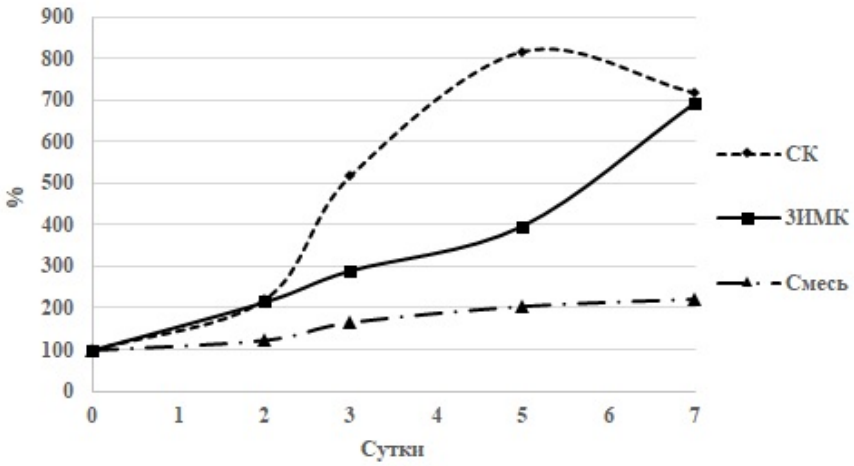

Рис. 6. Прирост плотности культуры *Chaetoceros muelleri* (%) в накопительной культуре под влиянием $2,8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты (СК), $0,4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (3ИМК) и смеси $2,8 \times 10^{-7}$ М салициловой кислоты и $0,4 \times 10^{-5}$ М индол-3-масляной кислоты (смесь). Составлено авторами

Fig. 6. Growth of *Chaetoceros muelleri* culture density (%) in a cumulative culture under the influence of $2,8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid (SA), $0,4 \times 10^{-5}$ M indol-3-butyric acid (3IBA), and a mixture of $2,8 \times 10^{-7}$ M salicylic acid and $0,4 \times 10^{-5}$ M indol-3-butyric acid (Mixture). Compiled by the authors

Активный рост культуры под действием салициловой кислоты происходит в течение 5 сут культивирования и составляет 816,9 % (рис. 6), что соответствует плотности культуры 2,9 млн кл./мл. Индол-3-масляная кислота оказывала менее выраженный стимулирующий эффект на рост культуры *Ch. muelleri* в течение 5 сут культивирования. Пик роста культуры приходился на 7-е сут культивирования и составлял 691 %. Добавление смеси фитогормонов приводило к росту количества клеток в культуре *Ch. muelleri* в течение 7 сут выращивания. К окончанию эксперимента рост плотности культуры составил 222 %, что соответствует плотности 1,11 млн кл./мл.

Расчет продукционной эффективности культуры позволяет оценить динамику изменения элементарного состава под влиянием условий среды.

Таблица 2

Константы продуктивности накопительной культуры *Chaetoceros muelleri* при внесении 2,8 × 10^{-7} М салициловой кислоты (СК), 0,4 × 10^{-5} М индол-3-масляной кислоты (ИМК) и их смеси в течение 7 сут культивирования

Table 2

Productivity constants of the accumulative culture of Chaetoceros muelleri when 2,8 × 10^{-7} M salicylic acid (SA), 0,4 × 10^{-5} M indole-3-butyric acid (IB) and their mixture were added during 7 days of cultivation

		Белок	Углеводы	Липиды
Смесь	К	0,15	0,23	0,20
	О	0,16	0,25	0,48
СК	К	0,16	0,12	0,1
	О	0,17	0,11	0,12
3ИМК	К	0,16	0,16	0,12
	О	0,14	0,08	0,2

Проведенными экспериментами показана динамика снижения продукции белка и липидов контрольной группы к 7-м сут культивирования (табл. 2).

Расчет констант продуктивности культуры *Ch. muelleri* показал отсутствие влияния СК на продукционные характеристики. В то же время введение в культуру 3ИМК вызывало 2-кратное снижение продукции углеводов и повышение продукции липидов на 66 %. Введение смеси гормонов оказывало влияние только на продукцию липидов, что способствовало увеличению константы продуктивности в 2,4 раза (табл. 2).

Заключение

Таким образам, в ходе работ установлено, что смесь двух фитогормонов, салициловой и индол-3-масляной кислот, оказывала подавляющее действие на ростовые показатели культуры микроводоросли *Ch. muelleri*. Также показано разнонаправленное действие смеси исследованных фитогормонов на биохимический состав культуры. При этом необходимо отметить, что смесь использованных гормонов оказывала стимулирующее действие на содержание липидов в культуре *Ch. muelleri*, что может указывать на окончание этапа роста количества клеток в культуре.

В ходе проведенных работ совместное применение исследованных фитогормонов, в их оптимальных концентрациях, не показало положительного стимулирующего эффекта, что было выявлено ранее в экспериментах с их индивидуальным внесением в культуру микроводоросли. Близкие результаты были получены для сочетанного действия ауксина и цитокинина

на микроводоросль *Montrella alpina* [23] и индолуксусной кислоты и зеатина на *Acutodesmus obliquus* [24]. Отмечено, что сочетанное действие фитогормонов способствовало снижению выработки липидов от 54 до 77 %. В то же время оценка сочетанного влияния трех фитогормонов (жасмонат, гиббереллиновая кислота, кинетин) в течение 24 ч на *Aurantiochytrium sp.* SW1 повышало продукцию докозогексаеновой кислоты на 126 % [12].

Полученные результаты указывают на то, что можно манипулировать регуляторными механизмами биосинтеза липидов в микроводорослях, добавляя фитогормоны в питательную среду, и что стимуляция имеет временную зависимость.

Модуляция продуктивности микроводорослей, опосредованная фитогормонами через механизм биохимических каскадов, по-видимому, определяется концентрацией, классом фитогормонов и их синергетическим действием. Изучение механизмов регуляции продуктивности микроводорослей под влиянием экзогенных фитогормонов может быть использовано для разработки рациональных подходов к культивированию микроводорослей.

Список источников

1. Goksan T., Durmaz Y., Gokpinar S. Effects of light path lengths and initial culture density on the cultivation of *Chaetoceros mueller* (Lemmermann, 1898) // Aquaculture. 2003. Vol. 217. P. 431–436.

2. Richmond A., Hu Q. Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology, 2nd Edition. Wiley-Blackwell, 2013. 736 p.

3. Wang X., Liang J. J., Luo C., Chen C., Gao Y. Biomass, total lipid production, and fatty acid composition of the marine diatom *Chaetoceros muelleri* in response to different CO2 levels // Bioresource Technology. 2014. Vol. 161. P. 124–130.

4. Ладыгина Л. В., Пиркова А. В. Культивирование диатомовой водоросли *Chaetoceros Calcitrans F. Pumilus* (Paulsen) TAKANO, 1968 – корма для личинок гигантской устрицы Crassostrea gigas (Thunberg) // Морской биологический журн. 2019. Т. 4. С. 34–40.

5. Becerra-Dorame M., Lopez-Elias J. A., Martinez-Cordova L. R. An alternative outdoor production system for the microalgae Chaetoceros muelleri and *Dunaliella sp.* during winter and spring in Northwest Mexico // Aquacultural Engineering. 2010. Vol. 43. P. 24–28.

6. Lopez-Elias J. A., Voltolina D., Enriquez-Ocana F., Gallegos-Simental G. Indoor and outdoor mass production of the diatom Chaetoceros muelleri in a mexican commercial hatchery // Aquacultural Engineering. 2005. Vol. 33. P. 181–191.

7. Gonzalez-Garcinuno A., Sanchez-Alvarez J., Galan M., Martin del Valle E. Understanding and Optimizing the Addition of Phytohormones in the Culture of Microalgae for Lipid Production // Biotechnology Progress. 2016. Vol. 32. P. 1203–1211.

8. Wang C., Guo J., Zhou C., Yan X., Ruan R., Cheng P. The Active Phytohormone in Microalgae: The Characteristics, Efficient Detection, and Their Adversity Resistance Applications // Molecules. 2021. Vol. 27. P. 46.

9. Ковалев Н. Н, Лескова С. Е., Михеев Е. В. Хетоцерос: модуляция роста и состава под действием салициловой кислоты // Аграрная Россия. 2022. № 10. С 13–18.

10. Ковалев Н., Лескова С., Михеев Е., Барсова Е. Оценка влияния ауксинов на рост и биохимические показатели *Chaetoceros muelleri* // Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture. 2024. Vol. 16, № 3. P. 205–226.

11. Shah S., Li X., Jiang Z., Fahad S., Hassan S. Exploration of the phytohormone regulation of energy, storage, compound accumulation in microalgae // Food and Energy Security. 2022. Vol. 11. P. 418–434.

12. Nazir Y., Halim H., Prabhakaran P., Ren X., Naz T., Mohamed H., Nosheen S., Mustafa K., Yang W., Hamid A. A., Song Y. Different Classes of Phytohormones Act Synergistically to Enhance the Growth, Lipid and DHA Biosynthetic Capacity of Aurantiochytrium sp. SW1 // Biomolecules. 2020. Vol. 10. P. 755–773.

13. Guillard, R. R. L. Culture of Phytoplankton for Feeding Marine Invertebrates. In: Smith, M. L. and Chanley, M. H., Eds., Culture of Marine Invertebrates Animals, Plenum Press, New York, 1975. P. 29–60.

14. Laurens L. M. L., Dempster T. A., Jones H. D. T., Wolfrum E. J., Wychen S. V., McAllister J. S. P., Rencenberger M., Parchert K. J., Gloe L. M. Algal Biomass Constituent Analysis: Method Uncertainties and Investigation of the Underlying Measuring Chemistries // Journal of Analytical Chemistry. 2012. Vol. 84, № 4. P. 1879–1887.

15. Herbert D., Phipps P. J., Strange R. E. Chemical analysis of microbial cells // Methods in Microbiology. 1971. № 5. P. 209–344.

16. Lowry O., Rosenbrougt N., Parr A., Randall R. Protein measurement with the Folin phenol reagent // Journal of Biological Chemistry. 1951. Vol. 193, № 1. P. 265–276.

17. Johnson K. R., Ellis G., Toothill C. The sulfophosphovanilin reaction for serum lipids: a reappraisal // Clinical Chemistry. 1977. Vol. 23. P. 1669–1673.

18. Carneiro M., Pojo V., Malcata F. X., Otero A. Lipid accumulation in selected *Tetraselmis strains* // Journal of Applied Phycology. 2019. Vol. 31, № 5. P. 2845–2853.

19. Aminot A., Ray F. Standard procedure for the determination of chlorophyll a by spectroscopic methods. ICES techniques in marine environmental sciences // International Council for the Exploration of the Sea, 2001. 16 p.

20. Wood A. M., Everroad R. C., Wingard L. M. Measuring Growth Rates in Microalgal Cultures. In: Andersen R.A. Algal Culturing Technique: Elsevier Academic Press, New York, 2005. P. 269–285.

21. Madani N. S. H., Shekarabi S. P. H., Mehrgan M. S., Pourang N. Can 2, 4-dichlorophenoxyacetic acid alter growth performance, biochemical composition, and fatty acid profile of the marine microalga *Isochrysis galbana*? // Phycologia. 2020. Vol. 59. P. 598–605.

22. Sun X. M., Ren L. J., Zhao Q. Y., Ji X. J., Huang H. Microalgae for the production of lipid and carotenoids: a review with focus on stress regulation and adaptation // Biotechnology for Biofuels. 2018. Vol. 11. P. 272.

23. Zhang H., Wang Z., Feng Y., Cui Q., Song X. Phytohormones as stimulators to improve arachidonic acid biosynthesis in Mortierella alpine // Enzyme Microb. Technol. 2019.Vol. 131. 109381.

24. Renuka N., Guldhe A., Singh P., Bux F. Combined effect of exogenous phytohormones on biomass and lipid production in Acutodesmus obliquus under nitrogen limitation // Energy Convers. Manag. 2018. Vol. 168. P. 522–528.

Сведения об авторах

Е. В. Михеев – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ инновационных биотехнологий, SPIN-код: 1244-4962.

С. Е. Лескова – кандидат биологических наук, доцент кафедры биоразнообразия и морских биоресурсов, SPIN-код: 5124-2384.

Н. Н. Ковалев – доктор биологических наук, главный научный сотрудник НИИ инновационных биотехнологий, профессор, Author ID: 96894.

Information about the authors

E. V. Mikheev – PhD in Technical Sciences, Head Researcher of Research Institute of Innovative Biotechnologies, SPIN-code in RSCI: 1244-4962.

S. E. Leskova – PhD in Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biodiversity and Marine Bioresources, SPIN-code in RSCI: 5124-2384

N. N. Kovalev – Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher of Research Institute of Innovative Biotechnologies, Professor, Author ID: 96894.

Статья поступила в редакцию 12.03.2026; одобрена после рецензирования 04.04.2026; принята к публикации 11.05.2026.

The article was submitted 12.03.2026; approved after reviewing 04.04.2026; accepted for publication 11.05.2026.

© Михеев Е. В., Лескова С. Е., Ковалев Н. Н., 2026.

«Синергетический эффект фитогормонов разных классов на рост и биохимический состав *Chaetoceros muelleri* (Lemmermann, 1898)» [Михеев Е. В., Лескова С. Е., Ковалев Н. Н.] распространяется под лицензией Creative Commons Attribution (CC BY 4.0).