

Научная статья
УДК 574.58
doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.009

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИКОЙ ЦИАНОБАКТЕРИАЛЬНОГО ЦВЕТЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВОЗДУШНЫХ И НАДВОДНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

**Андрей Леонидович Ронжин^{1✉}, Эльчин Нусратович Халилов², Андрей Александрович Лазукин³,
Антон Игоревич Савельев⁴, Зенглинг Ма⁵, Мин Ван⁶**

^{1, 3, 4}Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

^{2, 5, 6}Университет Вэньчжоу, Вэньчжоу, Китайская Народная Республика

¹ronzhin@iias.spb.su[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

²1283320580@qq.com, <https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

³lazukin1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6333-0725>

⁴saveliev@iias.spb.su, <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>

⁵mazengling@wzu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-4165-0339>

⁶minw@wzu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

Аннотация

В работе обсуждается проблема водных акваторий, загрязненных цианобактериями, и способы ее устранения за счет применения робототехнических средств. Лазерное излучение обладает свойством существенно подавлять жизнедеятельность как цианобактерий, так и целого ряда исследованных патогенных бактерий, вирусов, грибов и других микроорганизмов. Проведено моделирование параметров лазерного излучения с оценкой угнетающего воздействия на цианобактерии в водоемах. Представлены примеры созданного навесного оборудования с лазерными излучателями, транспортных беспилотных летательных и надводных аппаратов, использующихся в исследованиях по управлению динамикой цианобактериального цветения.

Ключевые слова:

робототехника, групповое управление, гетерогенные роботы, БПЛА, цианобактериальное цветение, лазерное излучение

Благодарности:

исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых № МК-3094.2022.1.6.

Для цитирования:

Ронжин А. Л., Халилов Э. Н., Лазукин А. А., Савельев А. И., Ма З., Ван М. Моделирование способов управления динамикой цианобактериального цветения с применением воздушных и надводных робототехнических средств // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2023. Т. 14, № 7. С. 86–91. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.009.

Original article

SIMULATION OF METHODS OF CONTROL THE DYNAMICS OF CYANOBACTERIAL BLOOMING USING AIR AND SURFACE ROBOTICS

Andrey L. Ronzhin^{1✉}, Elchin N. Khalilov², Andrey A. Lazukin³, Anton I. Savelyev⁴, Zengling Ma⁵, Ming Wang⁶

^{1, 3, 4}St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

^{2, 5, 6}Wenzhou University, Wenzhou, China

¹ronzhin@iias.spb.su[✉], <https://orcid.org/0000-0002-8903-3508>

²1283320580@qq.com, <https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

³lazukin1996@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6333-0725>

⁴saveliev@iias.spb.su, <https://orcid.org/0000-0003-1851-2699>

⁵mazengling@wzu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0002-4165-0339>

⁶minw@wzu.edu.cn, <https://orcid.org/0000-0001-7952-2802>

Abstract

The paper discusses the problem of water areas contaminated with cyanobacteria and ways to eliminate it through the use of robotic means. Laser radiation has the ability to significantly suppress the vital activity of both cyanobacteria and a number of studied pathogenic bacteria, fungal viruses and other microorganisms. The parameters of laser radiation

were modeled with an assessment of the inhibitory effect on cyanobacteria in water bodies. Examples of created attachments with laser emitters, transport unmanned aerial vehicles and surface vehicles used in studies to control the dynamics of cyanobacterial blooms are presented.

Keywords:

robotics, group control, heterogeneous robots, UAV, cyanobacterial bloom, laser radiation

Acknowledgments:

the study was supported by a grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists No. MK-3094.2022.1.6.

For citation:

Ronzhin A. L., Khalilov E. N., Lazukin A. A., Savelyev A. I., Ma Z., Wang M. Simulation of methods of control the dynamics of cyanobacterial blooming using air and surface robotics // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Engineering Sciences. 2023. Vol. 14, No. 7. P. 86–91. doi:10.37614/2949-1215.2023.14.7.009.

Введение

Проблема борьбы с цианобактериями в последние два десятилетия занимает особо важное место среди задач, утвержденных ООН в области экологии и защиты от загрязнений водных бассейнов. Каждая страна в мире сталкивается с рисками загрязнения токсинами огромных территорий водоемов всех типов при цветении и гибели цианобактерий. Эта проблема угрожает не только здоровью людей, но и флоре и фауне водной среды. Снижение объемов пресной и чистой питьевой воды в последние годы во всем мире создает критическую ситуацию для многих стран [1, 2].

Большинство существующих способов борьбы с цианобактериальным цветением основаны на применении химических, бактериологических веществ, механической фильтрации, ультразвуковой обработке, являются дорогостоящими и не обеспечивают достаточную скорость для воздействия на водоемы с большой площадью. Учитывая гигантские площади водных поверхностей нашей планеты, затронутые развитием цианобактерий, становится очевидной экономическая и технологическая нерентабельность известных подходов.

Способ лазерного облучения цианобактерий

Разрабатываемый способ лазерного облучения посредством беспилотных летательных и надводных аппаратов поможет решить указанные недостатки и позволит обрабатывать большие участки, зараженных цианобактериями водных акваторий при минимальных затратах времени и человеческих ресурсов. Лазерное излучение не требует расхода различных химических и других веществ для обработки загрязненных цианобактериями поверхностей [3, 4].

При проведении экспериментальных исследований были отобраны экстракты цианобактерий (ЭЦ) из рода *Microcystis*, выращенные в лабораторных условиях в специальном инкубаторе Университета Вэньчжоу. Для лазерного облучения цианобактерий был использован профессиональный полупроводниковый зеленый лазер марки FOX с длиной волны $\lambda = 520$ нм и регулируемой мощностью 5–15 Вт. Было отобрано 12 опытных образцов ЭЦ с одинаковой концентрацией, помещенных в равных количествах в пробирки диаметром 15 мм с высотой заполнения пробирки экстрактом 2 см. Один образец ЭЦ в той же концентрации и количестве был отобран в качестве контрольного.

В первом опыте были облучены 6 образцов ЭЦ первой партии лазером с мощностью излучения 5 W и временем облучения: 1 с; 5 с; 30 с; 60 с; 100 с; 10 мин.

Во втором опыте были облучены 6 образцов ЭЦ второй партии лазером с мощностью излучения 15 W и временем облучения: 1 с; 5 с; 30 с; 60 с; 100 с; 10 мин. Через 24 ч после облучения обеих партий образцов ЭЦ был произведен фотолюминесцентный анализ всех образцов ЭЦ посредством измерения флуоресценции хлорофилла методом пульс-амплитудной модуляции.

В эксперименте делался упор на анализ параметров флуоресценции при различных мощностях и времени лазерного облучения. Основными регистрируемыми параметрами являлись: интенсивность флуоресценции (F0); максимальная ее интенсивность (Fm); а также выход переменной флуоресценции, характеризующий квантовую эффективность первичной фотосинтетической реакции, рассчитанный как: F_v / F_m , где $F_v = F_m - F_0$ [5].

Результаты анализа экспериментальных данных по лазерному облучению образцов ЭЦ показали, что при мощности облучения лазером, равной 5 Вт, первой партии из 6 образцов наблюдалось незначительное снижение величины Fv/Fm , начиная со времени облучения 100 с. Существенное снижение параметра Fv/Fm наблюдалось, начиная с 10 мин облучения. Предварительно это может быть объяснено ингибированием биосинтеза белка в клетке в результате деструктивного воздействия лазерного излучения.

В то же время при мощности облучения лазером второй партии из 6 образцов, равной 15 Вт, наблюдалось существенное снижение всех трех величин: $F0$, Fm и Fv/Fm , отражающих инактивацию цианобактерий, начиная со времени облучения 60 с, при этом максимальное снижение наблюдалось при времени облучения 10 мин.

Таким образом, в результате проведенных первичных экспериментальных исследований в Университете Вэньчжоу был сделан основной вывод об эффективности воздействия зеленого лазерного излучения на инактивацию цианобактерий из рода *Microcystis*.

Для практической апробации предложенной технологии лазерного облучения цианобактерий в пресных водоемах планируется применение воздушных и надводных беспилотных транспортных средств, использующих специальное программное обеспечение для автономного перемещения над поверхностью водных акваторий, загрязненных цианобактериями. При этом планируется разработка специального программного обеспечения и исполнительных механизмов управления параметрами лазерного излучения (мощности, фокусировки, типа излучения (импульсного или непрерывного) и его модуляции) в зависимости от природных условий (метеоусловий, рельефа местности, размеров обрабатываемого участка и т. д.), а также специфики местности (высоких и крутых берегов рек и других водоемов и т. д.). Кроме того, учитывая определенные преимущества надводных беспилотных аппаратов (такие, как близость лазерного излучателя к поверхности воды, что обеспечивает возможность снижения мощности лазерного излучения и упрощение системы управления аппаратом) при применении в небольших водоемах и реках, предполагается создание двух вариантов беспилотных транспортных систем (воздушного и надводного). Планируется разработка программно-аппаратных средств для одновременного проведения дистанционного мониторинга по контролю результатов обработки водной поверхности с цианобактериями и выделением обработанных и необработанных участков с применением видеокамер в обычном и инфракрасном диапазонах.

Групповое управление воздушными и надводными роботами

В СПб ФИЦ РАН ведется разработка и прототипирование математического, алгоритмического, программного, аппаратного обеспечения группового управления и взаимодействия гетерогенных робототехнических комплексов, применяемых для решения агроэкологических задач в разных средах: воде, суше и воздухе [6–9].

Линейка выпускаемых беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) и навесного оборудования предназначена для распыления различных видов жидких удобрений, внесения сухих веществ, гранулированных удобрений, специализированных насекомых, лазерной стимуляции, мониторинга посредством мультиспектральной или видимого спектра видеокамеры [10]. Разработанные алгоритмы построения траектории обеспечивают движение по заданному маршруту с выполнением задач в ключевых точках, равномерно покрывая рабочий земельный участок при аэрофотосъемке, внесении и распределении сухих и жидких удобрений. Созданные пользовательские интерфейсы обеспечивают ряд преимуществ: простота настройки скорости движения, возможность удержания положения в точке обработки на заданное время, стабильный полет за счет используемого контроллера, автономное функционирование, применение различного программного обеспечения для реализации полетных задач. На рисунке 1 показаны пример БпЛА, выпускаемого СПб ФИЦ РАН, и виды используемого навесного оборудования. Последняя версия БпЛА имеет следующие характеристики: масса полезной нагрузки — до 12 кг; время полета — до 35 мин; автономный взлет и посадка, движение по заранее заданному маршруту, выполнение задач в ключевых точках.

Использование специализированной лазерной установки, монтируемой на беспилотный летательный аппарат для автоматизации процесса фотоактивации больших посевных площадей в результате полевых экспериментов показало, что лазерное облучение для большей части изучаемых культур увеличило урожайность и высоту травостоя (у злаковых — для четырех из шести культур, у бобовых — для четырех из пяти изучаемых культур) [11].



Рис. 1. Серийно выпускаемые БПЛА и навесное оборудование: *a* — пример БПЛА; *b* — лазерный блок для стимуляции растений; *c* — система полива; *d* — захват и контейнер для транспортировки грузов; *e* — бортовая видеочкамера

Также ведется разработка надводного судна, автономного подводного аппарата, алгоритмов управления их движением и взаимного позиционирования. Для рассматриваемой задачи управления динамикой цианобактериального цветения актуально применение надводного судна с аэродвигателем. Выбор данного движителя обусловлен требованием к проходимости лодки на сильно эвтрофицированных водоемах с высоким содержанием водорослей, способных привести к запутыванию гребного винта и рулей. Ожидается, что данная лодка будет способна перемещаться в акватории водоемов со стоячей и проточной водой, с волнением не более 2 баллов, в условиях сильной водорослевой нагрузки мелководья и болотистой местности (с глубиной водоема от 10 см).

Заключение

Приведенный способ лазерной инактивации цианобактерий и робототехнические средства будут модернизированы в ходе дальнейших совместных исследований ученых Университета Вэньчжоу и СПб ФИЦ РАН.

Список источников

1. Tang D. Y. Y., Chew K. W., Ting H. Y., Sia Y. H., Gentili F. G., Park Y. K., Banat F., Culaba A. B., Ma Z., Show P. L. Application of regression and artificial neural network analysis of Red-Green-Blue image components in prediction of chlorophyll content in microalgae. *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 370. P. 128503. doi: 10.1016/j.biortech.2022.128503.
2. Mai G., Song X., Xia X., Ma Z., Tan Y., Li G. Photosynthetic Characteristics of Smaller and Larger Cell Size-Fractioned Phytoplankton Assemblies in the Daya Bay, Northern South China Sea. *Microorganisms*. 2022. Vol. 10(1). P. 16. doi: 10.3390/microorganisms10010016.

3. Касумьян А. С., Азовскова О. В. Антибактериальное действие низкоинтенсивного лазерного излучения с различной длиной волны // Смоленский медицинский альманах. 2015. № 1. С. 31–33.
4. Каспарова Е. А., Бяо Я., Боcharова Ю. А., Новиков И. А. Применение длинноволнового излучения видимого спектра для инактивации микроорганизмов // Вестник офтальмологии. 2020. Т. 136, № 6. С. 42–49.
5. Маторин Д. Н., Протопопов Ф. Ф., Тодоренко Д. А., Пономарев В. Ю., Горячев С. Н., Алексеев А. А. Методы флуоресцентного зондирования фитопланктона в природных водоемах // Материалы II Международной конференции «Рациональное природопользование: традиции и инновации» (г. Москва, 17–18 ноября 2017 г.). М.: Издательство КДУ, 2017. С. 187–190.
6. Ронжин А. Л., Савельев А. И. Системы искусственного интеллекта в решении задач цифровизации и роботизации агропромышленного комплекса // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2022. Т. 16, № 2. С. 22–29.
7. Лобачевский Я. П., Дорохов А. С. Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2021. Т. 15, № 4. С. 6–10. doi: 10.22314/2073-7599-2021-15-4-6-10.
8. Костяев А. И., Суровцев В. Н., Ронжин А. Л. Цифровизация сельского хозяйства и органическое производство // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 12. С. 1179–1182.
9. Ронжин А. Л., Дудаков М. О., Дудакова Д. С. Концептуальная и теоретико-множественная модели задачи функционирования и применения системотехнических решений для пробоотбора донных отложений // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2023. Т. 15, № 1. С. 43–54.
10. Астапова М. А., Аксаментов Е. А. Использование спектральных ландшафтных индексов для детектирования препятствий в задачах навигации мобильных робототехнических платформ на сельскохозяйственных территориях // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. Т. 25, № 1. С. 66–81. doi: 10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81.
11. 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 // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20, № 6. С. 1395–1417.

References

1. Tang D. Y. Y., Chew K. W., Ting H. Y., Sia Y. H., Gentili F. G., Park Y. K., Banat F., Culaba A. B., Ma Z., Show P. L. Application of regression and artificial neural network analysis of Red-Green-Blue image components in prediction of chlorophyll content in microalgae. *Bioresource Technology*, 2023, vol. 370, p. 128503, doi: 10.1016/j.biortech.2022.128503.
2. Mai G., Song X., Xia X., Ma Z., Tan Y., Li G. Photosynthetic Characteristics of Smaller and Larger Cell Size-Fractionated Phytoplankton Assemblies in the Daya Bay, Northern South China Sea. *Microorganisms*, 2022, vol. 10, no. 1, p. 16, doi: 10.3390/microorganisms10010016.
3. Kasum'jan A. S., Azovskova O. V., Leljanov A. D., Fedosov E. A. Antibakterial'noe dejstvie nizkointensivnogo lazernogo izluchenija s razlichnoj dlinoj volny [Antibacterial effects of low-level laser radiation with different wave length]. *Smolenskij medicinskij al'manah* [Smolensk Medical Almanac], 2015, no. 1, pp. 31–33. (In Russ.).
4. Kasparova E. A., Bjao Ja., Bocharova Ju. A., Novikov I. A. Primenenie dlinnovolnovogo izluchenija vidimogo spektra dlja inaktivacii mikroorganizmov [Application of visible longwave radiation for inactivation of microorganisms]. *Vestnik oftal'mologii* [Russian Annals of Ophthalmology], 2020, vol. 136, no. 6, pp. 42–49. (In Russ.).
5. Matorin D. N., Protopopov F. F., Todorenko D. A., Ponomarev V. Ju., Gorjachev S. N., Alekseev A. A. Metody fluorescentnogo zondirovanija fitoplanktona v prirodnyh vodoemah [Methods for fluorescent sensing of phytoplankton in natural reservoirs]. *Materialy II Mezhdunarodnoj konferencii «Racional'noe prirodo-pol'zovanie: tradicii i innovacii» (g. Moskva, 17–18 noyabrya 2017 g.)* [Materials of the II International Conference "Rational Environmental Management: Traditions and Innovations"]. Moscow, KDU Publishing House, 2017, pp. 187–190. (In Russ.).

6. Ronzhin A. L., Saveliev A. I. Sistemy iskusstvennogo intellekta v reshenii zadach cifrovizacii i robotizacii agropromyshlennogo kompleksa [Artificial Intelligence Systems for Solving Problems of Agro-Industrial Complex Digitalization and Robotization]. *Sel'skhozhozajstvennye mashiny i tehnologii* [Agricultural Machinery and Technologies], 2022, vol. 16, no. 2, pp. 22–29. (In Russ.).
7. Lobachevskij Ja. P., Dorohov A. S. Cifrovye tehnologii i robotizirovannye tehicheskie sredstva dlja sel'skogo hozjajstva [Digital technologies and robotic devices in the agriculture]. *Sel'skhozhozajstvennye mashiny i tehnologii* [Agricultural Machinery and Technologies], 2021, vol. 15, no. 4, pp. 6–10. (In Russ.).
8. Kostjaev A. I., Surovcev V. N., Ronzhin A. L. Cifrovizacija sel'skogo hozjajstva i organicheskoe proizvodstvo [Digitalization of agriculture and organic production]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2021, vol. 91, no. 12, pp. 1179–1182. (In Russ.).
9. Ronzhin A. L., Dudakov M. O., Dudakova D. S. Konceptual'naja i teoretiko-mnozhestvennaja modeli zadachi funkcionirovanija i primenenija sistemotekhnicheskikh reshenij dlja probotobora donnyh otlozhenij [Conceptual and set-theoretical models of the functioning and application of system solutions for bottom sediment sampling]. *Vestnik Juzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Matematika. Mehanika. Fizika* [Bulletin of the South Ural State University Ser. Mathematics. Mechanics. Physics], 2023, vol. 15, no. 1, pp. 43–54. (In Russ.).
10. Astapova M. A., Aksamentov E. A. Ispolzovanie spektral'nyh landshaftnyh indeksov dlja detektirovanija prepjatstvij v zadachah navigacii mobil'nyh robototekhnicheskikh platform na sel'skhozhozajstvennyh territorijah [Use of Spectral Landscape Indices for Obstacle Detection in the Tasks of Mobile Robotic Platforms Navigation in Agricultural Areas]. *Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of the Southwest State University], 2021, no. 25, pp. 66–81, doi: 10.21869/2223-1560-2021-25-1-66-81. (In Russ.).
11. Sevostyanova N., Lebedev I., Lebedeva V., Vatamaniuk I. Innovacionnyj podhod k avtomatizirovannoju fotoaktivacii posevnyh ploshchadej posredstvom BpLA s cel'ju stimulyacii rosta kul'tur [An Innovative Approach to Automated Photo-Activation of Crop Acreage Using UAVs to Stimulate Crop Growth]. *Informatika i avtomatizacija* [Informatics and Automation], 2021, vol. 20, no. 6, pp. 1395–1417. (In Russ.).

Информация об авторах

А. Л. Ронжин — доктор технических наук, главный научный сотрудник;
Э. Н. Халилов — доктор технических наук, профессор;
А. А. Лазукин — младший научный сотрудник;
А. И. Савельев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник;
З. Ма — доктор наук, профессор;
М. Ван — доктор наук, профессор.

Information about the authors

A. L. Ronzhin — Doctor of Science (Tech.), Chief Researcher;
E. N. Khalilov — Doctor of Science (Tech.), Professor;
A. A. Lazukin — Researcher;
A. I. Savelyev — Candidate of Science (Tech.), Chief Researcher;
Z. Ma — PhD, Professor;
M. Wang — PhD, Professor.

Статья поступила в редакцию 15.10.2023; одобрена после рецензирования 01.11.2023; принята к публикации 08.11.2023.
The article was submitted 15.10.2023; approved after reviewing 01.11.2023; accepted for publication 08.11.2023.