








DOI 10.23859/estr-221005

EDN ITJWYW

УДК 574.5+574.6+57.04

Научная статья

## Насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты как потенциальные аллелохемики для реабилитации водных экосистем

Ю.В. Крылова<sup>1, 3</sup> , Е.А. Курашов<sup>1, 3\*</sup> , Е.В. Протопопова<sup>1</sup> ,  
В.В. Ходонович<sup>1, 2</sup> , Е.Я. Явид<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Институт озераведения РАН – обособленное структурное подразделение СПб ФИЦ РАН, 196105, Россия, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга), 199053, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 26

<sup>3</sup> Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

\*[evgeny\\_kurashov@mail.ru](mailto:evgeny_kurashov@mail.ru)

**Аннотация.** Опасное цианобактериальное цветение (ОЦЦ) водоемов может приводить к значительным отрицательным последствиям. В лабораторных экспериментах показано, что метаболиты-аллелохемики водных макрофитов, нонановая кислота (одноосновная предельная жирная кислота) и пальмитолеиновая кислота (Omega-7 мононенасыщенная жирная кислота), способны эффективно подавлять развитие цианобактерии *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, штамм № 1336 коллекции CALU (Collection of Algae of Leningrad University). Воздействие нонановой кислоты при наибольших из исследованных концентраций (1 и 1.8 мг/л) было более выраженным (коэффициенты подавления (SI) более 20), чем пальмитолеиновой кислоты (SI не более 3.5). Нонановая кислота может быть рекомендована для включения в состав альгицидов нового поколения на основе метаболитов водных макрофитов, используемых для предотвращения и ослабления ОЦЦ.

**Ключевые слова:** нонановая кислота, пальмитолеиновая кислота, цианобактерии, аллелопатия, альгициды нового поколения, метаболиты макрофитов

**Финансирование:** Исследование поддержано грантом Российского научного фонда № 22-24-00658.

**Благодарности.** Выражаем благодарность ресурсному центру «Культивирование микроорганизмов» научного парка СПбГУ за предоставленный для исследований штамм *S. aquatilis*.

### ORCID:

Ю.В. Крылова, <https://orcid.org/0000-0002-4274-2358>

Е.А. Курашов, <https://orcid.org/0000-0002-4486-2804>

Е.В. Протопопова, <https://orcid.org/0000-0001-5376-7019>

В.В. Ходонович, <https://orcid.org/0000-0002-3326-9773>

Е.Я. Явид, <https://orcid.org/0000-0002-8049-4156>

**Для цитирования:** Крылова, Ю.В. и др., 2023. Насыщенные и ненасыщенные жирные кислоты как потенциальные аллелохимики для реабилитации водных экосистем. *Трансформация экосистем* 6 (5), 29–42. <https://doi.org/10.23859/estr-221005>

Поступила в редакцию: 05.10.2022

Принята к печати: 29.10.2022

Опубликована онлайн: 08.12.2023

---






DOI 10.23859/estr-221005

EDN ITJWYW

UDC 574.5+574.6+57.04

### Article

# Saturated and unsaturated fatty acids as potential allelochemicals for aquatic ecosystems rehabilitation

Yulia V. Krylova<sup>1, 3</sup>, Evgeny A. Kurashov<sup>1, 3\*</sup>,  
Elena V. Protopopova<sup>1</sup>, Vlada V. Khodonovich<sup>1, 2</sup>,  
Elizaveta Ya. Iavid<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Institute of Lake Science, Russian Academy of Sciences – a separate subdivision of the Saint Petersburg Federal Research Center of the RAS, ul. Sevastyanova 9, St. Petersburg, 196105 Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg branch of FSBSI “VNIRO” (“GosNIORKh” named after L.S. Berg”), Makarova emb. 26, St. Petersburg, 199053 Russia

<sup>3</sup> Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouzsky District, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia

\*[evgeny\\_kurashov@mail.ru](mailto:evgeny_kurashov@mail.ru)

---

**Abstract.** Cyanobacterial blooms (HCBs) in water bodies adversely affect aquatic ecosystems. In laboratory experiments, metabolites-allelochemicals of aquatic macrophytes, nonanoic – a monobasic saturated and palmitoleic – an Omega-7 monounsaturated fatty acids effectively inhibit the development of cyanobacteria *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, strain No. 1336 of CALU (Collection of Algae of Leningrad University). In contrast to palmitoleic acid (Suppression Index (SI) within 3.5), nonanoic acid at the highest tested concentrations of 1–1.8 mg/l (SI above 20) had more pronounced effect. Nonanoic acid can be referred to an algaecide of a new generation based on aquatic macrophyte metabolites to prevent and attenuate HCBs.

**Keywords:** nonanoic acid, palmitoleic acid, cyanobacteria, allelopathy, algaecide of a new generation, macrophyte metabolites

**Funding:** The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-24-00658.

**Acknowledgements.** We express our gratitude to the resource center “Cultivation of Microorganisms” of the St. Petersburg State University Science Park for providing *S. aquatilis* strain.

**ORCID:**Yu.V. Krylova, <https://orcid.org/0000-0002-4274-2358>E.A. Kurashov, <https://orcid.org/0000-0002-4486-2804>E.V. Protopopova, <https://orcid.org/0000-0001-5376-7019>V.V. Khodonovich, <https://orcid.org/0000-0002-3326-9773>E.Ya. Iavid, <https://orcid.org/0000-0002-8049-4156>

**To cite this article:** Krylova, Yu.V. et al., 2023. Saturated and unsaturated fatty acids as potential allelochemicals for aquatic ecosystems rehabilitation. *Ecosystem Transformation* 6 (5), 29–42. <https://doi.org/10.23859/estr-221005>

Received: 05.10.2022

Accepted: 29.10.2022

Published online: 08.12.2023

---

**Введение**

Опасное цианобактериальное цветение (ОЦЦ) – явление (часто рукотворное), последствиями которого могут быть разнообразные угрозы для водных экосистем в целом, гидробионтов, околотоводных животных и человека. В частности, воздействие цианотоксинов способно приводить как к локальной, так и к глобальной деградации водных ресурсов (Huisman et al. 2018; Šulčius et al., 2017).

Проблема предотвращения и ослабления последствий ОЦЦ особенно актуальна для огромного числа малых водоемов, которые широко используются для различных видов водопотребления (рыбное хозяйство и аквакультура, водоснабжение, рекреация и т.д.). Подобные обстоятельства выдвигают на первый план поиск и внедрение в практику биотехнологических методов, способных эффективно предотвращать и подавлять избыточное развитие цианобактерий, но в то же время безопасных для других компонентов водных экосистем.

К таким методам относятся, прежде всего, конвергентные природоподобные технологии – подходы, в основе которых лежат какие-либо природные механизмы, вызывающие тот или иной эффект. Именно на такие технологии должно ориентироваться современное природопользование, чтобы обеспечить устойчивое развитие общества и природы (Kovalchuk and Naraikin, 2017; Nature-like..., 2019; Zhironkin et al., 2019).

Аллелопатия, природное явление ингибирования (или стимулирования) растениями развития других организмов посредством специфических аллелохимических соединений, характерна и для наземных, и для водных экосистем (Chemical Ecology..., 2002). Опыт изучения аллелопатии и низкомолекулярных органических соединений (НОС) в водных экосистемах указывает на то, что это явление может быть очень полезным для эффективной профилактики и ослабления развития ОЦЦ в водоемах (Гуревич, 1953, 1973; Fink, 2007; Hu and Hong, 2008; Kurashov et al., 2014; Kurashov et al., 2021; Macías et al., 2008). Синтезируемые водными макрофитами аллелохемики могут приводить к подавлению развития цианобактерий, препятствуя возникновению и развитию ОЦЦ (Asif et al., 2021; Mushtaq et al., 2020; Śliwińska-Wilczewska et al., 2021).

Продукция, накопление и выделение НОС водными и околотоводными растениями в качестве первичных и вторичных метаболитов является важным механизмом при их взаимодействии с другими гидробионтами (Fink, 2007; Li et al., 2020). Эти метаболиты чрезвычайно важны для формирования гидробиологических сообществ, выполняя роль регуляторных агентов в водных экосистемах (Antioxidants in Plant-Microbe..., 2021; Koksharova, 2020; Kurashov et al., 2021).

Существуют различные методы борьбы с цианобактериями (Burford et al., 2019). Однако многие из них не позволяют эффективно решить проблему ОЦЦ без ущерба для других компонентов экосистемы и связаны с существенными побочными (адвентивными) эффектами в отношении гидробионтов и водных экосистем в целом (Huisman et al., 2018; Zhu et al., 2021). В то же время имитация аллелопатического воздействия на цианобактерии посредством НОС-аллелохемиков составляет эффективную и безопасную для других гидробионтов альтернативу существующим методам подавления ОЦЦ. На сегодняшний день возможность успешно использовать аллелохемики водных растений для контроля ОЦЦ считается доказанной (Kurashov et al., 2021; Nezbyrka

et al., 2022; Zhu et al., 2021). Подход к борьбе с ОЦЦ на основе аллелохемиков водных растений дает возможность сохранять и восстанавливать качество воды в водоемах, делая их пригодными для многофункционального использования, а природные (или синтетические) аллелохимические вещества могут быть эффективной заменой существующих альгицидов (Hu and Hong, 2008; Kurashov et al., 2014; Mohamed, 2017).

Химическая природа аллелохемиков в водных экосистемах чрезвычайно разнообразна: в этой роли могут выступать альдегиды, кетоны, эфиры, терпены и терпеноиды, фитостероиды, жирные кислоты, серосодержащие соединения, азотсодержащие соединения, спирты, лактоны, хинины, фенолы, кумарины, флавоноиды и т.д. (Kurashov et al., 2014; Li et al., 2010; Nakai et al., 2012).

Для создания альгицидов нового поколения и соответствующих технологий борьбы с ОЦЦ наиболее перспективны жирные (карбоновые) кислоты (Курашов и др., 2019; Nakai et al., 2005; Zhu et al., 2021). Известно, что водные макрофиты в качестве аллелохемиков активно синтезируют как насыщенные, так и ненасыщенные жирные кислоты (Kurashov et al., 2018). Однако потенциальная возможность подавлять развитие цианобактерий экспериментально проверена не у всех потенциальных аллелохемиков в ряду жирных кислот.

В связи с этим, цель данной работы – установить возможное антицианобактериальное воздействие нонановой и пальмитолеиновой кислоты, которые входят в состав НОС-метаболитов водных макрофитов, для потенциального включения этих веществ в состав композиций альгицидов нового поколения для борьбы с ОЦЦ при реабилитации водных экосистем.

## Материал и методы

Эксперименты по подтверждению антицианобактериальной активности нонановой ( $C_9H_{18}O_2$ , одноосновная предельная карбоновая кислота) и пальмитолеиновой кислот ( $C_{16}H_{30}O_2$ , омега-7 мононенасыщенная жирная кислота) проводились с видом планктонных цианобактерий *Synechocystis aquatilis* Sauvageau, штамм № 1336 коллекции культур цианобактерий, водорослей и паразитов водорослей (CALU, Collection of Algae of Leningrad University), предоставленный Ресурсным центром «Культивирование микроорганизмов» Научного парка СПбГУ. Штамм выделен из пробы воды, отобранной в Финском заливе у г. Сосновый Бор.

Штамм *S. aquatilis* поддерживался в виде растущей культуры на синтетической питательной среде № 6, разработанной в лаборатории микробиологии ЛГУ (Громов и Титова, 1983), в таких же сосудах, в которых ставились эксперименты, и при тех же условиях. Активный рост культуры поддерживался периодическим ее пересеванием в чистую среду каждые 2 недели.

Эксперименты проводились в специальных емкостях объемом 0.5 л с постоянной аэрацией через бактериальный фильтр «BIOFIL Syringe Filter» с диаметром пор 0.22 мкм во избежание загрязнения культуры цианобактерии. Каждый вариант опыта ставился в 3 повторностях. Культуру цианобактерий *S. aquatilis* в фазе активного роста вносили в экспериментальные сосуды в виде суспензии начальной культуры. С пальмитолеиновой кислотой была поставлена одна серия экспериментов продолжительностью 10 дней. С нонановой кислотой были поставлены две серии экспериментов (18 и 23 дня), которые отличались концентрациями воздействующего аллелохемика.

В ходе экспериментов постоянство светового потока в 1500 lm на 1 м длины обеспечивалось специальным светильником Биодизайн Т8 с аквариумными лампами Т8 FRESH WATER. Режим смены дня и ночи задавался при помощи регулируемого таймера Feron TM50, 3500 W/16 A 230 V.

Для изучения антицианобактериального действия нонановой и пальмитолеиновой кислот применялись их очищенные аналоги производства Acros Organics BVBA в концентрациях, которые могут быть характерны для природных водоемов: 0.01, 0.018, 0.1, 0.18, 1 и 1.8 мг/л (собств. данные). Соединения добавляли в сосуды с культурой цианобактерий в количествах, необходимых для достижения указанных конечных концентраций. Контролем служили сосуды без добавления аллелохемиков.

Для оценки степени подавления развития цианобактерий использовали индекс подавления (SI, Suppression Index) (Kurashov et al., 2020), определяемый как отношение плотности цианобактерий в контроле к плотности цианобактерий в эксперименте с аллелохимическими препаратами. В настоящей работе дополнительно рассчитывались SI, основанные на изменениях концентраций хлорофилла *a* и фикоцианина.

Рост культур цианобактерий с интервалом 2–9 сут в разных экспериментах контролировали с помощью светового микроскопа (Zeiss Axio Lab A1), используемого для подсчета численности

клеток в камере Нажотта, а также по изменениям концентраций хлорофилла *a* и фикоцианина, фиксируемых при помощи многопараметрического зонда AquaTroll-500 (In-Situ Inc.). Температура во время экспериментов поддерживалась в диапазоне 25–26°C.

## Результаты и обсуждение

В первой серии экспериментов с нонановой кислотой были использованы следующие концентрации аллелохемика: 0.01, 0.1 и 1 мг/л. Результаты изменения численности культуры *S. aquatilis* представлены на Рис. 1. Во всех случаях наблюдалось снижение численности клеток цианобактерий в экспериментальных сосудах по сравнению с контролем. Наибольшее подавление развития цианобактерий (средний SI = 21.2) (Табл. 1) отмечено к концу эксперимента при наибольшей из исследованных концентраций (1 мг/л).

Дополнительная оценка состояния культуры в экспериментальных сосудах, выполненная по изменениям концентрации хлорофилла *a* и фикоцианина (Рис. 2, 3) также показала выраженный эффект подавления цианобактерий нонановой кислотой.

Во второй серии экспериментов с нонановой кислотой в концентрациях 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л также наблюдалось значительное подавление цианобактерий. Медианное значение SI для наибольшей из исследованных концентраций к концу эксперимента составило 19.9 (Рис. 4, Табл. 1).

Выраженное угнетающее воздействие нонановой кислоты на развитие культуры цианобактерии *S. aquatilis* также прослеживалось по изменению концентраций хлорофилла и фикоцианина (Рис. 5, 6, Табл. 1). При этом следует отметить, что вторая серия экспериментов была длительнее, чем первая (23 дня против 18). К концу второй серии экспериментов был зафиксирован стимулирующий эффект нонановой кислоты при наименьшей ее концентрации (0.018 мг/л) (Рис. 4–6). Кроме того, стимулирующее воздействие этой концентрации аллелохемика наблюдался с 4 по 11 день развития культуры. На 14 день рост культуры замедлился по сравнению с контролем, а затем возобновился с большей скоростью. Это говорит о том, что в определенных условиях аллелохемики макрофитов способны не только подавлять, но и стимулировать развитие цианобактерий. Таким образом, реакция цианобактерий на отдельные аллелохимиканы может меняться в зависимости от концентрации, длительности воздействия и условий окружающей среды. Данный эффект необходимо принимать во внимание при использовании альгицидов нового поколения на целых водных экосистемах.

Эксперимент с пальмитолеиновой кислотой также показал выраженное угнетающее воздействие на развитие культуры *S. aquatilis*, отмеченное как по изменению численности клеток цианобактерий, так и по концентрациям хлорофилла *a* и фикоцианина (Рис. 7–9). Все испытанные концентрации приводили к угнетению развития культуры цианобактерии. При этом угнетение развития цианобактерий при наибольших концентрациях пальмитолеиновой кислоты было не столь значительно, как при воздействии нонановой кислоты. Оценки подавления развития цианобактерий нонановой и пальмитолеиновой кислотами, выполненные разными методами (прямым счетом клеток, по концентрации хлорофилла *a* и по концентрации фикоцианина), в большинстве

**Табл. 1.** Медианные значения коэффициентов подавления (SI) развития цианобактерий при концентрациях аллелохемика, вызывающих отчетливое подавление, в вариантах оценки по численности (N), по хлорофиллу *a* (Хл) и фикоцианину (Фц). Над чертой указана концентрация в 1 серии экспериментов с нонановой кислотой, мг/л; под чертой – концентрация во 2-й серии экспериментов с нонановой кислотой и с пальмитолеиновой кислотой, мг/л.

Воздействующий аллелохимик	Оценка по N		Оценка по Хл		Оценка по Фц	
	$\frac{0.1}{0.18}$	$\frac{1}{1.8}$	$\frac{0.1}{0.18}$	$\frac{1}{1.8}$	$\frac{0.1}{0.18}$	$\frac{1}{1.8}$
Нонановая кислота (эксперимент 1)	1.8	21.2	1.1	37.5	1.5	24.0
Нонановая кислота (эксперимент 2)	4.3	19.9	1.5	1.9	9.1	25.0
Пальмитолеиновая кислота	3.1	3.4	3.7	3.5	2.0	2.2

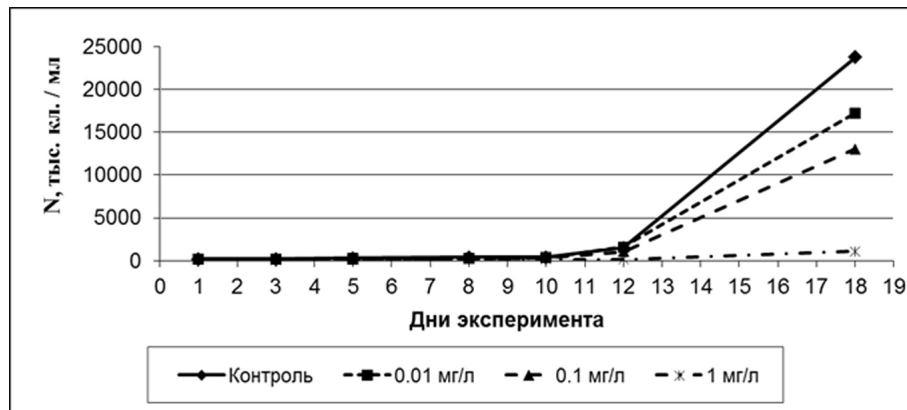


Рис. 1. Медиана численности культуры *S. aquatilis* в 1-й серии экспериментов при воздействии нанановой кислоты (концентрации 0.01, 0.1 и 1 мг/л).

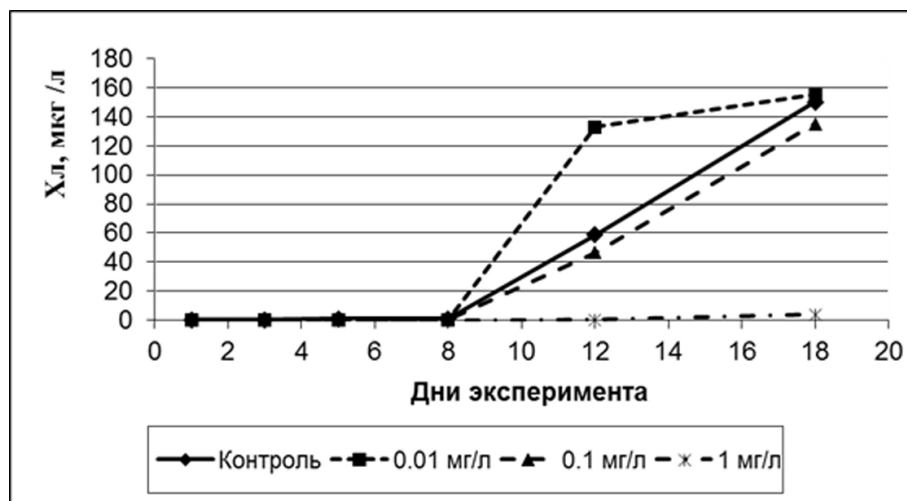


Рис. 2. Медиана концентрации хлорофилла а в 1-й серии экспериментов при воздействии нанановой кислоты (концентрации 0.01, 0.1 и 1 мг/л).

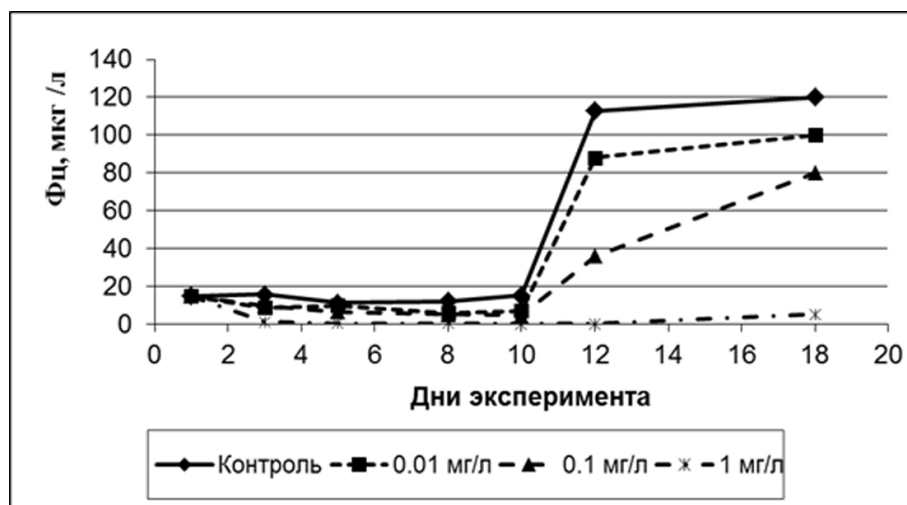


Рис. 3. Медиана концентрации фикоцианина в 1-й серии экспериментов при воздействии нанановой кислоты (концентрации 0.01, 0.1 и 1 мг/л).

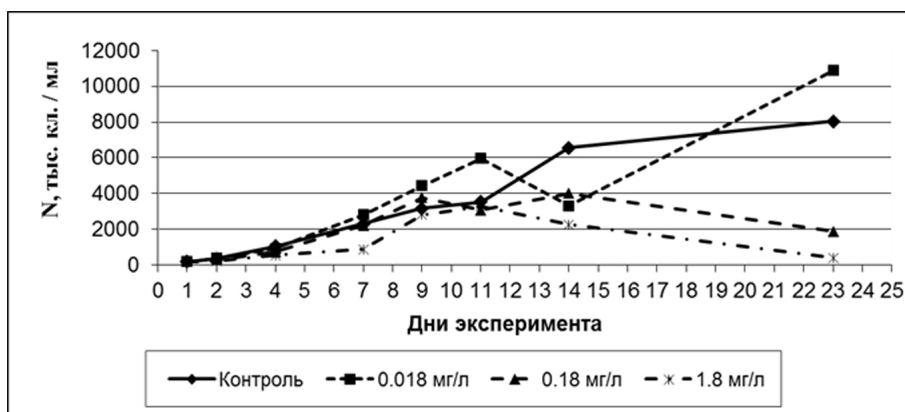


Рис. 4. Медиана численности культуры *S. aquatilis* во 2-й серии экспериментов при воздействии нонановой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).

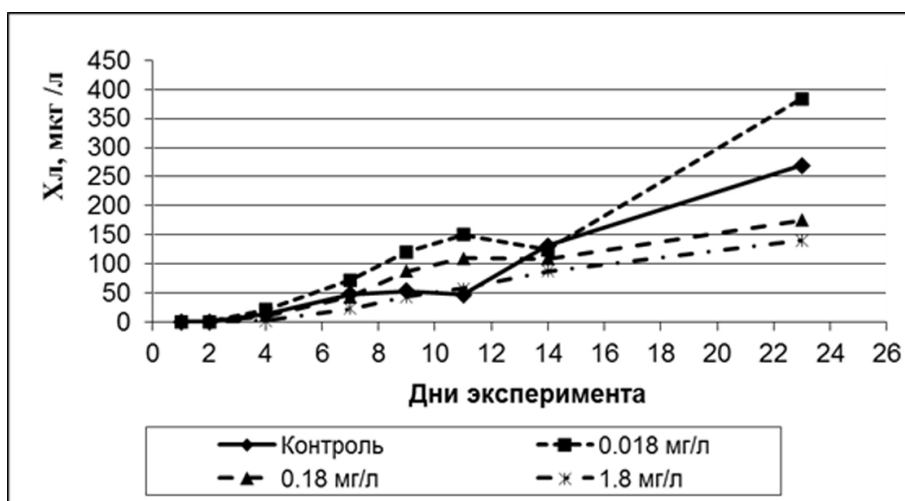


Рис. 5. Медиана концентрации хлорофилла *a* во 2-й серии экспериментов при воздействии нонановой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).

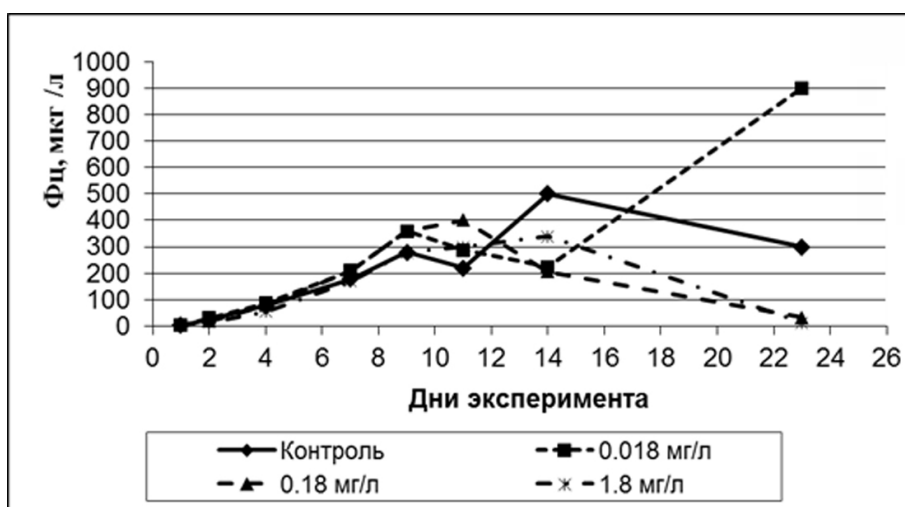


Рис. 6. Медиана концентрации фикоцианина во 2-й серии экспериментов при воздействии нонановой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).

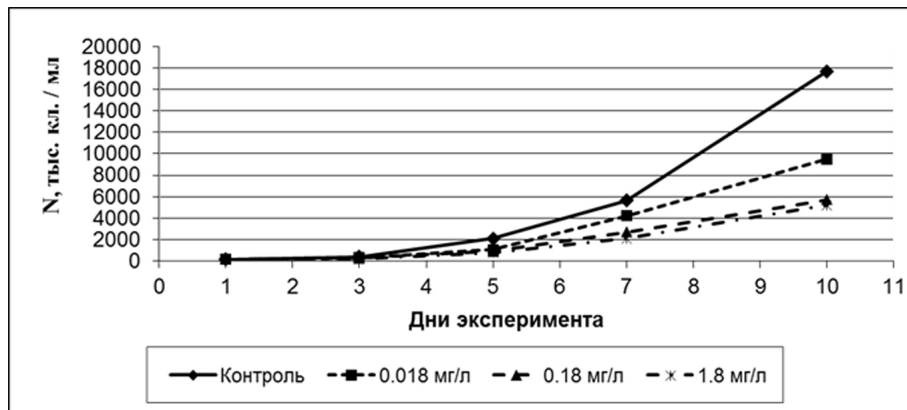


Рис. 7. Медиана численности культуры *S. aquatilis* в экспериментах при воздействии пальмитолеиновой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).

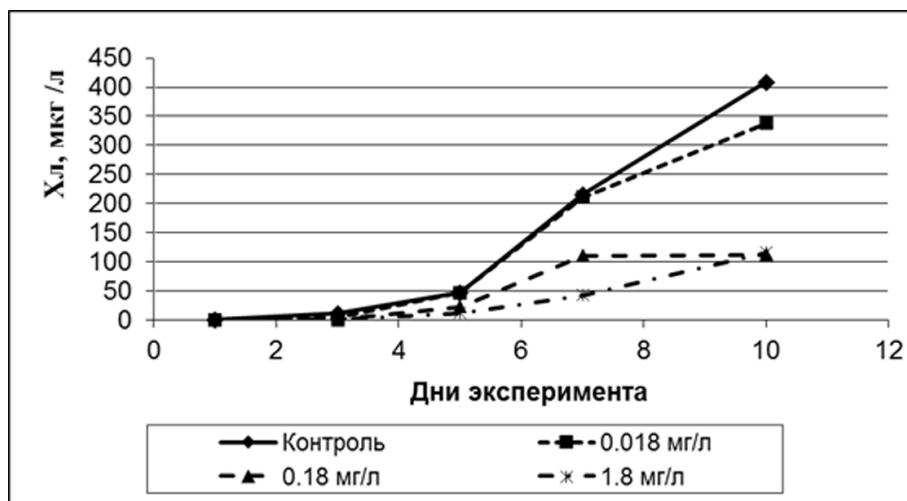


Рис. 8. Медиана концентрации хлорофилла а в экспериментах при воздействии пальмитолеиновой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).

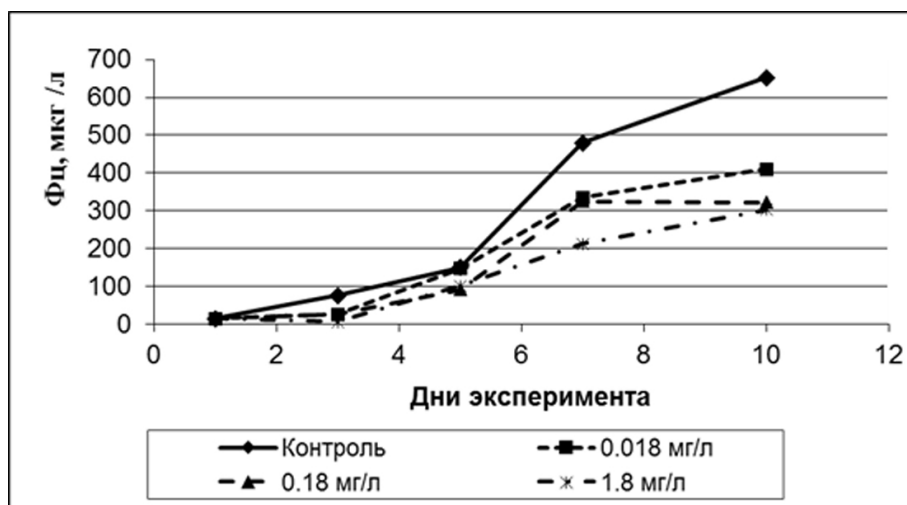


Рис. 9. Медиана концентрации фикоцианина в экспериментах при воздействии пальмитолеиновой кислоты (концентрации 0.018, 0.18 и 1.8 мг/л).



случаев были близки (Табл. 1). При этом к концу эксперимента коэффициенты подавления, полученные при воздействии на цианобактерий нонановой кислотой при максимальных концентрациях 1 и 1.8 мг/л в двух сериях были выше, чем при воздействии пальмитолеиновой кислотой по всем вариантам оценки, кроме оценки по хлорофиллу во 2-й серии экспериментов. Они значительно увеличивались при возрастании концентрации нонановой кислоты 0.1 до 1 мг/л и с 0.18 до 1.8 мг/л в двух сериях экспериментов. В то же время при воздействии пальмитолеиновой кислоты коэффициенты подавления возрастали значительно меньше (Табл. 1). При наибольших из исследованных концентраций нонановой кислоты ее SI, оцененные по прямому счету и по фиоцианину, достигали высоких значений (от 19 до 25), что говорит о перспективах использования этого аллелохимика в качестве компонента при создании альгицидов нового поколения.

Согласно результатам, полученным в работе S Nakai et al. (2006), нонановая кислота может ингибировать рост цианобактерий *Phormidium tenue* и *Microcystis aeruginosa*. Кроме того, ранее (Kurashov et al., 2020) были получены SI в отношении *S. aquatilis* для других насыщенных и ненасыщенных жирных кислот. При разных концентрациях максимальные значения SI составили: для линолевой кислоты – 3–12.5; для тетрадекановой кислоты – 7.5–14.5; для гексадекановой кислоты – 10.4; для гептановой кислоты – 1.9; для октановой кислоты – 3. Таким образом, нонановая кислота показала наиболее высокие уровни подавления *S. aquatilis* среди экспериментально проверенных жирных кислот.

Существует мнение, что чем короче углеродная цепь и число ненасыщенных связей у жирных кислот, тем сильнее выражен ингибирующий эффект в отношении цианобактерий (Tan et al., 2019; Zhang et al., 2009). По-видимому, этот вопрос не столь однозначен. Так, наименьшие значения SI получены для гептановой и октановой кислот, имеющих минимальное число атомов углерода среди исследованных жирных кислот (Kurashov et al., 2020). В настоящем исследовании показано, что нонановая кислота характеризуется наиболее высокими значениями SI, например, по сравнению с тетрадекановой и гексадекановой кислотами. В то же время SI, полученные для ненасыщенных кислот (пальмитолеиновой (настоящее исследование) и линолевой (Kurashov et al., 2020)), были не выше (особенно у пальмитолеиновой), чем у предельных карбоновых кислот (нонановой, тетрадекановой и гексадекановой).

Сообщается, что жирные кислоты с нечетным числом атомов углерода обладают лучшим ингибирующим действием на водоросли, чем кислоты с четным числом (Zhang et al., 2009). Наши результаты согласуются с этим мнением. Так, для нонановой кислоты были зафиксированы более высокие значения SI, чем у всех исследованных кислот с четным количеством атомов углерода.

## Заключение

Результаты настоящего исследования подтверждают перспективность использования жирных кислот как потенциальных агентов для защиты водных экосистем от ОЦЦ и их реабилитации путем включения этих соединений в состав композитных альгицидов нового поколения на основе аллелохимиков водных макрофитов. При этом природное явление аллелопатии лежит в основе новой конвергентной природоподобной технологии предотвращения и остановки развития ОЦЦ в водоемах, требующей детальной разработки и внедрения. Из протестированных в настоящем исследовании жирных кислот нонановая кислота проявила наиболее сильные ингибирующие свойства в отношении цианобактерий, и она может быть рекомендована для включения в состав новых альгицидов.

Следует отметить, что в настоящее время мы находимся лишь в начале пути разработки соответствующей природоподобной технологии. Однако уже сейчас можно наметить наиболее перспективные пути ее развития. Так, транспорт аллелохимиков до их мишеней в водной экосистеме может быть осуществлен, например, не простым добавлением препаратов в воду, а при помощи многообещающей альгинатно-хитозановой микрокапсульной технологии (Ni et al., 2013, 2015). Это позволит имитировать ингибирующее воздействие макрофитов на планктонные водоросли и цианобактерии на протяжении всего вегетационного сезона из-за постепенного высвобождения аллелохимиков из микросфер и тем самым контролировать и предотвращать развитие ОЦЦ.

Таким образом, данные о воздействии жирных кислот и других НОС на жизнедеятельность цианобактерий открывают новые перспективные направления научных исследований и практического использования аллелохимических препаратов водных макрофитов для реабилитации водных экосистем.

## Список литературы

- Громов, Б.В., Титова, Н.Н., 1983. Коллекция культур водорослей лаборатории Микробиологии Биологического института Ленинградского университета. В: Громов, Б.В. (ред.), *Культивирование коллекционных штаммов водорослей*. ЛГУ, Ленинград, СССР, 3–27.
- Гуревич, Ф.А., 1953. К вопросу о протистоцидных свойствах водных и прибрежно-водных растений. *Сборник научных Трудов Красноярского государственного медицинского института* 3, 212–214.
- Гуревич, Ф.А., 1973. Фитонциды водных и прибрежных растений, их роль в гидробиоценозах. *Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук*. Иркутск, СССР, 30 с.
- Курашов, Е.А., Крылова, Ю.В., Батаева, Ю.В., Русанов, А.Г., Сухенко, Л.Т., 2019. Альгицид для подавления развития цианобактерий и зеленых водорослей на основе метаболитов – аллелохимиков водных растений. Патент на изобретение RU 2709308 C1, 17.12.2019. [https://patents.s3.yandex.net/RU2709308C1\\_20191217.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2709308C1_20191217.pdf) (дата обращения: 04.10.2022).
- Antioxidants in plant-microbe interaction, 2021. Singh, H.B., Vaishnav, A., Sayyed, R.Z. (eds.). Springer Singapore, 655 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0>
- Asif, A., Baig, M.A., Siddiqui, M.B., 2021. Role of jasmonates and salicylates in plant allelopathy. In: Aftab, T. and Yusuf, M. (eds), *Jasmonates and salicylates signaling in plants. Signaling and communication in plants*. Springer Cham, Switzerland, 115–127. [http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-75805-9\\_6](http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-75805-9_6)
- Burford, M.A., Gobler, C.J., Hamilton, D.P., Visser, P.M., Lurling, M., Codd, G.A., 2019. Solutions for managing cyanobacterial blooms: A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO (IOC/INF-1382), Paris, 17 p.
- Chemical ecology of plants: allelopathy in aquatic and terrestrial ecosystems, 2002. Mallik, A.U., Inderjit (eds.), Springer, Basel, Switzerland, 272 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-3-0348-8109-8>
- Fink, P., 2007. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* 40, 155–168.
- Hu, H., Hong, Y., 2008. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* 2 (4), 421–438.
- Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H., Visser, P.M., 2018. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* 16, 471–483. <http://www.doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- Koksharova, O.A., 2020. Cyanobacterial VOCs as allelopathic tools. In: Ryu, C.M., Weisskopf, L., Piechulla, B. (eds), *Bacterial volatile compounds as mediators of airborne interactions*. Springer, Singapore, 257–280. [http://www.doi.org/10.1007/978-981-15-7293-7\\_11](http://www.doi.org/10.1007/978-981-15-7293-7_11)
- Kovalchuk, M.V., Naraikin, O.S., 2017. Nature-like technologies – new capacities and new challenges. *Security Index* 22 (3–4), 118–119.
- Kurashov, E., Kapustina, L., Krylova, J., Mitrukova, G., 2020. The use of fluorescence microscopy to assess the suppression of the development of cyanobacteria under the influence of allelochemicals of aquatic macrophytes. In: Grigoryeva, N. (ed.), *Fluorescence methods for investigation of living cells and microorganisms*. IntechOpen, London, 28 p. <http://www.doi.org/10.5772/intechopen.92800>

- Kurashov, E.A., Krylova, J.V., Mitrukova, G.G., Chernova, A.M., 2014. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems. *Contemporary Problems of Ecology* **7** (4), 433–448. <http://www.doi.org/10.1134/S1995425514040064>
- Kurashov, E.A., Mitrukova, G.G., Krylova, J.V., 2018. Interannual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a Floodplain lake with a changeable trophic status. *Contemporary Problems of Ecology* **11** (2), 179–194. <http://www.doi.org/10.1134/S1995425518020063>
- Kurashov, E., Krylova, J., Protopopova, E., 2021. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial “blooms”. In: Pereira, L., Gonçalves, A.M. (eds.), *Plankton Communities*. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95609>
- Li, Y., Xu, L., Letuma, P., Lin, W., 2020. Metabolite profiling of rhizosphere soil of different allelopathic potential rice accessions. *BMC Plant Biology* **20** (265). <http://www.doi.org/10.1186/s12870-020-02465-6>
- Li, Z-H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C-D., Jiang, D-A., 2010. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules* **15** (12), 8933–8952. <http://www.doi.org/10.3390/molecules15128933>
- Macías, F.A., Galindo, J.L.G., García-Díaz, M.D., Galindo, J.C.G., 2008. Allelopathic agents from aquatic ecosystems: potential biopesticides models. *Phytochemistry Reviews* **7**, 155–178. <http://www.doi.org/10.1007/s11101-007-9065-1>
- Mohamed, Z.A., 2017. Macrophytes-cyanobacteria allelopathic interactions and their implications for water resources management – A review. *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters* **63**, 122–132. <http://www.doi.org/10.1016/j.limno.2017.02.006>
- Mushtaq, W., Siddiqui, M.B., Hakeem, K.R., 2020. Allelopathy. Potential for green agriculture. Springer Cham, Switzerland, 69 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-40807-7>
- Nakai, S., Zhou, S., Hosomi, M., Tominaga, M., 2006. Allelopathic growth inhibition of cyanobacteria by reed. *Allelopathy Journal* **18** (2), 277–286.
- Nakai, S., Zou, G., Okuda, T., Nishijima, W., Hosomi, M., Okada, M., 2012. Polyphenols and fatty acids responsible for anti-cyanobacterial allelopathic effects of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum*. *Water Science and Technology* **66**, 993–999.
- Nakai, S., Yamada, S., Hosomi, M., 2005. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia* **543**, 71–78.
- Nature-like and convergent technologies driving the fourth industrial revolution, 2019. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria, 79 p.
- Nezbrytska, I., Usenko, O., Konovets, I., Leontieva, T., Abramiuk, I., Goncharova, M., Bilous, O., 2022. Potential use of aquatic vascular plants to control cyanobacterial blooms: A review. *Water* **14** (11), 1727. <http://www.doi.org/10.3390/w14111727>
- Ni, L.X., Acharya, K., Ren, G.X., Li, S.Y., Li, Y.P., Li, Y., 2013. Preparation and characterization of anti-algal sustained-release granules and their inhibitory effects on algae. *Chemosphere* **91**, 608–615. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.12.064>
- Ni, L.X., Jie, X.T., Wang, P.F., Li, S.Y., Hu, S.Z. et al., 2015. Characterization of unsaturated fatty acid sustained-release microspheres for long-term algal inhibition. *Chemosphere* **120**, 383–390. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.098>

- Śliwińska-Wilczewska, S., Wiśniewska, K.A., Budzałek, G., Konarzewska, Z., 2021. Phenomenon of allelopathy in cyanobacteria. In: Rastogi, R.P. (ed.). *Ecophysiology and biochemistry of cyanobacteria*. Springer Singapore, 225–254. [http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-4873-1\\_11](http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-4873-1_11)
- Šulčius, S., Montvydienė, D., Mazur-Marzec, H., Kasperovičienė, J., Rulevičius, R., Cibulskaitė, Ž., 2017. The profound effect of harmful cyanobacterial blooms: From food-web and management perspectives. *Science of The Total Environment* **609**, 1443–1450. <http://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.253>
- Tan, K., Huang, Z., Ji, R., Qiu, Y., Wang, Z., Liu, J., 2019. A review of allelopathy on microalgae. *Microbiology* **165**, 587–592.
- Zhang, T.T., Zheng, C.Y., He, M., Wu, A.P., Nie, L.W., 2009. Inhibition on algae of fatty acids and the structure-effect relationship. *China Environmental Science* **29**, 274–279.
- Zhironkin, S., Demchenko, S., Kayachev, G., Taran, E., Zhironkina, O., 2019. Convergent and nature-like technologies as the basis for sustainable development in the 21st century. *IVth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences* **105**, 03008. <http://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201910503008>
- Zhu, X., Dao, G., Tao, Y., Zhan, X., Hu, H., 2021. A review on control of harmful algal blooms by plant-derived allelochemicals. *Journal of Hazardous Materials* **401**, 123403. <http://www.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123403>

## References

- Antioxidants in plant-microbe interaction, 2021. Singh, H.B., Vaishnav, A., Sayyed, R.Z. (eds.). Springer Singapore, 655 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-1350-0>
- Asif, A., Baig, M.A., Siddiqui, M.B., 2021. Role of jasmonates and salicylates in plant allelopathy. In: Aftab, T. and Yusuf, M. (eds), *Jasmonates and salicylates signaling in plants. Signaling and communication in plants*. Springer Cham, Switzerland, 115–127. [http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-75805-9\\_6](http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-75805-9_6)
- Burford, M.A., Gobler, C.J., Hamilton, D.P., Visser, P.M., Lurling, M., Codd, G.A., 2019. Solutions for managing cyanobacterial blooms: A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO (IOC/INF-1382), Paris, 17 p.
- Chemical ecology of plants: allelopathy in aquatic and terrestrial ecosystems, 2002. Mallik, A.U., Inderjit (eds.), Springer, Basel, Switzerland, 272 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-3-0348-8109-8>
- Fink, P., 2007. Ecological functions of volatile organic compounds in aquatic systems. *Marine and Freshwater Behaviour and Physiology* **40**, 155–168.
- Gromov, B.V., Titova, N.N., 1983. Kolleksiya kul'tur vodorosley laboratorii Mikrobiologii Biologicheskogo instituta Leningradskogo universiteta [Collection of algae cultures of the Laboratory of Microbiology, Biological Institute, Leningrad University]. In: Gromov, B.V. (ed.), *Kultivirovanie kolleksiionnykh shtammov vodoroslei [Cultivation of collection strains of algae]*. Leningrad State University, Leningrad, USSR, 3–27. (In Russian).
- Gurevich, F.A., 1953. K voprosu o protistotsidnykh svoystvakh vodnykh i pribrezhno-vodnykh rasteniy [On the issue of the protistocidal properties of aquatic and coastal aquatic plants]. *Sbornik nauchnykh trudov Krasnoyarskogo gosudarstvennogo meditsinskogo instituta [Transactions of the Krasnoyarsk State Medical Institute]* **3**, 212–214. (In Russian).

- Gurevich, F.A., 1973. Fitontsidy vodnykh i pribrezhnykh rasteniy, ikh rol' v gidrobiotsenozakh [Phytoncides of aquatic and coastal plants, their role in hydrobiocenoses]. *Thesis of Doctor of Sciences in Biology*. Irkutsk, USSR, 30 p. (in Russian).
- Hu, H., Hong, Y., 2008. Algal-bloom control by allelopathy of aquatic macrophytes – a review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China* 2 (4), 421–438.
- Huisman, J., Codd, G.A., Paerl, H.W., Ibelings, B.W., Verspagen, J.M.H., Visser, P.M., 2018. Cyanobacterial blooms. *Nature Reviews Microbiology* 16, 471–483. <http://www.doi.org/10.1038/s41579-018-0040-1>
- Koksharova, O.A., 2020. Cyanobacterial VOCs as allelopathic tools. In: Ryu, C.M., Weisskopf, L., Piechulla, B. (eds), *Bacterial volatile compounds as mediators of airborne interactions*. Springer, Singapore, 257–280. [http://www.doi.org/10.1007/978-981-15-7293-7\\_11](http://www.doi.org/10.1007/978-981-15-7293-7_11)
- Kovalchuk, M.V., Naraikin, O.S., 2017. Nature-like technologies – new capacities and new challenges. *Security Index* 22 (3–4), 118–119.
- Kurashov, E., Kapustina, L., Krylova, J., Mitrukova, G., 2020. The use of fluorescence microscopy to assess the suppression of the development of cyanobacteria under the influence of allelochemicals of aquatic macrophytes. In: Grigoryeva, N. (ed.), *Fluorescence methods for investigation of living cells and microorganisms*. IntechOpen, London, 28 p. <http://www.doi.org/10.5772/intechopen.92800>
- Kurashov, E.A., Krylova, J.V., Mitrukova, G.G., Chernova, A.M., 2014. Low-molecular-weight metabolites of aquatic macrophytes growing on the territory of Russia and their role in hydroecosystems. *Contemporary Problems of Ecology* 7 (4), 433–448. <http://www.doi.org/10.1134/S1995425514040064>
- Kurashov, E.A., Mitrukova, G.G., Krylova, J.V., 2018. Interannual variability of low-molecular metabolite composition in *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae) from a Floodplain lake with a changeable trophic status. *Contemporary Problems of Ecology* 11 (2), 179–194. <http://www.doi.org/10.1134/S1995425518020063>
- Kurashov, E.A., Krylova, Yu.V., Batayeva, Yu.V., Rusanov, A.G., Sukhenko, L.T., 2019. Al'gitsid dlya podavleniya razvitiya tsianobakteriy i zelenykh vodorosley na osnove metabolitov – allelokhemikov vodnykh rasteniy [Algaecide to suppress the development of cyanobacteria and green algae based on metabolites – allelochemicals of aquatic plants]. Patent na izobreteniyе RU 2709308 C1, 17.12.2019. [https://patents.s3.yandex.net/RU2709308C1\\_20191217.pdf](https://patents.s3.yandex.net/RU2709308C1_20191217.pdf) (accessed: 04.10.2022).
- Kurashov, E., Krylova, J., Protopopova, E., 2021. The use of allelochemicals of aquatic macrophytes to suppress the development of cyanobacterial “blooms”. In: Pereira, L., Gonçalves, A.M. (eds.), *Plankton Communities*. IntechOpen, London. <https://doi.org/10.5772/intechopen.95609>
- Li, Y., Xu, L., Letuma, P., Lin, W., 2020. Metabolite profiling of rhizosphere soil of different allelopathic potential rice accessions. *BMC Plant Biology* 20 (265). <http://www.doi.org/10.1186/s12870-020-02465-6>
- Li, Z-H., Wang, Q., Ruan, X., Pan, C-D., Jiang, D-A., 2010. Phenolics and plant allelopathy. *Molecules* 15 (12), 8933–8952. <http://www.doi.org/10.3390/molecules15128933>
- Macías, F.A., Galindo, J.L.G., García-Díaz, M.D., Galindo, J.C.G., 2008. Allelopathic agents from aquatic ecosystems: potential biopesticides models. *Phytochemistry Reviews* 7, 155–178. <http://www.doi.org/10.1007/s11101-007-9065-1>
- Mohamed, Z.A., 2017. Macrophytes-cyanobacteria allelopathic interactions and their implications for water resources management – A review. *Limnologica – Ecology and Management of Inland Waters* 63, 122–132. <http://www.doi.org/10.1016/j.limno.2017.02.006>

- Mushtaq, W., Siddiqui, M.B., Hakeem, K.R., 2020. Allelopathy. Potential for green agriculture. Springer Cham, Switzerland, 69 p. <http://www.doi.org/10.1007/978-3-030-40807-7>
- Nakai, S., Zhou, S., Hosomi, M., Tominaga, M., 2006. Allelopathic growth inhibition of cyanobacteria by reed. *Allelopathy Journal* **18** (2), 277–286.
- Nakai, S., Zou, G., Okuda, T., Nishijima, W., Hosomi, M., Okada, M., 2012. Polyphenols and fatty acids responsible for anti-cyanobacterial allelopathic effects of submerged macrophyte *Myriophyllum spicatum*. *Water Science and Technology* **66**, 993–999.
- Nakai, S., Yamada, S., Hosomi, M., 2005. Anti-cyanobacterial fatty acids released from *Myriophyllum spicatum*. *Hydrobiologia* **543**, 71–78.
- Nature-like and convergent technologies driving the fourth industrial revolution, 2019. United Nations Industrial Development Organization, Vienna, Austria, 79 p.
- Nezbrytska, I., Usenko, O., Konovets, I., Leontieva, T., Abramiuk, I., Goncharova, M., Bilous, O., 2022. Potential use of aquatic vascular plants to control cyanobacterial blooms: A review. *Water* **14** (11), 1727. <http://www.doi.org/10.3390/w14111727>
- Ni, L.X., Acharya, K., Ren, G.X., Li, S.Y., Li, Y.P., Li, Y., 2013. Preparation and characterization of anti-algal sustained-release granules and their inhibitory effects on algae. *Chemosphere* **91**, 608–615. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.12.064>
- Ni, L.X., Jie, X.T., Wang, P.F., Li, S.Y., Hu, S.Z. et al., 2015. Characterization of unsaturated fatty acid sustained-release microspheres for long-term algal inhibition. *Chemosphere* **120**, 383–390. <http://www.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.098>
- Śliwińska-Wilczewska, S., Wiśniewska, K.A., Budzałek, G., Konarzewska, Z., 2021. Phenomenon of allelopathy in cyanobacteria. In: Rastogi, R.P. (ed.). *Ecophysiology and biochemistry of cyanobacteria*. Springer Singapore, 225–254. [http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-4873-1\\_11](http://www.doi.org/10.1007/978-981-16-4873-1_11)
- Šulčius, S., Montvydienė, D., Mazur-Marzec, H., Kasperovičienė, J., Rulevičius, R., Cibulskaitė, Ž., 2017. The profound effect of harmful cyanobacterial blooms: From food-web and management perspectives. *Science of The Total Environment* **609**, 1443–1450. <http://www.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.253>
- Tan, K., Huang, Z., Ji, R., Qiu, Y., Wang, Z., Liu, J., 2019. A review of allelopathy on microalgae. *Microbiology* **165**, 587–592.
- Zhang, T.T., Zheng, C.Y., He, M., Wu, A.P., Nie, L.W., 2009. Inhibition on algae of fatty acids and the structure-effect relationship. *China Environmental Science* **29**, 274–279.
- Zhironkin, S., Demchenko, S., Kayachev, G., Taran, E., Zhironkina, O., 2019. Convergent and nature-like technologies as the basis for sustainable development in the 21st century. *IVth International Innovative Mining Symposium. E3S Web of Conferences* **105**, 03008. <http://www.doi.org/10.1051/e3sconf/201910503008>
- Zhu, X., Dao, G., Tao, Y., Zhan, X., Hu, H., 2021. A review on control of harmful algal blooms by plant-derived allelochemicals. *Journal of Hazardous Materials* **401**, 123403. <http://www.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123403>