

УДК 574.5 + 615.917

ПОДХОД «ЕДИНОЕ ЗДОРОВЬЕ» КАК ВОЗМОЖНЫЙ СПОСОБ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ (НА ПРИМЕРЕ ЦИАНОТОКСИНОВ)

Т. Б. Калининкова, А. В. Егорова, Р. Р. Шагидуллин

Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан, Казань, Россия

Цианобактерии – это большая группа фотосинтезирующих прокариотических организмов, которые обитают в пресной и морской воде и во влажной почве. Цианобактерии продуцируют такие вторичные метаболиты, как цианотоксины, которые представляют потенциальную опасность для организма человека и животных при возможном их попадании в питьевую воду и реальную опасность для организмов водоплавающих птиц, рыб и зоопланктона. Поэтому цианобактерии часто рассматривают как патогенные организмы, хотя они не способны развиваться в организме животных. По данным международной гидрологической программы ЮНЕСКО CYANONET, цианобактерии и цианотоксины обнаружены в поверхностных водах 65 стран мира. Для изучения распространения цианобактерий и цианотоксинов в озерах Европы реализованы программы международного сотрудничества CYANOCOST в 2012–2016 гг. и EMLS (European Multi Lake Survey) в 2015 году. Цианотоксины подразделяются на группы, которые отражают особенности их действия на организм человека (гепатотоксины, нейротоксины, дерматоксины, цитотоксины). В последнее время выявлено и описано большое количество случаев влияния токсичных цианобактерий на здоровье. При этом случаи заболевания и гибели человека и животных, связанные с опасными цианобактериями, анализируются независимо друг от друга. Концепция «Единое здоровье» подразумевает, что здоровье человека находится в тесной взаимосвязи со здоровьем животных и состоянием окружающей среды. В данном обзоре приведены примеры того, как исследование болезней и гибели животных вследствие отравления цианотоксинами может быть использовано для уменьшения возможного вреда, причиняемого здоровью человека опасными цианобактериями. Использование подхода «Единое здоровье» является одним из способов управления экологическими рисками, который требует объединения усилий специалистов разного профиля.

Ключевые слова: цианобактерии; микроцистины; пресноводные экосистемы; влияние цианотоксинов на здоровье человека; негативное влияние цианобактерий на организм животных.

T. B. Kalinnikova, A. V. Egorova, R. R. Shagidullin. THE “ONE HEALTH” APPROACH AS A POSSIBLE MODE OF ECOLOGICAL RISK ASSESSMENT (EXAMPLE OF CYANOTOXINS)

Cyanobacteria are a big group of photosynthetic prokaryotic organisms inhabiting fresh and sea waters and damp soils. Cyanobacteria produce secondary metabolites – cyanotoxins, which are potentially dangerous for humans and animals if present in drinking

water, and pose real danger for waterfowl, fish, and zooplankton. Therefore, cyanobacteria are often considered as pathogenic organisms albeit they are unable to develop in animals' organisms. As reported by the UNESCO international hydrological program CYANONET, cyanobacteria and cyanotoxins were found in surface waters in 65 countries. To study the occurrence of cyanobacteria and cyanotoxins in European lakes, two international cooperation programs were implemented, namely CYANOCOST in 2012–2016 and EMLS (European Multi Lake Survey) in 2015. Cyanotoxins are divided into groups according to their action on human organisms (hepatotoxins, neurotoxins, dermatotoxins, and cytotoxins). Lately, the health impacts of harmful cyanobacteria have been more frequently detected and reported. However, reports of human and animal illnesses or death associated with harmful cyanobacteria tend to be investigated separately. One Health is an approach that recognizes that the health of people is closely connected to the health of animals and our shared environment. This review illustrates how the investigation of cyanotoxin-associated animal illnesses and death can be used to reduce the risks of human exposure to harmful cyanobacteria. The One Health approach is an environmental risk management method that requires the integration of efforts of different specialists.

Key words: cyanobacteria; microcystins; freshwater ecosystems; cyanotoxin effects on human health; harmful effects of cyanobacteria on animal organisms.

Подход «Единое здоровье» был предложен в начале XXI века с целью создания национальных механизмов координации, коммуникации и сотрудничества для устранения угроз здоровью при контактах между человеком, животными и окружающей средой. Трехстороннее сотрудничество Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций, Всемирной организации охраны здоровья животных и Всемирной организации здравоохранения служит примером многолетнего и успешного партнерства в деле практического применения подхода «Единое здоровье» для решения глобальных проблем охраны здоровья человека, животных (как домашних, так и диких) и окружающей среды.

С точки зрения биологии человек – это всего лишь один из многих видов, населяющих нашу планету, хотя и обладающий специфическими характеристиками, способностями и навыками. В последние десятилетия усиливается опасность переноса заболеваний от животных к человеку. В качестве примеров можно привести пандемию «свиного» гриппа A/H1N1 в 2009 г., вспышку лихорадки Эбола в Западной Африке в 2014–2015 гг., вспышку лихорадки Зика в Латинской Америке в 2015–2016 гг. [Destoumieux-Garzón et al., 2018] и текущую пандемию коронавирусной инфекции COVID-19, вызванную коронавирусом SARS-Cov-2 [Huang et al., 2020]. Первоначально термин «Единое здоровье» использовался для обозначения объединения усилий медицинских работников и ветеринаров в борьбе с зоонозными инфекциями. В настоящее время этот термин употребляется в более широком смысле и подразумевает защиту здоровья человека и животных от не-

благоприятных внешних воздействий [Hilborn, Beasley, 2015]. Человек и животные в равной степени испытывают на себе последствия загрязнения окружающей среды. По данным Всемирной организации здравоохранения, вследствие воздействия неблагоприятных факторов среды в Европе ежегодно погибает 1,4 млн человек [Destoumieux-Garzón et al., 2018]. Очень часто первыми жертвами опасных изменений в экосистеме становятся дикие и домашние животные. Одним из неблагоприятных изменений в водных экосистемах является размножение цианобактерий и накопление цианотоксинов в воде. В подготовленном Всемирной организацией здравоохранения «Руководстве по качеству питьевой воды» отмечается необходимость контроля в воде не только патогенных микроорганизмов, вирусов и простейших, но и непатогенных микроорганизмов – цианобактерий [WHO..., 2011]. В научной литературе описано немало примеров того, как гибель животных инициировала исследования, результатом которых было обнаружение цианотоксинов в воде и установление их химической природы и физиологического действия. Например, так были идентифицированы анатоксин-а [Devlin et al., 1977] и анатоксин-а(s) [Mahmood et al., 1988]. В этой статье проведен анализ исследований влияния цианотоксинов на здоровье человека, домашнего скота, домашних и диких животных.

Концепция «Единое здоровье»

Термин «единое здоровье» активно используется с начала XXI века для характеристики взаимодействия между специалистами в об-

ласти здравоохранения, ветеринарии и охраны окружающей среды с целью предотвращения угроз здоровью человека и животных. При этом сама концепция «Единое здоровье», предусматривающая единый подход к изучению проблем, связанных со здоровьем в межвидовом сообществе, появилась достаточно давно. Еще в XI–XIII веке в Китае существовала система здравоохранения, включавшая в себя не только врачей, но и ветеринаров [Zinsstag et al., 2011]. Хорошо известным примером взаимосвязи здоровья человека и животных является кросс-реактивность антител против вируса натуральной оспы и вируса коровьей оспы [Hilborn, Beasley, 2015]. Зависимость здоровья человека и животных от состояния окружающей среды проявилась при массовом отравлении метилртутью в городе Миннамата (Япония) в 1950-е годы. Причиной отравления стал продолжительный сброс в воду залива Миннамата неорганической ртути, которую донные микроорганизмы преобразовывали в метилртуть – сильный нейротоксин. По пищевой цепи метилртуть попадала в организмы рыб, птиц, а затем и человека, вызывая сильные неврологические расстройства, а в ряде случаев гибель пациентов [Harada, 1995]. Возможность интенсивной аккумуляции ртути в организмах рыб в водоемах с низким содержанием этого металла в абиотических компонентах среды показана в работе Н. Н. Немовой с соавторами [2014]. Накопление ртути в организмах рыб в концентрациях, намного превышающих ее содержание в окружающей среде, позволяет использовать рыб в качестве индикаторов загрязнения водоемов ртутью, в том числе и для прогнозирования рисков здоровью человека. Это особенно важно, учитывая, что максимально допустимую по рекомендации Всемирной организации здравоохранения безопасную суточную дозу ртути человек может получить при употреблении всего 100 г нехищной или 50 г хищной рыбы, содержание ртути в которой не превышает нормативы, действующие в Российской Федерации (0,3 мг/кг в пресноводной нехищной рыбе и 0,6 мг/кг в хищной рыбе) [Немова и др., 2014]. Уже с начала массового применения пестицидов в сельском хозяйстве появились сообщения об их негативном действии не только на насекомых-вредителей, но и на организм человека, домашних и диких животных (как наземных, так и водных) [Yadav, Devi, 2017].

Общая характеристика цианотоксинов

Цианотоксины – это вторичные метаболиты, продуцируемые цианобактериями. По химиче-

ской структуре цианотоксины представляют собой циклические пептиды (микроцистины и нодулярины), алкалоиды (цилиндропермопсины, сакситоксины, анатоксин-а, анатоксин-а(s), лингбиатоксины и аплизиатоксины), липопептиды, липополисахариды и аминокислоты, не входящие в состав белков (β -N-метиламино-L-аланин, 2,4-диаминомасляная кислота и N-(2-аминоэтил)глицин). По биологической активности различают гепатотоксины (микроцистины, нодулярины, цилиндроспермопсины и др.), нейротоксины (сакситоксины, анатоксин-а, анатоксин-а(s), некоторые липопептиды, β -N-метиламино-L-аланин и др.), дерматоксины (лингбиатоксины, аплизиатоксины и др.) и цитотоксины (большинство липопептидов) [Codd et al., 2005]. Помимо перечисленных цианотоксинов в водоемах присутствует большое количество неидентифицированных экзометаболитов цианобактерий [Elerseck et al., 2017].

Распространение токсигенных цианобактерий в поверхностных водах

Цианобактерии – это прокариотические фотосинтезирующие организмы. Они широко распространены в пресноводных экосистемах, реже встречаются в морской воде и в почве. Несмотря на большое количество исследований, посвященных распространению цианобактерий и факторов, влияющих на их численность и токсигенность [Codd et al., 2005; Степанова и др., 2012; Белых и др., 2013; Селезнева и др., 2014; Сиделев, Зубишина, 2014; Cyanobacteria..., 2014; Сиделев и др., 2016; Meriluoto et al., 2017; Mantzouki et al., 2018a, б; Davydov, 2018; Сиделев, 2019; Сиделев, Бабаназарова, 2020], интерес к изучению цианобактерий не ослабевает. Это определяется, в частности, расширением ареалов обитания многих цианобактерий вследствие современного глобального потепления климата Земли. Увеличению продуктивности цианобактерий и, как следствие, повышению содержания цианотоксинов в воде могут способствовать аномальные погодные условия. В 2010 году в летний период в бассейне Средней и Нижней Волги температура была существенно выше, а осадки ниже нормы, что привело к увеличению температуры воды и маловодью на Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах. Следствием этого стало многократное увеличение численности сине-зеленых водорослей [Селезнева и др., 2014]. Во многих водоемах появляются инвазивные виды цианобактерий, и состав продуцируемых ими токсинов может изменяться в зависимости от особенностей акваэко-

стемы. Например, цианобактерия *Raphidiopsis raciborskii* ((Woloszynska) Aguilera, Berrendero Gómez, Kastovsky, Echenique & Salerno 2018), обитающая в австралийских водоемах, продуцирует цилиндроспермопсин, а в европейских водоемах, где она является видом-вселенцем, эта цианобактерия синтезирует нодулярин [Meriluoto et al., 2017]. Среди других инвазивных видов цианобактерий в водоемах Европы можно назвать *Chrysochloris bergii* ((Ostenfeld) E. Zapomelová, O. Skácelová, P. Pummann, R. Kopp & E. Janeczek 2012), *Chrysochloris ovalisporum* ((Forti) E. Zapomelová, O. Skácelová, P. Pummann, R. Kopp & E. Janeczek, nom. inval. 2012) и *Sphaerospermopsis aphanizomenoides* ((Forti) Zapomelová, Jezberová, Hrouzek, Hisem, Reháková & Komárková 2010) [Quesada et al., 2006; Kaštovský et al., 2010; Koreivienė, Kasperovičienė, 2011]. Виды-вселенцы успешно адаптируются к условиям обитания в водоемах умеренного климата и могут составить конкуренцию аборигенным видам. Например, оптимальные температуры для роста инвазивного вида *S. aphanizomenoides* в озерах Литвы такие же, как и для аборигенных видов *Planktothrix agardhii* ((Gomont) Anagnostidis & Komárek 1988) и *Aphanizomenon gracile* (Lemmermann 1907) (20–28 °C), а температурный оптимум вида-вселенца *C. bergii* составляет 26–30 °C [Savadova et al., 2018]. Дальнейшее распространение этих видов и увеличение их численности усилит токсикологическую нагрузку на европейские водоемы.

Накопленные к настоящему времени сведения позволяют сделать вывод о практически повсеместном распространении цианобактерий. По данным международной гидрологической программы ЮНЕСКО CYANONET, цианобактерии и цианотоксины обнаружены в поверхностных водах 65 стран мира [Codd et al., 2005]. В водоемах Южной Калифорнии определены цианобактерии, относящиеся к родам *Anabaena*, *Nostoc*, *Oscillatoria*, *Cylindrospermum*, *Phormidium* и *Geitlerinema*. Цианотоксины установлены в 45 % исследованных проб воды [Tatters et al., 2019]. В озере Кабетогамма, расположенном в одном из национальных парков США, методом полимеразной цепной реакции токсигенные цианобактерии были выявлены до начала их массового размножения. Помимо микроцистинов в этом водоеме обнаружены сакситоксины и анатоксин-а [Christensen et al., 2019]. В результате многолетнего (2010–2017 гг.) изучения нескольких десятков озер в штате Виктория (Австралия) были выявлены штаммы цианобактерий, продуцирующие анатоксин-а. До этого исследования в водое-

мах Австралии обнаруживали микроцистины, нодулярины, цилиндроспермопсины и сакситоксины. После обнаружения в воде анатоксина-а были даны рекомендации по дополнению системы мониторинга цианотоксинов в водоемах [John et al., 2019]. В третьем по величине озере Китая – Тайху – присутствие цианобактерий описано еще в 1980-е годы. Возросшая антропогенная нагрузка привела к тому, что высокая численность цианобактерий в этом озере в 1998–2007 гг. отмечалась в течение всего года, за исключением января и февраля. После 2008 года вспышки численности цианобактерий в озере Тайху увеличились и наблюдались даже в январе. Озеро является источником питьевой воды для населения нескольких крупных городов. Содержание микроцистина-LR в озере составляет 0,069–0,701 мкг/л. Это меньше, чем рекомендованная Всемирной организацией здравоохранения ПДК для микроцистинов в питьевой воде (1 мкг/л). Однако, учитывая мелководность озера (средняя глубина 1,9 м), степень его эвтрофикации и большую антропогенную нагрузку, необходимо регулярно контролировать этот показатель [Li et al., 2018].

В нашей стране до сих пор отсутствуют стандарты безопасного содержания цианотоксинов в воде, несмотря на большое количество работ, посвященных изучению распространения цианобактерий и токсикологических последствий их массового размножения. Цианобактерии встречаются в водоемах всех регионов России. В качестве примера можно привести исследование О. И. Белых с соавторами [2013], в котором дана характеристика микроцистин-продуцирующих цианобактерий в водоемах Украины, Беларуси и России. В России эти авторы проводили обследования водоемов Иркутской области, Республики Бурятия, Красноярского края и Калининградской области. В большинстве исследованных водоемов выявлены токсигенные цианобактерии, способные продуцировать микроцистины [Белых и др., 2013]. На архипелагах Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Свальбард в зоне полярных пустынь выявлено 176 видов цианобактерий [Davydov, 2018]. В водоемах рекреационной зоны Казанского региона выявлено шесть видов цианобактерий. Содержание микроцистинов в воде, определенное методом иммуноферментного анализа, составило 0,25–5,72 мкг/л. Выявленная зависимость суммарного содержания микроцистинов от численности цианобактерий позволила предложить ориентировочный критический уровень численности сине-зеленых водорослей 20,9 млн кл./л, соответствующий нормативному содержанию цианотоксинов

в воде, рекомендованному ВОЗ [Степанова и др., 2012].

Водоемы, в которых присутствуют токсигенные цианобактерии, часто используются для снабжения населения питьевой водой, для обеспечения потребностей сельского хозяйства, рыбоводства, а также в рекреационных целях и в качестве объектов туризма. Для объединения усилий научных сотрудников, специалистов в области сельского хозяйства, здравоохранения, водоснабжения, охраны окружающей среды, организации отдыха и туризма с целью защиты населения от негативного воздействия цианотоксинов и для разработки методов мониторинга цианобактерий и цианотоксинов в водоемах и методов очистки воды для конечного потребителя от цианотоксинов Межправительственной структурой в области науки и технологий COST в 2012–2016 гг. была реализована программа CYANOCOST, в которой приняли участие представители 23 стран Европейского союза [Meriluoto et al., 2017]. В рамках программы взаимодействовали четыре рабочие группы, которые изучали распространение цианобактерий и цианотоксинов в водоемах; разрабатывали методы их мониторинга и анализа; изучали влияние цианотоксинов на здоровье; разрабатывали методы предупреждения развития цианобактерий, методы учета цианобактерий и определения содержания цианотоксинов; разрабатывали рекомендации для конечных потребителей воды [Meriluoto et al., 2017].

Другим примером международного сотрудничества в изучении распространения цианобактерий в водоемах является исследование 369 озер Европы, проведенное в 2015 году по программе Комплексного обследования озер Европы (EMLS – European Multi Lake Survey) и объединившее ученых из 27 стран [Mantzouki et al., 2018a, b]. В каждом из исследо-

ванных озер пробы отбирались однократно в самый теплый для данного региона период. В пробах определяли содержание азота, фосфора, пигментов водорослей, цианотоксинов и ряд других показателей. Данные по каждому из озер оформлялись в виде стандартного протокола [Mantzouki et al., 2018a]. Результаты этого исследования позволили охарактеризовать пространственное распределение семи цианотоксинов (пяти микроцистинов (MC-YR, MC-dmLR, MC-LR, MC-RR, MC-dmRR), анатоксина и цилиндроспермопсина) в 137 озерах. Все семь исследованных цианотоксинов присутствовали лишь в трех озерах. Наличие четырех, пяти или шести цианотоксинов было обнаружено в 34, 26 и 25 озерах соответственно. И, наконец, в 18 озерах найдено по два цианотоксина, а в 13 – всего один. Микроцистины выявлены в 93 % из 137 озер, при этом чаще других встречался MC-YR, а самым редким был MC-dmRR. Цилиндроспермопсин, как и анатоксин, обнаружен в 39 % из 137 озер. При этом в шести озерах присутствовал только цилиндроспермопсин в относительно низких концентрациях (менее 0,05 мкг/л) (табл. 1). В озере Dziekanowskie (Польша) был выявлен только анатоксин в очень низкой концентрации – 0,002 мкг/л.

Таким образом, самыми распространенными цианотоксинами в озерах Европы являются микроцистины. Цилиндроспермопсин встречается реже, но во многих случаях он является единственным цианотоксином, обнаруженным в водоеме. Вероятно, продуценты цилиндроспермопсина подавляют рост цианобактерий, продуцирующих другие токсины [Mantzouki et al., 2018b]. При этом цилиндроспермопсин может обнаруживаться в водоемах на протяжении длительного времени, поскольку он продуцируется несколькими видами цианобактерий. Например, в озере Альбано (Италия) цилин-

Таблица 1. Содержание цианотоксинов в озерах, обследованных по программе EMLS [Mantzouki et al., 2018b]

Table 1. Cyanotoxins content in the investigated EMLS lakes [Mantzouki et al., 2018b]

Тип цианотоксина Cyanotoxin variant	Число озер, в которых обнаружен цианотоксин Number of lakes where cyanotoxin was found	Диапазон концентраций (мкг/л) Concentration range (µg/L)	Тип цианотоксина Cyanotoxin variant	Число озер, в которых обнаружен цианотоксин Number of lakes where cyanotoxin was found	Диапазон концентраций (мкг/л) Concentration range (µg/L)
MC-Tot	127	0–17,18	MC-RR	67	0–3,31
MC-YR	113	0–4,92	ATX	54	0–1,33
MC-dmLR	108	0–3,16	CYN	53	0–2,01
MC-LR	93	0–3,97	MC-dmRR	52	0–14,89

Примечание. MC-Tot – общее содержание микроцистинов; MC – микроцистины; ATX – анатоксины; CYN – цилиндроспермопсин.

Note. MC-Tot – total microcystins; MC – microcystins; ATX – anatoxins; CYN – cylindrospermopsin.

дроспермопсин присутствует с начала лета до осени благодаря последовательной смене продуцентов этого токсина *C. raciborskii* на *C. ovalisporum*, также продуцирующих цилиндроспермопсин [Messineo et al., 2010]. Анатоксин тоже нередко бывает единственным цианотоксином, выявляемым в водоеме, хотя и в очень низких концентрациях. В работе N. Salmaso с соавторами [2016] описано замещение цианобактерий *Planktothrix rubescens* ((De Candolle ex Gomont) Anagnostidis & Komárek, 1988), в основном синтезирующих MC-dmRR, продуцентами анатоксина *Tychonema bourrellyi* ((J. W. G. Lund) Anagnostidis & Komárek, 1988), происходящее в настоящее время в озере Гарда (Италия).

В литературе, посвященной цианобактериям, данные о токсинах, как правило, обсуждаются в связи с видами-продуцентами. E. Mantzouki с соавторами [2018b] считают, что прямое качественное и количественное определение содержания цианотоксинов в воде, независимо от видового состава фитопланктона, является более эффективным подходом для мониторинга состояния водоема. Содержание цианотоксинов в воде зависит не только от биомассы и видового состава цианобактерий, но и от доли потенциально токсигенных генотипов. Идентификация токсигенных штаммов цианобактерий при мониторинге состояния водоемов является необходимым этапом для принятия решений о технологии обработки питьевой воды на водопроводных станциях или о временном запрете использования водоема в рекреационных и/или водохозяйственных целях. Световая микроскопия не позволяет отделить токсигенные штаммы цианобактерий от нетоксигенных, поскольку они морфологически идентичны. Решить эту проблему можно используя метод полимеразной цепной реакции, который позволяет выявить наличие токсигенных цианобактерий в водоемах задолго до их массового размножения [Сиделев, Зубишина, 2014; Сиделев и др., 2016; Сиделев, 2019; Сиделев, Бабаназарова, 2020].

Влияние цианотоксинов на здоровье человека

При рассмотрении влияния цианотоксинов на организм человека основное внимание уделяется их потенциальной опасности в питьевой воде. Цианотоксины, содержащиеся в питьевой воде, вызывают у человека различные гастроэнтериты, заболевания печени и почек [Byth, 1980; Falconer et al., 1983]. Длительное употребление питьевой воды, содержащей цианотоксины в низких концентрациях (меньше

ПДК), может приводить к онкологическим заболеваниям [Zhou et al., 2002; Maatouk et al., 2004; Grosse et al., 2006; Svirčev et al., 2009]. По данным Международного агентства по изучению рака, микроцистины и нодулярины могут провоцировать развитие рака печени [Grosse et al., 2006]. Высокий уровень заболевания колоректальным раком в китайской провинции Чжэцзян связывают с хроническим употреблением питьевой воды, загрязненной микроцистинами [Zhou et al., 2002]. Случайное использование для приготовления диализата воды, содержащей микроцистины, привело к появлению неврологических расстройств и токсического гепатита у пациентов гемодиализного центра в г. Каруару (Бразилия) в феврале 1996 г. В течение месяца после процедуры гемодиализа 60 пациентов этого центра умерли от острой печеночной недостаточности [Pouria et al., 1998; Hilborn et al., 2013].

Цианотоксины могут попадать в организм человека не только с питьевой водой, но и с продуктами питания. Воду из водоемов с высокой численностью цианобактерий нередко используют для полива. При этом цианотоксины могут накапливаться в растениях, таких как пшеница, кукуруза, рис, горох, чечевица и др. Аккумуляция цианотоксинов растениями имеет несколько последствий. С одной стороны, отмечается угнетение растений, замедляется их рост, уменьшается количество хлорофилла и, как следствие, снижается эффективность фотосинтеза [Saqrane et al., 2009; Drobac et al., 2013]. С другой стороны, цианотоксины могут накапливаться в растениях [Liana-Ruiz Cabello et al., 2019]. Употребляя в пищу такие растения, человек может получить дозу цианотоксинов, превышающую установленную ВОЗ безопасную суточную дозу (0,04 мкг/кг массы тела) [Crush et al., 2008].

Цианотоксины кумулируются и в организмах животных, которых человек употребляет в пищу, таких как ракообразные, моллюски, рыбы и водоплавающие птицы. В Китае на примере трех крупных озер было проведено большое исследование содержания цианотоксинов в организмах 26 видов рыб, наиболее часто употребляемых человеком в пищу. Результаты исследования показали, что такое использование этой рыбы опасно для человека вследствие высокого содержания в ней микроцистинов [Peng et al., 2010].

Контакт цианотоксинов с кожей во время отдыха или занятий водными видами спорта вызывает шелушение кожи, сыпь, астму, пневмонию, периодический сухой кашель с рвотой и другими желудочно-кишечными симптомами,

сенную лихорадку, конъюнктивиты, раздражение глаз и ушей, аллергические реакции, сильные головные боли, миалгию, головокружение, поражения слизистой полости рта (появление волдырей). Эти симптомы появляются как после отдыха на море, так и от пресной воды. При купании в воде с высокой численностью цианобактерий зуд и жжение кожи проявляются в период от нескольких минут до нескольких часов [Grauer, Arnold, 1961; Cardellina et al., 1979; Yasumoto, Murata, 1993; Codd et al., 1999; Stewart et al., 2006].

Нельзя игнорировать и попадание цианобактерий через нос при купании, занятиях водными видами спорта, во время сельхозработ [Hawser et al., 1991; Falconer, 1998; Drobac et al., 2013]. Обработка слизистой носа у мышей микроцистинами приводила к повреждению печени и некрозу эпителия обонятельной и дыхательной зоны. При этом чувствительность к цианотоксинам была примерно в 10 раз выше, чем при их пероральном введении [Fitzgeorge et al., 1994].

Влияние цианотоксинов на здоровье животных

Первое документальное упоминание о негативном влиянии цианобактерий на организмы животных относится к 1833 году и описывает гибель рыб и крупного рогатого скота, связанную с «большим» озером, поверхность которого была покрыта зеленой субстанцией. Природа этой субстанции не охарактеризована. По мнению автора описания, она могла состоять из водных растений, насекомых или минералов [Moestrup, 1996]. Долгое время не удавалось однозначно связать гибель животных вблизи водоемов с цветением цианобактерий. Первым, кто доказал токсичность цианобактерий для животных, был G. Francis [Hilborn, Beasley, 2015], экспериментально показавший, что причиной массовой гибели овец на озере Александрина (Австралия) является *Nodularia spumigena* (Mertens ex Bornet & Flahault, 1888). Случаи гибели диких животных, домашнего скота и домашних животных вследствие негативного влияния токсигенных цианобактерий описаны на всех континентах [Stewart et al., 2008; Hilborn, Beasley, 2015].

Данных о гибели домашнего скота после контакта с цианобактериями очень много, они включают в себя информацию о гибели жвачных животных, свиней, лошадей, домашних птиц, искусственно выращиваемой рыбы и даже пчел [May, McBarron, 1973; Galey et al., 1987; Beasley et al., 1989; Zimba et al., 2000; Singh et al., 2014;

Hilborn, Beasley, 2015]. Признаки интоксикации проявляются по-разному и зависят от цианотоксина, дозы, времени экспозиции и индивидуальных особенностей животного. Эффект острого отравления, как правило, включает в себя обильное слюноотечение, беспокойство, отказ от пищи, бледность слизистых оболочек, слабость, одышку, угнетенное состояние, нарушения координации, диарею, непроизвольное сокращение мышц, конвульсии, лежачее положение, частичную потерю зрения и внезапную гибель. У птиц перед смертью могут проявляться слабость, нарушения координации и запрокидывание головы. Цианобактерии могут вызывать массовую гибель рыбы в рыбоводческих прудах вследствие поражения печени [Zimba et al., 2000; Singh et al., 2014].

Имеющиеся в научной литературе данные о действии цианотоксинов на домашних животных в основном описывают случаи отравления собак. Собаки контактируют с цианобактериями и цианотоксинами во время купания. При этом они могут заглатывать биомассу цианобактерий на мелководьях, пить воду, содержащую цианобактерии, и слизывать цианобактерии с шерсти [Codd et al., 1992; Hilborn, Beasley, 2015]. Анализу отравления собак цианотоксинами в США в период с 1920-х по 2012 г. посвящен обзор L. C. Backer с соавторами [2013]. В этом обзоре рассматриваются 368 случаев отравления собак цианотоксинами, которые представляют собой лишь малую часть реального количества подобных отравлений. У пострадавших животных отмечались такие симптомы, как рвота, диарея, обильное слюноотделение, неврологические расстройства, геморрагия и внезапная гибель. Более трети случаев отравления собак цианотоксинами с летальным исходом были связаны с действием анатоксина [Backer et al., 2013]. Случаи отравления цианотоксинами других домашних животных, например кошек, описываются крайне редко [Hilborn, Beasley, 2015].

В дикой природе позвоночные животные, от рыб до птиц и млекопитающих, нередко испытывают на себе негативное действие цианотоксинов. К сожалению, не всегда возможно связать гибель диких животных с отравлением цианотоксинами, поскольку тушки животных часто бывают непригодны для токсикологического и патологоанатомического анализа вследствие их разложения. Наибольшему риску при воздействии цианотоксинов подвергаются рыбы и водоплавающие птицы [Hilborn, Beasley, 2015]. Цианобактерии могут оказывать на организмы рыб и водоплавающих птиц как прямое, так и не прямое действие. Прямое

токсическое действие наблюдается в случае непосредственного контакта с цианобактериями или при употреблении воды и пищи, загрязненной цианотоксинами. Непрямое действие связано со снижением содержания в воде растворенного кислорода вследствие высокой численности цианобактерий. В этом случае в водоеме могут создаваться условия, благоприятные для размножения анаэробных бактерий *Clostridium botulinum* ((van Ermengem 1896) Bergey et al. 1923) и, как следствие, накопления ботулотоксина в воде [Keumer et al., 1972; Murphy et al., 1999].

Заболевание и гибель животных вследствие действия цианобактерий как индикатор опасности для здоровья человека

Известно немало случаев, когда гибель животных инициировала исследования, результатом которых являлось обнаружение цианотоксинов в воде и установление их химической природы и физиологического действия. Например, анатоксин-а впервые выделен при изучении гибели крупного рогатого скота вследствие воздействия цианобактерий [Devlin et al., 1977]. Было установлено, что причиной гибели собак и других животных на одном из озер Южной Дакоты (США) послужил цианотоксин, ингибирующий ацетилхолинэстеразу [Mahmood et al., 1988]. Дальнейшие исследования позволили охарактеризовать анатоксин-а(s) – единственный известный фосфорорганический ингибитор ацетилхолинэстеразы природного происхождения [Matsunaga et al., 1989]. В обзоре E. D. Hilborn и Val R. Beasley [2015] приводятся примеры того, как отравление и гибель животных явились толчком для изучения цианобактерий и цианотоксинов в водоемах, которые не использовались для снабжения населения водой или для рекреации.

В качестве животных – индикаторов опасного содержания в воде цианотоксинов в научной литературе, как правило, упоминают собак, домашний скот и рыб. Обнаружение погибших или умирающих животных в водоеме либо рядом с ним всегда предостерегает о потенциальной опасности воды для здоровья человека. Для оценки реальной опасности в таких случаях необходимо тщательное токсикологическое и патологоанатомическое исследование обнаруженных животных и анализ проб воды.

Концепция «Единое здоровье» чаще всего используется для выявления зоонозов и разработки мер по предотвращению их распространения. Потребность в комплексных исследо-

ваниях влияния состояния окружающей среды на здоровье человека и животных в настоящее время возрастает. Результаты этих исследований публикуются, в частности, в мультидисциплинарных научных журналах. В качестве примера можно привести журнал «One Health», издаваемый Международной ассоциацией тропической медицины, который публикует исследования внутри- и межвидового переноса патогенов. Издаваемый с 2015 года «International Journal of One Health» публикует статьи, посвященные этномедицине, результаты исследований зоонозов и лекарственной устойчивости возбудителей болезней человека и животных. В США с 2008 г. издается журнал «One Health Newsletter», большинство статей в котором посвящены проблеме предотвращения заболеваний, передающихся человеку от животных. Проблеме планирования и проведения комплексных исследований состояния окружающей среды посвящена статья J. Lebow et al. [2017].

В странах Евросоюза разработана и реализуется комплексная программа «Единое здоровье» (The One Health European Joint Programme, 2018–2022) [Brown et al., 2020]. Программой предусмотрено комплексное изучение зоонозов, лекарственной устойчивости возбудителей заболеваний, вновь возникающих инфекций и заболеваний, передающихся с пищей. Мониторинг численности и видового состава цианобактерий в водоемах питьевого, бытового, рыбохозяйственного и рекреационного назначения и содержания цианотоксинов в этих водоемах может стать частью оценки опасности загрязнения окружающей среды для здоровья человека.

В научной литературе описано немало случаев, когда негативные последствия влияния цианобактерий на здоровье людей сопровождались заболеваниями или гибелью животных, также подвергшихся воздействию цианобактерий. Некоторые из этих эпизодов обобщены в обзоре E. D. Hilborn и Val R. Beasley [2015] и приведены в табл. 2.

Цианобактерии не всегда продуцируют токсины; распространение цианобактерий и цианотоксинов неоднородно во времени и пространстве. Острое отравление и гибель животных являются полезными индикаторами для оценки опасности для здоровья человека. Однако отсутствие в водоеме больных и погибших животных нельзя однозначно интерпретировать как отсутствие опасности для человека. Опубликованные данные о болезнях и гибели животных вследствие контакта с цианобактериями E. D. Hilborn и Val R. Beasley [2015] рас-

Таблица 2. Случаи заболевания и гибели животных, связанные с цианобактериями, как индикаторы риска для здоровья человека [Hilborn, Beasley, 2015]

Table 2. Reports of animal illnesses and deaths associated with cyanobacteria as sentinel events for health risks [Hilborn, Beasley, 2015]

Местоположение Location	Год Year	Цианобактерии, выявленные в воде Cyanobacteria identified in water	Заболевания животных Animal illness	Заболевания человека, способ экспозиции Human illness, exposure route
Реки Элк, Канова в Западной Виргинии; река Огайо в Западной Виргинии, Огайо и Кентукки, США Elk River, Kanawha River, West Virginia; Ohio River, West Virginia, Ohio, Kentucky, United States	1930–1931	<i>Dolichospermum flosaquae</i>	Гибель рыбы Fish deaths	Заболевания желудочно-кишечного тракта у тысяч людей, получавших питьевую воду из рек Gastrointestinal illness among thousands of people receiving drinking water from rivers
Озеро Ку'Аппель и другие озера провинции Саскачеван, Канада Qu'Appelle Lake, other lakes in Saskatchewan, Canada	1959	<i>Dolichospermum circinale</i>	Гибель большого количества рыбы, гусей, собак и домашнего скота Multiple livestock, fish, geese, dogs died	Заболевания желудочно-кишечного тракта у людей, отдыхавших на озерах Gastrointestinal illness among individuals with recreational exposure to lakes
Река Гвадиана, Португалия Guadiana River in Portugal	1987	<i>Aphanizomenon flosaquae</i>	Гибель рыбы Fish deaths	Гастроэнтериты и дерматиты у людей, употреблявших питьевую воду из озера Gastroenteritis, dermatitis among those who consumed drinking water
Озеро Ратленд, графство Лейстершир, Великобритания Rutland Lake in Leicestershire, United Kingdom	1989	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Гибель собак и овец Dogs and sheep deaths	Гастроэнтериты и дерматиты у людей, отдыхавших на озере Gastroenteritis, dermatitis among those who recreated in water
Пруд в Мименсингх, Бангладеш Pond in Mymensingh, Bangladesh	2002	<i>Dolichospermum flosaquae</i> and <i>Microcystis aeruginosa</i>	Гибель рыбы и коз Fish and goats deaths	Сыпь, раздражение глаз и ушей Rash, eye and ear irritation
Озера в штате Небраска, США Lakes, Nebraska, United States	2004	<i>Dolichospermum</i> , <i>Microcystis</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Aphanizomenon</i>	Гибель собак, домашнего скота и диких животных Dogs, livestock, wildlife deaths	Сыпь, поражения кожи, головные боли и гастроэнтериты Rash, skin lesions, headache and gastroenteritis
Озера штата Огайо, США Lakes, Ohio, United States	2010	<i>Dolichospermum</i> spp., <i>Raphidiopsis raciborskii</i> , <i>Aphanizomenon</i> spp., <i>Planktolyngbya limnetica</i>	Гибель рыбы и собак, заболевания птиц Dogs, fish deaths, birds illness	Заболевания кожи, органов дыхания, нервной системы, гастроэнтериты Dermatologic, respiratory, neurologic illness and gastroenteritis

смаатривают как неполные. Значительная часть информации оседает в архивах ветеринаров и муниципальных органов. Кроме того, могут остаться незамеченными многие случаи гибели небольшого количества мелких животных из-за цианотоксинов. Очень часто исследование погибших животных проводится недостаточно тщательно и не позволяет однозначно связать их гибель с отравлением цианотоксинами. Это может быть обусловлено недостаточной квалификацией исследователей, отсутствием единого подхода к исследованию органов и тканей животных и высокой стоимостью анализа содержания цианотоксинов в организме.

Заключение

В данном обзоре приведены примеры того, как исследование болезней и гибели животных вследствие отравления цианотоксинами может быть использовано для уменьшения возможного вреда, причиняемого здоровью человека опасными цианобактериями. Использование подхода «Единое здоровье» является эффективным способом управления экологическими рисками, который требует объединения усилий специалистов разного профиля. Основными препятствиями для использования животных в качестве индикаторов экологической опасности являются:

недостаток информации о неблагоприятных событиях; ограниченные возможности для наблюдения и исследования неблагоприятных событий; возможный недостаток средств коммуникации между потенциальными партнерами – специалистами в области экологического контроля, ветеринарии и медицины. В настоящее время накоплены знания об опасности цианотоксинов для здоровья человека и животных; разработаны доступные методы идентификации и количественной оценки опасных цианобактерий в водоемах; разработаны методы определения содержания цианотоксинов в клетках цианобактерий, воде и биологических образцах; проводится мониторинг цветения опасных цианобактерий в водоемах. Это позволяет использовать данные о численности и видовом составе цианобактерий в водоемах при прогнозе их негативного воздействия на человека и животных, а также использовать животных в качестве маркеров опасных для здоровья человека событий, связанных с цианобактериями.

Литература

- Белых О. И., Гладких А. С., Сорокикова Е. Г., Тихонова И. В., Потапов С. А., Федорова Г. А. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2013. Т. 21. С. 363–378.
- Немова Н. Н., Лысенко Л. А., Мещерякова О. В., Комов В. Т. Ртуть в рыбах: биохимическая индикация // *Биосфера*. 2014. Т. 6. С. 176–186. doi: 10.24855/biosfera.v6i2.215
- Селезнева А. В., Селезнев В. А., Беспалова К. В. Массовое развитие водорослей на водохранилищах р. Волги в условиях маловодья // *Поволжский экологический журнал*. 2014. № 1. С. 88–96.
- Сиделев С. И. Новый способ детекции токсигенных цианобактерий на основе мультиплексной полимеразной цепной реакции // *Микробиология*. 2019. Т. 88. С. 372–374. doi: 10.1134/s0026365619030121
- Сиделев С. И., Зубишина А. А. Мониторинг содержания цианотоксинов микроцистинов в водоемах Верхней Волги: молекулярно-генетический и аналитический подходы // *Вода: химия и экология*. 2014. № 8. С. 88–94.
- Сиделев С. И., Корнева Л. Г., Соловьева В. В., Зубишина А. А., Плигин Д. Н. Молекулярно-генетическая идентификация и сезонная сукцессия токсигенных цианобактерий в фитопланктоне Рыбинского водохранилища // *Биология внутренних вод*. 2016. № 4. С. 37–44. doi: 10.7868/s0320965216040124
- Сиделев С. И., Бабаназарова О. В. Обнаружение цианобактериальных токсинов в источниках водоснабжения и водопроводной воде некоторых городов России: поиск продуцентов и апробация методов удаления // *Водные ресурсы*. 2020. Т. 47. С. 218–229. doi: 10.31857/s0321059620020182
- Степанова Н. Ю., Халиуллина Л. Ю., Никитин О. В., Латыпова В. З. Структура и токсичность цианобактерий в рекреационных зонах водоемов Казанского региона // *Вода: химия и экология*. 2012. № 11. С. 67–72.
- Backer L. C., Landsberg J. H., Miller M., Keel K., Taylor T. K. Canine cyanotoxins poisonings in the United States (1920s–2012): Review of suspected and confirmed cases from three data sources // *Toxins*. 2013. Vol. 5. P. 1597–1628. doi: 10.3390/toxins5091597
- Beasley V. R., Cook W. O., Dahlem A. M., Lovell R. A., Valentine W. M. Algae intoxications in livestock and waterfowl // *Vet. Clin. N. Am. Food Anim. Pract.* 1989. Vol. 5. P. 345–361. doi: 10.1016/s0749-0720(15)30980-4
- Brown H. L., Passey J. L., Getino M., Pursley I., Basu P., Horton D. L., La Ragione R. M. The One Health European Join Programme (OHEJP), 2018–2022: an exemplary One Health initiative // *J. Med. Microbiol.* 2020. Vol. 69. P. 1037–1039. doi: 10.1099/jmm.0.001228
- Byth S. Palm Island mystery disease // *Med. J. Aust.* 1980. Vol. 2. P. 40–42. doi: 10.5694/j.1326-5377.1980.tb131814.x
- Cardellina J. H. 2nd, Marner F. J., Moore R. E. Seaweed dermatitis: structure of lyngbyatoxin A // *Science*. 1979. Vol. 204. P. 193–195. doi: 10.1126/science.107586
- Christensen V. G., Maki R. P., Stelzer E. A., Norland J. E., Khan E. Phytoplankton community and algal toxicity at a recurring bloom in Sullivan bay, Kabetogama lake, Minnesota, USA // *Sci. Reports*. 2019. Vol. 9. e16129. doi: 10.1038/s41598-019-52639-y
- Codd G. A., Azevedo S. M. F. O., Bagchi S., Burch M. D., Carmichael W. W., Kaya K., Utkilen H. C. CYANONET. A global network for cyanobacterial bloom and toxin risk management. Initial situation assessment and recommendations // *Int. Hydrol. Progr. VI (Unesco, Paris)*, Tech. Doc. Hydrol. 2005. No. 176. 138 p.
- Codd G. A., Bell S. G., Kaya K., Ward C. J., Beattie K., Metcalf J. Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health // *Eur. J. Phycol.* 1999. Vol. 34. P. 405–415. doi: 10.1080/09670269910001736462
- Codd G. A., Edwards C., Beattie K. A., Barr W. M., Gunn G. J. Fatal attraction to cyanobacteria? // *Nature*. 1992. Vol. 359. P. 110–111. doi: 10.1038/359110b0
- Crush J. R., Briggs L. R., Sprosen J. M., Nichols S. N. Effect of irrigation with lake water containing microcystins on microcystin content and growth of ryegrass, clover, rape, and lettuce // *Environ. Toxicol.* 2008. Vol. 23. P. 246–252. doi: 10.1002/tox.20331
- Cyanobacteria and cyanotoxins: Information for drinking water systems* // EPA USA. 2014. 11 p.
- Davydov D. Checklist of cyanobacteria from the European polar desert zone // *Botanica*. 2018. Vol. 24. P. 185–201. doi: 10.2478/botlit-2018-0018
- Devlin J. P., Edwards O. E., Gorham P. R., Hunter N. R., Pike R. K., Stavric B. Anatoxin-a, a toxic alkaloid from *Anabaena flos-aquae* NRC 44-h // *Can. J. Chem.* 1977. Vol. 55. P. 1367–1371. doi: 10.1139/v77-189
- Destoumiex-Garzón D., Mavingui P., Boetsch G., Boussier J., Darriet F., Duboz P., Fritsch C., Giraudoux P., Le Roux F., Morand S., Paillard C., Pontier D., Sueuer C., Voiturion Y. The one health concept: 10 years old and a long road ahead // *Front. Vet. Sci.* 2018. Vol. 5. Art. 14. doi: 10.3389/fvets.2018.00014

- Drobac D., Tokodi N., Simenovic J., Baltic V., Stanic D., Svircev Z.* Human exposure to cyanotoxins and their effects on health // *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 2013. Vol. 64. P. 305–316. doi: 10.2478/10004-1254-64-2013-2320
- Elersek T., Bláha L., Mazur-Marzec H., Schmidt W., Carmeli S.* Other cyanobacterial bioactive substances // *Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis* / Eds. J. Meriluoto, L. Spoof, G. A. Codd. John Wiley & Sons, LTD., 2017. P. 179–195. doi: 10.1002/9781119068761.ch19
- Falconer I. R.* Algal toxins and human health // *Handbook of environ. chemistry.* Vol. 5, part C / Ed. J. Hrubec. Berlin: Springer-Verlag, 1998. P. 53–82. doi: 10.1007/978-3-540-68089-5_4
- Falconer I. R., Beresford A. M., Runnegar M. T.* Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa* // *Med. J. Aust.* 1983. Vol. 1. P. 511–514. doi: 10.5694/j.1326-5377.1983.tb136192.x
- Fitzgeorge R. B., Clark C. A., Keevil C. W.* Routes of intoxication // *Detection methods for cyanobacterial toxins* / Eds. G. A. Codd, T. M. Jefferies, C. W. Keevil, E. Potter. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1994. P. 69–74. doi: 10.1533/9781845698164.1.69
- Galey F. D., Beasley V. R., Carmichael W. W., Klepepe G., Hooser S. B., Yaschek W. M.* Blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) hepatotoxicosis in dairy cows // *Am. J. Vet. Res.* 1987. Vol. 48. P. 1415–1420.
- Grauer F. H., Arnold H. L.* Seaweed dermatitis: first report of dermatitis-producing marine algae // *Arch. Dermatol.* 1961. Vol. 84. P. 720–732. doi: 10.1001/archderm.1961.01580170014003
- Grosse Y., Baan R., Secretan B., Ghissassi F., Coglianov V. on behalf of the WHO International Agency on Cancer Monograph Working Group.* Carcinogenicity of nitrate, nitrite and cyanobacterial peptide toxins // *Lancet. Oncol.* 2006. Vol. 7. P. 628–629. doi: 10.1016/S1470-2045(06)70789-6
- Harada M.* Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution // *Crit. Rev. Toxicol.* 1995. Vol. 25. P. 1–24. doi: 10.3109/10408449509089885
- Hawser S. P., Codd G. A., Capone D. G., Carpenter E. J.* A neurotoxic factor associated with the bloom-forming cyanobacterium *Trichodesmium* // *Toxicon.* 1991. Vol. 29. P. 277–278. doi: 10.1016/0041-0101(91)90231-f
- Hilborn E. D., Beasley V. R.* One Health and cyanobacteria in freshwater systems: animal illnesses and deaths are sentinel events for human health risks // *Toxins.* 2015. Vol. 7. P. 1374–1395. doi: 10.3390/toxins7041374
- Hilborn E. D., Soares R. M., Servaites J. C., Delgado A. G., Magalhães V. F., Carmichael W. W., Azevedo S. M.* Sublethal microcystin exposure and biochemical outcomes among hemodialysis patients // *PLoS One.* 2013. Vol. 8. e69518. doi: 10.1371/journal.pone.0069518
- Huang C., Wang Y., Li X., Ren L., Zhao J., Hu Y., Zhang L., Fan G., Xu J., Gu X., Cheng Z., Yu T., Xia J., Wei Y., Wu W., Xie X., Yin W., Li H., Liu M., Xiao Y., Gao H., Guo L., Xie J., Wang G., Jiang R., Gao Z., Jin Q., Wang J., Cao B.* Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China // *Lancet.* 2020. Vol. 395. P. 497–506. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30183-5
- John N., Baker L., Ansell B. R. E., Newham S., Crosbie N. D., Jex A. R.* First report of anatoxin-a-producing cyanobacteria in Australia illustrates need to regularly up-date monitoring strategies in a shifting global distribution // *Sci. Reports.* 2019. Vol. 10. e10894. doi: 10.1038/s41598-019-46945-8
- Kaštovský J., Hauer T., Mareš J., Krautová M., Bešta T., Komárek J., Desortová B., Heteša J., Hindáková A., Houk V., Janeček E., Kopp R., Marvan P., Pummann P., Skácelova O., Zapomělová E.* A review of the alien and expansive species of freshwater cyanobacteria and algae in the Czech Republic // *Biol. Invasions.* 2010. Vol. 12. P. 3599–3625. doi: 10.1007/s10530-010-9754-3
- Keymer I. F., Smith G. R., Roberts T. A., Heaney S. I., Hibberd D. J.* Botulism as a factor in waterfowl mortality at St. James's park // *Vet. Rec.* 1972. Vol. 90. P. 111–114. doi: 10.1136/vr.90.5.111
- Koreivienė J., Kasperovičienė J.* Alien cyanobacteria *Anabaenabergii* var. *limnetica* Couté et Preisig from Lithuania: Some aspects of taxonomy, ecology and distribution // *Limnologia.* 2011. Vol. 41. P. 325–333. doi: 10.1016/j.limno.2011.01.004
- Lebov J., Grieger K., Womack D., Zaccaro D., Whitehead N., Kowalczyk B., MacDonald P. D. M.* A framework for One Health research // *One Health.* 2017. Vol. 3. P. 44–50. doi: 10.1016/j.onehlt.2017.03.004
- Li D., Wu N., Tang S., Su G., Li X., Zhang Y., Wang G., Zhang J., Liu H., Hecker M., Giesy J. P., Yu H.* Factors associated with blooms of cyanobacteria in a large shallow lake, China // *Environ Sci. Eur.* 2018. Vol. 30. e27. doi: 10.1186/s12302-018-0152-2
- Liana-Ruiz Cabello M., Jos A., Cameán A., Oliveira F., Barreiro A., Machado J., Azevedo J., Pinto E., Almeida A., Campos A., Vasconcelos V., Freitas M.* Analysis of the use of cylindrospermopsin and/or microcystin-contaminated water in the growth, mineral content, and contamination of *Spinacia oleracea* and *Lactuca sativa* // *Toxins.* 2019. Vol. 11. e624. doi: 10.3390/toxins11110624
- Maatouk I., Bouaich N., Plessis M. J., Perin F.* Detection by 32P-postlabeling detection of 8-oxo-7,8-dihydro-2' – deoxyguanosine in DNA damages in vitro in primary cultured rat hepatocytes and in vivo rat liver // *Mutat. Res.* 2004. Vol. 564. P. 9–20. doi: 10.1016/j.mrgentox.2004.06.010
- Mahmood N. A., Carmichael W. W., Pfahler D.* Anticholinesterase poisonings in dogs from a cyanobacterial (blue-green algae) bloom dominated by *Anabaena flos-aquae* // *Am. J. Vet. Res.* 1988. Vol. 49. P. 500–503.
- Mantzouki E., Campbell J., van Loon E. et al.* A European Multi Lake Survey dataset of environmental variables, phytoplankton pigments and cyanotoxins // *Sci. Data.* 2018a. Vol. 5. e180226. doi: 10.1038/sdata.2018.226
- Mantzouki E., Lüring M., Fastner J. et al.* Temperature effects explain continental scale distribution of cyanobacterial toxins // *Toxins.* 2018b. Vol. 10. e156. doi: 10.3390/toxins10040156

- Matsunaga H., Moore R. E., Niemczura W. P., Carmichael W. W. Anatoxin-a(s), a potent anticholinesterase from *Anabaena flos-aquae* // J. Am. Chem. Soc. 1989. Vol. 111. P. 8021–8023. doi: 10.1021/ja00202a057
- May V., McBarron E. J. Occurrence of blue-green alga, *Anabaena circiniuis* Rabenh., in New South Wales and toxicity to mice and honey bees // J. Aust. Inst. Agric. Sci. 1973. Vol. 39. P. 264–266.
- Meriluoto J., Blaha L., Bojadzija G., Bormans M., Brient L., Codd G. A., Drobac D., Faasen E. J., Fastner J., Hiskia A., Ibeling B. W., Kaloudis T., Kokocinski M., Kurmayer R., Pantelić D., Quesada A., Salmaso N., Tokodi N., Triantis T. M., Visser P. M., Svirčev Z. Toxic cyanobacteria and cyanotoxins in European waters – recent progress achieved through CYANO-COST Action and challenges for further research // Adv. Oceanogr. Limnol. 2017. Vol. 8. P. 161–178. doi: 10.4081/aiol.2017.6429
- Messineo V., Melchiorre S., Corcia A., Gallo P., Bruno M. Seasonal succession of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Aphanizomenon ovalisporum* blooms with cylindrospermopsin occurrence in the volcanic lake Albano, Central Italy // Environ. Toxicol. 2010. Vol. 25. P. 18–27. doi: 10.1002/tox.20469
- Moestrup Ø. Toxic blue-green algae (cyanobacteria) in 1833 // Phycologia. 1996. Vol. 35. P. 5. doi: 10.2216/i0031-8884-35-6s-5.1
- Murphy T., Lawson A., Nalewajko C., Murkin H., Ross L., Oguma K., McIntyre T. Algal toxins – initiators of avian botulism? // Environ. Toxicol. 1999. Vol. 15. P. 558–567. doi: 10.1002/1522-7278(2000)15:5%3C558::aid-tox29%3E3.0.co;2-r
- Peng L., Liu Y., Chen W., Liu L., Kent M., Song L. Health risks associated with consumption of microcystin-contaminated fish and shellfish in three Chinese lakes: Significance for freshwater aquacultures // Ecotoxicol. Environ. Saf. 2010. Vol. 73. P. 1804–1811. doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.07.043
- Pouria S., de Andrade A., Barbosa J., Cavalcanti R. L., Barreto V. T., Ward C. J., Preiser W., Poon G. K., Neild G. H., Codd G. A. Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil // Lancet. 1998. Vol. 352. P. 21–26. doi: 10.1016/s0140-6736(97)12285-1
- Quesada A., Moreno E., Carrasco D., Paniagua T., Wormer L., De Hoyos C., Sukenik A. Toxicity of *Aphanizomenon ovalisporum* (Cyanobacteria) in Spanish water reservoir // Eur. J. Phycol. 2006. Vol. 41. P. 39–45. doi: 10.1080/09670260500480926
- Salmaso N., Cerasino L., Boscaini A., Capelli C. Planktic *Tychonema* (Cyanobacteria) in the large lakes south of the Alps: phylogenetic assessment and toxigenic potential // FEMS Microbiol. Ecol. 2016. Vol. 92, iss. 10. P. 155. doi: 10.1093/femsec/fiw155
- Saqrane S., Ouahid Y., El Ghazali I., Oudra B., Bouarab L., del Campo F. Physiological changes in *Triticum durum*, *Zea mays*, *Pisum sativum* and *Lens esculenta* cultivars, caused by irrigation with water contaminated with microcystins: A laboratory experimental approach // Toxicon. 2009. Vol. 53. P. 786–796. doi: 10.1016/j.toxicon.2009.01.028
- Savadova K., Mazur-Marzec H., Karosiené J., Kasperovičienė J., Vitonyté I., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J. Effect of increased temperature on native and alien nuisance cyanobacteria from temperate lakes: an experimental approach // Toxins. 2018. Vol. 10. P. 445. doi: 10.3390/toxins10110445
- Singh S., Asthana R. K. Assessment of microcystin concentration in carp and catfish: A case study from Lakshmikund pond, Varanasi, India // Bull. Environ. Contam. Toxicol. 2014. Vol. 92. P. 687–692. doi: 10.1007/s00128-014-1277-7
- Stewart I., Seawright A. A., Shaw G. R. Cyanobacterial poisoning in livestock, wild mammals and birds – an overview // Adv. Exp. Med. Biol. 2008. Vol. 619. P. 613–637. doi: 10.1007/978-0-387-75865-7_28
- Stewart I., Webb P. M., Schluter P. J., Shaw G. R. Recreational and occupational field exposure to freshwater cyanobacteria – a review of anecdotal and case reports, epidemiological studies and the challenges for epidemiologic assessment // Environ. Health. 2006. Vol. 5. Art. 6. doi: 10.1186/1476-069x-5-6
- Svirčev Z., Kristić S., Miladinov-Mikov M., Baltić V., Vidović M. Freshwater cyanobacterial blooms and primary liver cancer epidemiological studies in Serbia // J. Environ. Sci. Health. C Environ. Carcinog. Ecotoxicol. Rev. 2009. Vol. 27. P. 36–55. doi: 10.1080/10590500802668016
- Tatters A. O., Howard M. D. A., Nagoda C., Fetscher A. E., Kudela R. M., Caron D. A. Heterogeneity of toxin-producing cyanobacteria and cyanotoxins in coastal watersheds of Southern California // Estuaries and Coasts. 2019. Vol. 42. P. 958–975. doi: 10.1007/s12237-019-00546-w
- WHO – World Health Organization. Guidelines for drinking water quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2011. 541 p.
- Yadav I. C., Devi N. L. Pesticides classification and its impact on human and environment // Environ. science and engineering. Vol. 6: Toxicology / Eds. R. Chandra, B. R. Gurjar & J. N. Govil. Houston: Studium Press LLC, 2017. P. 140–158.
- Yasumoto Y., Murata M. Marine toxins // Chem. Rev. 1993. Vol. 93. P. 1897–1909. doi: 10.1021/cr00021a011
- Zimba P. V., Khoo L., Carmichael W. W., Gaunt P. Confirmation of catfish mortalities resulting from microcystin produced during *Microcystis* blooms // J. Phycol. 2000. Vol. 36. P. 72–73. doi: 10.1046/j.1529-8817.1999.00001-215.x
- Zinsstag J., Schellin E., Waltner-Toews D., Tanner M. From “one medicine” to “one health” and systemic approaches to health and well-being // Prev. Vet. Med. 2011. Vol. 101. P. 148–156. doi: 10.1016/j.prevetmed.2010.07.003
- Zhou L., Yu H., Chen K. Relationship between microcystin in drinking water and colorectal cancer // Biomed. Environ. Sci. 2002. Vol. 15. P. 166–171.

Поступила в редакцию 14.01.2021

References

- Belykh O. I., Gladkikh A. S., Sorokovikova E. G., Tikhonova I. V., Potapov S. A., Fedorova G. A. Microcystine-producing cyanobacteria in water reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine. *Chem. for Sustainable Development*. 2013. Vol. 21. P. 347–361.
- Nemova N. N., Lysenko L. A., Meshcheryakova O. V., Komov V. T. Rtut' v rybakh: biokhimitseskaya indikatsiya [Mercury in fish: biochemical indication]. *Biosphera*. [Biosphere]. 2013. Vol. 6. P. 176–186. doi: 10.24855/biosfera.v6i2.215
- Selezneva A. V., Seleznev V. A., Bepalova K. V. Massovoe razvitiye vodoroslei na vodokhranilishchakh r. Volgi v usloviyakh malovod'ya [Mass seaweed development in the Volga reservoirs when shortage of water]. *Povolzhskiy ekol. zhurn.* [Volga Region J. Ecol.]. 2014. No. 1. P. 88–96.
- Sidelev S. I. A novel multiplex PCR-based technique for detection of toxigenic cyanobacteria. *Microbiol.* 2019. Vol. 88. P. 375–377. doi: 10.1134/S0026261719030123
- Sidelev S. I., Zubishina A. A. Monitoring sodержaniya tsianotoksinov mikrotsistinov v vodoemakh Verkhnei Volgi: molekulyarno-geneticheskii i analiticheskii podkhody [Monitoring of cyanotoxins microcystins content in the Upper Volga water bodies: molecular-genetic and analytical approaches]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2014. No. 8. P. 88–94.
- Sidelev S. I., Korneva L. G., Solovyeva V. V., Zubishina A. A., Pligin D. N. Molecular genetic identification and seasonal succession of toxigenic cyanobacteria in phytoplankton of the Rybinsk reservoir. *Inland Water Biol.* 2016. Vol. 9. P. 368–374. doi: 10.1134/S199508291604012X
- Sidelev S. I., Babanazarova O. V. Detection of cyanobacterial toxins in water supply sources and tap water in some Russian cities: searching producers and testing removal methods. *Water Resources*. 2020. Vol. 47. P. 304–314. doi: 10.1134/S0097807820020189
- Stepanova N. Yu., Khaliullina L. Yu., Nikitin O. V., Latypova V. Z. Struktura i toksichnost' tsianobakterii v rekreatsionnykh zonakh vodoemov Kazanskogo regiona [Structure and toxicity of cyanobacteria in recreative zones of the Kazan region]. *Voda: khimiya i ekol.* [Water: Chemistry and Ecol.]. 2012. No. 11. P. 67–72.
- Backer L. C., Landsberg J. H., Miller M., Keel K., Taylor T. K. Canine cyanotoxins poisonings in the United States (1920s–2012): Review of suspected and confirmed cases from three data sources. *Toxins*. 2013. Vol. 5. P. 1597–1628. doi: 10.3390/toxins5091597
- Beasley V. R., Cook W. O., Dahlem A. M., Lovell R. A., Valentine W. M. Algae intoxications in livestock and waterfowl. *Vet. Clin. N. Am. Food Anim. Pract.* 1989. Vol. 5. P. 345–361. doi: 10.1016/s0749-0720(15)30980-4
- Brown H. L., Passey J. L., Getino M., Pursley I., Basu P., Horton D. L., La Ragione R. M. The One Health European Joint Programme (OHEJP), 2018–2022: an exemplary One Health initiative. *J. Med. Microbiol.* 2020. Vol. 69. P. 1037–1039. doi: 10.1099/jmm.0.001228
- Byth S. Palm Island mystery disease. *Med. J. Aust.* 1980. Vol. 2. P. 40–42. doi: 10.5694/j.1326-5377.1980.tb131814.x
- Cardellina J. H. 2nd, Marner F. J., Moore R. E. Seaweed dermatitis: structure of lyngbyatoxin A. *Science*. 1979. Vol. 204. P. 193–195. doi: 10.1126/science.107586
- Christensen V. G., Maki R. P., Stelzer E. A., Norland J. E., Khan E. Phytoplankton community and algal toxicity at a recurring bloom in Sullivan bay, Kabetogama lake, Minnesota, USA. *Sci. Reports*. 2019. Vol. 9. e16129. doi: 10.1038/s41598-019-52639-y
- Codd G. A., Azevedo S. M. F. O., Bagchi S., Burch M. D., Carmichael W. W., Kaya K., Utkilen H. C. CYANONET. A global network for cyanobacterial bloom and toxin risk management. Initial situation assessment and recommendations. *Int. Hydrol. Progr. VI (Unesco, Paris)*, *Tech. Doc. Hydrol.* 2005. No. 176. 138 p.
- Codd G. A., Bell S. G., Kaya K., Ward C. J., Beattie K., Metcalf J. Cyanobacterial toxins, exposure routes and human health. *Eur. J. Phycol.* 1999. Vol. 34. P. 405–415. doi: 10.1080/09670269910001736462
- Codd G. A., Edwards C., Beattie K. A., Barr W. M., Gunn G. J. Fatal attraction to cyanobacteria? *Nature*. 1992. Vol. 359. P. 110–111. doi: 10.1038/359110b0
- Crush J. R., Briggs L. R., Sprosen J. M., Nichols S. N. Effect of irrigation with lake water containing microcystins on microcystin content and growth of ryegrass, clover, rape, and lettuce. *Environ. Toxicol.* 2008. Vol. 23. P. 246–252. doi: 10.1002/tox.20331
- Cyanobacteria and cyanotoxins: Information for drinking water systems. *EPA USA*. 2014. 11 p.
- Davydov D. Checklist of cyanobacteria from the European polar desert zone. *Botanica*. 2018. Vol. 24. P. 185–201. doi: 10.2478/botlit-2018-0018
- Devlin J. P., Edwards O. E., Gorham P. R., Hunter N. R., Pike R. K., Stavric B. Anatoxin-a, a toxic alkaloid from *Anabaena flos-aquae* NRC 44-h. *Can. J. Chem.* 1977. Vol. 55. P. 1367–1371. doi: 10.1139/v77-189
- Destoumiex-Garzon D., Mavingui P., Boetsch G., Boussier J., Darriet F., Duboz P., Fritsch C., Giraudoux P., Le Roux F., Morand S., Paillard C., Pontier D., Sueuer C., Voiturion Y. The one health concept: 10 years old and a long road ahead. *Front. Vet. Sci.* 2018. Vol. 5. Art. 14. doi: 10.3389/fvets.2018.00014
- Drobac D., Tokodi N., Simenovic J., Baltic V., Stanic D., Svircev Z. Human exposure to cyanotoxins and their effects on health. *Arh. Hig. Rada. Toksikol.* 2013. Vol. 64. P. 305–316. doi: 10.2478/10004-1254-64-2013-2320
- Elersek T., Blaha L., Mazur-Marzec H., Schmidt W., Carmeli S. Other cyanobacterial bioactive substances. *Handbook of cyanobacterial monitoring and cyanotoxin analysis*. Eds. J. Meriluoto, L. Spoof ana G. A. Codd. John Wiley & Sons, LTD., 2017. P. 179–195. doi: 10.1002/9781119068761.ch19
- Falconer I. R. Algal toxins and human health. *Handbook of environ. chemistry*. Vol. 5, part C. Ed. J. Hrubec. Berlin: Springer-Verlag, 1998. P. 53–82. doi: 10.1007/978-3-540-68089-5_4
- Falconer I. R., Beresford A. M., Runnegar M. T. Evidence of liver damage by toxin from a bloom of the blue-green alga, *Microcystis aeruginosa*. *Med. J. Aust.* 1983. Vol. 1. P. 511–514. doi: 10.5694/j.1326-5377.1983.tb136192.x
- Fitzgeorge R. B., Clark C. A., Keevil C. W. Routes of intoxication. *Detection methods for cyanobacteri-*

- al toxins*. Eds. G. A. Codd, T. M. Jefferies, C. W. Keevil, E. Potter. Cambridge: The Royal Society of Chemistry, 1994. P. 69–74. doi: 10.1533/9781845698164.1.69
- Galey F. D., Beasley V. R., Carmichael W. W., Klepepe G., Hooser S. B., Yaschek W. M. Blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*) hepatotoxicosis in dairy cows. *Am. J. Vet. Res.* 1987. Vol. 48. P. 1415–1420.
- Grauer F. H., Arnold H. L. Seaweed dermatitis: first report of dermatitis-producing marine algae. *Arch. Dermatol.* 1961. Vol. 84. P. 720–732. doi: 10.1001/archderm.1961.01580170014003
- Grosse Y., Baan R., Secretan B., Ghissassi F., Coglianov V. on behalf of the WHO International Agency on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of nitrate, nitrite and cyanobacterial peptide toxins. *Lancet. Oncol.* 2006. Vol. 7. P. 628–629. doi: 10.1016/s1470-2045(06)70789-6
- Harada M. Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Crit. Rev. Toxicol.* 1995. Vol. 25. P. 1–24. doi: 10.3109/10408449509089885
- Hawser S. P., Codd G. A., Capone D. G., Carpenter E. J. A neurotoxic factor associated with the bloom-forming cyanobacterium *Trichodesmium*. *Toxicon.* 1991. Vol. 29. P. 277–278. doi: 10.1016/0041-0101(91)90231-f
- Hilborn E. D., Beasley V. R. One Health and cyanobacteria in freshwater systems: animal illnesses and deaths are sentinel events for human health risks. *Toxins.* 2015. Vol. 7. P. 1374–1395. doi: 10.3390/toxins7041374
- Hilborn E. D., Soares R. M., Servaites J. C., Delgado A. G., Magalhães V. F., Carmichael W. W., Azevedo S. M. Sublethal microcystin exposure and biochemical outcomes among hemodialysis patients. *PLoS One.* 2013. Vol. 8. e69518. doi: 10.1371/journal.pone.0069518
- Huang C., Wang Y., Li X., Ren L., Zhao J., Hu Y., Zhang L., Fan G., Xu J., Gu X., Cheng Z., Yu T., Xia J., Wei Y., Wu W., Xie X., Yin W., Li H., Liu M., Xiao Y., Gao H., Guo L., Xie J., Wang G., Jiang R., Gao Z., Jin Q., Wang J., Cao B. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet.* 2020. Vol. 395. P. 497–506. doi: 10.1016/S0140-6736(20)30183-5
- John N., Baker L., Ansell B. R. E., Newham S., Crosbie N. D., Jex A. R. First report of anatoxin-a-producing cyanobacteria in Australia illustrates need to regularly up-date monitoring strategies in a shifting global distribution. *Sci. Reports.* 2019. Vol. 10. e10894. doi: 10.1038/s41598-019-46945-8
- Kaštovský J., Hauer T., Mareš J., Krautová M., Bešta T., Komárek J., Desortová B., Heteša J., Hindáková A., Houk V., Janeček E., Kopp R., Marvan P., Pummann P., Skácelova O., Zapomělová E. A review of the alien and expansive species of freshwater cyanobacteria and algae in the Czech Republic. *Biol. Invasions.* 2010. Vol. 12. P. 3599–3625. doi: 10.1007/s10530-010-9754-3
- Keymer I. F., Smith G. R., Roberts T. A., Heaney S. I., Hibberd D. J. Botulism as a factor in waterfowl mortality at St. James's park. *Vet. Rec.* 1972. Vol. 90. P. 111–114. doi: 10.1136/vr.90.5.111
- Koreivienė J., Kasperovičienė J. Alien cyanobacteria *Anabaenabergii* var. *limnetica* Couté et Preisig from Lithuania: Some aspects of taxonomy, ecology and distribution. *Limnologica.* 2011. Vol. 41. P. 325–333. doi: 10.1016/j.limno.2011.01.004
- Lebov J., Grieger K., Womack D., Zaccaro D., Whitehead N., Kowalczyk B., MacDonald P. D. M. A framework for One Health research. *One Health.* 2017. Vol. 3. P. 44–50. doi: 10.1016/j.onehlt.2017.03.004
- Li D., Wu N., Tang S., Su G., Li X., Zhang Y., Wang G., Zhang J., Liu H., Hecker M., Giesy J. P., Yu H. Factors associated with blooms of cyanobacteria in a large shallow lake, China. *Environ Sci. Eur.* 2018. Vol. 30. e27. doi: 10.1186/s12302-018-0152-2
- Liana-Ruiz Cabello M., Jos A., Cameán A., Oliveira F., Barreiro A., Machado J., Azevedo J., Pinto E., Almeida A., Campos A., Vasconcelos V., Freitas M. Analysis of the use of cylindrospermopsin and/or microcystin-contaminated water in the growth, mineral content, and contamination of *Spinacia oleracea* and *Lactuca sativa*. *Toxins.* 2019. Vol. 11. e624. doi: 10.3390/toxins11110624
- Maatouk I., Bouaich N., Plessis M. J., Perin F. Detection by 32P-postlabeling detection of 8-oxo-7,8-dihydro-2'-deoxyguanosine in DNA damages in vitro in primary cultured rat hepatocytes and in vivo rat liver. *Mutat. Res.* 2004. Vol. 564. P. 9–20. doi: 10.1016/j.mrgentox.2004.06.010
- Mahmood N. A., Carmichael W. W., Pfahler D. Anticholinesterase poisonings in dogs from a cyanobacterial (blue-green algae) bloom dominated by *Anabaena flos-aquae*. *Am. J. Vet. Res.* 1988. Vol. 49. P. 500–503.
- Mantzouki E., Campbell J., van Loon E. et al. A European Multi Lake Survey dataset of environmental variables, phytoplankton pigments and cyanotoxins. *Sci. Data.* 2018a. Vol. 5. e180226. doi: 10.1038/sdata.2018.226
- Mantzouki E., Lürling M., Fastner J. et al. Temperature effects explain continental scale distribution of cyanobacterial toxins. *Toxins.* 2018b. Vol. 10. e156. doi: 10.3390/toxins10040156
- Matsunaga H., Moore R. E., Niemczura W. P., Carmichael W. W. Anatoxin-a(s), a potent anticholinesterase from *Anabaena flos-aquae*. *J. Am. Chem. Soc.* 1989. Vol. 111. P. 8021–8023. doi: 10.1021/ja00202a057
- May V., McBarron E. J. Occurrence of blue-green alga, *Anabaena circinulis* Rabenh., in New South Wales and toxicity to mice and honey bees. *J. Aust. Inst. Agric. Sci.* 1973. Vol. 39. P. 264–266.
- Meriluoto J., Blaha L., Bojadzija G., Bormans M., Brient L., Codd G. A., Drobac D., Faasen E. J., Fastner J., Hiskia A., Ibeling B. W., Kaloudis T., Kokocinski M., Kurmayer R., Pantelić D., Quesada A., Salmaso N., Tokodi N., Triantis T. M., Visser P. M., Svirčev Z. Toxic cyanobacteria and cyanotoxins in European waters – recent progress achieved through CYANO-COST Action and challenges for further research. *Adv. Oceanogr. Limnol.* 2017. Vol. 8. P. 161–178. doi: 10.4081/aiol.2017.6429
- Messineo V., Melchiorre S., Corcia A., Gallo P., Bruno M. Seasonal succession of *Cylindrospermopsis raciborskii* and *Aphanizomenon ovalisporum* blooms with cylindrospermopsin occurrence in the volcanic

lake Albano, Central Italy. *Environ. Toxicol.* 2010. Vol. 25. P. 18–27. doi: 10.1002/tox.20469

Moestrup Ø. Toxic blue-green algae (cyanobacteria) in 1833. *Phycologia*. 1996. Vol. 35. P. 5. doi: 10.2216/i0031-8884-35-6s-5.1

Murphy T., Lawson A., Nalewajko C., Murkin H., Ross L., Oguma K., McIntyre T. Algal toxins – initiators of avian botulism? *Environ. Toxicol.* 1999. Vol. 15. P. 558–567. doi: 10.1002/1522-7278(2000)15:5%3C558::aid-tox29%3E3.0.co;2-r

Peng L., Liu Y., Chen W., Liu L., Kent M., Song L. Health risks associated with consumption of microcystin-contaminated fish and shellfish in three Chinese lakes: Significance for freshwater aquacultures. *Eco-toxicol. Environ. Saf.* 2010. Vol. 73. P. 1804–1811. doi: 10.1016/j.ecoenv.2010.07.043

Pouria S., de Andrade A., Barbosa J., Cavalcanti R. L., Barreto V. T., Ward C. J., Preiser W., Poon G. K., Neild G. H., Codd G. A. Fatal microcystin intoxication in haemodialysis unit in Caruaru, Brazil. *Lancet*. 1998. Vol. 352. P. 21–26. doi: 10.1016/S0140-6736(97)12285-1

Quesada A., Moreno E., Carrasco D., Paniagua T., Wormer L., De Hoyos C., Sukenik A. Toxicity of *Aphanizomenon ovalisporum* (Cyanobacteria) in Spanish water reservoir. *Eur. J. Phycol.* 2006. Vol. 41. P. 39–45. doi: 10.1080/09670260500480926

Salmaso N., Cerasino L., Boscaini A., Capelli C. Planktic *Tychonema* (Cyanobacteria) in the large lakes south of the Alps: phylogenetic assessment and toxigenic potential. *FEMS Microbiol. Ecol.* 2016. Vol. 92, iss. 10. P. 155. doi: 10.1093/femsec/fiw155

Saqrane S., Ouahid Y., El Ghazali I., Oudra B., Bouarab L., del Campo F. Physiological changes in *Triticum durum*, *Zea mays*, *Pisum sativum* and *Lens esculenta* cultivars, caused by irrigation with water contaminated with microcystins: A laboratory experimental approach. *Toxicon*. 2009. Vol. 53. P. 786–796. doi: 10.1016/j.toxicon.2009.01.028

Savadova K., Mazur-Marzec H., Karosiené J., Kasperovičienė J., Vitonytė I., Toruńska-Sitarz A., Koreivienė J. Effect of increased temperature on native and alien nuisance cyanobacteria from temperate lakes: an experimental approach. *Toxins*. 2018. Vol. 10. P. 445. doi: 10.3390/toxins10110445

Singh S., Asthana R. K. Assessment of microcystin concentration in carp and catfish: A case study from Lakshmikund pond, Varanasi, India. *Bull. Environ. Con-*

tam. Toxicol. 2014. Vol. 92. P. 687–692. doi: 10.1007/s00128-014-1277-7

Stewart I., Seawright A. A., Shaw G. R. Cyanobacterial poisoning in livestock, wild mammals and birds – an overview. *Adv. Exp. Med. Biol.* 2008. Vol. 619. P. 613–637. doi: 10.1007/978-0-387-75865-7_28

Stewart I., Webb P. M., Schluter P. J., Shaw G. R. Recreational and occupational field exposure to freshwater cyanobacteria – a review of anecdotal and case reports, epidemiological studies and the challenges for epidemiologic assessment. *Environ. Health*. 2006. Vol. 5. Art. 6. doi: 10.1186/1476-069x-5-6

Svirčev Z., Kristić S., Miladinov-Mikov M., Baltić V., Vidović M. Freshwater cyanobacterial blooms and primary liver cancer epidemiological studies in Serbia. *J. Environ. Sci. Health. C Environ. Carcinog. Eco-toxicol. Rev.* 2009. Vol. 27. P. 36–55. doi: 10.1080/10590500802668016

Tatters A. O., Howard M. D. A., Nagoda C., Fetscher A. E., Kudela R. M., Caron D. A. Heterogeneity of toxin-producing cyanobacteria and cyanotoxins in coastal watersheds of Southern California. *Estuaries and Coasts*. 2019. Vol. 42. P. 958–975. doi: 10.1007/s12237-019-00546-w

World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking water quality. 4th ed. Geneva: WHO, 2011. 541 p.

Yadav I. C., Devi N. L. Pesticides classification and its impact on human and environment. *Environ. science and engineering*. Vol. 6: Toxicology. Eds. R. Chandra, B. R. Gurjar & J. N. Govil. Houston: Studium Press LLC, 2017. P. 140–158.

Yasumoto Y., Murata M. Marine toxins. *Chem. Rev.* 1993. Vol. 93. P. 1897–1909. doi: 10.1021/cr00021a011

Zimba P. V., Khoo L., Carmichael W. W., Gaunt P. Confirmation of catfish mortalities resulting from microcystin produced during *Microcystis* blooms. *J. Phycol.* 2000. Vol. 36. P. 72–73. doi: 10.1046/j.1529-8817.1999.00001-215.x

Zinsstag J., Schellin E., Waltner-Toews D., Tanner M. From “one medicine” to “one health” and systemic approaches to health and well-being. *Prev. Vet. Med.* 2011. Vol. 101. P. 148–156. doi: 10.1016/j.prevetmed.2010.07.003

Zhou L., Yu H., Chen K. Relationship between microcystin in drinking water and colorectal cancer. *Biomed. Environ. Sci.* 2002. Vol. 15. P. 166–171.

Received January 14, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Калинникова Татьяна Борисовна

заведующая лаб. экспериментальной экологии, к. б. н.
Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: tbkalinnikova@gmail.com

CONTRIBUTORS:

Kalinnikova, Tatyana

Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Daur'skaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: tbkalinnikova@gmail.com

Егорова Анастасия Васильевна

младший научный сотрудник лаб. экспериментальной экологии

Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: egorovanastassia@gmail.com

Шагидуллин Рифгат Роальдович

директор, чл.-корр. АН РТ, д. х. н.

Институт проблем экологии и недропользования
Академии наук Республики Татарстан
ул. Даурская, 28, Казань, Республика Татарстан,
Россия, 420087
эл. почта: shagidullin@mail.ru

Egorova, Anastasia

Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauruskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: egorovanastassia@gmail.com

Shagidullin, Rifgat

Research Institute for Problems of Ecology
and Mineral Wealth Use, Tatarstan Academy of Sciences
28 Dauruskaya St., 420087 Kazan, Republic of Tatarstan, Russia
e-mail: shagidullin@mail.ru