

Научная статья

УДК 639.2+582.23/.27

DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2025-74-15

EDN: TBQLEF

## Синергетический эффект фитогормонов разных классов на рост и биохимический состав *Isochrysis galbana* (Parke, 1949)

Евгений Валерьевич Михеев<sup>1</sup>, Светлана Евгеньевна Лескова<sup>2</sup>,  
Николай Николаевич Ковалев<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup> Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия

<sup>1</sup> zhenyasuper79@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3433-5653

<sup>2</sup> svetaleskova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7058-3449

<sup>3</sup> kovalevnn61@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7100-7208

**Аннотация.** Произведена оценка влияния совместного применения двух различных по структуре фитогормонов (ауксинового и гиббереллинового ряда) на рост и биохимический состав культуры микроводоросли *Isochrysis galbana*. В качестве гормонов использовались гиббереллиновая кислота и индол-3-уксусная кислота. Показано влияние смеси фитогормонов на количество клеток и константы роста культуры *Isochrysis galbana*. Проведено сравнение содержания основных биохимических компонентов (белка, углеводов, липидов и хлорофилла) в клетках культуры микроводоросли, обработанной смесью гормонов, и контрольной группы. Установлено, что в культуре с добавлением смеси гормонов наблюдался процесс роста на протяжении всего эксперимента. Показано, что константы роста популяции за весь период эксперимента у опытной и контрольной групп не отличались. Установлено разнонаправленное действие смеси фитогормонов на содержание белка, углеводов, липидов и хлорофилла в клетках культуры микроводоросли *Isochrysis galbana*. Отмечен рост концентрации белка через три дня эксперимента. Дальнейшее культивирование не оказывало значимого влияния на содержание белка в контрольной и экспериментальной группах. В процессе исследования отмечено снижение концентрации углеводов в контрольной и экспериментальной группах. При этом содержание углеводов в опытной группе было выше, по сравнению с контролем на протяжении всего времени эксперимента. Показан рост содержания липидов в опытной и контрольных группах через три дня эксперимента. В дальнейшем наблюдалось снижение содержания липидов в обеих экспериментальных группах. Установлено накопление хлорофилла в клетках *Isochrysis galbana* в первые семь дней исследования в обеих группах.

**Ключевые слова:** *Isochrysis galbana*, биохимический состав, фитогормоны, гиббереллиновая кислота, индол-3-уксусная кислота

**Для цитирования:** Михеев Е. В., Лескова С. Е., Ковалев Н. Н. Синергетический эффект фитогормонов разных классов на рост и биохимический состав *Isochrysis galbana* (Parke, 1949) // Научные труды Дальрыбвтуза. 2025. Т. 74, № 4. С. 144–155.

## FISHERIES, AQUACULTURE AND INDUSTRIAL FISHERIES

## Original article

**Synergistic effect of phytohormones of different classes on growth and biochemical composition of *Isochrysis galbana* (Parke, 1949)****Evgeny V. Mikheev<sup>1</sup>, Svetlana E. Leskova<sup>2</sup>, Nikolai N. Kovalev<sup>3</sup>**<sup>1,3</sup> Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia<sup>2</sup> Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia<sup>1</sup> zhenyasuper79@mail.ru, ORCID: 0000-0003-3433-5653<sup>2</sup> svetaleskova@mail.ru, ORCID: 0000-0001-7058-3449<sup>3</sup> kovalevnn61@yandex.ru, ORCID: 0000-0001-7100-7208

**Abstract.** The article assesses the effect of combined use of two phytohormones with different structures (auxin and gibberellin series) on the growth and biochemical composition of microalgae *Isochrysis galbana* culture. Gibberellic acid and indole-3-acetic acid were used as hormones. The phytohormone mixture effect on the cell count and growth constants of the *Isochrysis galbana* culture is shown. The content of the main biochemical components (protein, carbohydrates, lipids and chlorophyll) in microalgae cells culture treated with the hormone mixture and the control group is compared. It was found that culture growth process under the influence of phytohormones mixture observed throughout the experiment. It was shown that the population growth constants did not differ in the experimental and control groups over the entire period of the experiment. Multidirectional effects of the phytohormone mixture on the content of protein, carbohydrates, lipids and chlorophyll in the cells of the *Isochrysis galbana* microalgae culture were established. An increase in protein concentration was noted after 3 days of experiment. Further cultivation did not have a significant effect on the protein content in the control and experimental groups. Decrease in carbohydrate concentration was noted in the control and experimental groups during the study. At the same time, the carbohydrate content in the experimental group was higher than in the control throughout the entire experiment. An increase lipid content was shown in the experimental and control groups after three days of the experiment. Subsequently, a decrease in lipid content was observed in both experimental groups. Accumulation of chlorophyll in *Isochrysis galbana* cells was established in the first seven days of the study in both groups.

**Keywords:** *Isochrysis galbana*, biochemical composition, phytohormones, gibberellic acid, indole-3-acetic 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 *Isochrysis galbana* (Parke, 1949). *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University*. 2025; 74(4): 144–155. (In Russ.).

**Введение**

Одним из вариантов повышения как количественного, так и качественного роста высших растений и биомассы культур микроводорослей является применение веществ, относящихся к фитогормонам – цитокины, гиббереллины, ауксины и др. [1, 2]. Их использование в процессе выращивания культур различных микроводорослей является объектом внимания широкого круга ученых [3, 4, 5, 6]. В процессе выращивания микроводорослей введение различных доз

фитогормонов предотвращает рост активного кислорода за счет запуска ферментов, отвечающих за антиоксидантную активность, и собственно антиоксидантов, что приводит к предотвращению повреждений клеток, вызванных неблагоприятными факторами окружающей среды [7].

Знания о механизмах действия фитогормонов остаются фрагментарными, а биологические эффекты влияния зависят от концентрации, локализации в тканях растений, а также перекрестного влияния различных групп гормонов [8].

Большинство опубликованных исследований сосредоточены на оценке индивидуального эффекта экзогенных фитогормонов, в то время как синергический эффект фитогормонов разных классов и их влияние на ключевые метаболические ферменты носит спорадический характер [9, 10]. Ранее проведена оценка влияния последовательного применения салициловой и индол-уксусной кислоты при культивировании *Tetraselmis suecica*. Последовательная обработка фитогормонами стимулировала деление клеток культуры и удельную скорость роста. Однако суммарный эффект влияния фитогормонов был выражен в ингибировании накопления углеводов и липидов [11]. Результатируется, что последовательное применение фитогормонов снижает интенсивность метаболизма без изменения тренда биохимического состава.

Оценка синергического влияния фитогормонов проведена на ограниченном количестве видов микроводорослей: *Chlorella sp.* [12]; *Chlorella sorokiniana* [13] (*Scenedesmus obliquus*, *Ourococcus multispurus* [9]; *Desmodesmus sp.* [14]. Синергическое влияние фитогормонов увеличивало темп роста и урожайность микроводорослей [15, 16], продукцию липидов и белка [17]. В исследовании культивирования микроводоросли *Aurantiochytrium sp.* показано положительное зависимое от времени синергическое влияние шести различных по структуре фитогормонов на синтез липидов и докозогексаеновой кислоты [10]. Кратковременное (24 ч) культивирование сопровождалось снижением концентрации активных форм кислорода, малонового альдегида, антиоксидантов (супероксиддисмутаза, каталаза) и ключевых ферментов липогенеза.

Несмотря на то, что ряд вопросов по комбинированному действию фитогормонов на микроводоросли остаются открытыми, исследование их совместного использования имеет важное значение. Процесс дальнейшего рассмотрения закономерностей и механизмов сочетанного действия фитогормонов на микроводоросли в процессе их культивирования может иметь как количественный, так и качественный эффект, связанный с ростом биомассы и улучшением биохимического состава.

В то же время очевидно, что пути воздействия и сочетанного действия фитогормонов как между собой, так и с другими веществами и системами микроводорослей нуждаются в более глубоком рассмотрении. Также стоит отметить, что остаются мало изученными процессы модерации в микроводорослевых клетках, что обуславливает углубление исследований в отношении фитогормонов эндогенного происхождения [18].

Целью исследования являлась оценка влияния сочетанного воздействия фитогормонов ауксинового и гиббереллинового ряда на культуру микроводоросли *Isochrysis galbana*.

### Объекты и методы исследований

В работе использовали культуру микроводоросли *Isochrysis galbana* 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 ( $\text{NaNO}_3$ ;  $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), микроэлементов ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ; ЭДТА- $\text{Na}_2$ ;  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) и витаминов ( $\text{B}_1$ ;  $\text{B}_7$ ;  $\text{B}_{12}$ ) [19]. Культура водорослей содержалась при постоянных условиях: температуре 21–23 °С, освещенности 8–10 клк, фотопериоде 8 : 16 ч (свет : темнота) и периодическом перемешивании (4–5 раз в сутки).

В качестве стимулятора роста использовали гиббереллиновую (ГК) и индолил-3-уксусную (ЗИУК) кислоты (Hebei Guanlang Biotechnology Co., Ltd, China). Эффективные концентрации стимуляторов были определены в ранее проведенных исследованиях [20, 21] и составляли для культуры *Isochrysis galbana*  $0,39 \times 10^{-8}$  М в случае гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М – в случае индолил-3-уксусной кислоты/

В качестве культиваторов использовались стеклянные термостойкие конические колбы объемом 1 л. В эксперименте использовали стерильные колбы, в которые в начале эксперимента наливали 400 мл чистой 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. Прирост биомассы водорослей определяли по увеличению числа клеток, просчитанных в каждом опыте в трех камерах Горяева под световым микроскопом. Продолжительность эксперимента составляла 14 дней.

Общее содержание углеводов оценивали методом кислотного гидролиза проб взвези 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 [22].

Пробоподготовку для определения белка проводили согласно [23]. Определение содержания белка проводили методом Лоури [24].

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 [25].

Сумму хлорофиллов выделяли методом экстракции ацетоном из предварительно замороженной биомассы водорослей [26]. Количественное содержание хлорофиллов определяли спектрофотометрически при длинах волн 630, 647, 664 и 750 нм. В качестве контроля использовали 90 % ацетон [27].

Расчет скорости роста популяции (R), количества делений в сутки (K) и времени удвоения популяции ( $T_2$ ) производили, как указано в [28].

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

Процесс рассмотрения закономерностей и механизмов сочетанного действия фитогормонов на микроводоросли в процессе их культивирования может иметь как количественный, так и качественный эффект, связанный с ростом биомассы и изменением биохимического состава.

Проведены экспериментальные исследования по оценке совместного влияния фитогормонов различной природы, гиббереллинового и ауксинового ряда, на ростовые показатели культуры *Isochrysis galbana*. Эксперимент включал внесение в культивационную среду одновременно двух фитогормонов, гиббереллиновой и индолил-3-уксусной кислот в эффективных концентрациях. Продолжительность эксперимента составляла 14 сут. Эффективные концентрации вносимых в культуральную среду фитогормонов выбраны на основании ранее проведенных исследований [20, 21]. Кривые роста *Isochrysis galbana*, выращенной на среде с добавлением двух гормонов (O) и среде без добавления фитогормонов, контроль (K), представлены на рис. 1.

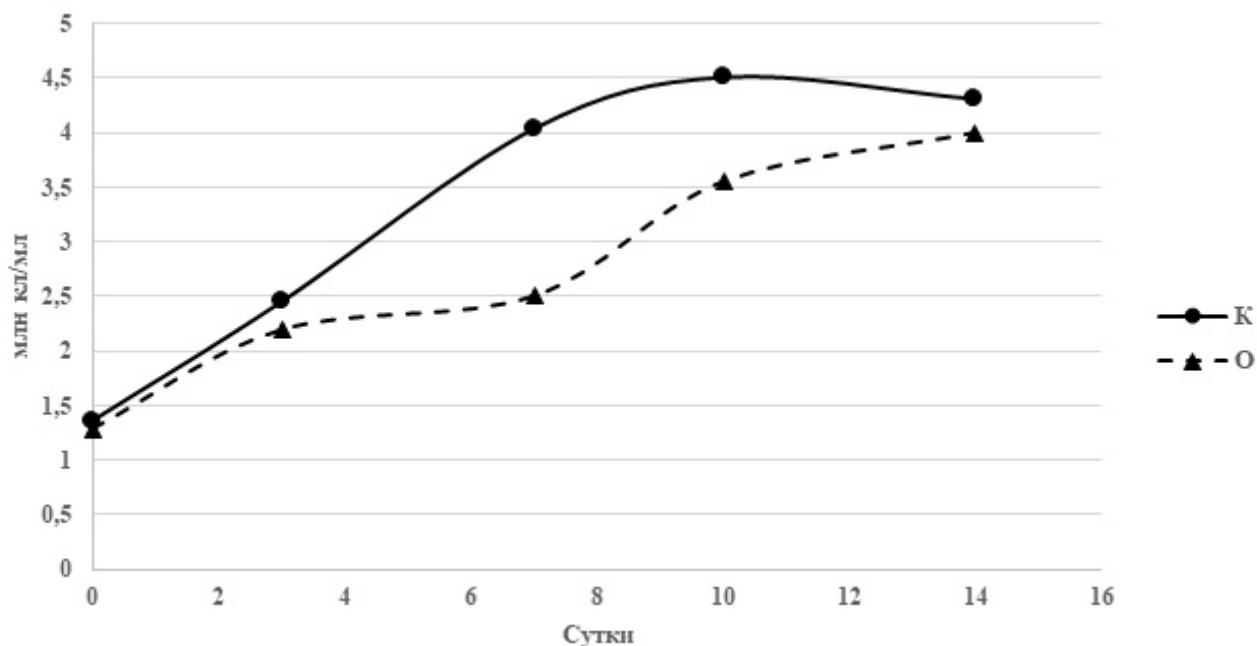


Рис. 1. Влияние на динамику плотности микроводоросли *Isochrysis galbana* в накопительной культуре внесения  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 1. Effect of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O) on the density dynamics of *Isochrysis galbana* microalgae in a cumulative culture, compared with the control (K). Compiled by the authors

Из представленных данных видно, что линейный рост контрольной культуры сохраняется в первые 7 сут культивирования и составляет 315 % по сравнению с исходными значениями. Максимальная плотность культуры отмечена на 10-е сутки культивирования и составляет 4,5 млн кл./мл культуральной среды. Дальнейшее культивирование *I. galbana* сопровождается снижением плотности культуры до 4,3 млн клеток, что, по-видимому, свидетельствует о смене генераций.

В опытной группе с применением смеси двух гормонов рост культуры *I. galbana* отмечался в течение всего времени эксперимента. Однако плотность культуры в период активного роста (лаг-фаза) была ниже, чем в контрольной группе. Так, на 10-е сутки культивирования плотность клеток в опытной культуре составляла 3,55 млн клеток на мл, что в 1,27 раза меньше, чем в контрольной группе. Однако ко времени окончания эксперимента (14 сут) плотность клеток в опытной и контрольной группах достоверно не различалась.

Проведённый расчет констант роста культуры *Isochrysis galbana* (таблица) подтверждает сделанное заключение. Удельная скорость роста, количество делений в день и время удвоения популяции микроводоросли в культуре (0–14 сут) были равны в опытной и контрольной культурах.

**Влияние на константы роста в накопительной культуре *Isochrysis galbana* внесения  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К)**

**Effect of the addition of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O) on the growth constants in the cumulative culture of *Isochrysis galbana*, compared with the control (K)**

	Период, сут	Удельная скорость роста R, сутки <sup>-1</sup>	Количество делений в день K	Время удвоения популяции T2
К	0–3	0,196	0,283	3,54
	0–7	0,155	0,224	4,47
	7–14	0,009	0,013	<b>7,7</b>
	0–14	0,082	0,118	8,45
О	0–3	0,179	0,258	3,87
	0–7	0,096	0,138	7,21
	7–14	0,067	0,097	10,3
	0–14	0,081	0,117	8,56

Однако в первые 7 сут культивирования отмечено снижение величин констант роста и количества делений в день в опытной и контрольной культурах. Наибольшее снижение величин констант роста отмечено в опытной культуре, что сопровождается практически 2-кратным увеличением времени удвоения популяции клеток.

Второй период культивирования (7–14 сут) выявил дальнейшее значительное снижение удельной скорости роста контрольной культуры и количества делений в сутки (в 17,2 раза).

Снижение удельной скорости роста в опытной культуре в этот период было менее значительным (в 1,4 раза), чем в контрольной группе. Разница значений времени удвоения популяции между контрольной и опытной группами в этот период составляла 2,6 сут.

Таким образом, проведенным исследованием установлена специфичность действия комбинации гормонов на рост *Isochrysis galbana* в накопительной культуре.

Ранее проведенными исследованиями установлено стимулирующее влияние на накопление биохимических компонентов, отдельных фитогормонов в процессе накопительного культивирования *Isochrysis galbana*.

В настоящем исследовании проведено определение влияния комбинации гормонов фитогормонов ауксинового и гиббереллинового ряда на биохимические показатели культуры *I. galbana*.

Данные по динамике накопления белка в контрольной и опытной группах представлены на рис. 2.

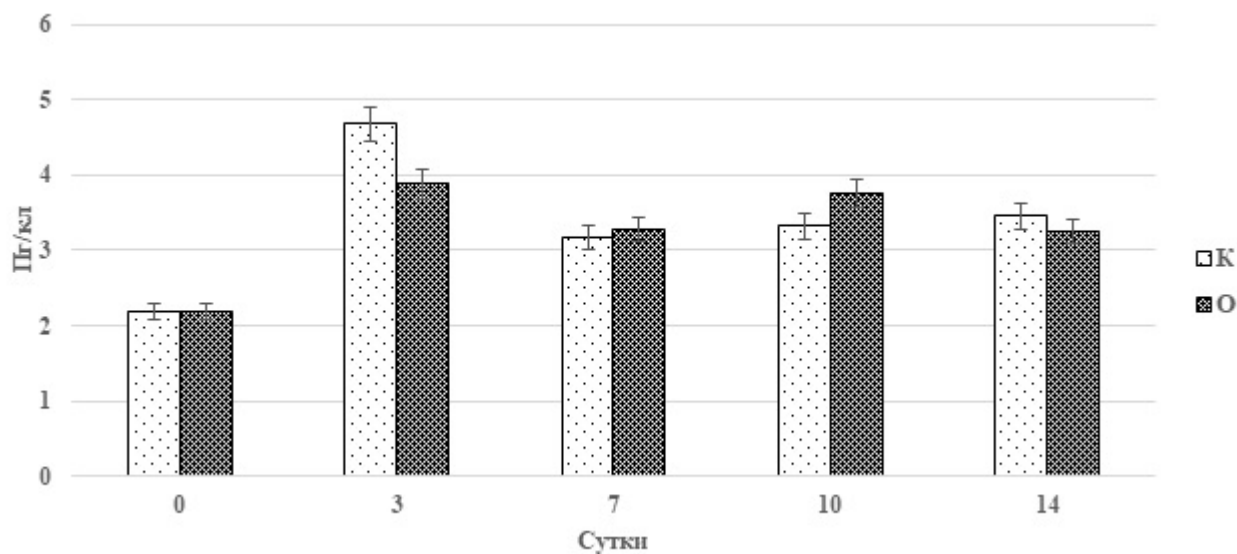


Рис. 2. Динамика накопления белка в культуре *Isochrysis galbana* при внесении  $0,39 \times 10^{-8}$  М гибберелиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К).

Составлено авторами

Fig. 2. Dynamics of protein accumulation in *Isochrysis galbana* culture with the addition of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O), compared with the control (K).

Compiled by the authors

Общая тенденция динамики концентрации белка в опытной и контрольной группах характеризуется в его увеличение на третьи сутки культивирования и незначительным снижением к 7-м суткам культивирования в 1,2–1,4 раза соответственно. Дальнейшее культивирование культуры *I. galbana* не оказывало влияния на концентрацию белка. Следует отметить, что не выявлено достоверных отличий в концентрации белка в контрольной и опытной группах на каждом этапе эксперимента (рис. 2).

В процессе проведенного эксперимента отмечено также резкое снижение концентрации углеводов в культуре *I. galbana* (рис. 3).

В первые трое суток культивирования концентрация углеводов снижалась в 1,8 и 1,2 раза в контрольной и опытной группах соответственно (рис. 3). Причиной менее выраженного снижения концентрации углеводов в опытной группе может являться результатом синергического действия гормонов. Следует отметить, что, несмотря на общую тенденцию снижения углеводов в процессе культивирования *I. galbana*, уровень концентрации углеводов в опытной группе был достоверно выше, чем в контрольной.

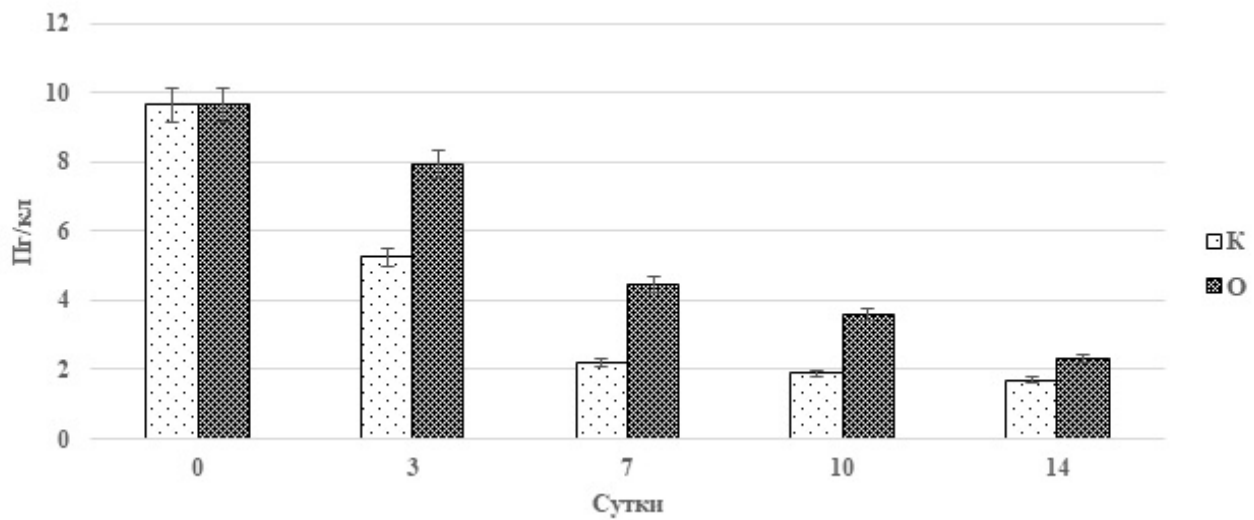


Рис. 3. Динамика накопления углеводов в культуре *Isochrysis galbana* при внесении  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 3. Dynamics of carbohydrate accumulation in *Isochrysis galbana* culture with the addition of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O), compared with the control (K). Compiled by the authors

По-видимому, полученные результаты свидетельствуют об отсутствии накопления углеводов в период активного роста культуры *I. galbana*.

Динамика накопления липидов культурой *I. galbana* аналогична таковой для углеводов. Однако следует отметить, что различия в концентрации липидов на третьи сутки культивирования между контрольной и опытной группой не было выявлено (рис. 4).

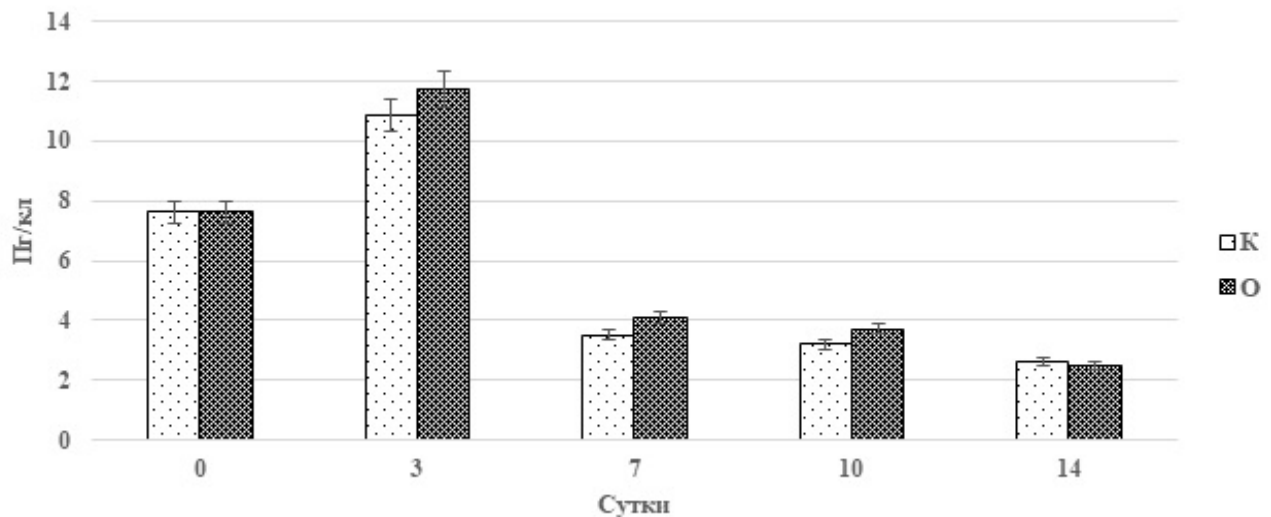


Рис. 4. Динамика накопления липидов в культуре *Isochrysis galbana* при внесении  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 4. Dynamics of lipid accumulation in *Isochrysis galbana* culture with the addition of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O), compared with the control (K). Compiled by the authors

Снижение концентрации липидов составило 1,5 и 1,4 раза для опытной и контрольной групп соответственно. Общее снижение концентрации липидов к окончанию эксперимента составило 2,9 раза (рис. 4). Накопление липидов в культурах микроводорослей отмечается, как правило, в период лаг-фазы. В период активного роста накопления не происходит вследствие перераспределения энергетических ресурсов на метаболические пути, связанные с размножением.

Показателем метаболической активности растительной клетки является количественное содержание пигментов фотосинтеза.

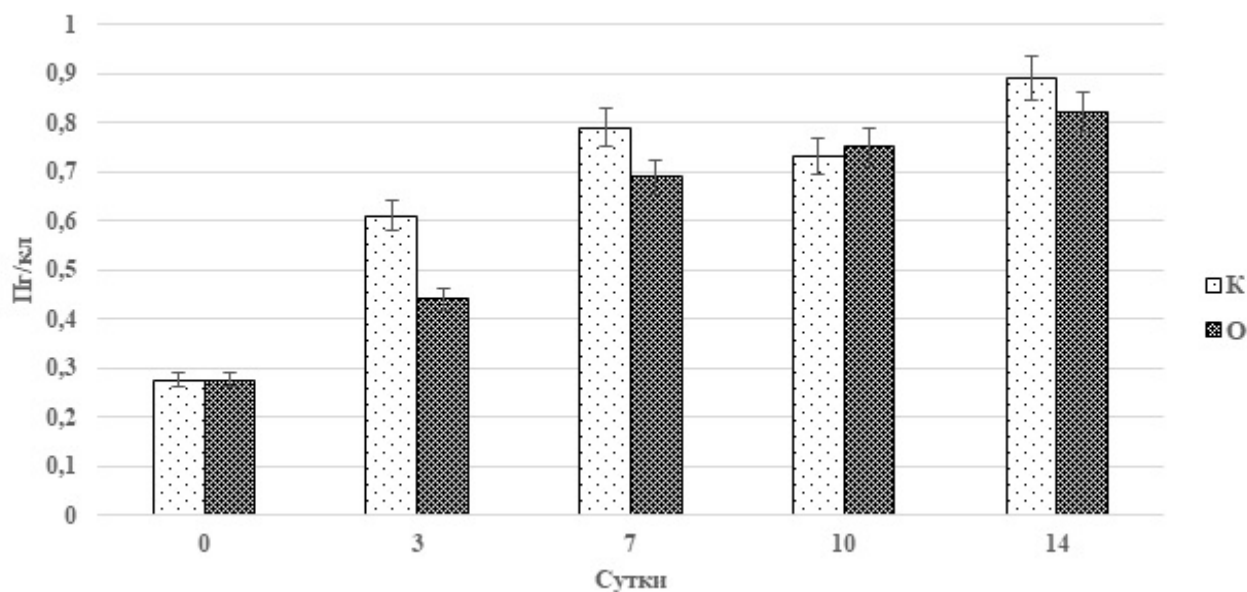


Рис. 5. Динамика накопления хлорофилла в культуре *Isochrysis galbana* при внесении  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (О), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 5. The dynamics of chlorophyll accumulation in the culture of *Isochrysis galbana* with the addition of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (O), compared with the control (K). Compiled by the authors

Проведённым экспериментом установлено накопление хлорофилла в первые 7 сут культивирования. Рост концентрации пигмента составил 2,5 и 2,9 раза в опытной и контрольной культурах соответственно (рис. 5). Дальнейшее культивирование не оказывало влияния на данный показатель. Следует отметить, что в каждой временной точке эксперимента, значения показателя в контрольной и опытной группах достоверно не различались. Выявленная динамика концентрации хлорофилла соответствует фазе активного роста микроводорослей.

### Заключение

Рост и развитие растений – сложный динамический процесс, требующий быстрых и адекватных реакций на сигналы окружающей среды.

Восприимчивость воздействия внешних факторов обеспечивают сложные сигнальные сети, способные быстро адаптироваться к изменяющимся внешним условиям. Известно, что фитогормоны играют центральную роль в регулировании роста при стрессе. Установлено, что взаимодействие между различными фитогормонами является естественным механизмом стрессоустойчивости растений.

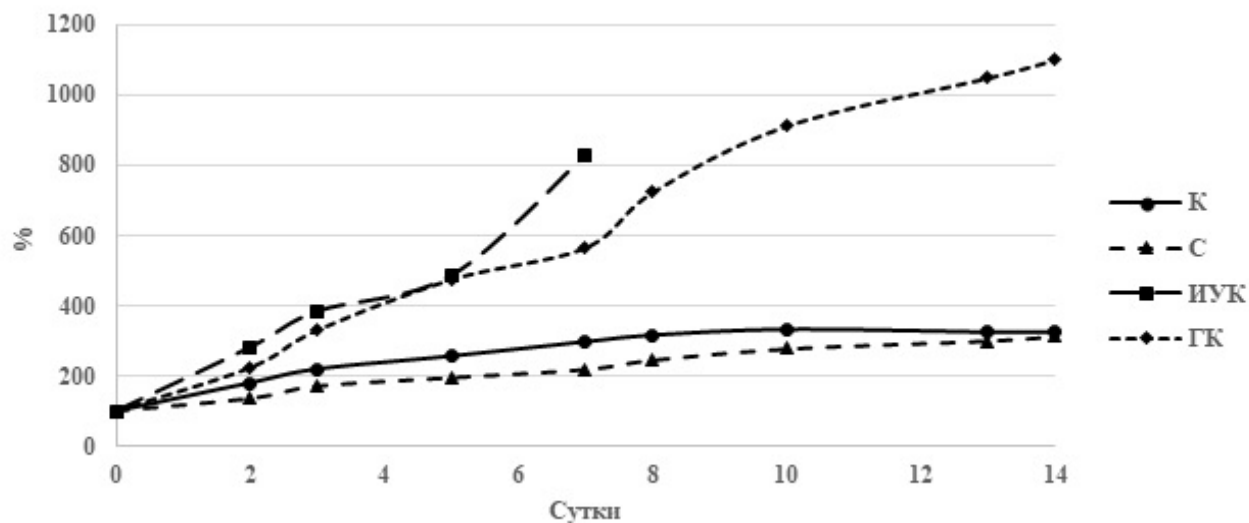


Рис. 6. Кривые роста микроводоросли *Isochrysis galbana* в накопительной культуре под влиянием  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой кислоты (ГК),  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (ИУК) и смеси  $0,39 \times 10^{-8}$  М гиббереллиновой и  $0,1 \times 10^{-5}$  М индол-3-уксусной кислоты (С), по сравнению с контролем (К). Составлено авторами

Fig. 6. Growth curves of *Isochrysis galbana* microalgae in a cumulative culture under the influence of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid (HA),  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (IAC) and a mixture of  $0,39 \times 10^{-8}$  M gibberellic acid and  $0,1 \times 10^{-5}$  M indole-3-acetic acid (C), compared with the control (K). Compiled by the authors

Проведенное исследование и ранее полученные данные [19, 20] по культивированию культуры *I. galbana* с различными фитогормонами показало их стимулирующий эффект на прирост биомассы (рис. 6). Так, плотность культуры *I. galbana* под влиянием гибберелиновой кислоты на 14-е сут культивирования увеличивалась на 1100 %, а под влиянием индол-уксусной кислоты на 7-е сут – на 800 %, по сравнению с исходными значениями.

Проведенное исследование показало ингибирующий эффект на рост микроводоросли смеси эффективных концентраций двух гормонов. Выявлено тормозящее действие фитогормонов на накопление основных структурных и питательных компонентов микроводорослей. В то же время концентрация хлорофилла увеличивалась весь период культивирования, что свидетельствует об активном делении клеточной популяции.

Исследование механизмов биохимической адаптации растений показывают изменения в их развитии в ответ на абиотический стресс, который можно объяснить взаимодействием фитогормонов в процессе внутриклеточной сигнализации.

Выявленные связи объясняют многочисленные биологические ответы под влиянием фитогормонов различной природы. Очевидно, что эта парадигма будет играть центральную роль в интерпретации регулирования развития растений. Выяснение молекулярных механизмов, регулирующих биосинтез, трансдукцию сигналов и биологические эффекты гормонов, позволяет определить пути модификации биосинтеза гормонов при создании трансгенных культур с повышенной устойчивостью к абиотическому стрессу. Изучение взаимодействия гормонов в регуляции роста и состава является основой повышения урожайности.

В научной литературе мало сведений о влиянии эндогенных растительных гормонов на микроводоросли. В то же время исследование влияния отдельных фитогормонов и их смесей представляется перспективной задачей для обоснования биотехнологии микроводорослей как продуцентов и разработки способов защиты водоемов при цветении токсичных микроводорослей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Singh P., Kumari S., Guldhe A., Misra R., Rawat I., Bux F. Trends and novel strategies for enhancing lipid accumulation and quality in microalgae // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 55. P. 1–16.
2. Parsaeimehr A., Mancera-Andrade E. I., Robledo-Padilla F., Iqbal H. M., Parra-Saldivar R. A chemical approach to manipulate the algal growth, lipid content and high-value alpha-linolenic acid for biodiesel production // *Algal Research*. 2017. Vol. 26. P. 312–322.
3. Lin B., Ahmed F., Du H., Li Z., Yan Y., Huang Y., Cui M., Yin Y., Li B., Wang M. Plant growth regulators promote lipid and carotenoid accumulation in *Chlorella vulgaris* // *Journal of Applied Phycology*. 2018. Vol. 30. P. 1549–1561.
4. Renuka N., Guldhe A., Singh P., Ansari F., Rawat I., Bux F. Evaluating the potential of cytokinins for biomass and lipid enhancement in microalga *Acutodesmus obliquus* under nitrogen stress // *Energy Conversion and Management*. 2017. Vol. 140. P. 14–23.
5. Arora S., Mishra G. Biochemical modulation of *Monodopsis subterranea* (Eustigmatophyceae) by auxin and cytokinin enhances eicosapentaenoic acid productivity // *Journal of Applied Phycology*. 2019. Vol. 31. P. 3441–3452.
6. Han SF., Jin W., Abomohra A., Zhou X., Tu R., Chen C., Chen H., Gao S., Wang Q. Enhancement of lipid production of *Scenedesmus obliquus* cultivated in municipal wastewater by plant growth regulator treatment // *Waste and Biomass Valorization*. 2019. Vol. 10. P. 2479–2485.
7. Yu X. H., Chen L., Zhang W. W., Angelis M. D. Chemicals to enhance microalgal growth and accumulation of high-value bioproducts // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. P. 56.
8. Davies P. J. Regulatory factors in hormone action: Level, location and signal transduction. In *Plant Hormones*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2010; pp. 16–35.
9. Babu A. G., Wu X. G., Kabra A. K., Kim D. Cultivation of an indigenous with phytohormones for biomass and lipid production under N-limitation // *Algal Research*. 2017. Vol. 23. P. 178–185.
10. 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.
11. Ковалев Н. Н., Лескова С. Е., Михеев Е. В., Барсова Е. А. Оценка влияния ауксинов на рост и биохимические показатели *Chaetoceros muelleri* // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, № 3. С. 205–226.
12. Bajguz A., Piotrowska-Niczyporuk A. Synergistic effect of auxins and brassinosteroids on the growth and regulation of metabolite content in the green alga *Chlorella vulgaris* (Trebouxiophyceae) // *Plant Physiology and Biochemistry*. 2013. Vol. 71. P. 290–297.
13. Hunt R.W., Chinnasamy S., Bhatnagar A., Das K.C. Effect of biochemical stimulants on biomass productivity and metabolite content of the microalga, *Chlorella sorokiniana* // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2010. Vol. 162. P. 2400–2414.
14. Singh J., Jain D., Agarwal P., Singh R. P. Auxin and cytokinin synergism augmenting biomass and lipid production in microalgae *Desmodesmus sp.* JS07 // *Process Biochemistry*. 2020. Vol. 95. P. 223–234.
15. Yu X. H., Chen L., Zhang W. W., Angelis M. D. Chemicals to enhance microalgal growth and accumulation of high-value bioproducts // *Frontiers in Microbiology*. 2015. Vol. 6. P. 56.
16. Thole J. M., Beisner E. R., Liu J., Venkova S. V., Strader L. C. Abscisic acid regulates root elongation through the activities of auxin and ethylene in *Arabidopsis thaliana* // *G3 (Bethesda)*. 2014. Vol. 4. P. 1259–1274.
17. Liu J., Sommerfeld M., Hu Q. Screening and characterization of *Isochrysis* strains and optimization of culture conditions for docosahexaenoic acid production // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 97. P. 4785–4798.

18. 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.
19. 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.
20. Ковалев Н. Н., Лескова С. Е., Михеев Е. В. Рост *Isochrysis galbana* в миксотрофных условиях с использованием гиббереллиновой кислоты // Journal of Agriculture and Environment. 2022. № 2(22). <https://doi.org/10.23649/jae.2022.2.22.03>.
21. Лескова С. Е., Барсова Е. А., Михеев Е. В., Ковалев Н. Н. Индол уксусная кислота – модулятор роста некоторых зеленых и диатомовых водорослей // Комплексные исследования Мирового океана : материалы VIII Всероссийской научной конференции молодых ученых. Владивосток : НИЦМБ им. А.В. Жирмунского ДВО РАН, 2024. С. 312–313.
22. 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.
23. Herbert D., Phipps P. J., Strange R. E. Chemical analysis of microbial cells // Methods in Microbiology. 1971. № 5. P. 209–344.
24. 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.
25. Johnson K. R., Ellis G., Toothill C. The sulfophosphovanilin reaction for serum lipids: a reappraisal // Clinical Chemistry. 1977. Vol. 23. P. 1669–1673.
26. 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.
27. 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.
28. 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.

### 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 ИМО ДВФУ, SPIN-код: 5124-2384.

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

### Information about the authors

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

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

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

Статья поступила в редакцию 04.09.2025; одобрена после рецензирования 01.10.2025; принята к публикации 10.11.2025.

The article was submitted 04.09.2025; approved after reviewing 01.10.2025; accepted for publication 10.11.2025.