

УДК [582.26:574.63 + 626.881]

*Н. И. Кирпенко, Ю. Г. Крот, О. М. Усенко*

**«ЦВЕТЕНИЕ» ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД —  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ<sup>1</sup>**

Рассматривается проблема «цветения» воды вследствие массового размножения синезеленых водорослей, особое внимание уделено развитию этого явления в Украине. С учетом мирового опыта проанализированы причины, динамика, последствия «цветения» и факторы, влияющие на его развитие. Представлены некоторые биотехнологические и физико-химические приемы ограничения «цветения» и возможные пути уменьшения его негативного влияния. В связи с риском усиления «цветения» водоемов вследствие антропогенных воздействий и климатических аномалий, учитывая потенциальную опасность этого явления для водопользователей, подчеркивается необходимость усиления внимания к нему со стороны как научных организаций, так и государственных органов санитарного контроля.

*Ключевые слова:* «цветение» воды, синезеленые водоросли, качество воды, способы ограничения «цветения».

Несмотря на большое количество пресноводных водоемов (более 60 000 рек, 1 100 водохранилищ, около 20 000 озер) [7], Украина является одним из самых маловодных регионов Европы. Недостаточность водных ресурсов усугубляется тем, что большинство поверхностных вод, которые в Украине используются для питьевого водоснабжения, характеризуются очень низким качеством и высокой степенью химического и бактериального загрязнения вследствие сброса неочищенных или недостаточно очищенных коммунально-бытовых и промышленных стоков, смыва загрязняющих веществ с городских и сельскохозяйственных территорий, эрозии почв на водосборной площади.

Одной из серьезных проблем водообеспечения региона, имеющей тенденцию к значительному усугублению в настоящее время в связи с увеличением антропогенного пресса и глобальными климатическими изменениями, является «цветение» воды, представляющее собой быстрое неконтролируемое развитие некоторых видов микроводорослей. «Цветение» могут вызывать представители Rynophyta, Chrysophyta, Chlorophyta и Cyanophyta [11], но в условиях Украины основные проблемы создают синезеленые водорос-

---

<sup>1</sup> Исследования поддержаны Программой развития приоритетных направлений научных исследований НАН Украины на 2018 г.

© Н. И. Кирпенко, Ю. Г. Крот, О. М. Усенко, 2018

ли (согласно современной классификации — цианобактерии *Cyanobacteria* или цианопрокариоты *Cyanoprokaryota*) [44, 45].

### ***Распространение и экологическое значение «цветения» воды***

«Цветение» воды широко известно во всем мире. В настоящее время оно наблюдается во всех природно-климатических зонах Земли, включая северные и арктические регионы, — в малых и крупных реках и их эстуариях, в больших и малых равнинных и горных озерах, в прудах и водохранилищах, в морях и на опресненных морских акваториях. Наиболее глобальные масштабы это явление принимает в водоемах, подверженных антропогенному воздействию.

В последние десятилетия «цветение» водоемов синезелеными водорослями регистрируют в десятках стран Австралии, Европы, Азии, Африки и Америки [50, 51, 62, 66]. В России его регулярно наблюдают на Южном Урале и в западной Сибири, в реках Воронежской области и Чудско-Псковском озере, в Ижевском, Усть-Илимском и Цимлянском водохранилищах, в Карелии, Куршском и Финском заливах Балтийского моря, в водоемах юга и северо-запада России, в дельте Печоры и в Приморском крае [1, 3, 14, 23, 30, 46, 57].

Микроскопические водоросли, которые обычно трудно рассмотреть в толще воды, в благоприятных условиях начинают бурно размножаться, образуя ярко-зеленую пленку на поверхности водоема, которая мигрирует в зависимости от направления ветра, образует характерные зеленые полосы и с течением времени покрывает все большую акваторию. В местах ветрового стога пленки образуется густая зеленая масса, которая постепенно приобретает голубоватый, синий или пурпурный оттенок и неприятный запах, возникающие при отмирании и разложении биомассы водорослей.

«Цветение» оказывает существенное негативное влияние на водные экосистемы, создает проблемы для рекреации, хозяйственного и питьевого водопользования. Значительно ухудшается качество воды, формируются риски для живых организмов всех трофических уровней, включая человека, населяющих как водоемы, так и их окрестности, и использующих их для получения питьевой воды и пищевых ресурсов (рыбы, моллюсков) или рекреации. Развивающиеся в огромных количествах водоросли изменяют окраску воды и ухудшают ее органолептические показатели, создают существенные помехи в питьевом и техническом водоснабжении, препятствуют нормальной работе тепловых, атомных и гидроэлектростанций. При скоплении водорослей в водозаборных зонах после отмирания клеток неприятный запах и вкус сохраняются и в водопроводной воде.

Ухудшение качества воды вызывают повышение рН, накопление фенолов, значительное снижение содержания растворенного кислорода, увеличение концентрации и изменение состава растворенного органического вещества вследствие накопления продуктов жизнедеятельности водорослей (органических и аминокислот, углеводов, пигментов, веществ пептидной

природы, летучих соединений) [44, 45]. Некоторые вещества опасны для здоровья, поскольку обладают аллергенными свойствами или являются предшественниками канцерогенных соединений.

Уменьшение прозрачности воды и снижение проникновения солнечной радиации в нижележащие горизонты водоемов приводит к световому лимитированию водорослей, формирующих кормовую базу зоопланктона и зообентоса, и ухудшению рыбопродуктивности. В целом «цветение» приводит к нарушению трофических связей, токсификации и общей деградации водных экосистем [20].

При отмирании водорослей, вследствие прекращения фотосинтеза резко снижается насыщение воды кислородом, большое количество которого дополнительно расходуется на окисление органических веществ, возникают заморные явления. Так, в Куршском заливе в 2008—2011 гг. массовую гибель рыбы и беспозвоночных отмечали неоднократно — сначала в конце весны — начале лета, затем в июле и августе [12]. При усилении интенсивности «цветения» заморы распространялись с прибрежных районов на всю акваторию залива, при этом погибали рыбы, в том числе молодь, рыбацкие птицы и даже устойчивые к дефициту кислорода моллюски и другие беспозвоночные.

Следует отметить, что после отмирания клеток водорослей в воду возвращаются все поглощенные биогенные элементы и аккумулярованные поллютанты, в том числе, тяжелые металлы и радионуклиды. Учитывая масштабы «цветений», это явление следует рассматривать как мощный фактор вторичного загрязнения водоемов.

Обычно «цветение» наблюдается в августе — сентябре, но в зависимости от погодных и гидрологических условий может регистрироваться с конца мая до глубокой осени [46]. По натурным наблюдениям в разных регионах, «цветение» с каждым годом начинается все раньше и заканчивается все позже. В последние годы интенсивное «цветение» Куршского залива Балтийского моря с биомассой водорослей до 200—400 г/м<sup>3</sup>, а в отдельных точках — до 1200—2500 г/м<sup>3</sup>, регулярно наблюдается в период с июня по ноябрь [1, 12].

Во время «цветения» воды синезеленые водоросли формируют значительную численность и биомассу. Например, в Чудском озере в 1972, 1988, 1992, 1996, 2002, 2003 гг. биомасса фитопланктона достигала 250—500 г/м<sup>3</sup> и выше, что соответствует максимальной интенсивности «цветения» и сопровождается образованием «пятен цветения» и нагонных масс водорослей [46]. Даже в озерах восточноевропейской тундры «цветение» достигает значительной степени [30], а в Цимлянском водохранилище наблюдается практически ежегодно, что затрудняет его хозяйственное использование и иногда приводит к чрезвычайным ситуациям с питьевым водоснабжением [43].

Значительную, но, к сожалению, пока до конца не осознанную опасность представляет свойство многих синезеленых водорослей синтезировать вещества, высокотоксичные для других организмов и человека. Токси-

ны могут накапливаться в активной форме в воде, молоке, мясе домашних животных, в моллюсках и рыбе, используемых людьми в пищу [70]. Эти вещества могут накапливаться в водопроводной воде, причем не всегда разрушаются при высокой температуре, обработке воды хлором или ее сильном подкислении.

По данным международной гидрогеологической программы UNESCO CYANONET, массовое развитие цианобактерий и появление их токсинов выявлено в водоемах и водотоках 65 стран мира.

### *«Цветение» воды в Украине*

В Украине всестороннее исследование проблемы «цветения» началось во второй половине XX в. в связи с резко увеличившимися его масштабами после зарегулирования Днепра и образования каскада водохранилищ. Вследствие замедления течения, появления обширных прогреваемых мелководий, насыщения воды органическими веществами с затопленных плодородных земель сформировались условия для интенсивного развития синезеленых водорослей и регулярных вспышек «цветения».

Комплексные исследования, которые координировал Институт гидробиологии АН Украины, завершились серией научных работ [16—18, 37—39, 44, 45 и др.] и позволили приблизиться к пониманию механизмов возникновения «цветения» и возможных масштабов негативных последствий, а также наметили некоторые пути его ограничения. Однако, в силу стабилизации состояния водохранилищ и/или естественной цикличности биологических процессов, уровень «цветения» несколько снизился и, соответственно, уменьшился интерес к этому явлению. Специальных исследований стало меньше, они проводятся эпизодически, при превышении некоего критического уровня, хотя масштабы явления не только не уменьшились, но и демонстрируют тенденцию к усилению, о чем свидетельствуют многочисленные публикации в научных изданиях, в прессе и Интернете.

В последние десятилетия в Украине развитие синезеленых водорослей до степени «цветения» регистрировали в днепровских водохранилищах, водоемах Сумской, Харьковской и Житомирской областей, водоемах-охладителях АЭС, оз. Сасык, озерах Киева, Крыма и украинского Придунавья, в Тилигульском, Хаджибейском и других лиманах Черного моря [19, 25, 29, 34, 40, 42, 57, 61]. В заливах, мелководных зонах водохранилищ Днепра и придунайских озерах вода «цветет» ежегодно, причем в 2015—2017 гг. интенсивность «цветения» существенно увеличилась [6].

Частота и интенсивность «цветения» — одна из составляющих оценки экологического статуса водных экосистем и их соответствия требованиям Водной рамочной директивы ЕС, которая отражает реакцию автотрофных сообществ на изменение условий среды в целом и на эвтрофирование в частности [72]. Однако о существовании проблемы «цветения» вспоминают в основном при возникновении заморных явлений, массовой гибели рыб или в случаях отравлений неясной этиологии животных или людей вблизи водоемов.

Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает «цветение» воды как явление, представляющее опасность для населения, однако в Украине официально контроль и учет токсических проявлений «цветения» не проводится, поэтому нет точных статистических данных о его масштабах. Отсутствие квалифицированного мониторинга за развитием потенциально-токсичных водорослей, системы контроля риска развития токсических проявлений и предупреждения их последствий среди населения во многих случаях позволяет лишь предполагать участие токсичных *Cyanophyta* в формировании токсикозов невыявленной этиологии. Так, согласно сообщению UCS-INFO.891 от 22 июля 2002 г., в г. Комсомольске Полтавской области ежегодно, начиная с ноября 1995 г., в осенний период регистрировались заболевания людей альвеолитом. После принятия душа у них наблюдались симптомы удушья, подобно приступам астмы, сохранявшиеся на протяжении 2—3 месяцев. В ноябре 1997 г. было зафиксировано заболевание 200 человек. Было высказано предположение, что наиболее вероятными виновниками отравлений являются синезеленые водоросли, в огромных количествах размножающиеся в месте водозабора и начинающие отмирать с наступлением холодов. Выделяемые ими альготоксины, проходя по трубам горячего водоснабжения, очевидно, вместе с паром попадали в организм человека и вызвали легочную недостаточность. Местные власти отключили горячую воду и изменили место водозабора. После этого в 2001 г., впервые за пять лет, заболевание не было зарегистрировано.

Изучение влияния на лабораторных животных воды из озер Украинского Приднубья во время их «цветения» *Cyanophyta* выявило комплекс функциональных и структурных изменений системного характера, включая повышение функциональной активности центральной нервной системы, угнетение белоксинтезирующей функции печени и изменение процессов трансминирования, угнетение системы антиоксидантной защиты на фоне усиления пероксидного окисления липидов, нарушение функции почек, дистрофические изменения головного мозга гипоксического характера [27]. Автор считает, что длительное поступление низких доз альготоксинов может быть одним из факторов, ответственных за изменение динамики инфекционных и неинфекционных патологических процессов и хронизацию заболеваний населения.

Таким образом, «цветение» воды синезелеными водорослями является глобальной проблемой. Учитывая сложность и многообразие аспектов, связанных с этим явлением, оно требует постоянного контроля и всестороннего изучения с привлечением гидробиологов, медиков, биохимиков, гигиенистов и специалистов-практиков, занимающихся вопросами водоподготовки.

### ***Основные факторы, влияющие на «цветение» воды***

«Цветение» воды наблюдается в широком диапазоне физических и гидрохимических параметров. В первую очередь это следствие эвтрофирования водоемов, которое сопровождается значительным повышением содержания в воде азота и фосфора в результате как естественных процессов, так и несбалансированной хозяйственной деятельности человека, приводящей к поступлению в водоемы больших объемов неочищенных бытовых и про-

мышленных сточных вод, стоков животноводческих ферм и птицефабрик, смыва с сельскохозяйственных территорий удобрений и средств защиты растений. «Цветению» способствует обогащение воды и другими макро- и микроэлементами (медь, кобальт, ванадий, железо, цинк и др.) [28, 58]. Однако случаи отравления цианотоксинами происходят не только в эвтрофных, но и в менее продуктивных водоемах. Токсигенные водоросли обнаружены в фитопланктоне сибирских водохранилищ, зарегистрировано массовое отравление людей при употреблении воды и рыбы из оз. Котокель (Бурятия). Считают, что это может быть связано с повышением температуры в регионе: на Байкале увеличение биомассы фитопланктона происходит на фоне роста приземной температуры, составившего за 100 лет 1,2°C [3].

Синезеленые водоросли обладают рядом особенностей, способствующих их массовому развитию в водоемах [9, 21, 38]. Нитчатые гетероцистные виды являются азотфиксаторами, что позволяет им активно развиваться при низкой концентрации растворенных неорганических соединений азота; для них более важным является содержание фосфора, необходимого для азотфиксации. Этим объясняется усиление развития синезеленых водорослей на мелководных участках водоемов, где скорость оборота минерального фосфора значительно выше, чем в открытой глубоководной части [30]. Интенсивность развития синезеленых водорослей меньше зависит от отношения N/P и положительно коррелирует с концентрацией фосфорсодержащих соединений, например, в озерах Финляндии содержание фосфора всегда является лимитирующим фактором [47].

У синезеленых водорослей высокая скорость поглощения фосфора, которая еще возрастает по мере увеличения его концентрации в среде [63]. Эти организмы способны активно ассимилировать фосфор в темноте, что обеспечивает им возможность получать его в богатых придонных слоях воды, поэтому низкое содержание элемента в поверхностных горизонтах не ограничивает их развитие [49]. Наряду с плавучестью, термофильностью, высокой скоростью размножения, разнообразием пигментного комплекса и другими механизмами, это способствует возникновению «цветения» [64].

При снижении концентрации растворенных биогенных элементов синезеленые водоросли способны эффективно использовать их из донных отложений. Кроме того, они могут использовать азот не только в нитратной форме, но и в аммонийной, и даже в форме низкомолекулярных органических соединений, например аминокислот [24]. Некоторые виды способны к гетеротрофному питанию с использованием растворенных органических соединений [48] или могут активно расти в условиях пониженной освещенности и низких температур водной среды. Так, *Planktothrix agardhii* способен вызывать «цветение» водоемов даже зимой подо льдом. В отличие от большинства эукариотических планктонных автотрофов, этот вид и некоторые другие представители порядка Oscillatoriales могут фотосинтезировать в более глубоких слоях воды в условиях недостатка освещения, используя газовые вакуоли для изменения плавучести и регулирования расположения в толще пелагиали [21], а также гетеротрофный тип питания для потребления растворенных органических веществ [5].

В целом считается, что массовое развитие синезеленых водорослей до уровня «цветения» наиболее вероятно при относительно высоком содержании минерального и органического фосфора и низком (менее 25) отношении азота к фосфору, низкой численности зоопланктона, способного потреблять эти водоросли, высокой концентрации микроэлементов, а также низкой прозрачности и малой проточности воды [13, 20, 55]. Исследования на днепровских водохранилищах показали, что наблюдающееся в настоящее время повышение температуры и суммарной солнечной радиации также будет способствовать усилению развития именно синезеленых водорослей из всего комплекса видов, формирующих фитопланктон [71].

Глобальное потепление способствует повышению выживаемости синезеленых водорослей в зимний период и более раннему началу их вегетации [9]. Помимо общего комплекса внешних факторов, благоприятных для усиления их развития (высокие значения температуры воды, концентрации биогенных элементов и органических веществ), для отдельных видов характерны и некоторые особенности, которые чаще обуславливают их доминирование. Так *Anabaena flos-aquae* чаще доминировала при высокой проточности и низкой солнечной активности, а *Aphanizomenon flos-aquae* — при повышении среднемесячного количества осадков (72 мм) и высокой солнечной активности [9]. Виды рода *Microcystis* доминировали при установлении сухой погоды, низкой проточности и высокой солнечной активности, а *Oscillatoria agardhii* получала преимущество при сравнительно низкой температуре воды (в среднем 14°C), малом количестве осадков, низкой проточности и низкой активности солнца. Водоросли, относящиеся к р. *Planktothrix* предпочитают для роста низкую интенсивность света, *Anabaena* — среднюю, а *Aphanizomenon* — высокую [12]. Представители р. *Phormidium* устойчивы к экстремальным значениям pH, температуры и общего содержания солей [2].

### **Методы и технологические приемы борьбы с «цветением» воды**

Учитывая наблюдающийся повсеместно высокий уровень эвтрофикации водоемов, во многих странах мира для предупреждения развития «цветения» повышают требования к очистке сточных вод и качеству водоохранных мероприятий, в частности принимают «антифосфатные» законы, что позволяет существенно снизить влияние данного антропогенного фактора. Комплекс природоохранных мер на водосборной территории Нарочанских озер Беларуси позволил снизить внешнюю фосфорную нагрузку и накопление фосфора в их водах примерно на треть [15]. Снижение антропогенной нагрузки на водоемы способствует уменьшению интенсивности развития синезеленых водорослей. Так, сокращение применения удобрений в дельте Волги привело к заметному снижению концентрации растворенного азота, некоторому уменьшению содержания фосфора и снижению частоты «цветения» [10]. Однако необходимо учитывать, что донные отложения в эвтрофированных водоемах долго могут оставаться доступным для водорослей ресурсом биогенных веществ.

В то же время разные водоросли, даже разные виды одного рода различаются по чувствительности к внешним факторам, в частности по требова-

тельности к азоту и фосфору, поэтому уровень этих биогенных элементов, недостаточный для «цветения» одних потенциально-токсичных видов, не исключает возможность массового развития других представителей синезеленых. Например, в восточноевропейской тундре наиболее требовательными к содержанию азота и фосфора оказались *Anabaena flos-aquae* и *Aphanizomenon flos-aquae*, которые чаще других вызывали цветение мезотрофных и эвтрофных водоемов, менее требовательной была *Anabaena lemmermannii*, «цветение» которой наблюдали в олиготрофных и олигомезотрофных водоемах [30].

К эффективным мерам ограничения «цветения» можно отнести биологическую реабилитацию водоемов, например создание в прибрежных зонах систем «биоплато» с использованием высшей водной растительности [31]. Высшие водные растения не только экранируют водоем от значительной части поступающих извне биогенных элементов, но и отличаются высокой аллелопатической активностью за счет выделения разнообразных фенольных соединений, способных существенно снизить интенсивность развития синезеленых водорослей [32]. Так, высокая альгицидная активность характерна для *Glyceria maxima*, *Nuphar lutea*, *Trapa natans*, *Phragmites australis*, *Typha latifolia* [33].

Необходимо уделять внимание вопросам коррекции видового состава водных беспозвоночных и рыб, таким как создание резерватов для моллюсков-фильтраторов, вселение растительноядных рыб, питающихся фитопланктоном, а также вселение хищных рыб. Например, увеличение численности судака будет способствовать снижению численности карпа и карася, что позволит снизить взмучивание донных отложений и высвобождение фосфора [52,60].

В комплексе мероприятий по ограничению «цветений» предлагается альгализация водоемов зелеными микроводорослями, в частности, в России для этих целей используют штамм *Chlorella vulgaris* ИФР № С-111 [23].

Среди биологических методов ограничения развития синезелёных водорослей можно выделить применение отечественных биопрепаратов «БИОМАГ», «МИКРОЗИМ™», «ПОНД ТРИТ», «PLUS WATER», принцип действия которых основан на биохимическом разложении органических веществ. Эти препараты применяют в закрытых и слабопроточных водоемах — прудах, озерах, водохранилищах. Расход биопрепарата «ПОНД ТРИТ» составляет от 4 до 5 г на 1 м<sup>2</sup> водного зеркала при средней глубине водоема 2—2,5 м, а «PLUS WATER» — от 40 мл на 10 м<sup>3</sup> воды (<http://www.microzym.ru/pondtreatment.htm>).

### **Превентивные меры в районах водозаборов для ограничения негативных последствий «цветения» воды**

«Цветение» воды является серьезной проблемой, требующей всестороннего внимания, особенно с учетом вероятности усиления интенсивности этого явления вследствие повышения температуры воды в водоемах [41].



Особого внимания заслуживают вопросы токсичности синезеленых водорослей. К сожалению, появление токсичности пока невозможно предсказать — не установлены сезонные закономерности ее изменений, нет устойчивой зависимости от температуры воды, доминирующего рода водорослей или каких-либо других факторов. Натурные наблюдения показывают, что она может изменяться в широких пределах в достаточно короткие сроки, и в какой-то мере прослеживается только взаимосвязь между токсичностью и соотношением доминирующих видов [35]. Эту связь подтверждает тот факт, что в водоемах Украины гены микроцистинсинтетазы, ответственной за образование наиболее известных альготоксинов микроцистинов, отсутствовали в монодоминантном фитопланктоне, но часто обнаруживались в фитопланктоне с полидоминантной структурой [25]. Однако пока неизвестны механизмы, запускающие эти гены, вследствие чего реальная и потенциальная токсичность «цветения» не всегда совпадают [54].

Контроль токсических проявлений «цветения» в водоемах Украины затрудняет отсутствие недорогих доступных экспресс-методов обнаружения альготоксинов, немаловажным фактором является также разнообразие токсических эффектов и отсутствие специфических признаков, позволяющих связать отравление именно с контактом с этими водорослями и продуктами их жизнедеятельности. Кроме того, в каждом локальном пятне «цветения» могут одновременно присутствовать как токсичные, так и нетоксичные штаммы одного и того же вида водорослей, что можно определить только с применением молекулярно-генетического анализа, доступного не каждой контролирующей организации. Например, при мониторинге альготоксинов в водоемах Верхней Волги в течение 2009—2011 гг. при помощи ПЦР-анализа (полимеразно-цепная реакция) в комплексе с аналитическими методами показано наличие *mscE* гена микроцистинсинтетазы во всех пробах синезеленых водорослей и присутствие в воде микроцистинов, концентрация которых составляла от 0,13 до более 1000 мкг/дм<sup>3</sup>, что превышало как установленную ВОЗ предельно допустимую концентрацию, так и порог чувствительности метода [29]. При изучении фитопланктона водоемов Украины *mscE* ген был обнаружен в 12 из 18 исследованных проб, независимо от типа водного объекта, где развивалось «цветение» [20]. Следовательно, угроза проявления негативных последствий «цветения» воды является повсеместной, поэтому необходимо усиление внимания к этому явлению, разработка методов оценки и учета возможных рисков, что особенно актуально при использовании поверхностных вод для питьевого водоснабжения.

В связи с трудностью прогнозирования появления токсичности и во избежание массовых токсикозов, на водоемах Украины необходимо внедрение постоянного квалифицированного альгологического мониторинга для контроля развития потенциально-токсичных видов синезеленых водорослей. По рекомендациям ВОЗ, концентрацию 20 млн. клеток в 1 л воды следует рассматривать как сигнал о риске появления токсичности, представляющей угрозу для здоровья, уровень 50—100 млн. кл./л ориентировочно свидетельствует об умеренной опасности при использовании вод в рекреационных целях, при плотности водорослей более 100 млн кл./л водоемы не рекомендуются использовать для питьевого водоснабжения [67].

Определенную информацию о токсикологической ситуации во время «цветения» может дать контроль в тканях рыб количества тиаминина и активности тиамининазы, претерпевающих серьезные изменения под влиянием альготоксинов [26].

Как правило, альготоксины накапливаются в клетках водорослей, поэтому использование на водозаборах механических приемов очистки воды (например, флотация, фильтрация), позволяет ограничить их попадание в системы водоснабжения. Однако при отмирании и разложении клеточной массы водорослей, концентрации накапливающихся в воде токсических веществ представляют реальную угрозу для водопотребителей, что исключает применение на водозаборах методов, разрушающих клетки водорослей при их высокой плотности (например, обработка кислородом, внесение альгицидов). Следует также учитывать, что концентрация микроцистинов варьирует с глубиной, поэтому при токсикологическом мониторинге на водозаборах рекомендуется анализировать воду на разных глубинах [69].

Для удаления токсинов из воды требуются достаточно сложные и дорогие технологические приемы. В настоящее время ведутся работы по использованию для этих целей полупроводниковых фотокатализаторов, в частности показано, что устранение микроцистинов в фотокаталитическом процессе с использованием диоксида титана эффективнее, чем традиционное хлорирование или адсорбция активированным углем [22].

Необходимо учитывать, что альготоксины характеризуются определенной устойчивостью и могут сохраняться в водной среде еще некоторое время после высвобождения из клеток водорослей (в Куршском заливе альготоксины обнаруживали даже в ноябре [12]). Препаративно выделенные вещества обладают разной химической стабильностью и биологической активностью и довольно устойчивы в водном растворе [8], в то же время в водоемах они подвержены бактериальному разрушению [56], а для некоторых выявлена возможность детоксикации моллюсками [59]. На солнечном свете они медленно разрушаются и изомеризуются, особенно в присутствии гуминовых веществ [65, 68]. Эти особенности могут быть использованы для разработки методов детоксикации воды в процессе водоподготовки. Детализация физико-химических и биологических особенностей альготоксинов будет способствовать разработке эффективных методов снижения потенциальной опасности «цветения» и обеспечения качества питьевой воды.

В мире проводятся работы по разработке критериев опасности цианобактерий и их токсинов [51], в США, Австралии, Канаде и др. странах уже введены и используются в законодательстве нормативы на содержание в воде микроцистина и других альготоксинов [43]. Ввиду повсеместного распространения «цветения», в Украине также необходима разработка подобных критериев и совершенствование водоохранного законодательства.

### *Заключение*

В период глобальных климатических изменений и увеличивающегося антропогенного воздействия на водные экосистемы, «цветение» воды можно отнести к

явлениям экологического порядка, которое выходит за рамки конкретного водоема и носит всеобщий характер. В связи с этим, Водная рамочная директива ЕС рассматривает частоту и интенсивность «цветения» как одну из составляющих оценки экологического статуса водных экосистем.

Неконтролируемое развитие микроводорослей наносит гидроэкосистемам значительный ущерб, создает проблемы в энергетике, хозяйственном и питьевом водопользовании и рекреации. Вследствие «цветения» ухудшается качество поверхностных вод, в теле многих видов гидробионтов накапливаются сильнодействующие токсические вещества. Это приводит к снижению пищевой ценности объектов аквакультуры и усилению риска массовых отравлений. При попадании альготоксинов в водопроводную сеть возможны вспышки эпидемического токсического гастроэнтерита по типу дизентерие- или холероподобных заболеваний.

Анализ отечественной и мировой литературы, посвященной изучению возможности снижения частоты и интенсивности «цветений», свидетельствует о необходимости совершенствования системы водопользования, улучшения водоохранных мероприятий на водосборной площади, включающих снижение биогенной нагрузки и улучшение очистки сточных вод, биологическую реабилитацию водоемов, коррекцию видового состава водных беспозвоночных и рыб, альгализацию водоемов другими видами водорослей, использование аллелопатического потенциала высшей водной растительности, применение биопрепаратов и др.

С целью предупреждения негативных последствий «цветения» воды и риска токсификации водоемов следует регулярно проводить в них качественный и количественный анализ альгофлоры, выявление потенциально-токсичных видов синезеленых водорослей, установление их соотношения и количественных показателей развития. Параллельно необходимы проведение биологического и физико-химического контроля токсичности воды, разработка и обязательное внедрение на водозаборах экспресс-методов обнаружения альготоксинов. Учитывая масштабы «цветения» и связанные с ним риски, необходимо усиление внимания к этому явлению государственных органов санитарного контроля, включение в законодательную базу, регламентирующую качество воды, стандартов на содержание альготоксинов, привлечение средств массовой информации для предупреждения населения о потенциальной опасности «цветений».

\*\*

*Розглянуто проблему «цвітіння» водойм, що виникає внаслідок масового розмноження синьозелених водоростей, особливу увагу приділено розвитку цього явища в Україні. З урахуванням світового досвіду проаналізовано причини, динаміку, наслідки «цвітіння» і чинники, що впливають на його розвиток. Висловлено припущення про посилення «цвітіння» внаслідок збільшення антропогенного впливу на водойми та кліматичних аномалій. Представлено деякі біотехнологічні й фізико-хімічні прийоми обмеження «цвітіння» та його негативного впливу, включно з поліпшенням водоохоронних заходів, біологічною реабілітацією водойм, запровадженням альгологічного і токсикологічного контролю. У зв'язку з численними несприятливими наслідками та потенційною небезпекою «цвітіння» води для водокористувачів, підкреслено необхідність посилення уваги до нього з боку як наукових організацій, так і державних органів санітарного контролю.*

\*\*

*The paper is dealt with the problem of water bloom formed as a result of mass development of Cyanoprokaryota, in particular in Ukraine. The reasons, dynamics, consequences of water bloom, and factors influencing its development are discussed and analyzed. It is thought that the increase in the intensity of anthropogenic load and climate warming will result in the increase in the intensity of water bloom. Some biotechnological and physico-chemical approaches to the inhibition of water bloom and its adverse effect, and also to the improvement of the state of water bodies, including their biological rehabilitation and algological and toxicological monitoring, are given in the paper.*

\*\*

1. Александров С.В. Влияние «цветения» синезеленых водорослей на экологическое состояние Куршского залива // *Вода: Химия и Экология*. — 2009. — № 4. — С. 2—6.
2. Батаева Ю.В. Влияние экстремальных гидрохимических условий на видовой состав цианобактерий в водоемах Нижней Волги: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М., 2005. — 23 с.
3. Белых О.А. Микроцистин продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины // *Химия в интересах устойчивого развития*. — 2013. — С. 59—67.
4. Белых О.И., Сороковикова Е.Г., Калюжная О.В. и др. Видовой состав планктонных цианобактерий озера Котокельского (Бурятия) в период токсичного «цветения» 2009 г. // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 22.
5. Бонгаренко Н.А., Щур Л.А. Особенности развития синезеленых водорослей (Cyanophyta) в разнотипных водоемах Восточной Сибири // 9-й съезд гидробиол. об-ва РАН, 18—22 сент. 2006 г., Тольятти: Тез. докл. — Тольятти; Самара, 2006. — С. 50.
6. Вишневський В.І., Шевчук С.А. Використання даних дистанційного зондування Землі у дослідженнях водних об'єктів України — К.: Інтерпрес, 2018. — 116 с.
7. *Водный фонд Украины: Штучні водойми — водосховища і ставки: Довідник / За ред. В. К. Хільчевського, В. В. Гребеня*. — К.: Інтерпрес, 2014. — 164 с.
8. Волошко Л.Н., Плющ А.В., Титова Н.Н. Токсины цианобактерий (Cyanobacteria, Cyanophyta) // *Альгология*. — 2008. — Т. 18, № 1. — С. 3—20.
9. Гаврилова Е.В. Видовой состав, динамика численности и токсичность цианобактерий Шершневого водохранилища Челябинской области: Дис. ... канд. биол. наук. — Пермь, 2009. — 138 с.
10. Горбунова Ю.А., Александров С.В. Влияние изменения внешней биогенной нагрузки на гидрохимический режим и первичную продукцию планктона в эстуариях на примере Вислинского залива и дельты Волги // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 50.

11. Горюнова С.В., Демина Н.М. Водоросли — продуценты токсических веществ. — М.: Наука, 1974. — 256 с.
12. Ежова Е.Е., Ланге Е.К., Русских Я.В. и др. Вредоносные цветения микроводорослей в Куршском заливе Балтийского моря в 2008—2011 гг. // Проблемы изучения и охраны природного и культурного наследия национального парка «Куршская коса». — [Http://www.park-kosa.ru/new\\_grad39.ru/2012.pdf](http://www.park-kosa.ru/new_grad39.ru/2012.pdf).
13. Елизарова В.А. Влияние зоопланктона на рост синезеленых водорослей в Рыбинском водохранилище // Биология внутр. вод. — 2006. — № 2. — С. 19—22.
14. Еремкина Т.В., Ярушина М.И. Сукцессия фитопланктона в горных озерах Южного Урала в условиях антропогенного эвтрофирования // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 62.
15. Жукова Т.В. Режим фосфора в Нарочанских озерах: многолетняя динамика и факторы, ее определяющие // Там же. — С. 65.
16. Кирпенко Ю.А., Кирпенко Н.И. Факторы, влияющие на образование токсинов водорослями // Гидробиол. журн. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 51—56.
17. Кирпенко Ю.А., Сиренко Л.А., Орловский В.М., Лукина Л.Ф. Токсины синезеленых водорослей и организм животного. — Киев: Наук. думка, 1977. — 251 с.
18. Кирпенко Ю.О., Сиренко Л.Я., Кирпенко Н.И. Вплив токсину синьозелених водоростей на функції головного мозку, серця та процеси окислення субстратів у клітинах // Доп. АН УРСР, сер. Б. — 1982. — № 2. — С. 54—56.
19. Ковальчук Л. И., Мокиенко А. В., Нестерова Д. А. Гигиеническая оценка цианобактерий озер Украинского Придунавья // Досягнення біології та медицини. — 2014. — № 2 (24). — С. 10—13.
20. Колмаков В.И. Токсичное «цветение» воды континентальных водоемов: глобальная опасность и методы ликвидации. — <http://biokomfort74.ru/>.
21. Котегов Б.Г., Аксенова Н.П., Захаров В.Ю. и др. Биологические и химические эффекты антропогенного эвтрофирования Ижевского водохранилища / Под ред. Б. Г. Котегова. — Ижевск: Изд-во Удмурт. ун-та, 2013. — 177 с.
22. Кофман В.Я. Новые окислительные технологии очистки воды и сточных вод. Ч. 1. — <http://www.kofman.info/>.
23. Кузнецов П.И., Фролова М.В., Московец М.В. и др. Экологические проблемы эвтрофирования внутренних континентальных водоемов юга России и биотехнологический метод повышения качества воды // Науч. потенциал регионов на службу модернизации. — 2013. — № 2 (5). — С. 65—67.
24. Кузьменко М.И. Миксотрофизм синезеленых водорослей и его экологическое значение. — Киев: Наук. думка, 1981. — 211 с.
25. Курейшевич А.В., Белых О.И., Сороковикова Е.Г. и др. Наличие гена синтеза микроцистина у синезеленых водорослей разнотипных водных

- объектов Украины // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 101.
26. *Маляревская А.Я., Сиренко Л.А., Карасина Ф.М. Курпенко Н.И.* Определение токсинов синезеленых водорослей в воде и рыбе, диагностика отравления рыб в период интенсивного «цветения» воды: Методические рекомендации / Институт гидробиологии АН УССР. — Киев, 1986. — 42 с.
27. *Мокієнко А.В.* Ціанобактерії і ціанотоксини: міф чи реальність? // Вісн. НАН України. — 2016. — № 4. — С. 65—75.
28. *Мосияш С.А., Далечина И.Н., Филимонова И.Г.* Многолетняя динамика биогенных элементов и фитопланктона в Волгоградском водохранилище // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 126.
29. *Нестерова Д.А., Коваленко О.В.* «Цветение» синезеленых водорослей в лиманах северо-западного Причерноморья // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. — Севастополь, 2011. — Т. 1, вип. 25. — С. 347—355.
30. *Патова Е.Н.* Цианопрокариотическое «цветение» водоемов восточноевропейских тундр (флористические и функциональные аспекты) // Теоретическая и прикладная экология. — 2007. — № 3. — <http://www.ecoregion.ru>.
31. *Романенко В.Д., Крот Ю.Г., Киризі́й Т.Я. та ін.* Природні і штучні біоплато (фундаментальні і прикладні аспекти). — К.: Ін-т гідробіології НАН України, 2012. — 150 с.
32. *Романенко В.Д., Сакевич О.Й., Усенко О.М.* Вищі водянні рослини як чинник обмеження «цвітіння» води ціанобактеріями // Доп. НАН України. — 2005. — № 8. — С. 174—177.
33. *Сакевич О.Й., Усенко О.М.* Алелопатія в гідроекосистемах. — К.: Логос, 2008. — 344 с.
34. *Самылина О. С., Герасименко Л. М., Шагрин Н. В.* Сравнительная характеристика фототрофных сообществ в минеральных озерах Крыма (Украина) и Алтайского края (Россия) // Альгология. — 2010. — Т. 20, № 2. — С. 192—209.
35. *Сафонова Е. В.* Оценка влияния различных факторов на токсичность цианобактерий Шершневого водохранилища (Челябинская область) // Вестн. Челябин. гос. ун-та. — 2008. — № 4. — С. 133—135.
36. *Сигелев С.И., Зубишина А.А., Бабаназарова О.В. и др.* Мониторинг содержания цианотоксинов микроцистинов в водоемах Верхней Волги: молекулярно-генетический и аналитический подходы // Вода: химия и экология. — 2014. — № 8. — С. 88—94.
37. *Сиренко Л.А.* Физиологические основы размножения синезеленых водорослей в водохранилищах. — Киев: Наук. думка, 1972. — 203 с.

38. Сиренко Л.А., Гавриленко М.Я. «Цветение» воды и евтрофирование (методы его ограничения и использование сестона). — Киев: Наук. думка, 1978. — 232 с.
39. Сиренко Л.А., Кирпенко Ю.А., Кирпенко Н.И. Биологически активные метаболиты синезеленых водорослей и их роль в эпидемиологии // Гидробиол. журн. — 1997. — Т. 33, № 3. — С. 51—61.
40. Теренько Л. М. Планктонніе мікрободорослі Тилігульського лимана // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. праць. — 2005. — Вип. 12. — С. 622—631.
41. Тімченко В.М., Линник П.М., Холодько О.П. та ін. Абіотичні компоненти екосистеми Канівського водосховища / За ред. В. М. Тімченка. — К.: Логос. — 2013. — 60 с.
42. Феденко М.В. Цветение воды в Косовщинском водохранилище. — [http://fish-club.net/article/interesting/algae\\_blooms\\_in\\_kosovska\\_reservoir/](http://fish-club.net/article/interesting/algae_blooms_in_kosovska_reservoir/).
43. Хоружая Т.А., Никаноров А.М. Евтрофирование и токсичность синезеленых водорослей как проявление глобальных экологических проблем / Вода и водные ресурсы: Системообразующие функции в природе и экономике: Сб. науч. трудов / Отв. ред. В. Г. Пряжинская. — Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2012. — С. 340—344.
44. «Цветение» воды. — Киев: Наук. думка, 1968. — Т. 1. — 387 с.
45. «Цветение» воды. — Киев: Наук. думка, 1969. — Т. 2. — 267 с.
46. Ястремский В.В. Динамика интенсивности «цветения» воды синезелеными водорослями в Чудско-Псковском озере // Тез. докл. IV Междунар. конф. «Современные проблемы гидроэкологии», 11—15 окт. 2010 г., С.-Петербург. — СПб., 2010. — С. 216.
47. Arvola L., Järvinen M., Tulonen T. Long-term trends and regional differences of phytoplankton in large Finnish lakes // Hydrobiologia. — 2011. — Vol. 660, N 1. — P. 125—134.
48. Boyer J.N., Dailey S.K., Gibson P.J. et al. The role of dissolved organic matter bioavailability in promoting phytoplankton blooms in Florida Bay // Ibid. — 2006. — Vol. 569, N 1. — P. 71—85.
49. Burford M.A., Mcneale K.L., McKenzie-Smith F.J. The role of nitrogen in promoting the toxic cyanophyte *Cylindrospermopsis raciborskii* in a subtropical water reservoir // Freshwater Biol. — 2006. — Vol. 51, N 11. — P. 2143—2153.
50. Carmichael W.W. The cyanotoxins // Adv. Bot. Res. — 1997. — Vol. 27. — P. 211—256.
51. Fitzgerald D.J., Cunliffe D.A., Burch M.D. Development of health alerts for cyanobacteria and related toxins in drinking water in South Australia // Environ. Toxicol. — 1999. — Vol. 14, N 1. — P. 203—209.
52. Gladyshev M.I., Sushchik N.N., Makhutova O.N. et al. Correlations between fatty acid composition of seston and zooplankton and effects of environmental parameters in a eutrophic Siberian reservoir // Limnologica. — 2010. — Vol. 40, N 4. — P. 343—357.

53. Gromov B.V., Vepritsky A.A., Mamkaeva K.A., Voloshko L.N. A survey of toxicity of cyanobacterial blooms in Lake Ladoga and adjacent water bodies // *Hydrobiologia*. — 1996. — Vol. 322, N 1—3. — P. 149—151.
54. Hotto A., Satchwell M., Boyer G. Seasonal production and molecular characterization of microcystins in Oneida Lake, New York, USA // *Environ. Toxicol.* — 2005. — Vol. 20, N 3. — P. 243—248.
55. Irigoien X., Flynn K.J., Harris R.P. Phytoplankton blooms: a «loophole» in microzooplankton grazing impact? // *J. Plankton Res.* — 2005. — Vol. 27, N 4. — P. 313—321.
56. Jones G.J., Negri A.P. Persistence and degradation of cyanobacterial paralytic shellfish poisons (PSPs) in freshwaters // *Water Res.* — 1997. — Vol. 31, N 3. — P. 525—533.
57. Klochenko P.D., Shevchenko T.F., Kharchenko G.V. Structural organization of phytoplankton and phytoepiphyton of the lakes of Kiev // *Hydrobiol. J.* — 2013. — Vol. 49, N 4. — P. 47—63.
58. Lukač M., Aegerter R. Influence of trace metals on growth and toxin production of *Microcystis aeruginosa* // *Toxicon*. — 1993. — Vol. 31, N 3. — P. 293—305.
59. Misono K., Kitamura N., Matsushima H. et al. Detoxification of microcystin using the filter-feeding function of *Corbicula leana* in fresh water // 48th Annu. Conf. of the Intern. Assoc. for Great Lakes Res. «Great Lakes ecosystem forecasting: improving understanding and prediction», 23—27 May 2005, Ann Arbor, Abstr. — Ann Arbor (Michigan), 2005. — P. 131.
60. Pires L.M. Dionisio, Bontes B.M., Van Donk E., Ibelings B.W. Grazing on colonial and filamentous, toxic and non-toxic cyanobacteria by the zebra mussel *Dreissena polymorpha* // *J. Plankton Res.* — 2005. — Vol. 27, N 4. — P. 331—339.
61. Protasov A.A., Sylayeva A.A., Yarmoshenko L.P. et al. Hydrobiological studies on the techno-ecosystem of the Zaporozhye Nuclear Power Station // *Hydrobiol. J.* — 2013. — Vol. 49, N 4. — P. 75—92.
62. Rantala A., Rajaniemi-Wacklin P., Lyra Chr. et al. Detection of microcystin-producing cyanobacteria in Finnish lakes with genus-specific microcystin synthetase gene E (mcyE) PCR and associations with environmental factors // *Appl. and Environ. Microbiol.* — 2006. — Vol. 72, N 9. — P. 6101—6110.
63. Reinertsen H., Jensen A., Langeland A., Olsen Y. Algal competition for phosphorus: the influence of zooplankton and fish // *Canad. J. Fish. and Aquat. Sci.* — 1986. — Vol. 43, N 6. — P. 1135—1141.
64. Schanz F., Allen E.D., Gorham P.R. Bioassay of the seasonal ability of water from a eutrophic Alberta lake to promote selective growth of strains of *Anabaena flos-aquae* and other blue-green algae // *Canad. J. of Botany*. — 1979. — Vol. 57, N 21. — P. 2443—2451.
65. Sivonen K., Jones G. Cyanobacterial toxins // *Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring, and management* / Ed. by I. Chorus, J. Bartram. — London: E & FN Spon on behalf of the World Health Organization, 1999. — P. 41—111.



66. *Skulberg O.M., Underdal B., Utkilen H.* Toxic waterblooms with cyanophytes in Norway — current knowledge // *Algol. Studies.* — 1994. — Vol. 75. — P. 279—289.
67. *Toxic Cyanobacteria in Water: a guide to their public health consequences, monitoring and management* / Ed. by I. Chorus, J. Bartram. — London: E & FN Spon on behalf of the World Health Organization, 1999. — 416 p.
68. *Tsuji K., Watanuki T., Kondo F. et al.* Stability of microcystins from cyanobacteria — iv. Effect of chlorination on decomposition // *Toxicol.* — 1997. — Vol. 35, N 7. — P. 1033—1041.
69. *Van Ginkel C.E., Silberbauer M.J., du Plessis S., Carelsen C.I.C.* Monitoring microcystin toxin and chlorophyll in five South African impoundments // *Verh. Internat. Verein. Theor. und Angew. Limnol.* — 2006. — Vol. 29, N 3. — P. 1611—1616.
70. *Xie L., Xie P., Guo L. et al.* Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic lake Chaohu, China // *Environ. Toxicol.* — 2005. — Vol. 20, N 3. — P. 293—300.
71. *Zadorozhna G.M., Shcherbak V.I.* Effect of solar radiation and water temperature on development of phytoplankton in the Kaniv Reservoir // *Hydrobiol. J.* — 2017. — Vol. 53, N 1. — P. 17—25.
72. *Zotov A.V.* Possibility of use of phytoplankton surface characteristics as indicators, which meet EU Water Framework Directive provisions // *Ibid.* — 2016. — Vol. 52, N 4. — P. 3—11.