

УДК 66.047 УДК: 573.6:579.844

ЦИАНОБАКТЕРИИ КАК БИОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ**В.Б. Сбойчаков¹, А.Л. Панин²***1 – «Военно-медицинская академия имени С.М. Кирова Министерства обороны Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия**2 – Санкт-Петербургский НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Пастера, Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия***ВВЕДЕНИЕ**

В двадцатые годы XXI века глобальное потепление климата стало уже главной экологической проблемой. Долгосрочное повышение средней температуры климатической системы Земли наблюдается уже более века. Основной причиной этого явления считается антропогенный фактор [22, 28]. Это признается и на правительственном уровне, и большинством ученых. Как отмечается в публикации В.Д. Santer и соавт. [29] степень уверенности в том, что изменение климата вызвано деятельностью человека, достигла так называемого «золотого стандарта» в пять сигм (99,999 % вероятности неслучайного результата).

Для объективной оценки изменения климата необходима разработка индикаторов. Наиболее оптимально использование биологических индикаторов, то есть живых организмов, реагирующих на изменения окружающей среды [1, 10]. Одними из таких биологических индикаторов могут служить цианобактерии, водные микроорганизмы, которые широко распространены в водоемах. За последние несколько десятков лет их численность резко увеличилась. С жизнедеятельностью цианобактерий связано цветение воды в озерах, водохранилищах и реках по всему миру. Это становится комплексной экономической и экологической проблемой, так как затрагивает вопросы очистки водных ресурсов, морской логистики и туризма [8, 19, 33].

Цель работы – изучение роли цианобактерий в составе цианобактериальных матов как биологических индикаторов глобального потепления в Антарктике.

Цианобактерии (сине-зелёные водоросли) являются крупными грамнегативными бактериями. Они близки к древнейшим микроорганизмам. Это единственные бактерии, способные к оксигенному фотосинтезу. Цианобактерии относятся к наиболее сложно организованным и морфологически дифференцированным прокариотам. Сам по себе факт их выживания в современной биосфере свидетельствует об их огромном адаптационном потенциале [6, 21, 27, 31].

Цианобактерии являются объектом тщательного изучения как альгологов (как организмы, схожие с эукариотическими водорослями), так и бактериологов (как прокариоты). Сравнительно крупные размеры клеток и сходство с водорослями и было причиной их рассмотрения ранее в составе растений («сине-зелёные водоросли»). За это время альгологически описано более 1000 видов в почти 175 родах. Бактериологическими методами в настоящее время подтверждено существование не более 400 видов. Биохимическое, молекулярно-генетическое и филогенетическое сходство цианобактерий с остальными бактериями в настоящее время объективно доказано [24, 31].

Способность к азотфиксации делает цианобактерии весьма перспективными продуцентами белка, что широко используется в сельскохозяйственной биотехнологии [3, 16]. Даже в симбиозе с другими организмами (грибы, мхи и т. д.), цианобактерии не теряют способности фиксировать азот. В странах Юго-Восточной Азии используют цианобактерии вида *Anabaena azollae* в качестве азотного удобрения рисовых полей. Азотфиксирующая функция цианобактерий позволит экономить энергию, затрачиваемую при химическом синтезе аммиака в производстве дорогостоящих химических удобрений [3].

Цианобактерии интенсивно используются в биотехнологии как модельные организмы для изучения фундаментальных биологических процессов: фотосинтез и его генетический контроль; фоторегуляция генной экспрессии; клеточная дифференцировка и фиксация азота; метаболизм азота, углерода и водорода; устойчивость к стрессовым факторам окружающей среды; биологические часовые механизмы в клетке, клеточное деление, молекулярная эволюция. Наличие эффективных генетических методов позволило использовать цианобактерии в биотехнологии для производства специфических продуктов, для биодеградации органических загрязнений и других целей [6, 12, 14].

Цианобактерии как древнейшие организмы первоначально существовали в виде симбиозов, прежде всего с бактериальной гетеротрофной микробиотой, выполняющей роль редуцентов и стабилизирующей существование первичного ценоза. Цианобактерии часто вступают в симбиоз с грибами (образуя самые выносливые лишайники), мхами, папоротниками.

Способность цианобактерий входить в симбиотические отношения с разнообразными представителями флоры и фауны развилась в процессе эволюции жизни на Земле. Это и послужила основой для их сохранения и широкого распространения в определенных экотопах [6, 11, 14, 20, 23, 32]. Благодаря миксотрофности и азотфиксации диапазон условий, в которых цианобактерии способны обитать, чрезвычайно широк. Они первыми заселяют обнаженные после вулканических извержений или ядерных взрывов скалы, создавая органическое вещество, формируя почвы. Цианобактерии способны длительное время сохранять жизнеспособность при засухе; выживать при очень низких и очень высоких температурах; противостоять сильной инсоляции; выдерживать радиоактивное излучение; быть толерантными к высоким концентрациям солей; выносить действие токсикантов; вегетировать в анаэробных восстановительных условиях и т. д. [7, 17].

В этом году исполняется ровно 100 лет со дня открытия русской экспедицией под руководством Фаддея Беллинсгаузена и Михаила Лазарева загадочного «шестого континента» или Антарктиды. Расширение российского присутствия на этом континенте отвечает как научным, экономическим, так и геополитическим интересам России. Однако в последнее время, глядя на Землю из космоса можно наблюдать, что Антарктида «зеленеет» [34]. Глобальное потепление вызывает цветение так называемых «снежных водорослей» по всей поверхности снега вдоль береговой линии. В действительности эти «снежные водоросли» являются цианобактериями. По мере увеличения температуры их общая масса будет только увеличиваться [18, 19].

Актуальность охраны Антарктиды связана с глобальным потеплением климата. Вначале при комплексном обследовании прибрежных территорий, характеризующихся наибольшим биоразнообразием в Антарктике, специальное внимание было уделено лишайникам, как индикаторам состояния полярных экосистем [2]. Однако в ходе последующих обследований было обнаружено, что в ряде районов Антарктиды, различающихся по климатическим условиям и степени антропогенной нагрузки, доминируют цианобактерии [13, 15, 18]. В отсутствие или слабо выраженной конкуренции со стороны более развитых форм жизни в Антарктиде формируются так называемые цианобактериальные маты. Это – высокоинтегрированные прокариотные сообщества, связанные синтрофическими отношениями. Основными компонентами этих матов являются фотосинтезирующие цианобактерии. Маты можно назвать автономным сообществом, где присутствуют и продукционная ветвь углеродного цикла, осуществляемая цианобактериями, и деструкционная ветвь, осуществляемая другими бактериями.

Маты заселяют грунты после освобождения пространства от ледников, участвуют в почвообразовании и первыми реагируют на экологические изменения. Приурочены они к местам таяния льда, концентрации птиц и постоянного антропогенного загрязнения, в том числе и на удалении от объектов антарктических экспедиций. Близость матов к полярным станциям позволяет предположить, что они реагируют на изменения условий обитания под влиянием человека и могут быть использованы в целях биоиндикации [1, 4, 13, 15].

Цианобактериальные маты также могут включать в себя соли тяжелых металлов и нефтепродукты. Однако, вопросы формирования разнообразия цианобактериальных матов и взаимодействия микроорганизмов различных трофических групп, остаются недостаточно исследованными.

На территориях постоянно действующих научных станций и сезонных полевых баз Российской антарктической экспедиции было проведено изучение цианобактериальных матов как биологических индикаторов глобального потепления в результате антропогенной деятельности.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом для исследований служили образцы цианобактериальных матов и полученные из них субстраты, отобранные в районах полярных станций «Прогресс», Новолазаревская», «Беллинсгаузен», обсерватории «Мирный», полевой базы «Дружная-4». За период полевых работ исследовано 77 цианобактериальных матов в восточной и западной частях Антарктиды. Для привязки к местности применялся GPS-навигатор фирмы Garmin-60 CSx. Бурение льда на поверхности озер осуществлялось с помощью мотобура Hitachi (диаметр шнека 200 мм, толщина льда до 3 м). Отбор проб донных отложений производили трубчатым дночерпателем (стратометром) в соответствии с ГОСТ 31861–2012 [9].

Исследуемый материал забирали в стерильные контейнеры и пробирки с транспортной средой. Пробы в течение 24 ч доставляли в лабораторию научно-экспедиционного судна «Академик Фёдоров» и до проведения исследований в судовой лаборатории сохраняли при температуре +4°C. Часть материала сохраняли при –25°C в морозильной камере до завершения экспедиции для идентификации цианобактерий и других микроорганизмов классическими микробиологическими методами. Штаммы бактерий, которые не удалось идентифицировать с помощью биохимических тестов, были изучены с помощью технологии MALDI TOF на приборе Bruker Daltonics.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Показано, что количество обнаруженных цианобактериальных матов на загрязненных территориях заметно превышает их число на экологически чистых территориях Антарктики, а их контаминация посторонней микробиотой в нарушенных экосистемах возрастает в 1,5–3 раза. Обнаружение патогенных штаммов иерсиний (*Yersinia enterocolitica*), а также условно-патогенных псевдомонад и микромицетов в составе матов, формирующихся вблизи полярных станций, является основанием для создания системы экологического мониторинга в местах присутствия человека в Антарктике [4].

Цианобактериальные маты состояли из нитчатых, колониальных и одноклеточных цианобактерий. В 77 % образцов обнаружены цианобактерии родов *Pseudanabaena*, *Leptolyngbya*, *Oscillatoria*, *Nostoc*. Они являлись основными компонентами микробных матов и выживали в широких диапазонах освещенности и колебаний температуры.

Для цианобактериальных матов характерно разнообразие окраски, зависящее от доминирования определенных групп организмов в их поверхностном слое и от состава субстрата, на котором развиваются данные сообщества. Чаще встречались маты сине-зеленого, черного, бурого, рыжего и сероватого цветов. Редко обнаруживали красную и пурпурную окраску.

Толщина цианобактериальных матов оказалась весьма изменчивой. Первичные маты были достаточно тонкими, а многолетние – имели значительную толщину и хорошо выраженную слоистость, образованную чередованием органических и минеральных слоев. Для всех этих образований характерно наличие нескольких основных зон, имеющих определенный набор микроорганизмов с присущим только им метаболизмом. Первая зона окислительного фотосинтеза с цианобактериями характеризовалась рыхлой структурой. В ней сосредоточено основное видовое многообразие микроорганизмов. Анаэробная зона достигала в озерных матах толщины нескольких десятков сантиметров. Для слоев с анаэробной деструкцией была характерна сложная последовательность реакций, осуществляемых различными функциональными группами организмов. Нижние слои цианобактериальных матов плавно переходили в полностью минерализованные осадки, в образовании которых принимали активное участие микроорганизмы.

В результате глобальных изменений климата, увеличения концентрации углекислого газа цианобактерии, изменяя механизмы жизнеобеспечения, приобретают токсические свойства [5, 12, 24, 25, 26]. Цианобактерии синтезируют широкий спектр токсинов (био- и цитотоксины). Токсины обладают нейротоксичностью, иммунотоксичностью, генотоксичностью и мутагенностью, канцерогенностью, эмбриотоксичностью и дерматотоксичностью [30]. Гепатотоксины продуцируют штаммы цианобактерий *Microcystis*, *Anabaena*, *Oscillatoria*, *Nodularia*, *Nostoc*, *Cylindrospermopsis* и *Umezakia*. Нейротоксины производят штаммы *Aphanizomenon* и *Oscillatoria*. Цианобактерии вида *Cylindrospermopsis raciborskii* могут также производить токсичные алкалоиды, поражающие желудочно-кишечный тракт и почки [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цианобактериальные маты в районах расположения полярных станций в Антарктике имеют двойное значение. С одной стороны, они создают биологические субстраты, которые в Антарктиде представлены весьма скудно. Это своеобразные места концентрации микроорганизмов, что составляет основу антарктических экосистем. Маты обладают устойчивостью к высокому уровню ультрафиолетового излучения, препятствуют смыву потоком воды органических веществ, поскольку клейкие вещества скрепляют частицы грунта и тем самым защищают первичную почву от эрозии. С другой стороны, в цианобактериальных матах могут создаваться условия сохранения и размножения патогенных и условно патогенных микроорганизмов. Это способно привести к изменчивости микробиоты в окружающей среде прибрежных полярных станций и может потенциально представлять опасность возникновения заболеваний у людей и животных.

Некоторые виды цианобактериальных матов могут быть токсичны. С учетом наличия матов в русле водотоков и на дне водоемов, примыкающих к полярным станциям и используемых в качестве источников для хозяйственно-бытовых нужд и водоснабжения, необходимо изучать состав цианобактериальных матов и с токсикологической точки зрения. Кроме того, в этих образованиях могут накапливаться нефтепродукты и опасные для здоровья вещества.

Вполне вероятно, что глобальное потепление климата, в особенности проявляющееся в полярных зонах, будет способствовать более продолжительному и токсичному «цветению» воды в период планктонной стадии развития космополитных и эндемических видов цианобактерий. Сюда будут входить и теплолюбивые виды, ранее массово не развивались в исследуемых регионах. Увеличение или уменьшение количества термофильных видов цианобактерий является объективным биологическим индикатором изменения климата. Практическое значение изучения цианобактерий состоит в том, что они являются объективным индикатором санитарно-эпидемического состояния районов размещения полярных станций и полевых баз, что может быть использовано в целях мониторинга антропогенного воздействия на экосистемы Антарктики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абакумов Е.В. и др. Изменение микробных сообществ в первичных почвах и грунтах в районе антарктической станции Мирный при антропогенном влиянии // Гигиена и санитария. – 2017. – Т. 96, № 10. – С. 949–955.
2. Андреев, М.П. Современные ботанические исследования российских ученых в континентальной Антарктике / М.П. Андреев, Л.Е. Курбатова // Российские полярные исследования. – № 1. – 2012. – С. 23–24.
3. Баймаханова, Г.Б. и др. Создание консорциумов на основе цианобактерий для применения в агробиотехнологии // Известия НАН РК, Серия биологическая и медицинская. – 2014. – № 5. – С. 35–39.
4. Белов, А.Б. и др. Теория сапронозных инфекций: история развития и пути совершенствования в системе медико-биологических наук // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. – 2020. – № 97(1). – С. 91–101.
5. Волошко, Л.Н. Токсины цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanophyta) / Л.Н. Волошко, А.В. Плющ, Н.Н. Титова // Альгология. – 2008. – № 18 (1). – С. 3–20.
6. Горелова, О.А. Растительные синцианозы: изучение роли макропартнера на модельных системах / О.А. Горелова: Автореф. дисс... докт. биол. наук. – М. 2005. – 47 с.
7. Громов, Б.В. Цианобактерии в биосфере // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 9. – С. 33–39.
8. Капков, В.И. Сукцессии цианобактерий в водоемах бореальной зоны / В.И. Капков, С.Г. Васильева, Е.С. Лобакова // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. – 2018. – № 95(4). – С. 100–107.
9. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31861–2012 «Вода. Общие требования к отбору проб» (введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 29 ноября 2012 г. № 1513 ст).
10. Неверова О.А. Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды / О.А. Неверова // Биосфера. – Том № 1. – № 1. – 2009. – С. 82–92.
11. Немцова, Н.В. Биомедицинский потенциал альго-бактериальных биоценозов / Н.В. Немцова, О.А. Гоголева, М.Е. Игнатенко // Журнал микробиологии, эпидемиологии и иммунологии. – 2018. – № 94(4). – С. 82–87.
12. Поляк, Ю.М. Токсигенные цианобактерии: распространение, регуляция синтеза токсинов, способы их деструкции / Ю.М. Поляк, В.И. Сухаревич // Вода: химия и экология. – 2017. – № 11. – С. 125–139.
13. Панин, А.Л. Природно-техногенная очаговость инфекционных болезней на территории антарктических поселений / А.Л. Панин, В.Б. Сбойчаков, А.Б. Белов и др. // Успехи современной биологии. – 2016. – № 136 (1). – С. 53–67.
14. Панкратова, Е.М. Симбиоз как основа существования цианобактерий в естественных условиях и в конструируемых системах / Е.М. Панкратова, Л.В. Трефилова // Теоретическая и прикладная экология. – 2007. – № 1. – С. 4–14.
15. Сбойчаков, В.Б. Природно-очаговые инфекции шестого континента: ретроспективный взгляд в будущее / В.Б. Сбойчаков, А.Л. Панин, А.Б. Белов // Национальные приоритеты России. – 2014. – № (3). – С. 86–89.
16. Трефилова, Л.В. Использование цианобактерий в агробиотехнологии / Л.В. Трефилова: Автореф. дис... канд. биол. наук. – Саратов. – 2008. – 25 с.
17. Штина, Э.А. Экология почвенных водорослей / Э.А. Штина, М.М. Голлербах. – М.: Наука, 1976. – 143 с.
18. Bonnedahl, J. In search of human associated bacterial pathogens in Antarctic wildlife: report from six penguin colonies regularly visited by tourists / J. Bonnedahl, T. Broman, J. Waldenström et al. // Ambio. – 2005. – № 34(6). – P. 430–432.
19. Davis, T.W. et al. The effects of temperature and nutrients on the growth and dynamics of toxic and non-toxic strains of *Microcystis* during cyanobacteria blooms // Harmful Algae. – 2009. – V. 8. – P. 715–725.
20. De Morais, P. Cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* response to pentachlorophenol and comparison with that of the microalga *Chlorella vulgaris* / P. De Morais, T. Stoichev, M.C.P. Basto et al. // Water Res. – 2014. – V. 52. – P. 63–72.
21. Harke, M.J. A review of the global ecology, genomics, and biogeography of the toxic cyanobacterium, / M.J. Harke, M.M. Steffen, C.J. Gobler et al. // Harmful Algae. – 2016. – V. 54. – P. 4–20.
22. Key World Energy Statistics 2019. International Energy Agency. 26 September 2019. – P. 6–36.
23. Kuno, S. et al. Intricate interactions between the bloom-forming cyanobacterium *Microcystis aeruginosa* and foreign genetic elements, revealed by diversified clustered regularly interspaced short palindromic repeat (CRISPR) signatures // Appl. Environ. Microbiol. 2012. V. 78, № 15. P. 5353–5360.
24. Martins, J.C. Microcystin dynamics in aquatic organisms / J.C. Martins, V.M. Vasconcelos // J. Toxicol. Environ. Health Brit. Rev. – 2009. – V. 12, № 1. – P. 65–82.
25. Merel, S. State of knowledge and concerns on cyanobacterial blooms and cyanotoxins / S. Merel, D. Walker, R. Chicana et al. // Environ. Int. – 2013. – V. 59. – P. 303–327.
26. Miller, T.R. Cyanobacterial toxins of the Laurentian Great Lakes, their toxicological effects, and numerical limits in drinking water / T.R. Miller, L.J. Beversdorf, C.A. Weirich, S.L. Bartlett // Marine Drugs. – 2017. – V. 15, № 6. – P. 160.
27. Paerl, H.W. Harmful cyanobacterial blooms: causes, consequences, and controls / H.W. Paerl, T.G. Otten // Environ. Microbiol. – 2013. – V. 65. – P. 995–1010.
28. Robock, A. Volcanic eruptions and climate // Rev. Geophys. – 2000. – № 38. – P. 191–219.
29. Santer, B.D. Celebrating the Anniversary of Three Key Events in Climate / B.D. Santer, C.J.W. Bonfils, Q. Fu et al. // Nature Climate Change. – 2019. – № 9. – P. 180–182.
30. Sivonen, K. Cyanobacterial toxins / K. Sivonen, G. Jones // Toxic Cyanobacteria in Water / Eds. Chorus I., Bartram J. London: E&FN Spon, 1999. – P. 41–111.
31. The ecology of cyanobacteria II: their diversity in time and space / Ed.: B.A. Whitton. Netherlands: Springer, 2012. – 760 p.
32. Wang, L.C. Allelopathic effects of *Microcystis aeruginosa* on green algae and a diatom: evidence from exudates addition and co-culturing / L.C. Wang, J.M. Zi, R.B. Xu et al. // Harmful Algae. – 2017. – V. 61. – P. 56–62.
33. Zaharia, A.M. First report of toxic *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Raphidiopsis mediterranea* (Cyanoprokaryota) in Egyptian fresh water / A.M. Zaharia // FEMS Microbiol. Ecol. – 2007. – V. 59. № 3. – P. 749–761.