

Научная статья
УДК 574.24, 582.232.5, 546.562
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.010

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЗЕЛЁНЫХ ВОДОРОСЛЕЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ МЕДИ

**Юлия Валерьевна Невзорова¹, Денис Александрович Давыдов²,
Вера Вячеславовна Редькина³**

^{1,3}Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

²Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН, Апатиты, Россия

¹y.nevzorova@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4756-6026>

²d.davydov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0866-4747>

³<https://orcid.org/0000-0002-4908-5098>

Аннотация

Проведён скрининг на устойчивость к меди 9 штаммов зелёных водорослей и цианобактерий, выделенных из наземных местообитаний. Показано, что штаммы, подвергшиеся воздействию высоких уровней меди (3 мг/л и выше), демонстрировали значительные изменения, включая уменьшение размера клеток и разрушение пигментов хлорофилла. Выявлен штамм *Nostoc* sp. LK-20-1, демонстрирующий устойчивость к меди на уровне 2 мг/л. Данный штамм перспективен для биоремедиации территорий, загрязнённых тяжёлыми металлами.

Ключевые слова:

тяжёлые металлы, *Nostoc*, Cu, токсичность, морфология клеток, биотестирование, флуоресценция хлорофилла

Благодарности:

исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-14-20011, <https://rscf.ru/project/25-14-20011/>.

Для цитирования:

Невзорова Ю. В., Давыдов Д. А., Редькина В. В. Морфологические изменения зелёных водорослей и цианобактерий при длительном воздействии меди // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 155–167. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.010.

Original article

MORPHOLOGICAL CHANGES IN GREEN ALGAE AND CYANOBACTERIA UNDER LONG-TERM EXPOSURE TO COPPER

Yulia V. Nevzorova¹, Denis A. Davydov², Vera V. Redkina³

^{1,3}Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia

²Polar-Alpine Botanical Garden-Institute of the KSC RAS, Apatity, Russia

¹y.nevzorova@ksc.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4756-6026>

²d.davydov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0866-4747>

³<https://orcid.org/0000-0002-4908-5098>

Abstract

This study presents a screening of microalgae strains for their resistance to heavy metals, specifically copper. Various species of green algae and cyanobacteria were examined, identifying strains with increased tolerance to metal contamination. Results indicate that at copper concentrations above 3 mg/L, growth is completely inhibited, while *Nostoc* sp. LK-20-1 exhibits survival and adaptation capabilities. The study also explored the physiological effects of copper exposure on microalgal morphology. In strains exposed to high copper levels (3 mg/L and above), significant changes were observed, including reduced cell size and the breakdown of chlorophyll pigments. Interestingly, *Nostoc* sp. LK-20-1 continued to form biomass in high copper environments, even though the cells exhibited minor pigmentation defects. This strain was further tested for its ability to grow across a range of copper concentrations (from 10 µg/L to 2 mg/L), revealing consistent growth at lower concentrations and partial recovery at higher levels. This strain shows potential for bioremediation of contaminated areas, offering prospects for environmentally safe decontamination technologies.

Keywords:

heavy metals, *Nostoc*, Cu, toxicity, cell morphology, bioassay, chlorophyll fluorescence

Acknowledgments:

Work was supported by the Russian Science Foundation according to the project No. 25-14-20011, <https://rscf.ru/project/25-14-20011/>.

For citation:

Nevzorova Y. V., Davydov D. A., Redkina V. V. Morphological changes in green algae and cyanobacteria under long-term exposure to copper // Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3. P. 155–167. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.010.

Введение

Микроводоросли представляют собой разнообразную группу фотосинтетических микроорганизмов, как прокариотических, так и эукариотических, обитающих в водной и наземной среде [1]. Эти организмы играют важную роль в экосистемах и являются ценным источником веществ для пищевой и косметической промышленности, а также для медицины и биотехнологии [2]. Одним из перспективных направлений их применения является фиторемедиация — процесс очистки загрязнённых территорий с использованием водорослей [3].

В связи с бурным развитием промышленности загрязнение тяжёлыми металлами (ТМ) становится особо актуальной проблемой [4]. ТМ представляют серьёзную угрозу для экосистем и здоровья человека, поскольку способны накапливаться в организмах, вызывая токсические эффекты и нарушая физиологические процессы [5].

Мурманская область, расположенная в российской Арктике, отличается высокой степенью индустриализации. Цветная металлургия, включая производство меди и никеля, приводит к значительному загрязнению окружающей среды. Основными источниками загрязнения медью в области являются выбросы медно-никелевых заводов, таких как комбинат «Североникель» [6].

Загрязняющие вещества, включая медь, обнаруживаются в высоких концентрациях в атмосферных осадках и почвенных водах, значительно превышающих фоновые уровни, что приводит к деградации растительного покрова и образованию промышленных пустошей [7]. Экосистемы Крайнего Севера имеют замедленные процессы энерго- и массообмена из-за климатических условий, что делает их особенно уязвимыми к антропогенным воздействиям [8]. В связи с этим целью данного исследования является выявление устойчивых к ТМ штаммов зелёных водорослей и цианобактерий, которые могут быть перспективны для использования в биоремедиации загрязнённых северных территорий.

Материал и методы

Объектами исследования выступали штаммы микроводорослей. Зелёные водоросли *Scenedesmus* sp., *Microthamnion* sp., *Monoraphidium* sp. из коллекции культур лаборатории экологии микроорганизмов Института проблем промышленной экологии Севера (ИППЭС) определены до родов по морфологии. Из коллекции культур Полярно-альпийского ботанического сада-института им. Н.А. Аврорина (ПАБСИ)¹ использовали 6 штаммов цианобактерий рода *Nostoc*: LK-20-1, KK-12, 610010, 610016, 610054, 4176 (табл. 1).

Среды, стоковые растворы и посуду стерилизовали автоклавированием при 0,5 атмосферы в течение 30 мин. Стекланные колбы, используемые для роста культур в средах с повышенным содержанием меди, дополнительно обрабатывали 10 %-м раствором азотной кислоты для удаления следовых количеств металлов.

Перед началом эксперимента произвели пересев культур в колбы объёмом 100 мл, содержащие 50 мл жидкой среды BG-11. Культуры поддерживались при искусственном освещении с фотопериодом 16 ч света 35 мкмоль фотонов м⁻² с⁻¹ / 8 ч темноты при 22 °С.

В тесте на токсичность использовалась культура микроводорослей спустя месяц после посева. В стерильные колбы объёмом 100 мл добавляли 50 мл среды с различным содержанием меди. Посев производили в асептических условиях добавлением к опытному раствору 1 мл инокулята водорослей (10⁸–10⁹ кл/мл).

¹ URL: <https://isling.org/cyano> (дата обращения: 17.06.2024).

Таблица 1

Характеристика используемых в работе штаммов
Characteristics of the strains used in the work

Вид	Среда	Точка отбора	Условия
<i>Scenedesmus</i> sp.	Почва	Мурманская область, муниципальный округ Мончегорск, гора Ньюдуйвенч (N67.901259, E2.933299)	Загрязнённые
<i>Monoraphidium</i> sp.	Почва	Мурманская область, муниципальный округ Мончегорск, гора Ньюдуйвенч (N67.901259, E32.933299)	То же
<i>Microthamnion</i> sp.	Почва	Мурманская область, Заполярный. Импактная зона комбината «Печенганикель» (3 км) (N69.409786, E30.800459)	«
<i>Nostoc</i> sp. КК-12	Богатая кальцием порода	Полуостров Камчатка, вулкан Толбачик, шлаковые конусы, в местах фумарольной активности. Вулканические породы покрыты биоплёнками (N55.70919, E160.275547)	«
<i>Nostoc</i> sp. LK-20-1	Фумаролы на изменённом базальте	Полуостров Камчатка, вулкан Толбачик, шлаковые конусы, в местах фумарольной активности. Вулканические породы покрыты биоплёнками (N55.696201, E160.245077)	«
<i>Nostoc</i> sp. 610010	Почва	Антарктида, оазис Ширмахера, станция Новолазаревская. Район озера Чёрное, на берегу озера, корочки на грунте (S –70.76258, E11.78061)	Фоновые
<i>Nostoc</i> sp. 610016	Скальная порода	Мурманская область, хребет Сальные тундры, склон г. Вуим северной эксп., Горная тундра. Глыба (N68.13249, E31.28249)	То же
<i>Nostoc</i> sp. 610054	Почва	Антарктида, оазис Ширмахера, станция Новолазаревская. Район озера Чёрное, на берегу озера, корочки на грунте (S –70.76258, E11.78061)	«
<i>Nostoc</i> sp. 4176	Шлак	Мурманская область, 30-летний золошлакоотвал Апатитской ТЭЦ, корочки на почве (N67.598548, E33.473342)	Загрязнённые

Градиент концентраций меди (от 0,5 до 15 мг/л с перерасчётом на ион меди) получали добавлением различных объёмов стока ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 300 мг/л) к питательной среде BG-11. На первом этапе эксперимента реакцию штаммов тестировали на концентрации 3–15 мг/л, на втором — 0,5–2 мг/л). Эксперимент содержал две повторности. В качестве контроля выступала стерильная среда без добавления раствора купороса.

Спустя месяц оценивали способность к выживанию по совокупности трёх критериев: видимому приросту биомассы (способность к размножению), возобновлению роста при наступлении благоприятных условий (для исключения бактериостатического эффекта), автофлуоресценции хлорофилла (индикатора жизнеспособности клеток). Флуоресценция хлорофилла широко используется в экологических исследованиях для оценки фотосинтетической активности и стрессового состояния микроводорослей [9]. Прирост биомассы оценивался визуально. Флуоресценцию хлорофилла оценивали

на микроскопе Olympus CX-41 (Olympus, Япония) с камерой ProgRes CT3. Способность к восстановлению роста определялась путём пересева образцов на твёрдую питательную среду BG-11.

Для визуализации данных использовалась тепловая карта, созданная с помощью языка программирования R с использованием пакета ggplot2. Данные были преобразованы в бинарный формат, где значение 1 указывало на обнаружение признака, а значение 0 — на его отсутствие.

Изменение морфологии отмечали с помощью микроскопа AxioScope A1 (Carl Zeiss, Йена, Германия), оснащённого камерой Olympus DP23.

В дополнительной серии экспериментов оценивали ингибирование флуоресценции штаммов *Scenedesmus* sp. и *Nostoc* sp. LK-20-1. Предварительно биомассу сгущали путём центрифугирования в течение 5 мин при 6 тыс. об/мин. В эппендорфы со средой Z8 и градиентом концентраций меди от 5 мкг/л до 10 мг/л переносили 2 мкл биомассы с достижением конечного объёма раствора в 1 мл. Спустя сутки регистрировали флуоресценцию на микроскопе Olympus CX-41 (Olympus, Япония) с камерой ProgRes CT3.

Результаты и обсуждение

Для питьевой воды ПДК меди составляет 1,0 мг/л, что является строгим стандартом, установленным в санитарных правилах СанПиН 2.1.4.1074-01. Для почв предельно допустимая концентрация меди составляет 3,0 мг/кг, с учётом различных показателей вредности [10]. В рамках данного исследования были изучены концентрации меди, превышающие ПДК до 15 раз. В сильно загрязнённых районах содержание меди может достигать значительно более высоких значений, до 469 мг/кг в верхних слоях почвы в окрестностях г. Мончегорск [11].

Медь в малых дозах является необходимым микроэлементом для клеток микроводорослей, однако при превышении пороговых уровней она становится токсичной [12, 13]. Индикаторы стресса микроводорослей могут проявляться в разнообразных формах, включая изменения морфологии клеток и физиологических параметров [14].

За 30 дней первого этапа эксперимента при концентрации меди выше 3 мг/л не наблюдалось прироста биомассы. Медь показала угнетающий эффект на клетки микроводорослей, приводя к полной или частичной утрате клеточного содержимого, в том числе пигментов, к уменьшению размера клеток или их полному обезвоживанию, ингибированию автофлуоресценции хлорофилла и невозможности восстановить рост при наступлении благоприятных условий.

Для всех исследуемых штаммов при воздействии 3 мг/л меди наблюдали изменения в сравнении с контролем: уменьшение клеток в объёме, частичную или полную потерю пигментации. У *Microthamnion* sp. (рис. 1Б) в уцелевших клетках, окружённых остатками разрушенных структур, наблюдалось отделение протопласта от стенок.

У штамма *Scenedesmus* sp. (рис. 1Г) наблюдалось выраженное отрицательное воздействие меди, предположительно связанное с осмотическим стрессом и дегидратацией клеток [15].

При концентрации меди 15 мг/л *Monoraphidium* sp., *Nostoc* sp. 610010 (рис. 1) и *Nostoc* sp. LK-20-1 (рис. 2) сохранили целостность клеточных оболочек и внутреннего содержимого; средний размер клеток соответствовал контрольным. При этом способность к росту у данных штаммов в культуре с высокой концентрацией ТМ не наблюдалась. Пересев на обычную среду после инкубации с ТМ также не привёл к возобновлению роста данных штаммов, что свидетельствует о невозможности сохранять жизнеспособность в условиях с высокой концентрацией меди.

Nostoc sp. КК-12 демонстрировал деградацию независимо от концентраций меди; содержимое при 15 мг/л частично окрашено, что может быть вызвано отложением солей меди. Штамм *Nostoc* sp. LK-20-1 при воздействии 3 мг/л формировал скопления бесформенных клеток, в то время как при концентрации 15 мг/л размеры клеток соответствовали контрольным, сохранена нитчатая структура таллома, что, по всей видимости, объясняется быстрой гибелью клеток и сохранением внешних структур гликокаликса.

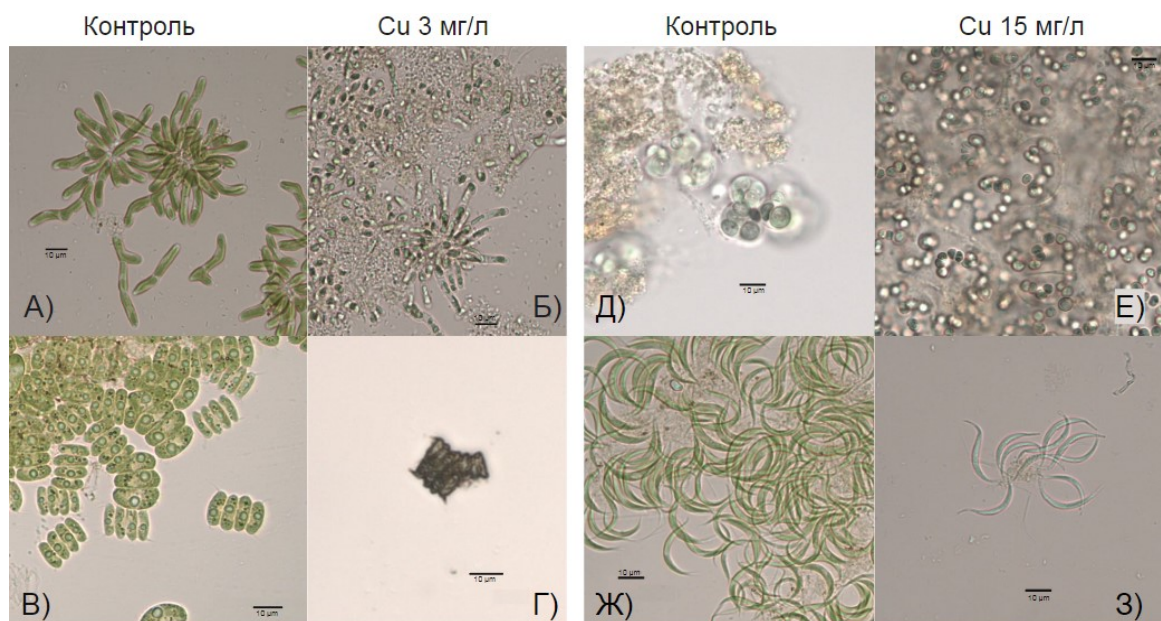


Рис. 1. Морфология штаммов микроводорослей при культивировании с высокими концентрациями меди: А — *Microthamnion* sp., контрольная проба; Б — *Microthamnion* sp. под воздействием 3 мг/л меди спустя месяц экспозиции; В — *Scenedesmus* sp., контрольная проба; Г — *Scenedesmus* sp. под воздействием 3 мг/л меди после месячной экспозиции; Д–Е — *Nostoc* sp. 610010 контроль и обработка 15 мг/л соответственно; Ж–З — *Monoraphidium* sp. контроль и обработка 15 мг/л соответственно

Fig. 1. Morphological changes in microalgae strains following long-term exposure to high copper concentrations. (A, B) *Microthamnion* sp.: (A) control and (B) treated with 3 mg/L Cu for one month. (C, D) *Scenedesmus* sp.: (C) control and (D) treated with 3 mg/L Cu for one month. (E, F) *Nostoc* sp. 610010: (E) control and (F) treated with 15 mg/L Cu. (G, H) *Monoraphidium* sp.: (G) control and (H) treated with 15 mg/L Cu

Отдельные цианобактерии (*Nostoc* sp. 610010, *Nostoc* sp. 610016, *Nostoc* sp. КК-12, *Nostoc* sp. ЛК-20-1, *Nostoc* sp. 4176) продемонстрировали прирост биомассы при концентрациях меди в диапазоне от 1 до 2 мг/л, однако к концу эксперимента проявляли явные признаки стресса. Единственный штамм, *Nostoc* sp. ЛК-20-1, выживший при концентрации меди 2 мг/л, возобновил свой рост в опытной колбе на поверхности раздела фаз воздух-вода спустя 3 месяца после завершения эксперимента (рис. 3). Через 6 месяцев наблюдался рост во всей толще среды, что может указывать на наличие специфических механизмов приспособления к условиям стресса, вызванного ТМ.

На микроскопическом уровне культура данного штамма продемонстрировала признаки относительно молодой и здоровой популяции клеток. Замечено, что при экспозиции к концентрации меди 2 мг/л (рис. 3А) наблюдались признаки адаптации, хотя и со снижением скорости роста по сравнению с контрольной группой (рис. 3В).

Культура, подвергшаяся воздействию меди в течение 10 месяцев (рис 3Б), продемонстрировала сохранение пигментации, что является важным индикатором целостности клеток.

Ответ в виде изменения морфологии, по-видимому, не специфичен к определённому виду металлов. Так, световая микроскопия позволяет выявить плазмолиз, а также изменение размеров клеток: как увеличение, так и уменьшение в объёме [15, 16]. Под воздействием сублетальных уровней меди в клетках образуются активные формы кислорода, которые повреждают клеточные мембраны и органеллы, нарушая осмотическую регуляцию [17].

Так как для большинства протестированных штаммов, несмотря на наблюдаемую при световой микроскопии пигментацию клеточного содержимого (см. рис. 1Б, рис. 2), клетки продемонстрировали отсутствие автофлуоресценции хлорофилла, была проведена дополнительная серия экспериментов с уменьшенным временем воздействия — в течение суток (рис. 4).

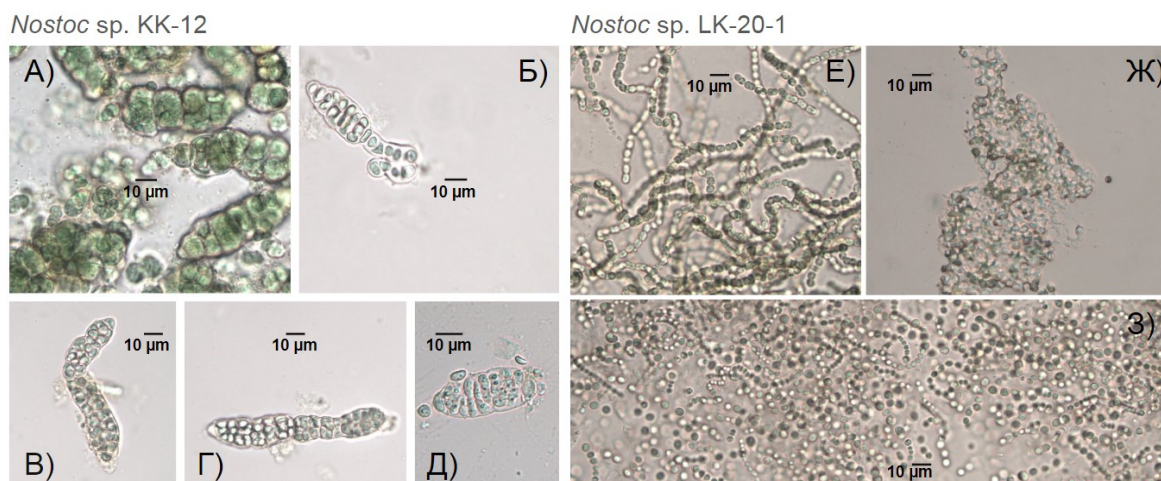


Рис. 2. Морфология колоний цианобактерий рода *Nostoc*. А–Д — штамм *Nostoc* sp. KK-12, А — контроль (без обработки меди), Б–Д — обработка медью в концентрациях 3, 6, 9 и 15 мг/л соответственно;

Е–З — штамм *Nostoc* sp. LK-20-1, Е — контроль (без обработки меди), Ж и З — 3 и 15 мг/л

Fig. 2. Morphology of *Nostoc* cyanobacterial colonies under copper stress. (A-E) strain KK-12: (A) control and (B-E) treated with 3, 6, 9, and 15 mg/L Cu, respectively. (F-H) strain LK-20-1: (F) control, (G) 3 mg/L Cu, (H) 15 mg/L Cu

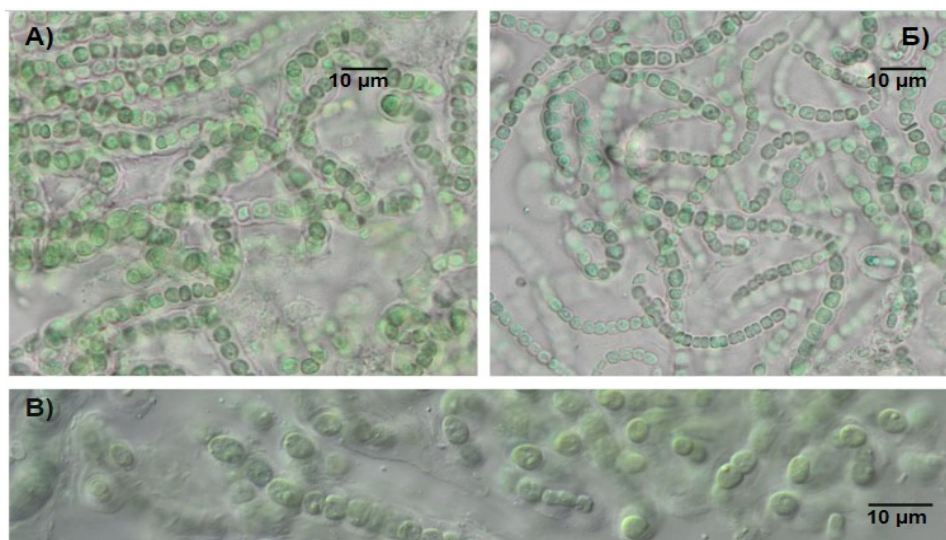


Рис. 3. Морфология штамма *Nostoc* sp. LK-20-1, адаптировавшегося к повышенному содержанию меди:

А — состояние культуры спустя месяц при росте на среде с содержанием 2 мг/л меди;

Б — состояние культуры спустя 10 месяцев при росте на среде с содержанием 2 мг/л меди;

В — состояние культуры спустя месяц на среде BG-11 без добавочной меди (контроль)

Fig. 3. Morphology of the copper-adapted *Nostoc* sp. LK-20-1 strain. (A) Culture grown for one month on medium with 2 mg/L Cu. (B) Culture after 10 months of adaptation on medium with 2 mg/L Cu. (C) Control culture grown for one month on standard BG-11 medium without copper addition

При инкубации с различными концентрациями меди наблюдались заметные изменения в активности клеток. В контрольной группе (рис. 4, первый ряд, первый столбец) клетки демонстрировали выраженную автофлуоресценцию, что может свидетельствовать о наличии активных метаболических процессов. Однако при добавлении меди в концентрациях 2,5 мкг/мл (второй ряд, первый столбец) и 10 мкг/мл (третий ряд, первый столбец) наблюдается заметное снижение интенсивности.

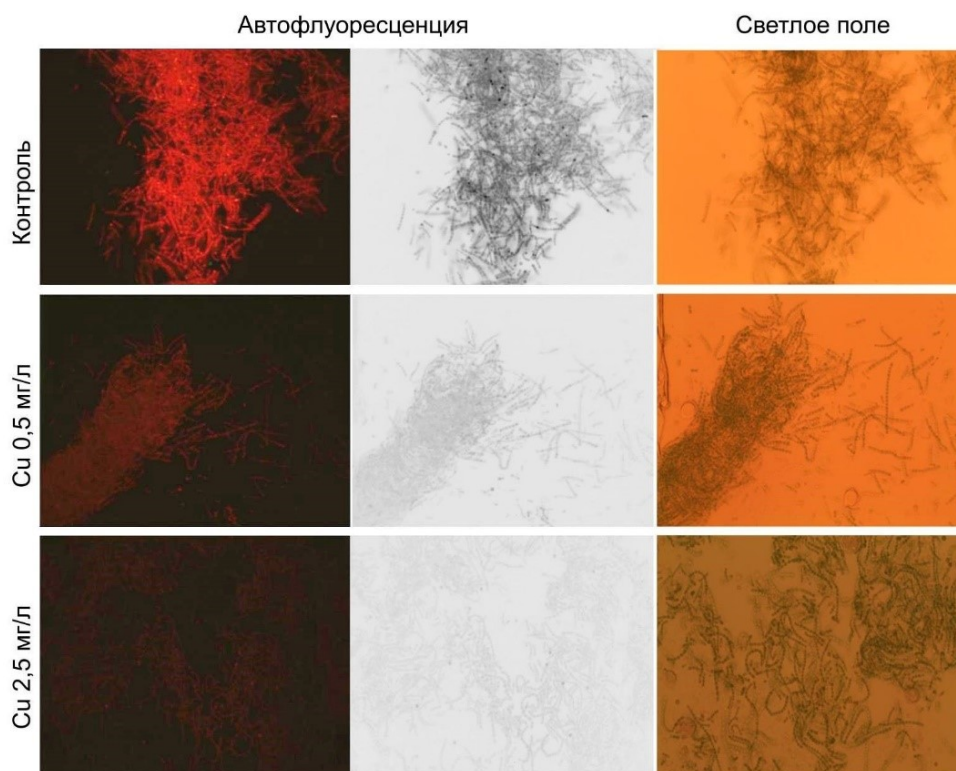


Рис. 4. Автофлуоресценция штамма *Nostoc* sp. LK-20-1 без воздействия меди (контроль) и под воздействием меди в концентрации 0,5 и 2,5 мг/л в течение суток. Снимки сделаны на микроскопе Olympus CX-41 (Olympus, Япония) с камерой ProgRes CT3, экспозиция — 280 мс, увеличение — 600х

Fig. 4. Autofluorescence of the *Nostoc* sp. LK-20-1 strain under copper exposure. Images show the control (no copper) and treatments with 0.5 and 2.5 mg/L Cu over a 24-hour period. Images were acquired using an Olympus CX-41 microscope (Olympus, Japan) equipped with a ProgRes CT3 camera. Acquisition settings: 280 ms exposure, 600x magnification

Выраженный негативный эффект меди на интенсивность флуоресценции штамма *Nostoc* sp. LK-20-1 наблюдался начиная с минимальной тестовой концентрации (10 мкг) (рис. 5).

Анализ реакции штамма *Scenedesmus* sp. показал, что определённые клетки всё ещё сохраняют уровень флуоресценции, но с заметным уменьшением интенсивности (рис. 6, третий ряд). Наличие у зелёных водорослей мембранных органелл, таких как хлоропласты и вакуоли, может играть решающую роль в смягчении токсических эффектов.

Флуоресценция фотосинтетических пигментов является специфическим ответом, причём пики интенсивности отличаются для штаммов и могут быть использованы для таксономической диагностики [18]. При воздействии тяжёлых металлов, как правило, интенсивность флуоресценции значительно снижается [19], ответ цианобактерий отличается от такового у зелёных водорослей. У цианобактерий основными пигментами, ответственными за фотосинтетическую активность, являются фикобилины, а хлорофилл долго не распадается в мёртвых клетках даже после их разрушения [20].

На рис. 7 приведена сводная тепловая карта всех протестированных штаммов с качественной оценкой их состояния.

Результаты показывают, что концентрации меди в диапазоне от 1 до 2 мг/л находятся на уровне, допускающем жизнеспособность клеток исследуемых организмов. Это наблюдение объясняет незначительное увеличение биомассы, хотя потеря пигментации к концу эксперимента указывает на наличие стресса среди клеток, что подтверждается их медленной деградацией. В то же время

сравнение морфологии при воздействии более высоких концентрациях меди (15 мг/л) может свидетельствовать о быстрой гибели клеток, что связано с выраженным токсическим эффектом меди.

Как показали исследования Ж. Леви [Levy] с соавторами, токсичность меди не зависит от биотических факторов, таких как таксономическое положение, тип клеточной стенки или соотношение объёма к площади [21]. Это указывает на то, что устойчивость к меди является специфичной, и подчёркивает важность проверки различных штаммов в пределах одного рода.

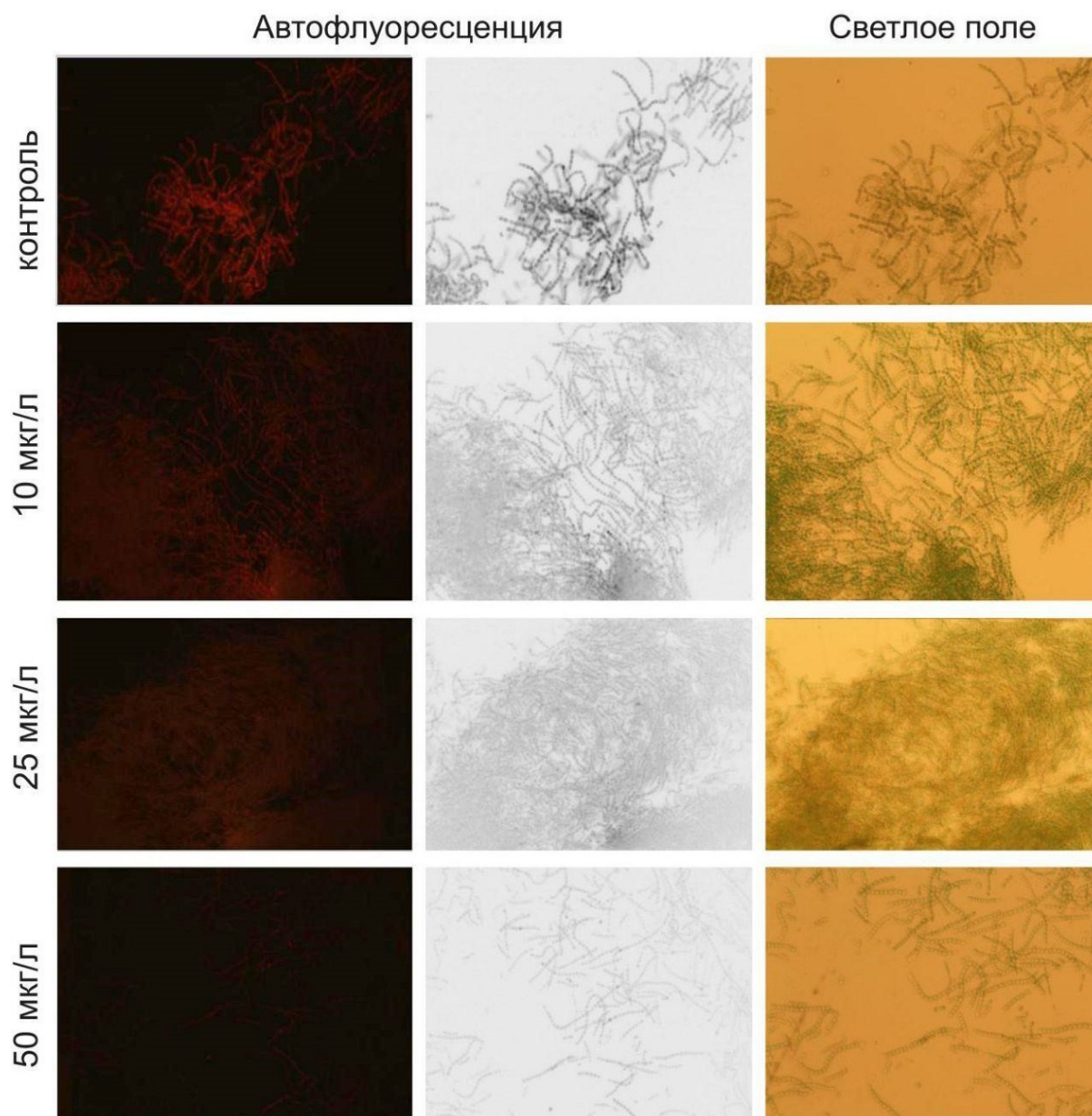


Рис. 5. Автофлуоресценция штамма *Nostoc* sp. LK-20-1 без воздействия меди (контроль) и под её воздействием в концентрации 10, 25 и 50 мкг/л в течение суток. Снимки сделаны на микроскопе Olympus CX-41 (Olympus, Япония) с камерой ProgRes CT3, экспозиция — 160 мс, увеличение — 600х.

Fig. 5. Autofluorescence of the *Nostoc* sp. LK-20-1 strain under copper exposure. Images show the control (no copper) and treatments with 10, 25, and 50 µg/L Cu over a 24-hour period. Images were acquired using an Olympus CX-41 microscope (Olympus, Japan) equipped with a ProgRes CT3 camera.

Acquisition settings: 160 ms exposure, 600x magnification

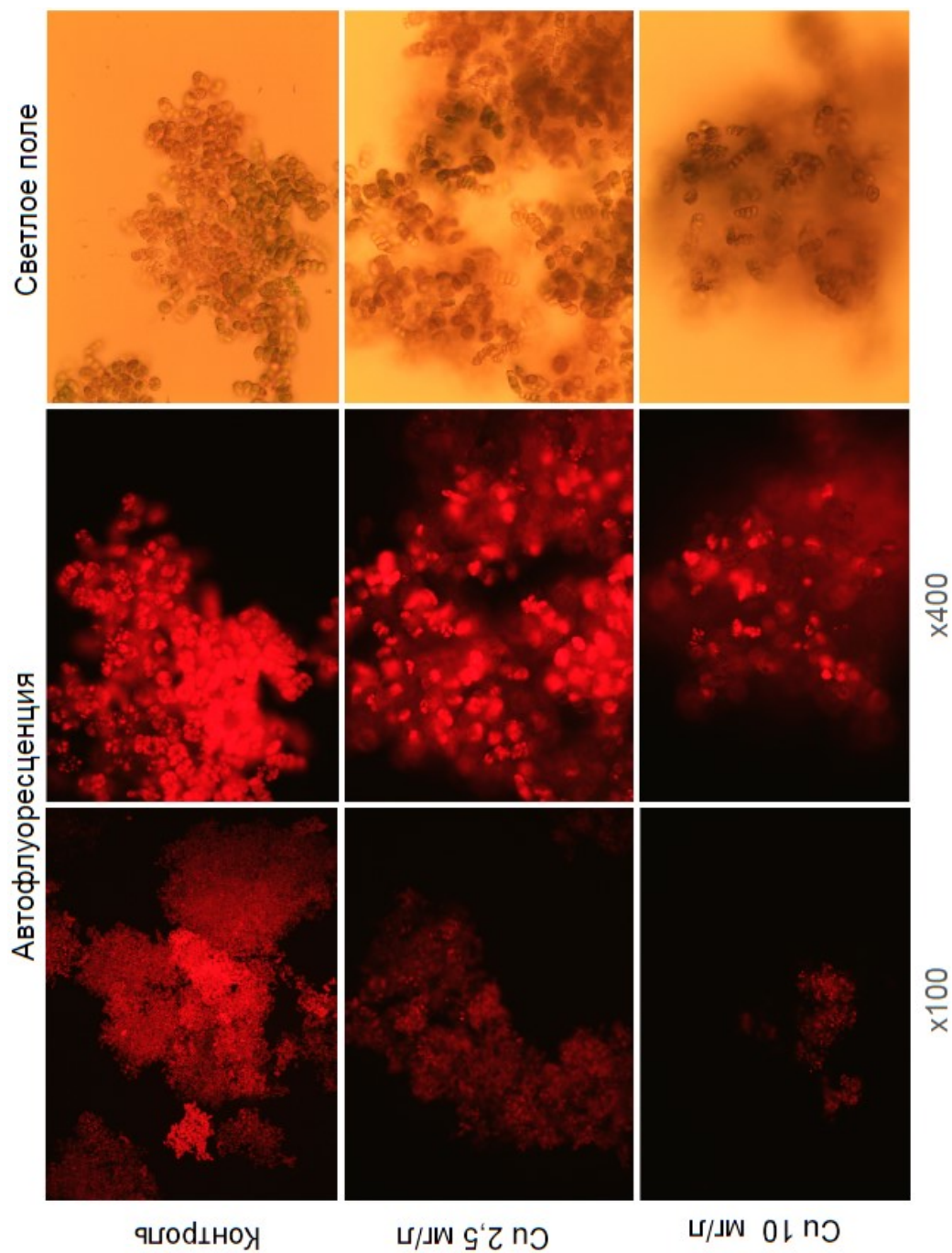


Рис. 6. Автофлуоресценция штамма *Scenedesmus* sp. без воздействия меди (контроль) и под её воздействием в концентрации 2,5 и 10 мг/л в течение суток. Снимки сделаны на микроскопе Olympus CX-41 (Olympus, Япония) с камерой ProgRes CT3, экспозиция — 400 мс
Fig. 6. Autofluorescence of the *Scenedesmus* sp. strain under copper exposure. Images show the control (no copper) and treatments with 2.5 and 10 mg/L Cu over a 24-hour period. Images were acquired using an Olympus CX-41 microscope (Olympus, Japan) equipped with a ProgRes CT3 camera. Acquisition settings: 400 ms exposure

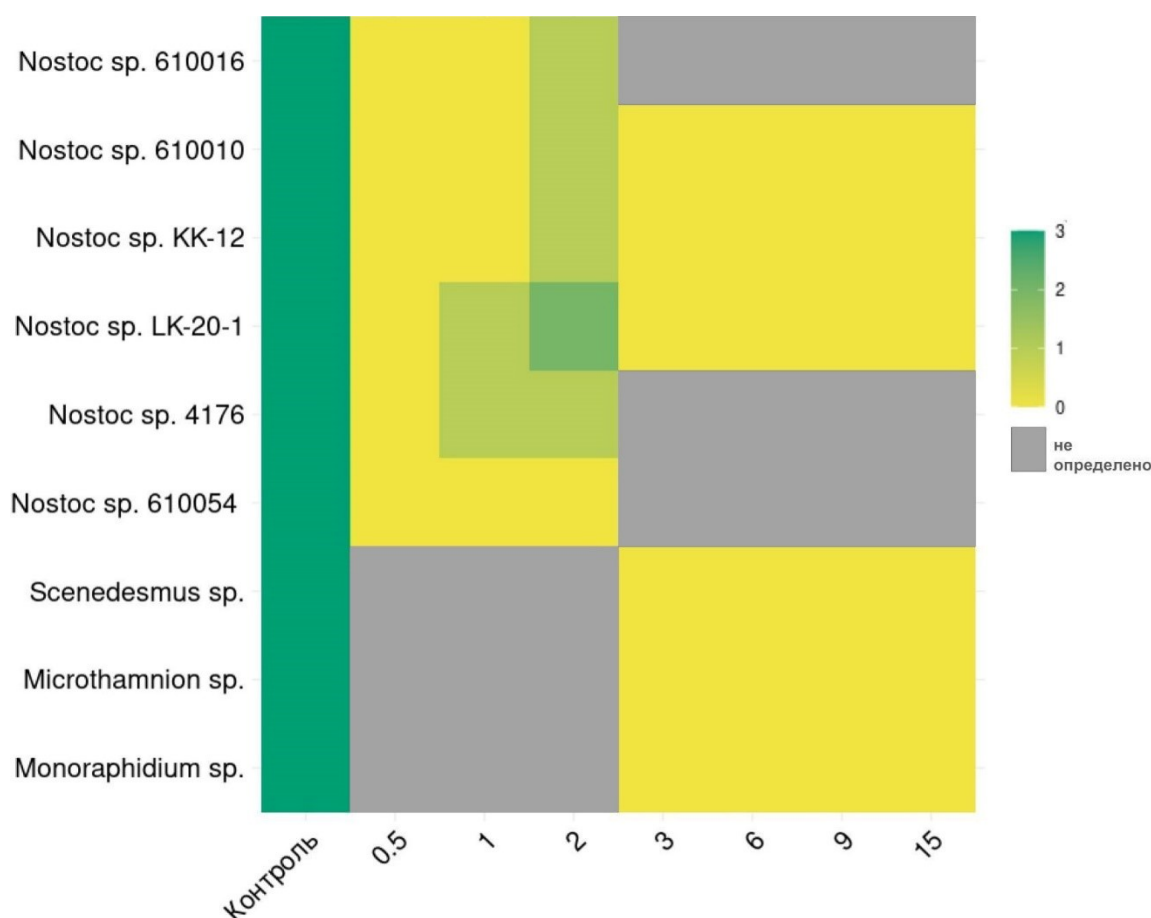


Рис. 7. Тепловая карта, отображающая наличие/отсутствие определённых признаков (приращение биомассы, флуоресценция хлорофилла, способность к восстановлению роста), была создана путём преобразования данных в бинарный формат: значение 1 указывало на обнаружение признака, значение 0 на его отсутствие.

Концентрации меди 3–15 и 0,5–2 мг/л тестировались в двух независимых этапах эксперимента

Fig. 7. A heatmap depicting the presence or absence of specific traits (biomass increment, chlorophyll fluorescence, regrowth capacity). Data were transformed into a binary format for visualization, where a value of 1 indicates the detection of a trait, and a value of 0 indicates its absence. Copper concentrations of 3–15 mg/L and 0.5–2 mg/L were tested in two independent experimental stages

Выводы

Стресс, вызванный высокими концентрациями меди, приводит к заметным морфологическим изменениям, таким как уменьшение размера клеток и разрушение хлорофилла. Эти изменения могут служить индикатором токсичности меди для микроводорослей, однако не отражают фактическую способность приспосабливаться к неблагоприятным условиям среды. Так, *Nostoc* sp. LK-20-1 проявляет механизмы адаптации и способен восстанавливать рост после воздействия меди, что может свидетельствовать о его способности к долговременному выживанию в загрязнённых условиях.

В связи с этим штамм рассматривается как перспективный «кандидат» для дальнейших исследований в области разработки биотехнологий очистки загрязнённых почв. Это особенно важно для контроля деградации природных систем в таких индустриально загрязнённых районах, как Мурманская область.

Список источников

1. Руденко Р. А., Ткачева И. В. Биотехнология водорослей в аквакультуре // Международный научно-исследовательский журнал. Вып. 8. 2021. Р. 136138.

2. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing / W. G. Morais Junior [et al.] // *Aquaculture*. 2020. Vol. 528. P. 735562.
3. Richmond A. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Oxford Ames: Blackwell Science, 2004.
4. Vareda J. P., Valente A. J. M., Durães L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review // *J. Environ. Manage.* 2019. Vol. 246. P. 101–118.
5. Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals / G. I. Edo [et al.] // *Chem. Ecol.* 2024. Vol. 40, no. 3. P. 322–349.
6. Pollution-Induced Changes in the Composition of Atmospheric Deposition and Soil Waters in Coniferous Forests at the Northern Tree Line / V. Ershov [et al.] // *Sustainability*. 2022. Vol. 14, no. 23. P. 15580.
7. Копчик Г. Н., Копчик С. В., Смирнова И. Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской Субарктике // *Почвоведение*. 2016. № 11. С. 1375–1391.
8. Kryuchkov V. V. Extreme Anthropogenic Loads and the Northern Ecosystem Condition // *Ecol. Appl.* 1993. Vol. 3, no. 4. P. 622–630.
9. Chlorophyll fluorescence as a valuable multitool for microalgal biotechnology / A. Solovchenko [et al.] // *Biophys. Rev.* 2022. Vol. 14, no. 4. P. 973–983.
10. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства / А. М. Кузнецов [и др.]; Мин-во сельского хозяйства Российской Федерации, Центральный институт агрохимического обслуживания сельского хозяйства. М., 1992. 63 с.
11. Экологические аспекты накопления минеральных элементов в организме населения, проживающего в районах интенсивной промышленной деятельности в европейской части Арктической зоны России: монография / А. Н. Никанов [и др.]. Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 87 с.
12. Изменение скорости роста, флуоресцентных и цитометрических показателей у микроводоросли *Dunaliella salina* (Teod.) при различной концентрации меди в среде / А. И. Акимов [и др.] // *Сибирский экологический журнал*. 2023. № 3. С. 343–356.
13. Kong L. Copper Requirement and Acquisition by Marine Microalgae // *Microorganisms*. 2022. Vol. 10, no. 9. P. 1853.
14. Elisabeth B., Rayen F., Behnam T. Microalgae culture quality indicators: a review // *Crit. Rev. Biotechnol.* 2021. Vol. 41, no. 4. P. 457–473.
15. Wang H., Sathasivam R., Ki J.-S. Physiological effects of copper on the freshwater alga *Closterium ehrenbergii* Meneghini (Conjugatophyceae) and its potential use in toxicity assessments // *ALGAE*. 2017. Vol. 32, no. 2. P. 131–137.
16. Indication of water pollution with heavy metals by means of Cyanobacteria *Synechocystis* sp. / A. S. Bogacheva [et al.] // *Toxicol. Rev.* 2019. No. 4. P. 57–62.
17. ROS dependent copper toxicity in Hydra-biochemical and molecular study / M. Zeeshan [et al.] // *Comp. Biochem. Physiol. Part C Toxicol. Pharmacol.* 2016. Vol. 185–186. P. 1–12.
18. Grigoryeva N., Chistyakova L. Fluorescence Microscopic Spectroscopy for Investigation and Monitoring of Biological Diversity and Physiological State of Cyanobacterial Cultures // *Cyanobacteria*. 2018. C. 11–44.
19. Influence of heavy metals on fluorescence activity of perspective strains of microalgae and cyanobacteria / B. K. Zayadan [et al.] // *Int. J. Biol. Chem.* 2016. Vol. 9, no. 1. P. 42–45.
20. Grigoryeva N. Yu. Studying Cyanobacteria by Means of Fluorescence Methods: A Review // *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms*. 2020. P. 3–33.
21. Levy J. L., Stauber J. L., Jolley D. F. Sensitivity of marine microalgae to copper: The effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity // *Sci. Total Environ.* 2007. Vol. 387, no. 1–3. P. 141–154.

References

1. Rudenko R. A., Tkacheva I. V. Biotekhnologiya vodorosley v akvakulture [Biotechnology of Algae in Aquaculture]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Scientific Research Journal], 2021, Vol. 8, pp. 136–138. (In Russ.).
2. Morais Junior W. G., Gorgich M., Corrêa P. S., Martins A., Mata T. M., Caetano Sá N. Microalgae for biotechnological applications: Cultivation, harvesting and biomass processing. *Aquaculture*, 2020. Vol. 528, pp. 735562.
3. Richmond A. Handbook of microalgal culture: biotechnology and applied phycology. Oxford, Blackwell Science, 2004, 576 p.

4. Vareda J. P., Valente A. J. M., Durães L. Assessment of heavy metal pollution from anthropogenic activities and remediation strategies: A review. *Journal of Environmental Management*, 2019, Vol. 246, pp. 101–118.
5. Edo G. I., Samuel P. O., Oloni G. O., Ezekiel G. O., Ikpekor V. O., Obasohan P., Ongulu J., Otunuya Ch. F., Opiti A. R., Ajakaye R. Sh., Essaghah A. E. A., Agbo J. J. Environmental persistence, bioaccumulation, and ecotoxicology of heavy metals. *Chemical Ecology*. 2024, Vol. 40, no. 3, pp. 322–349.
6. Ershov V., Sukhareva T., Isaeva L., Иванова Е. Pollution-Induced Changes in the Composition of Atmospheric Deposition and Soil Waters in Coniferous Forests at the Northern Tree Line. *Sustainability*, 2022, Vol. 14, no. 23, pp. 15580.
7. Koptsik G. N., Koptsik S. V., Smirnova I. E. Alternativnye tekhnologii remediiatsii tekhnogennykh pustoshyek v Kolskoj Subarktike [Alternative Remediation Technologies for Technogenic Wastelands in the Kola Subarctic]. *Pochvovedenie* [Soil Science], 2016, no. 11, pp. 1375–1391. (In Russ.).
8. Kryuchkov V. V. Extreme Anthropogenic Loads and the Northern Ecosystem Condition. *Ecological Applications*, 1993, Vol. 3, no. 4, pp. 622–630.
9. Solovchenko A., Lukyanov A., Vasilieva S., Lobakova E. Chlorophyll fluorescence as a valuable multitool for microalgal biotechnology. *Biophysical Reviews*, 2022, Vol. 14, no. 4, pp. 973–983.
10. Kuznetsov A. M., Fesyun A. P., Samokhvalov S. G., Makhonka E. P. *Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu tyazhelykh metallov v pochvakh selskokhozyaystvennykh ugodiy i produktakh rastenievodstva* [Guidelines for Determining Heavy Metals in Soils of Agricultural Lands and Crop Products]. Moscow, Tsentral'nyi institut agrokhimicheskogo obsluzhivaniya selskohozyaystva, 1992, 63 p.
11. Nikanov A. N., Dorofeev V. M., Megorskiy V. V., Zhirov V. K. *Severo-Zapadnyy nauchnyy tsentr gigieny i obshchestvennogo zdorov'ya et al. Ekologicheskiye aspekty nakopleniya mineral'nykh elementov v organizme naseleniya, prozhivayushchego v rayonkakh intensivnoy promyshlennoy deyatel'nosti v yevropeyskoy chasti Arkticheskoy zony Rossii* [Ecological Aspects of the Accumulation of Mineral Elements in the Population Living in Areas of Intensive Industrial Activity in the European Part of the Arctic Zone of Russia]. Apatity, FIC KNC RAN, 2020, 87 p.
12. Akimov A. I., Solomonova E. S., Shoman N. Yu., Rylkova O. A. Izmeneniye skorosti rosta, fluores Tsentnykh i tsitometricheskikh pokazateley u mikrovo Dorosli Dunaliella salina (Teod.) pri razlichnoy kontsentratsii medi v srede [Changes in the Growth Rate, Fluorescent and Cytometric Parameters in the Microalgae Dunaliella Salina (Teod.) at Different Copper Concentration in the Medium]. *Sibirskiy Ekologicheskiy Zhurnal* [Siberian Ecological Journal], 2023, no. 3, pp. 343–356. (In Russ.).
13. Kong L. Copper Requirement and Acquisition by Marine Microalgae. *Microorganisms*, 2022, Vol. 10, no. 9, pp. 1853.
14. Elisabeth B., Rayen F., Behnam T. Microalgae culture quality indicators: a review. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2021, Vol. 41, no. 4, pp. 457–473.
15. Wang H., Sathasivam R., Ki J.-S. Physiological effects of copper on the freshwater alga *Closterium ehrenbergii* Meneghini (Conjugatophyceae) and its potential use in toxicity assessments. *ALGAE*, 2017, Vol. 32, no. 2, pp. 131–137.
16. Bogacheva A. S., Polozova E. V., Shilov V. V., Davydova E. V., Yudin M. A., Klyushkin I. N. Indication of Water Pollution with Heavy Metals by Means of Cyanobacteria *Synechocystis* sp. *Toxicology Reviews*, 2019, no. 4, pp. 57–62.
17. Zeeshan M., Murugadas A., Ghaskadbi S., Rajendran R. B., Akbarsha M. A. ROS dependent copper toxicity in Hydra: biochemical and molecular study. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2016. Vol. 185–186, pp. 1–12.
18. Grigoryeva N., Chistyakova L. Fluorescence Microscopic Spectroscopy for Investigation and Monitoring of Biological Diversity and Physiological State of Cyanobacterial Cultures. *Cyanobacteria*, 2018, pp. 11–44.
19. Zayadan B. K., Akmuhanova N., Sadvakasova A., Kirbaeva D. Influence of heavy metals on fluorescence activity of perspective strains of microalgae and cyanobacteria. *International Journal of Biological Chemistry*, 2016, Vol. 9, no. 1, pp. 42–45.
20. Grigoryeva N. Studying Cyanobacteria by Means of Fluorescence Methods: A Review. *Fluorescence Methods for Investigation of Living Cells and Microorganisms*, 2020, pp. 3–33.
21. Levy J. L., Stauber J. L., Jolley D. F. Sensitivity of marine microalgae to copper: The effect of biotic factors on copper adsorption and toxicity. *Science of the Total Environment*, 2007, Vol. 387, no. 1–3, pp. 141–154.

Информация об авторах

Ю. В. Невзорова — магистр, инженер;

Д. А. Давыдов — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник;

В. В. Редькина — кандидат биологических наук, старший научный сотрудник

Information about the authors

Yu. V. Nevzorova — Master student, Engineer;

D. A. Davydov — Dr. Sc. (Biology), Leading Researcher;

V. V. Redkina — PhD (Biology), Senior Researcher

Статья поступила в редакцию 17.09.2024; одобрена после рецензирования 15.03.2025; принята к публикации 29.05.2025.
The article was submitted 17.09.2024; approved after reviewing 15.03.2025; accepted for publication 29.05.2025.