

УДК 574.52:581.1

КАЧЕСТВО ВОДЫ В СТОКЕ УЧИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ПЕРИОД ВЕСЕННЕГО «ЦВЕТЕНИЯ» ДИАТОМОВЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ

© 2010 г. И.М. Ворожун

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

Ключевые слова: Учинское водохранилище, весеннее «цветение» диатомовых водорослей, содержание азота и фосфора в стоке водохранилища, прогноз качества воды водохранилища.

Изучены особенности формирования стока Учинского водохранилища в период весеннего «цветения» диатомовых водорослей в годы с различными температурными, гидрохимическими и гидродинамическими условиями. Показано, что сроки «цветения» зависят от температуры воды в водохранилище, а скорость и направление ветра определяют колебания численности водорослей в стоке. Общий уровень развития диатомовых водорослей зависит от гидрохимических условий, особенно от количества различных форм азота и минерального фосфора. Выявленные закономерности формирования пиков весеннего развития диатомовых водорослей позволяют составлять краткосрочный прогноз качества воды, поступающей на водопроводную станцию.



Характерной особенностью развития фитопланктона в водоемах средней полосы России является периодическое «цветение» диатомовых водорослей. В зависимости от региона, специфики ландшафта, особенностей площади водосбора и других условий варьирует количественный и качественный состав фитопланктонного сообщества, однако в значительной степени соблюдается общая тенденция интенсивного «цветения» диатомовых водорослей весной и менее отчетливо выраженное их развитие осенью.

Исследования причин периодичности «цветения», потребностей организмов в питательных веществах проводились еще в 30—40-е годы XX в. как отечественными, так и зарубежными авторами. Как подчеркивала К.А. Гусева, «эти статьи затрагивают, прежде всего, лишь отдельные моменты явления «цветения», не решая вопрос в целом, авто-

Водное хозяйство России № 1, 2010

Водное хозяйство России

ры не ставили перед собой ясных практических целей» [1]. Фундаментальные исследования этого ученого подняли решение проблемы на принципиально новый уровень. Особенностью ее изысканий является комплексный подход к проблемам «цветения» воды и факторам, его обуславливающим. Кроме того, К.А. Гусева ставила своей задачей научное решение практических задач, в частности, изучение причин, вызывающих «цветение», прогноз и меры борьбы с ним.

За последующие более чем полвека проделано множество исследований по изучению взаимосвязи фитопланктонного сообщества с гидрохимическим составом как морских, так и пресных вод в лабораторных и полевых условиях. Актуальность такой задачи возросла в последние десятилетия в связи с проблемой эвтрофирования различных типов водных экосистем [2—5]. Значительная часть поисков прямым или косвенным образом связана с практическими проблемами питьевого водоснабжения, некоторые из них носят системный характер [6—9].

Наши исследования ставят как научные, так и практические цели изучения динамики диатомовых водорослей в период весеннего «цветения» в водоеме питьевого назначения.

Цель и задачи исследования, метод

Цель настоящей работы — изучение закономерностей формирования качества воды в стоке Учинского водохранилища в зависимости от гидрохимических, физико-химических и гидродинамических условий в период весеннего «цветения» диатомовых водорослей и перспективы составления краткосрочного прогноза качества воды, поступающей на водопроводную станцию.

Учинское водохранилище входит в каскад водохранилищ Волжской гидросистемы, являясь его последним звеном. Этот водоем служит резервуаром для Московского водопровода, снабжая водой Восточную и Северную водопроводные станции. При этом на Северную водопроводную станцию вода поступает по подземным стальным водоводам, а на Восточную — по бетонированному водопроводному каналу длиной 28 км. Водоохранилище вытянуто с северо-запада на юго-восток. Особенностью этого водоема служит строгая санитарная охрана со стороны МГУП «Мосводоканал» и отсутствие притоков, способных внести загрязняющие вещества с площади водосбора. Это делает Учинское водохранилище модельным водоемом для альгологических и другого рода исследований. Формирование качества воды в Учинском водохранилище в значительной степени определяется качеством верхневолжской воды а также процессами, происходящими в самом водоеме [10].

Предыдущие исследования автора данной статьи посвящены изучению закономерностей формирования качества воды, поступающей в водопроводный канал из Учинского водохранилища, и закономерностям его трансформации в канале по составу сообщества планктонных ракообразных и коловраток [11, 12]. Было установлено, что при еженедельном контроле наблюдаются резкие и труднообъяснимые колебания численности зоопланктона, а при ежедневном отборе проб удалось установить тесную взаимосвязь между численностью планктонных животных и температурным и гидродинамическим режимами в водоеме.

Позднее автором было начато изучение общих закономерностей формирования стока Учинского водохранилища по составу фитопланктонного сообщества на основе многолетних данных, включающих ежедневные наблюдения в периоды весеннего «цветения» диатомовых водорослей [13]. Проведенные исследования показали, что высота и форма пиков «цветения» существенно различаются по годам, что связано с изменениями химических, физико-химических и гидродинамических условий.

Данная работа является продолжением и расширением общего комплекса работ по изучению качества воды в стоке Учинского водохранилища. Представленные в статье данные за 2005—2008 гг. ранее не были обобщены и детально не анализировались.

Наиболее удобной точкой наблюдения служит Листвянская ГЭС (ЛГЭС), расположенная на юго-восточной оконечности водохранилища близ Акуловской плотины, где вода из донного водозабора через гидроэлектростанцию перетекает в водопроводный канал. По каналу вода в течение 14—16 часов доходит до Восточной водопроводной станции (ВВС). Это создает предпосылки для составления краткосрочного прогноза качества воды, поступающей на очистные сооружения ВВС.

Детальное изучение закономерностей формирования стока по составу диатомовых водорослей в периоды их массового развития и его прогнозирование имеют немаловажное значение для эффективной работы водопроводных станций. Присутствие в воде большого количества водорослей с кремнеземными оболочками осложняет процесс водоподготовки. Отчетливые представления об условиях и закономерностях формирования пиков «цветения» позволяют с некоторой заблаговременностью составлять прогноз о нагрузке, которую будут испытывать система фильтров и вся система очистных мероприятий на водопроводных станциях.

В процессе работы были рассмотрены данные биологического и физико-химического мониторинга в точке наблюдения ЛГЭС за период

январь-май 2005, 2006 и 2008 гг., куда включены следующие результаты наблюдений:

1. Ежедневные данные по количественному и качественному составу диатомовых водорослей в период их весеннего «цветения». Пробы отобраны до полудня батометром 1 дм³ с глубины 0,5 м.
2. Температура воды с той же периодичностью.
3. Гидрохимические показатели по содержанию фосфор- и азотсодержащих веществ, частота наблюдений — еженедельная.

Кроме того, учитывались скорость и направление ветра в этом регионе.

На основе этих данных произведен комплексный анализ изменения различных показателей, способных обусловить характер стока Учинского водохранилища в каждый конкретный момент массового развития диатомей.

Результаты и их обсуждение

Результаты ежедневных наблюдений за изменением численности водорослей в наблюдаемые годы представлены на рис. 1. На рисунке отчетливо видно, что кривые, отражающие характер «цветения» в разные годы, имеют резко отличный характер. Наибольшей высотой пика характеризуется 2006 г., когда максимальные величины достигают 20 тыс. кл/мл и выше, причем кривая носит отчетливо выраженный зубчато-пиковый характер. Эта особенность обусловлена быстро происходящими изменениями гидродинамического режима водоема. Ветер, резко меняющий свое направление при достаточно высокой скорости (до 7 м/с), или слабый продолжительный ветер одной направленности (1—2 м/с) обуславливают отчетливо выраженные сгонно-нагонные явления. В это время происходит перемещение водных масс, в том числе, поднятие придонных слоев воды, обогащенных биогенными элементами, и опускание поверхностных слоев на глубину. Поступление биогенных элементов из донных отложений стимулирует рост численности водорослей [1].

Из приведенного рисунка также видно, что май 2005 г. отличается уровнем «цветения» примерно вдвое ниже по сравнению с 2006 г., причем кривая «цветения» имеет также зубчато-пиковый но менее выраженный характер.

Колебания пиковых величин в период массового развития диатомей отражены как на рис. 1, так и в таблице.

В наибольшей степени сгонно-нагонные явления повлияли на характер «цветения» в мае 2006 г.: численности водорослей колебались в пределах 4,2—21,8 тыс. кл/мл. За аналогичный период 2005 г. эти вели-

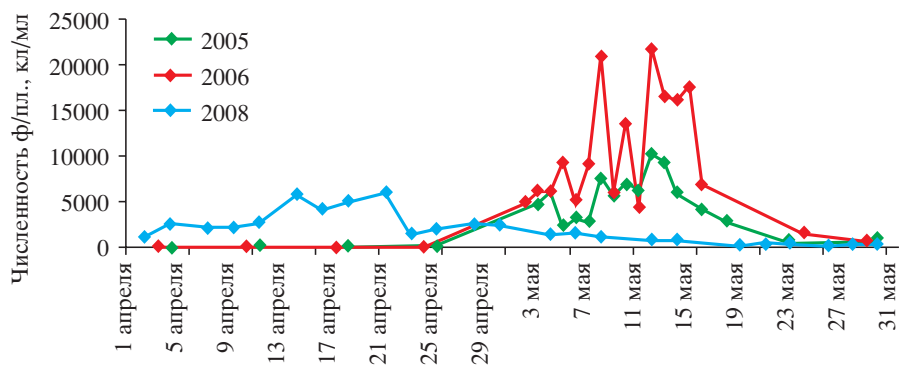


Рис. 1. Колебания численности диатомовых водорослей в стоке Учинского водохранилища в периоды весеннего «цветения» (по результатам ежедневных наблюдений в 2005—2008 гг.).

чины изменялись от 2,1 до 10,2 тыс. кл/мл. Ежедневные данные и сопоставление их с ветровыми характеристиками позволили установить и объяснить эти особенности. Наиболее отчетливые изменения численности диатомей, связанные с ветровым сгоном, зарегистрированы в период с 8 по 12 мая 2006 г., когда в течение одних суток они изменялись в 3—5 раз.

Аномальный характер развития диатомей наблюдался весной 2008 г. В связи с ранним таянием снегового покрова и прозрачностью льда в первых числах апреля началось подледное «цветение». Такое явление, как подледное развитие диатомей в пресноводных водоемах, наблюдалось в оз. Байкал и было подробно описано О.М. Кожовой [14]. При развитии диатомей в подледный период в Учинском водохранилище не отмечены отчетливо выраженные пики «цветения» из-за отсутствия перемешивания водных масс. Ледовый покров препятствовал ветровому воздействию и поступлению биогенных элементов из придонных слоев воды в зону фотосинтеза, поэтому в первой декаде мая численности диатомей свелись практически к нулю (рис. 1), не превысив 5,9 тыс. кл/мл за весь период апрельского «цветения». В исследуемый период эта группа водорослей на 90 % представлена *Stephanodiscus hantzschii* Grun., ему сопутствовала *Diatoma elongatum* Ag. и единичные клетки других диатомей.

Синоптические условия такие, как освещенность и температура, по мнению К.А. Гусевой [1], не бывают в первом минимуме, однако в значительной степени обуславливают сроки, продолжительность и интенсивность «цветения». На рис. 2 отображены данные по изменению

Таблица. Изменение численности диатомовых водорослей в периоды их массового развития (тыс. кл/мл)

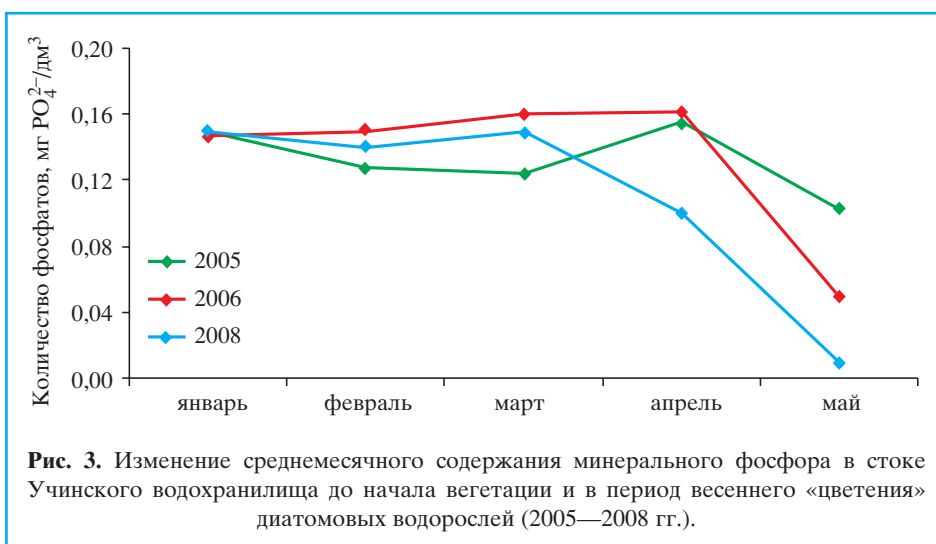
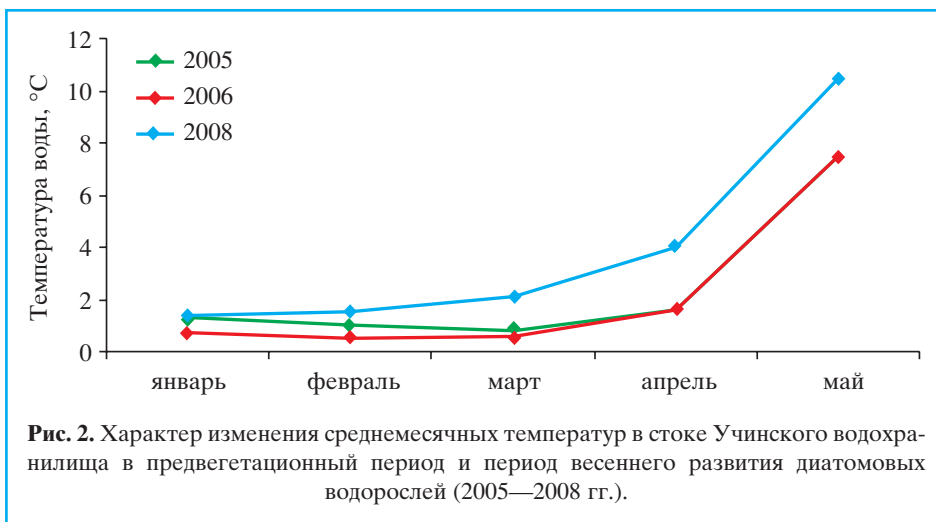
Год	Даты													
	3.05	4.05	5.05	6.05	7.05	8.05	9.05	10.05	11.05	12.05	13.05	14.05	15.05	16.05
2005	4,9	6,1	2,1	3,1	2,6	7,7	5,7	7,1	6,2	10,2	9,4	5,8	4,1	2,7
2006	6,0	6,1	9,3	4,8	9,0	21,0	6,1	14,0	4,2	21,8	16,7	16,1	17,6	6,9

среднемесячных температур в период, предшествующий «цветению», и в период активного развития диатомовых водорослей. К.А. Гусева отмечает, что подготовка к «цветению» может длиться месяцами для диатомей, зимующих в вегетирующем состоянии, и годами — для синезеленых водорослей, зимующих в форме цист. При этом большую роль играет температурный режим водоема.

Как видно из рис. 2, среднеянварские и среднефевральские температуры в 2006 г. ниже по сравнению с 2005 г. на 0,5—0,7 °С, а в последующий период в эти годы они сравнялись и составили 1,6 °С в апреле, 7,5 °С — мае. Первое полугодие 2008 г. характеризовалось самыми высокими температурными показателями за рассматриваемые годы и в апреле, мае эти величины достигли 4,0 и 10,7 °С, соответственно. При практически полной идентичности температурных условий в эти годы уровень развития диатомей различался вдвое. Подледное развитие водорослей 2008 г., несмотря на высокие температурные показатели, не набрало силу и во время слабо выраженного «цветения» не были зарегистрированы отчетливо выраженные пики.

Причины этих различий следует искать в особенностях гидрохимического и гидродинамического режимов каждого отдельно взятого периода. Если весеннее «цветение» 2005 и 2006 гг. происходило в условиях ветрового перемешивания, то апрель 2008 г. отличался полным отсутствием перемешивания водных масс и подпитки биогенными элементами из донных отложений. В этом случае развитие водорослей происходило только за счет поступления питательных веществ с верхневолжской водой.

Основными биогенными элементами, регулирующими развитие диатомовых водорослей, К.А. Гусева [1] называла фосфор, марганец и железо в доступной для организмов форме, а также присутствие в различных количествах нитратного и аммонийного азота. В настоящей работе рассматривается влияние количественного состава минерального фосфора, иона аммония и нитратного азота на уровень развития диатомей. Проведен анализ изменений содержания этих веществ в период, предшествующий вегетации и в вегетационный период (рис. 3, 4, 5).



На рис. 3 приведены кривые, отображающие особенности динамики минерального фосфора в точке наблюдения ЛГЭС. Из рисунка видно, что в январе за все годы наблюдения этот показатель характеризуется одной и той же величиной, равной $0,150 \text{ мг PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$. Затем эти величины несколько различаются и находятся в пределах $0,128\text{—}0,150 \text{ мг PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$ в феврале и $0,124\text{—}0,160 \text{ мг PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$ в марте. В апреле 2005 и 2006 гг. наблюдается одинаково высокое содержание фосфатов $0,156\text{—}0,162 \text{ мг PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$, характерное для паводкового и послепаводкового периодов. В апреле 2008 г. подледное «цветение» привело к заметному

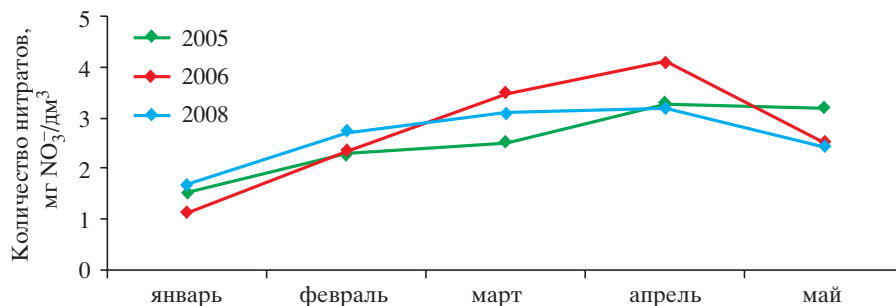


Рис. 4. Изменение среднемесячного содержания нитратов в стоке Учинского водохранилища до начала вегетации и в период весеннего «цветения» диатомовых водорослей (2005—2008 гг.).

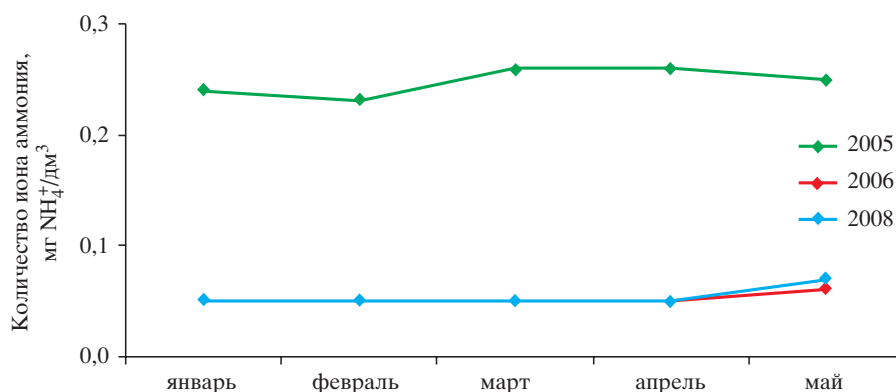


Рис. 5. Изменение среднемесячного содержания аммонийного азота в стоке Учинского водохранилища до начала вегетации и в период весеннего «цветения» диатомовых водорослей (2005—2008 гг.).

снижению концентрации минерального фосфора в воде до 0,100 мг $\text{PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$. Лимитирующее влияние фосфатов для развития диатомей отчетливо прослеживается в мае. После апрельского «цветения» 2008 г. количество фосфатов в мае свелось практически к нулю, интенсивное «цветение» в мае 2006 г. также обусловило резкое снижение минерального фосфора до 0,05 мг $\text{PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$, при умеренном развитии диатомей в 2005 г. его средне майское содержание — 0,102 мг $\text{PO}_4^{2-}/\text{дм}^3$. Таким образом, потребление фосфора составило 35, 68 и 93 % от первоначального запаса в 2005, 2006 и 2008 гг., соответственно. Описанная ситуация является характерной для водохранилищ умеренной зоны и находится в соответствии с данными многолетних наблюдений за внутригодовой дина-

микой содержания фосфорсодержащих веществ в Учинском водохранилище [9].

Несмотря на практически одинаковое исходное содержание фосфатов в воде и идентичный температурный режим в годы с отчетливо выраженным «цветением», уровень развития диатомей существенно различался. Возможно, причины этих различий заключаются в особенностях динамики азотсодержащих веществ в наблюдаемые периоды.

На рис. 4 представлены кривые, отражающие изменения содержания нитратного азота. На рисунке видно, что в январе количество нитратного азота в воде минимально и колеблется в пределах 1,11—1,70 мг $\text{NO}_3^-/\text{дм}^3$. Затем значения этого показателя постепенно возрастают и достигают максимальных величин в апреле. Они составляют 3,2 мг $\text{NO}_3^-/\text{дм}^3$ в 2005 и 2008 гг. и 4,11 мг $\text{NO}_3^-/\text{дм}^3$ в 2006 г. Это связано с внесением в водоем загрязняющих веществ с паводковыми водами. В мае 2006 и 2008 гг. наблюдалось отчетливо выраженное снижение количества нитратного азота до 2,52 и 2,40 мг $\text{NO}_3^-/\text{дм}^3$, соответственно. В мае 2005 г. этот показатель не изменился по сравнению с апрелем. Совершенно очевидно, что интенсивное «цветение» в мае 2006 г. и вялое «цветение» в апреле 2008 г. без подпитки питательными веществами из донных отложений вызвало снижение содержания нитратов в воде. Однако при умеренном развитии диатомей в мае 2005 г. не наблюдалось снижения содержания нитратного азота, его количество осталось на уровне апреля.

Динамика нитратных соединений тесно связана с изменениями содержания аммонийного азота в воде. Известно, что аммонийный азот (NH_4^+) является первичной неорганической формой азота при минерализации органического вещества, присутствует в водоеме круглый год, изменяясь количественно. Нитраты появляются в результате окисления иона аммония, причем являются продуктом второй фазы нитрификации, т. е. окисления нитритной формы азота (NO_2^-), крайне нестойкой [15]. Кроме того, нитраты в готовом виде попадают в водоем с освоенных территорий, что особенно отчетливо проявляется в паводковые периоды.

Как аммонийный, так и нитратный азот могут служить питанием для водорослей, но для различных групп фитопланктона по-разному. Для диатомей предпочтительнее нитратный азот. По мнению К.А. Гусевой [1], избыток азота может оказывать ингибирующее действие на развитие диатомовых водорослей.

На рис. 5 представлены данные по количественному содержанию иона аммония в различные годы и периоды. Из рисунка видно, что весь рассматриваемый период 2005 г. характеризуется чрезвычайно высоким

содержанием этого вещества (0,24—0,26 мг NH_4^+ /дм³) и весеннее «цветение» диатомей не привело к снижению его количества. Напротив, 2006 и 2008 гг. отличаются постоянно низким содержанием аммонийного азота, не превышающим 0,05—0,07 мг NH_4^+ /дм³.

Если сопоставить данные по нитратному и аммонийному азоту (рис. 4 и 5), то видно, что при неизменном содержании аммонийного азота в воде количество нитратного азота с января по апрель постепенно возрастало на протяжении всех лет наблюдения. В зимние месяцы в условиях низких температур окислительные процессы замедлены и ион аммония претерпевал чрезвычайно медленный процесс трансформации. Нитраты, поступающие с площади водосбора, при неустойчивых климатических условиях могут вноситься в водоем уже в феврале-марте и в районе водозабора достигают максимальных величин в апреле. В 2005 г. аммонийный азот попадал в водоем в течение зимнего и весеннего периодов, имея определенный источник загрязнения. Это обусловило общую ситуацию по азотсодержащим веществам в этом году и способствовало частичному ингибированию развития диатомей в мае.

Таким образом, интенсивное «цветение» в мае 2006 г. и подледное «цветение» в апреле 2008 г. привело к снижению количества нитратов на 40 и 25 %, соответственно, а в мае 2007 г. концентрация этого вещества по сравнению с апрелем не снизилась. Количество аммонийного азота, как и нитратного в результате «цветения» не уменьшилось, оба эти показателя достигали достаточно высоких значений.

Выводы

Изучены особенности формирования стока Учинского водохранилища в период весеннего «цветения» диатомовых водорослей в годы с различными температурными, гидрохимическими и гидродинамическими условиями. Ежедневные наблюдения за составом фитопланктона в сопоставлении с комплексом этих факторов позволили выявить следующие закономерности.

1. Во время весеннего «цветения» диатомовых водорослей их численности могут достигать 20 тыс. кл/мл и выше. Видовой состав этой группы водорослей примерно на 90 % представлен *St. hantzschii*.

2. Кривые, отражающие изменение численности диатомей, имеют зубчатый характер, обусловленный изменениями гидродинамических условий. В течение суток численность водорослей в выбранной точке наблюдения может колебаться в несколько раз. Ветровое перемешивание водных масс вызывает подъем придонных слоев воды, обогащенных биогенными элементами, в зону фотосинтеза, что способствует

подъему численности водорослей и увеличению продолжительности «цветения».

3. Общий уровень развития диатомовых водорослей зависит от температурных условий и содержания основных биогенных элементов, а именно фосфор- и азотсодержащих веществ. Количество этих веществ зависит от состава верхневолжской воды и состояния водохранилищ верхнего бьефа. Кроме того, запасы биогенных элементов в воде непрерывно пополняются за счет поступления их из донных отложений, что связано с температурным и ветровым перемешиванием водных масс и в наибольшей степени проявляется во время весенней гомотермии.

4. Содержание фосфатов к концу весеннего «цветения» значительно снижается, иногда практически до нуля. Максимальное уменьшение содержания нитратов в наблюдаемые годы — 40 %, а количественный состав иона аммония в периоды «цветения» не изменялся по сравнению с исходной величиной.

Таким образом, различия в сроках весеннего «цветения» обусловлены разницей температурных условий, а уровень «цветения» и его продолжительность определяются количественным и качественным соотношением основных биогенных элементов. Лимитирующим элементом является фосфор, необходимым — азот, предпочтительно в нитратной форме. Продолжительность «цветения» и зубчато-пиковый его характер зависят от особенностей гидродинамического режима. Выявленные закономерности формирования пиков весеннего развития диатомовых водорослей способствуют составлению краткосрочного прогноза качества воды, поступающей на водопроводные станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусева К.А. «Цветение» воды, его причины, прогноз и меры борьбы с ним (по материалам Учинского водохранилища). Дис. ... докт. биол. наук. М., 1951. 210 с.
2. Word Resources 1996—1997. N.Y. et al.: Oxford Univ. Press, 1996. 368 p.
3. Word Resources 1994—1995. N.Y. et al.: Oxford Univ. Press, 1994. 404 p.
4. Mason R., Mattson M. Atlas of United States Environmental Issues. N.Y.: Macmillan, 1990. 252 p.
5. Остроумов С.А. Синэкологические основы решения проблемы эвтрофирования // Доклады академии наук. 2001. Т. 381. № 5. С. 709—712.
6. Штина Э.А. Изменение фитопланктона реки Вятки за полвека наблюдений // Гидробиологический журнал. 1992. № 1. С. 12—17.
7. Витвицкая Т.В., Хромов В.М. Изменение сезонной и пространственной структуры фитопланктонного сообщества р. Москвы // Водные ресурсы. 1991. № 6. С. 82—89.
8. Витвицкая Т.В., Хромов В.М., Цыцарина И.М. Многолетняя динамика минеральных форм азота и фосфора в воде верхнего участка Москвы-реки в процессе ее эвтрофирования // Водные ресурсы. 1994. № 3. С. 344—349.

9. Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
10. Францев А.В. Очистной эффект Учинского водохранилища и некоторые пути его повышения // Труды IV совещания по проблемам биологии внутренних вод. М.; Л.: Наука, 1959. С. 247—259.
11. Ворожун И.М., Карташева Н.В., Лебедева Л.И. Формирование качества воды в стоке Учинского водохранилища и в водопроводном канале (по сообществу планктонных ракообразных) // Водные ресурсы. 1985. № 6. С. 141—147.
12. Лебедева Л.И., Карташева Н.В., Ворожун И.М. Трансформация сообщества коловраток в стоке Учинского водохранилища и в водопроводном канале // Водные ресурсы. 1985. № 1. С. 121—125.
13. Ворожун И.М. Особенности развития фитопланктона в Учинском водохранилище. В кн.: Эколого-физиологические исследования водорослей и их значение для оценки состояния природных вод. Ярославль. 1996. С. 15—17.
14. Кожова О.М. О подледном «цветении» озера Байкал // Ботанический журнал. 1959. Т. 44. Вып. 7. С. 1001—1004.
15. Алексин О.А. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, 1953. 294 с.

Сведения об авторе:

Ворожун Ирина Михайловна к. б. н., инженер 1 категории, кафедра гидробиологии биологического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, artemova@mscins.ru.