

Научная статья
УДК 574.58
DOI: 10.31857/S0869769825010034
EDN: HIBQPW

О возможности управления динамикой развития хлореллы (*Chlorella vulgaris*) в пресноводных акваториях под воздействием инфракрасных лазеров

Э. Н. Халилов✉, Дж. Мин, З. Ма, О. Я. Глибка, М. Ванг,
Ф. Э. Халилов, Ю. Зоу, А. Л. Ронжин

Эльчин Нусратович Халилов

доктор геолого-минералогических наук, профессор
Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика
prof.khalilov@qq.com
<https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

Джао Мин

доктор наук, профессор
Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика
zhaomin-zmcn@tom.com
<https://orcid.org/0000-0001-7950-5279>

Зенглинг Ма

доктор наук, профессор
Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика
mazengling@wzu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0002-4165-0339>

Оксана Ярославовна Глибка

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник
Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия
glibko.o@spcras.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4589-3671>

Мин Ванг

доктор наук, исследователь
Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика
minw@wzu.edu.cn
<https://orcid.org/0009-0005-7144-8923>

Фарид Эльчинович Халилов

ассистент профессора, преподаватель
Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика
farid.khalilov.87@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7281-3607>

Юченг Зоу

магистр, исследователь

Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика

1941619785@qq.com

<https://orcid.org/0009-0002-9365-8997>

Андрей Леонидович Ронжин

доктор технических наук, главный научный сотрудник, профессор

Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН, Санкт-Петербург, Россия

ronzhin@iias.spb.su

<https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

Аннотация. Интенсивная сельскохозяйственная деятельность ведет к загрязнению и цианобактериальному цветению пресноводных акваторий, что угрожает не только здоровью людей, но и флоре и фауне водной среды. В работе рассмотрены результаты исследований воздействия на развитие *Chlorella vulgaris* электромагнитных излучений различных длин волн. С этой целью было проведено облучение выращенной суспензии *Chlorella vulgaris* в питательном растворе с помощью ЭМИ различных диапазонов длин волн: в ультрафиолетовом (UV) с длиной волны 220 и 253 нм, в зеленом (Gr) с длиной волны 520 нм, в красном (R) с диапазоном излучения 625 нм и в инфракрасном (IR) в диапазоне 1200–1400 нм. В результате проведенных экспериментов было установлено, что воздействие UV излучения в обоих диапазонах длин волн 220 и 253 нм, а также действие Gr при длине волны 520 нм не привело к изменению показателя концентрации клеток хлореллы в тестируемых образцах по сравнению с контрольными образцами в течение 6 сут измерений после облучения. В то же время в образцах, облученных R и IR соответственно при длинах волн 625 и 1200–1400 нм, наблюдался рост концентрации клеток хлореллы в суспензии примерно вдвое по сравнению с контрольным образцом. Авторы считают наиболее перспективным применение именно инфракрасного диапазона электромагнитного спектра при воздействии на хлореллу с целью активизации ее роста. Между тем при подборе длины волны в ИК диапазоне рекомендуется учитывать оптические окна прозрачности атмосферы над водоемами.

Ключевые слова: *Chlorella vulgaris*, электромагнитные излучения, ультрафиолетовые излучения, инфракрасные излучения, БПЛА, ИК лазеры, оптические окна прозрачности атмосферы

Для цитирования: Халилов Э.Н., Мин Дж., Ма З., Глибко О.Я., Ванг М., Халилов Ф.Э., Зоу Ю., Ронжин А.Л. О возможности управления динамикой развития хлореллы (*Chlorella vulgaris*) в пресноводных акваториях под воздействием инфракрасных лазеров // Вестн. ДВО РАН. 2025. № 1. С. 31–39. <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825010034>

Original article

On the possibility of controlling the dynamics of the development of chlorella (*Chlorella vulgaris*) in freshwater areas under the influence of infrared lasers

E. N. Khalilov, Zh. Ming, Z. Ma, O. Ya. Glibko, M. Wang, F. E. Khalilov, Yu. Zhou, A. L. Ronzhin

Elchin N. Khalilov

Doctor of Sciences in Geology and Mineralogy, Professor

Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China

prof.khalilov@qq.com

<https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

Zhao Ming

Doctor of Sciences, Professor
Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China
zhaomin-zmcn@tom.com
<https://orcid.org/0000-0001-7950-5279>

Zengling Ma

Doctor of Sciences, Professor
Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China
mazengling@wzu.edu.cn
<https://orcid.org/0000-0002-4165-0339>

Oksana Ya. Glibko

Candidate of Sciences in Biology, Senior Researcher
St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
glibko.o@spcras.ru
<https://orcid.org/0009-0004-4589-3671>

Ming Wang

Doctor of Sciences, Researcher
Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China
minw@wzu.edu.cn
<https://orcid.org/0009-0005-7144-8923>

Farid E. Khalilov

Assistant Professor, Teacher
Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China
farid.khalilov.87@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7281-3607>

Yucheng Zhou

Master, Researcher
Wenzhou University, Wenzhou, People's Republic of China
1941619785@qq.com
<https://orcid.org/0009-0002-9365-8997>

Andrey L. Ronzhin

Doctor of Sciences in Technique, Chief Researcher, Professor
St. Petersburg Federal Research Center of the RAS, St. Petersburg, Russia
ronzhin@iias.spb.su
<https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

Abstract. Intensive agricultural activity leads to pollution and cyanobacterial blooms of freshwater areas, which threatens not only human health, but also the flora and fauna of the aquatic environment. The paper examines the results of studies of the impact of electromagnetic radiation of various wavelengths on the development of *Chlorella vulgaris*. For this purpose, a grown suspension of *Chlorella vulgaris* in a nutrient solution was irradiated using EMR of various wavelength ranges: in ultraviolet (UV) with a wavelength of 220 nm and 253 nm, in green (Gr) with a wavelength of 520 nm, in red (R) with a radiation range of 625 nm and in infrared (IR) in the range of 1200–1400 nm. As a result of the experiments, it was found that exposure to UV radiation in both wavelength ranges of 220 nm and 253 nm, as well as under the influence of Gr at a wavelength of 520 nm, did not lead to a change in the concentration of chlorella cells in the tested samples, compared with control samples within 6 days of measurements after irradiation. At the same time, in samples irradiated with R and IR, respectively, at wavelengths of 625 and 1200–1400 nm, an approximately twofold increase in the concentration of chlorella cells in the suspension was observed, compared with the control sample. The authors consider the most promising to be the use of the infrared range of the electromagnetic spectrum when influencing chlorella in order to activate its growth. Meanwhile, when selecting a wavelength in the IR range, it is recommended to take into account the optical transparency windows of the atmosphere above water bodies.

Keywords: *Chlorella vulgaris*, electromagnetic radiation, ultraviolet radiation, infrared radiation, UAVs, IR lasers, optical windows of atmospheric transparency

For citation: Khalilov E.N., Ming Zh., Ma Z., Glibko O.Ya., Wang M., Khalilov F.E., Zhou Yu., Ronzhin A.L. On the possibility of controlling the dynamics of the development of chlorella (*Chlorella vulgaris*) in freshwater areas under the influence of infrared lasers. *Vestnik of the FEB RAS*. 2025;(1):31–39. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769825010034>

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современной цивилизации является загрязнение окружающей среды, в частности водных акваторий. Для решения проблем очистки воды в экосистемах акваторий применяется широкий спектр современных технологий, включая биохимическую очистку воды с помощью различных фильтров, использующих природные адсорбенты, ультрафиолетовые лампы, различные химические реагенты. Между тем все указанные методы могут быть реализованы для очистки относительно ограниченных объемов воды, например для очистки сточных вод от промышленных предприятий, населенных пунктов и сельхозугодий. Для больших площадей акваторий применение указанных методов и технологий малоэффективно из-за их высокой стоимости и ограниченной производительности. Проблемы загрязнения водных ресурсов, накопления токсичных соединений в органах и тканях гидробионтов, влияние на состояние сельского хозяйства и продовольственную безопасность субъектов Дальневосточного федерального округа обсуждаются в работах [1, 2].

Наиболее перспективным для биохимической очистки больших площадей водных акваторий считается применение культур одноклеточных зеленых водорослей [3–10]. В работе [3] изучались процессы сорбции трехвалентного хрома с помощью зеленых водорослей. В работе [4] клетки *Chlorella sorokiniana* использовали для извлечения ионов хрома. В работе [5] исследовались методы иммобилизации микроводорослей в разнообразных матрицах.

Наибольшее распространение в указанном отношении получили виды рода *Chlorella*. *Chlorella* – род зеленых эукариотических микроводорослей, имеющих сферическую форму, диаметром 2–10 мкм. Попадая в водоем с высоким уровнем биохимического загрязнения, хлорелла начинает активно развиваться, поглощая углекислый газ, биогены, азотистые и фосфатные соединения. Кроме того, хлорелла является прекрасной питательной средой для зоопланктона, которым питаются рыбы. Хлорелла активно насыщает воду кислородом, весьма позитивно влияя на развитие флоры и фауны акваторий и защищая от токсичных цианобактерий, вызывающих «цветение» воды. Так, в работе [8] было изучено использование зеленых водорослей *C. elliposoidea* (Gerneck) + *Scenedesmus bijuga* (Turpin) Lageh в качестве профилактики и биологической борьбы с цветением цианобактерий в полевых условиях. Авторы исследований пришли к выводу об эффективности применения *C. elliposoidea* (Gerneck) + *S. bijuga* (Turpin) Lageh для снижения популяции цианобактерий.

В России были рекомендованы к применению для биологической очистки загрязненных водных объектов Российской Федерации запатентованные штаммы хлореллы *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 и *C. vulgaris* BIN, разработанные в Российском государственном аграрном университете – МСХА им. К.А. Тимирязева [11]. Однако к настоящему времени накоплено большое количество аргументов против необоснованного проведения так называемой альголизации: отсутствие подобного направления в современной биотехнологии микроводорослей, нулевые или даже отрицательные результаты воздействия метода на водоемы, отсутствие прописанной и апробированной методики, неправомерность выводов в связи с ошибочностью методологии проведения исследования [12–14].

Между тем естественные условия развития хлореллы не могут существенно повлиять на биохимическую очистку больших акваторий. В связи с этим активно исследуются и развиваются методы активизации развития хлореллы и увеличения ее биомассы, в частности два независимых направления. Первое – искусственное выращивание большой биомассы хлореллы с целью последующего производства на его основе различных медикаментов, биоактивных добавок, косметических средств, подкормки домашних животных, рыб и птиц [15]. Это связано прежде всего с тем, что хлорелла характеризуется большим комплексом биологически активных веществ: около 50% белка, содержащего ценные аминокислоты и целый ряд ненасыщенных жирных кислот, включая Омега-3; витамины А,

B1, B2, B3, B5, B6, E; макро- и микроэлементы. Хлореллу обычно выращивают в прудах или биореакторах, в которых созданы благоприятные условия для роста ее биомассы [15].

Второе направление активации роста хлореллы связано с проблемой интенсификации роста водоросли непосредственно в водном объекте при его альголизации внесенной культурой клеток. Очевидно, что методы, направленные на повышение биомассы хлореллы, применяемые в промышленном производстве с использованием биореакторов и специальных прудов, не могут быть эффективно применены для активации роста хлореллы на больших акваториях.

Исследования, проведенные в настоящей работе, направлены на изучение возможности применения эффективных методов дистанционного воздействия на рост хлореллы для крупных акваторий с использованием лазеров наиболее оптимальной длины волны, установленных на роботизированных летательных аппаратах.

Ранее было показано, что воздействие лазерным облучением с определенными длинами волн способно активировать рост растений. Так, в работе [16] представлен новый метод воздействия красным лазером с длиной волны 650 нм и мощностью излучения 150 мВт для повышения урожайности овса. По мнению авторов [16], лазерное излучение запускает каскадный механизм синтеза сложных органических соединений, повышая урожайность овса на 25%. В [17] были приведены интересные результаты по разработке и тестированию роботизированного БПЛА с лазерным модулем для обработки растений в фазе вегетации в ночное время. Излучение модуля имело форму квадрата размерами 1 × 1 м. Длина волны лазерного излучения составила 638 нм при мощности 1 Вт. В результате экспериментальных исследований было получено ощутимое повышение урожайности ряда злаковых и бобовых культур от 6 до 23%, в зависимости от сорта растений.

В работе [15] исследовалось воздействие естественного спектра излучений на развитие хлореллы. Было, в частности, установлено, что выращивание *Chlorella vulgaris* невозможно без поддержания необходимого светового режима. Отмечено, что наиболее оптимальный световой режим находился в пределах значений длин волн 420–450 и 660–680 нм, т.е. в ультрафиолетовом и красном диапазонах длин волн.

Целью настоящих исследований является изучение и разработка научно-технологических требований для создания роботизированного беспилотного воздушного средства лазерной обработки больших площадей акваторий для активации роста хлореллы.

Методология

В рамках данных исследований был проведен ряд экспериментов по изучению влияния различных длин волн на динамику роста концентрации клеток хлореллы. С этой целью нами было проведено облучение выращенной суспензии *Chlorella vulgaris* в питательном растворе с помощью разных типов излучателей: в ультрафиолетовом (UV) диапазоне использовались люминесцентные лампы с длиной волны 220 и 253 нм мощностью 40 Вт; в зеленом (Gr) диапазоне – зеленый лазер с длиной волны 520 нм мощностью 10 Вт; в красном (R) диапазоне – LED лампа с диапазоном излучения 625 нм мощностью 15 Вт; в инфракрасном (IR) диапазоне 1200–1400 нм – ИК лампа накаливания мощностью 40 Вт.

Из маточного раствора хлореллы, выращенного в питательной среде в инкубаторе при температуре 25 °С, были отобраны три контрольных образца и по три образца суспензии хлореллы для облучения в четырех диапазонах волн UV, Gr, R и IR. Во всех случаях суспензия хлореллы в питательном растворе в количестве 50 мл в колбе устанавливалась на расстоянии 20 см от излучателя и производилось облучение установленных образцов в течение 10 мин. После облучения все образцы помещались в инкубатор при температуре 25 °С и ежедневно в одно и то же время в 15:00 производились замеры концентрации хлореллы в суспензии с помощью спектрофотометра. Основой данного метода является определение количества клеток в среде (концентрация клеток), используя светопоглощающие (абсорбцию) свойства клеточной культуры, в данном случае клеток хлореллы. Клеточная культура обладает определенными оптическими свойствами, обуславливающими ее состояние, плотность и т.д. По сути, оптическую плотность культуры определяет эффект светорассеивания.

Светорассеивание, в свою очередь, прямо пропорционально концентрации клеток в среде. После проведения замеров величины оптической плотности производился перевод данного параметра в величину концентрации клеток в миллионах клеток на миллилитр на основе заранее составленного уравнения и коэффициента, вычисленного при подсчете количества клеток на единицу объема с помощью электронного микроскопа.

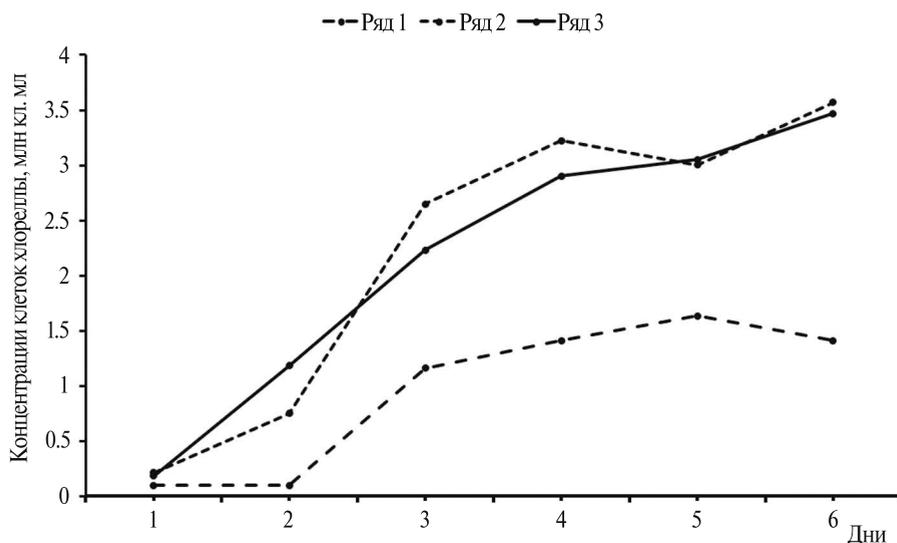
Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов было установлено следующее. Воздействие UV излучения в обоих диапазонах длин волн 220 и 253 нм, а также под действием G_r при длине волны 520 нм не привело к изменению показателя концентрации клеток хлореллы в тестируемых образцах по сравнению с контрольными образцами в течение 6 сут измерений после облучения.

В то же время в образцах, облученных R и IR при длинах волн 625 и 1200–1400 нм соответственно, наблюдался рост концентрации клеток хлореллы в суспензии примерно вдвое по сравнению с контрольным образцом. То есть при концентрации контрольного образца около 1,5–1,6 млн кл/мл, в тестируемых образцах, облученных в красном и инфракрасном диапазонах, через 6 сут была определена концентрация клеток хлореллы 3,6 млн кл/мл (см. рисунок). При построении графиков были использованы усредненные значения концентрации клеток хлореллы от трех образцов для каждого диапазона длин волн.

Выводы

Таким образом, были сделаны предварительные выводы о наиболее эффективном воздействии на рост цианобактерий излучений в красном и инфракрасном диапазонах. Если принять во внимание, что инфракрасный диапазон излучений, по мнению многих исследователей [18], является более эффективным и позитивно воздействующим на внутриклеточные процессы живых организмов по сравнению с красным, авторы считают наиболее перспективным применение именно инфракрасного диапазона электромагнитного спектра при воздействии на хлореллу с целью активизации ее роста. Между тем при облучении



Динамика роста концентрации клеток *Chlorella vulgaris*: ряд 1 – в контрольных образцах; ряд 2 – под действием инфракрасного излучения в диапазоне 1200–1400 нм; ряд 3 – под действием красного излучения при длине волны 625 нм

популяции хлореллы на поверхности акваторий необходимо учитывать повышенное поглощение электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне. В то же время существуют оптические окна, при которых поглощение водяным паром над поверхностью водоемов является минимальным. Данным окнам соответствуют нижеприведенные интервалы длин волн инфракрасных излучений: $\lambda = 0,95-1,05$ мкм; $\lambda = 1,15-1,35$ мкм; $\lambda = 1,5-1,8$ мкм; $\lambda = 2,1-2,4$ мкм; $\lambda = 3,3-4,2$ мкм; $\lambda = 4,5-5,1$ мкм; $\lambda = 8-13$ мкм [19]. Учитывая вышесказанное, необходимо подобрать длину волны лазерного излучателя, соответствующую одному из окон прозрачности атмосферы для инфракрасных излучений. Принимая во внимание, что над водными акваториями наибольшее влияние на поглощение инфракрасного излучения оказывает водяной пар, то окном прозрачности для водяного пара является $\lambda = 4,5-5,1$ мкм [19].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Клык А.Г., Потенко Т.А., Мамай О.В. Оценка продовольственной безопасности Дальнего Востока России // Вестник ДВО РАН. 2023. № 3. С. 12–22.
2. Жадько Е.А., Стеблевская Н.И., Полякова Н.В., Чусовитина С.В. Содержание некоторых элементов в тканях пурпурной асцидии *Halocynthia aurantium* из Амурского залива (залив Петра Великого, Японское море) // Вестн. ДВО РАН. 2023. № 2. С. 124–134.
3. Akhtar N., Iqbal M., Zafar S.I., Iqbal J. Biosorption characteristics of unicellular green alga *Chlorella sorokiniana* immobilized in loofa sponge for removal of Cr(III) // Journal of Environmental Sciences. 2008. Vol. 20, iss. 2. P. 231–239.
4. Ardila L., Godoy R., Montenegro L. Sorption capacity measurement of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* to remove chromium from tannery waste water // IOP Conference. Ser.: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 83. 012031.
5. Moheimani N.R., McHenry M.P., de Boer K., Bahri P.A. Biomass and Biofuels from Microalgae. Advances in Engineering and Biology. New York; Dordrecht; London: Springer International Publishing, 2015. 373 p.
6. Зибарев Н.В., Политаева Н.А., Андрианова М.Ю. Использование микроводорослей *Chlorella sorokiniana* (Chlorellaceae, Chlorellales) для очистки сточных вод пивоваренной промышленности // Поволжский экологический журнал. 2021. № 3. С. 262–271.
7. Кирилина Т.В., Ханг Д.Т., Сироткин А.С. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 8. С. 200–203.
8. Dawah A.M., El-Naggar G., Mesalhy S. Field studies on prevention and biological control of the cyanobacterial blooms using chlorella and scenedesmus in the Nile tilapia farms // Abbassa Int. J. Aqua. 2008. N1A. P. 151–175.
9. Дудина Ю.А., Калашникова Е.А., Киракосян Р.Н. Создание фотобиореактора для эффективного роста хлореллы и изучение влияния спектрального состава света на ее биомассу // Тимирязевский биологический журнал. 2023. № 1. С. 15–22.
10. Карпов М.В., Наумова О.В., Жиздюк А.А., Малышева А.А. Перспективы использования культивированных водорослей хлореллы при доочистке и обеззараживании сточных вод на очистных сооружениях // Аграрный научный журнал. 2023. № 1. С. 150–154.
11. Новиков А.Е., Филимонов М.И., Торопов А.Ю., Фролова М.В. Культивирование *Chlorella vulgaris* при воздействии полного спектра естественных излучений // Орошаемое земледелие. 2020. № 2. С. 51–54.
12. Корнева Л.Г., Шаров А.Н., Сиделев С.И., Зубишина А.А., Медведева Н.Г., Лазарева Г.А. «Цветение» воды цианобактериями и методы борьбы с их массовым развитием: учебное пособие. Дубна: Гос. ун-т «Дубна», 2023. 258 с. ISBN: 978-5-89847-695-3.
13. Шаров А.Н. Фитопланктон холодноводных озерных экосистем под влиянием природных и антропогенных факторов // Вопросы современной альгологии. 2021. № 1 (25). С. 42–49.
14. Kurbatova S., Berezina N., Sharov A., Chernova E., Kurashov E., Krylova Yu., Yershov I., Mavrin A., Otyukova N., Borisovskaya E., Fedorov R. Effects of algicidal macrophyte metabolites on cyanobacteria, microcystins, other plankton and fish in microcosms // Toxins. 2023. Vol. 15, N9. P. 529.

15. Sevostyanova N., Shkodina E., Trezorova O., Zhukova M. The effect of laser stimulation on the yield and quality of oat grain. *Agriculture digitalization and organic production // Proceedings of the first international conference, ADOP 2021, St. Petersburg, Russia, June 7–9. Springer, SIST, 2021. Vol. 245. P. 113–115.*
16. Севостьянова Н.Н., Лебедев И.В., Лебедева В.В., Ватаманюк И.В. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БПЛА с целью стимуляции роста культур. *Робототехника, автоматизация и системы управления // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 6. С. 1395–1414.*
17. Кузнецов Д.Б. Молекулярные механизмы воздействия инфракрасного излучения на микроорганизмы // *Фундаментальные исследования. 2013. № 4-2. С. 414–418.*
18. Малиновская С.Л., Другова О.В., Борзиков В.В., Баврина А.П. Фотобиомодуляция как альтернативный подход к коррекции физиологически измененных состояний живой ткани // *Медицинский альманах. 2021. № 4 (69). С. 6–17.*
19. Ортенберг Ф.С. Методы инфракрасного зондирования Земли из космоса. М.: Знание, 1987. 64 с.

REFERENCES

1. Klykov A.G., Potenko T.A., Mamai O.B. Evaluating the food security of the Russian Far East. *Vestnik of the FEB RAS. 2023;(3):2–22. (In Russ.).*
2. Zhadko E.A., Steblevskaya H.I., Polyakova H.B., Chusovitina C.B. The content of some elements in tissues of the purple ascidian *Halocynthia aurantium* from the Amur Bay (Peter the Great Bay, Sea of Japan). *Vestnik of the FEB RAS. 2023;(2):124–134. (In Russ.).*
3. Akhtar N., Iqbal M., Zafar S.I., Iqbal J. Biosorption characteristics of unicellular green alga *Chlorella sorokiniana* immobilized in loofa sponge for removal of Cr(III). *Journal of Environmental Sciences. 2008;20(2):231–239.*
4. Ardila L., Godoy R., Montenegro L. Sorption capacity measurement of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* to remove chromium from tannery waste water. *IOP Conference. Ser.: Earth and Environmental Science. 2017;83. 012031.*
5. Moheimani N.R., McHenry M.P., de Boer K., Bahri P.A. Biomass and Biofuels from Microalgae. *Advances in Engineering and Biology. New York; Dordrecht; London: Springer International Publishing; 2015. 373 p.*
6. Zibarev N.V., Politaeva N.A., Andrianova M.Yu. Use of microalgae *Chlorella sorokiniana* (Chlorellaceae, Chlorellales) for wastewater treatment of the brewing industry. *Volga Ecological Journal. 2021;(3):262–271. (In Russ.).*
7. Kirilina T.V., Hang D.T., Sirotkin A.S. Assessing the efficiency of wastewater tertiary treatment using unicellular and multicellular hydrobionts. *Bulletin of the Kazan Technological University. 2013;(8):200–203. (In Russ.).*
8. Dawah A.M., El-Naggar G., Mesalhy S. Field studies on prevention and biological control of the cyanobacterial blooms using chlorella and scenedesmus in the Nile tilapia farms. *Abbassa Int. J. Aqua. 2008;(1A):151–175.*
9. Dudina Yu.A., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. Creation of a photobioreactor for the effective growth of chlorella and study of the influence of the spectral composition of light on its biomass. *Timiryazevsky Biological Journal. 2023;(1):15–22. (In Russ.).*
10. Karpov M.V., Naumova O.V., Zhizdyuk A.A., Malysheva A.A. Prospects for the use of cultivated chlorella algae for post-treatment and disinfection of wastewater at wastewater treatment plants. *Agricultural Scientific Journal. 2023;(1):150–154. (In Russ.).*
11. Novikov A.E., Filimonov M.I., Toropov A.Yu., Frolova M.V. Cultivation of *Chlorella vulgaris* under the influence of the full spectrum of natural radiation. *Irrigated Agriculture. 2020;(2):51–54. (In Russ.).*
12. Korneva L.G., Sharov A.N., Sidelev S.I., Zubishina A.A., Medvedeva N.G., Lazareva G.A. Water “blooming” with cyanobacteria and methods of combating their mass development: a tutorial. *Dubna: State University “Dubna”; 2023. 258 p. (In Russ.). ISBN: 978-5-89847-695-3.*
13. Sharov A.N. Phytoplankton of cold-water lake ecosystems under the influence of natural and anthropogenic factors. *Issues of Modern Algology. 2021;25(1):42–49. (In Russ.).*
14. Kurbatova S., Berezina N., Sharov A., Chernova E., Kurashov E., Krylova Yu., Yershov I., Mavrin A., Otyukova N., Borisovskaya E., Fedorov R. Effects of algicidal macrophyte metabolites on cyanobacteria, microcystins, other plankton and fish in microcosms. *Toxins. 2023;15(9):529.*

15. Sevostyanova N., Shkodina E., Trezorova O., Zhukova M. The effect of laser stimulation on the yield and quality of oat grain. Agriculture digitalization and organic production. In: *Proceedings of the first international conference, ADOP 2021, St. Petersburg, Russia, June 7–9*. Springer, SIST; 2021. Vol. 245. P. 113–115.
16. Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth. *Informatics and Automation*. 2021;20(6):1395–1417. (In Russ.).
17. Kuznetsov D.B. Molecular mechanisms of the influence of infrared radiation on microorganisms. *Fundamental Research*. 2013;(4-2):414–418. (In Russ.).
18. Malinovskaya S.L., Drugova O.V., Borzikov V.V., Bavrina A.P. Photobiomodulation as an alternative approach to the correction of physiologically altered states of living tissue. *Medical Almanac*. 2021;69(4):6–17. (In Russ.).
19. Ortenberg F.S. Methods of infrared sensing of the Earth from space. M.: Knowledge; 1987. 64 p. (In Russ.).