

ПРИМЕНЕНИЕ флуоресцентных методов для мониторинга биотехнологических процессов и **ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА** воды р. Москва В ЧЕРТЕ ГОРОДА

С использованием современных флуоресцентных методов изучен процесс получения биомассы микроводорослей на очищенной воде МГУП «Мосводоканал», а также исследованы сезонные изменения концентрации хлорофилла и параметров флуоресценции хлорофилла природного фитопланктона в р. Москва. При культивировании микроводорослей в лабораторном фотобиореакторе выявлены связи между содержанием хлорофилла «а», биомассой, показателем флуоресценции F_o , а также между приростом биомассы и значением F_v/F_m .



Введение

В больших городах важнейшей проблемой становится загрязнение природных вод биогенными элементами. С этой проблемой связано развитие избыточного количества фитопланктона в водоемах, который не утилизируется зоопланктоном и рыбами и создает предпосылки для загрязнения воды органическими соединениями. Значительная часть биогенных элементов поступает в водоемы с бытовыми стоками. Их удаление осуществляется на очистных сооружениях с помощью биологической очистки. Очистка от азота проводится с помощью процесса нитрификации (удаление аммонийного азота) и денитрификации (удаление нитритного и нитратного азота), а очистка от фосфора – удалением с помощью бактерий, аккумулирующих фосфор в биомассе. Недостаток вышеперечисленных способов: бактериям для удаления азота и фосфора необходимо биологически доступное органическое вещество, которого не всегда достаточно в городских сточных водах. Одним из способов, позволяющим удалять азот и фосфор в отсутствие органического вещества, является применение для очистки фотоавтотрофов, которые используют сол-

Н.М. Щеголькова*,
доктор биологических наук, главный специалист, Инженерно-технологический центр МГУП «Мосводоканал»

П.С. Шашкина,
инженер, Инженерно-технологический центр МГУП «Мосводоканал», аспирант, Московский областной государственный университет

нечный свет в отличие бактерий, использующих энергию органического вещества. Наиболее продуктивными из всех фотоавтотрофов являются микроводоросли. Развитие технологий очистки бытовых стоков с применением фотоавтотрофов сдерживалось отсутствием технологий по переработке получаемой биомассы. В последние годы наблюдается активное развитие таких технологий. [1, 2]. Преимущества микроводорослей перед другими источниками биомассы огромны – наивысшая продуктивность и способность очищать воду от биогенных элементов. В мировой практике уже используются фотобиореакторы для выращивания биомассы микроводорослей на очищенных стоках [3-5]. В 2008-2010 гг. в МГУП «Мосводоканал» проведены работы по получению биомассы водорослей на биологически очищенной воде и переработке ее в биотопливо. В Инженерно-технологическом центре МГУП «Мосводоканал» на Курьяновских очистных сооружениях (КОС) создана и запущена в

* Адрес для корреспонденции: NShegolkova@mail.ru

действие пилотная установка, представляющая собой фотобиореактор (ФБР) с микроводорослями [2].

Проработаны основные технологические этапы:

1. Выведен устойчивый биоценоз водорослей, дающий оптимальный прирост на очищенной воде КОС.

2. Разработаны технические решения по созданию ФБР, отработаны режимы его функционирования (возраст культуры, тип реактора),

3. Найдены технические решения по обеспечению ФБР солнечным светом для оптимального использования солнечной энергии,

4. Проработан вопрос утилизации CO_2 , образующейся от ТЭЦ для повышения продуктивности ФБР.

5. Проработан способ отделения биомассы водорослей из раствора.

6. Ведется работа по оценке биогазового потенциала выращенных водорослей.

Для дальнейшего усовершенствования процесса важной технологической задачей является непрерывное наблюдение за состоянием фотосинтетического аппарата популяции микроводорослей, так как от этого зависит продукция биомассы. Прогнозирование ухудшения состояния водорослей позволяет своевременно регулировать технологический процесс, поддерживая максимальную продуктивность. В лабораторных условиях состояние обычно оценивается по стабильности видового состава и уровню хлорофилла «а» [6]. При реализации промышленных проектов данный вид технологического мониторинга чрезвычайно трудоёмок и занимает много времени.

Известно, что при действии различных экологических и технологических факторов на микроводоросли в первую очередь изменяется их фотосинтетическая активность, которая и определяет численность клеток водорослей [7]. Это справедливо как для природных водоемов, так и для промышленных фотобиореакторов. Для быстрой диагностики состояния фитоценоза в природных условиях развиваются современные методы регистрации флуоресценции хлорофилла, которые позволяют получать информацию о количестве и активности фототрофных организмов *in situ* [8-12].

По характеристикам состояния фотосинтетического аппарата можно оценивать общее физиологическое состояние клеток и судить о качестве водной среды, так как фитопланктон в природных водоемах – один из главных живых агентов, влияющих на процессы самоочищения [13]. МГУП «Мосводоканал» осуществляет регулярный мониторинг

Д.Н. Маторин,
доктор биологических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,

В.А. Осипов,
кандидат биологических наук, научный сотрудник кафедры биофизики биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

А.Б. Рубин,
доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой биофизики биологического факультета, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

р. Москва и ее притоков в местах выпусков очистных сооружений (Курьяновские, Люберецкие, Зеленоградские, Южно-Бутовские). В том числе проводится многолетнее наблюдение за состоянием фитопланктона рек. Сокращение трудозатрат при проведении экологического мониторинга является насущной задачей современного производственного процесса.

Поэтому основной целью настоящей работы являлось изучение изменений состояния фитопланктона в промышленных и природных условиях с использованием современных флуоресцентных методов.

Материалы и методы исследования

Лабораторный фотобиореактор (рис. 1) состоит из колонн с культурой водорослей, системы освещения (3000 люкс), системы подачи и распределения воздуха (для снабжения водорослей CO_2 и для перемешивания биомассы в колоннах), системы подачи очищенной сточной воды 1 раз в сутки взамен слитой воды из реактора, системы обезвоживания биомассы фильтрованием с применением вакуумного насоса (фильтр с размером пор 3 мкм).

Подача воздуха осуществляется круглосуточно, освещение колонн 12 часов в сутки, регулирование освещения – контролером. Температура воды в реакторах составляла 22-25 °С. Колонны являются периодически реакторами с заменой части жидкости 1 раз в сутки.

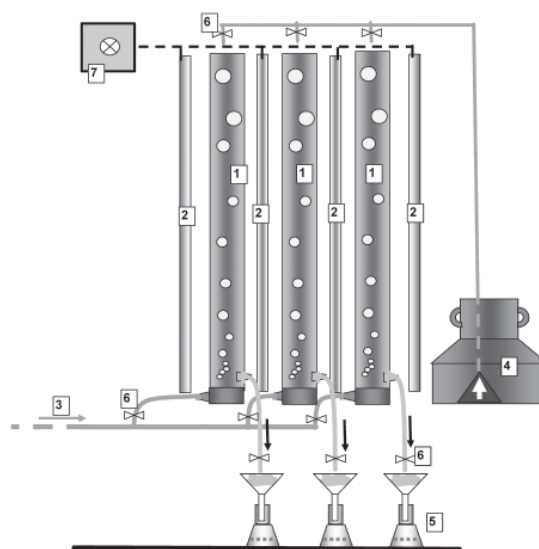


Рис. 1. Схема фотобиореактора: 1 – колонны-реакторы с культурой водорослей; 2 – система освещения; 3 – система подачи и распределения воздуха для снабжения водорослей CO_2 и для перемешивания культуры; 4 – система подачи очищенной сточной воды 1 раз в сутки (емкость с насосом); 5 – система обезвоживания биомассы и отбора проб из культиваторов; 6 – вентили; 7 – контролер.



Колонны являются периодическими реакторами полного смешения с заменой части жидкости 1 раз в сутки. Сливаемая ежедневно вода фильтровалась через фильтр «белая лента» с использованием вакуумного насоса. Отфильтрованная биомасса ежедневно взвешивалась. В колоннах были заданы три разных режима, отличающихся значением водообмена (объем жидкости, заменяемой в реакторе на сточную воду, выраженный в процентах от общего объема колонны). В настоящей работе для изучения были выбраны три реактора со следующими режимами: в первый реактор осуществлялась подача биологически очищенной воды, возраст культуры – 3 сут (треть объема реактора 1 раз в сутки заменялась на «свежую» очищенную воду), во второй и третий реактор осуществлялась подача осветленной воды, возраст культуры во втором реакторе – 3 сут, в третьем – 2 сут (водообмен – половина объема реактора в сутки).

Исследования на р. Москва

Первая точка исследования располагалась в Тушино, где река входит в черту города, вторая – в центральной части Москвы (Воробьевы горы) и третья – на выходе реки за пределы города, в подмосковном г. Дзержинский. Отбор проб проводили в сентябре – октябре 2009, 2010 г.г. Два года наблюдения отличались по температурному режиму и освещенности в летний период. Последний год был экстремален по устойчиво высокой температуре и высокой степени освещенности за счет отсутствия облачности.

Пробы из р. Москва отбирались по несколько раз за период сентябрь-октябрь, а пробы из фотобиореактора отбирались из каждого опыта в тройной повторности (с интервалом в неделю).

Пробы фитопланктона на анализ концентрации пигментов и флуоресценцию отбирали в нестерильные пластиковые бутылки объемом 1 л. Флуоресцентный анализ проб начинали не позднее 2 час после их отбора. Измерение параметров флуоресценции хлорофилла в суспензии водорослей проводили на сертифицированном импульсном флуориметре, созданном на кафедре биофизики Биологического факультета МГУ, предназначенном для измерения сильно разбавленных суспензий микроводорослей [14]. В адаптированных к темноте образцах регистрировали постоянную (F_0) и максимальную флуоресценцию (F_m), а также относительный выход переменной флуоресценции $(F_m - F_0)/F_m = F_v/F_m$, который является мерой квантовой эффективности фотосистемы 2 (ФС 2). Эффективность первичных процессов фотосинтеза (F_v/F_m) представляет собой безразмерную энергетическую характеристику фотосинтеза, аналогичную коэффициенту полезного действия и не зависящую от видовой специфики организма [8]. Уровень постоянной флуоресценции F_0 высоким коэффициентом корреляции соответствует суммарному содержанию пигментов фотосинтетического аппарата фитопланктона, осуществляющих сбор энергии и, соответственно, также коррелирует с обилием клеток водорослей [12]. Поэтому он может быть использован для оценки ростовых процессов культур клеток. Использование флуориметрического метода для определения хлорофилла в составе фитопланктонных водорослей не предполагает какой-либо предварительной подготовки воды для измерения. Для измерений применяли также флуориметр WaterPAM (Walz, Германия).

Пробы воды на анализ фитопланктона отбирались по известным стандартным методикам [15]. Пробы фиксировали раствором люголя (2 мл на 1 л воды). В дальнейшем численность фитопланктона определялась микроскопированием с использованием счетной камеры Нажотта. Биомасса определялась методом геометрического подобия. Содержание хлорофилла «а» определялось экстракцией органическим растворителем пигмента с последующим спектрометрическим определением. Во всех пробах определялся видовой состав водорослей, численность и биомасса по основным группам (диатомовые, зеленые, сине-зеленые, золотистые, эвгленовые, прочие).

Измерения выполняли в 2-3 повторностях. Обработку результатов производили с использованием статистических методов по Фишеру.

Результаты и их обсуждение

Оценка применения флуориметрического метода для технологического контроля фотобиореактора

Химический состав воды в реакторах

Осветленная вода отличается от очищенной большим содержанием биогенных элементов (соли аммонийные, нитратные, фосфаты) и растворенного органического вещества. Содержание фосфатов (по Р), азота нитратов и азота аммонийного в реакторе с биологически очищенной водой в среднем составляло 1,66; 13,63; 2,50 мг/л, соответственно. В реакторе с осветленной водой те же показатели: 5,65; 0,04 и 24,20 мг/л. Исходное содержание хлорофилла «а» - 0,001-0,002 мг/л.

Видовой состав водорослей фотобиореактора

Вопрос формирования видового состава реактора с начала работы был основным. Наиболее продуктивными, как известно, являются реакторы с одним видом водорослей. Однако поддержание стерильности в реакторе, доочищающем бытовые стоки, нереально. С очищенными водами постоянно поступают водоросли, растущие во всех сооружениях очистки – от открытых каналов поступающей воды до вторичных отстойников.

В самом начале эксперимента в фотобиореактор была добавлена культура водорослей *Scenedesmus*. Регулярное обследование на видовой состав поступающей и доочищенной воды показало, что разнообразие видов поступающей воды значительно выше набора видов в реакторе. Если в поступающей воде за все время наблюдений зафиксировано 89 видов, то в воде реакторов – 22. Преобладают в обоих случаях зеленые и диатомовые водоросли. Видовой состав фотобиореактора достаточно стабилен в течение всего времени наблюдения. В воде, поступающей в реакторы, из диатомовых доминирующими видами являются *Nitzschia palea* (Kutz.) W.Sm., *Stephanodiscus sp*, из зеленых *Scenedesmus quadricauda* Chod., *Scenedesmus opoliensis* P. Richt., из сине-зеленых (цианобактерий) *Oscillatoria amphibia f. tenuis* (Anissim.) Elenk., *Oscillatoria tenuis* Ag.ex Gom, *Chroococcus minutus*. В воде реакторов доминирующими видами из диатомовых являются *Dicthyosphaerium ehrenbergianum* Nag., *Navicula viridula* Kutz, из зеленых *Scenedesmus obliquus* (Turp.)Kutz., *Scenedesmus parvus*, из сине-зеленых *Oscillatoria amphibia f. tenuis* (Anissim.) Elenk., из пиррофитовых *Didymocystis lineata* Korsch., из эвгленовых: *Astasia sp*.

Как видно из анализа видового состава, в фотобиореакторе идет перестройка структуры сообщества. Большая часть биомассы

Ключевые слова:

мониторинг,
хлорофилл,
флуоресценция,
фотобиореактор

формируется за счет видов *Oscillatoria.*, *Scenedesmus* и *Astasia*. Биомасса этих видов в сумме в сливной воде может достигать 500-1000 г/м³.

Технологические показатели продуктивности и характеристики флуоресценции

Основным технологическим параметром фотобиореактора является прирост биомассы на единицу объема реактора в единицу времени. Продуктивность зависит от нескольких факторов – содержания биогенных элементов, возраста культуры и токсичности подаваемой воды. Очищенная вода (первая колонна) характеризовалась возрастом культуры 3 сут, меньшим содержанием биогенных элементов и отсутствием токсичности. Последнее подтверждено опытами по биотестированию, индекс токсичности на инфузориях 0,26 [16]. Осветленная вода содержит большее количество биогенных элементов, в основном, в виде аммонийных солей, которые потребляются водорослями в первую очередь. Однако осветленная вода имеет уровень токсичности выше, чем биологически очищенная. Индекс токсичности по биотестированию на инфузориях изменялся от 0,35 до 0,89. Максимальные значения (0,72-0,89) – в третьей колонне. Первый и второй реакторы отличались по качеству подаваемой воды и не различались по возрасту культуры (3 сут). Во второй и третий реакторы подавалась осветленная вода при возрасте культуры 3 и 2 сут, соответственно. Все эти факторы приводили к тому, что средние значения продуктивности для трех реакторов различались - 149, 206, 135 мг/(л сут) по сырой биомассе при разбросе значений не более 25 % от абсолютных величин (табл. 1). Плотность водорослевой культуры (которая определялась в сливной жидкости ежедневно) также различалась. Содержание сырой биомассы водорослей в трех реакторах составляло 287, 125 и 165 мг/л, соответственно.

Таблица 1

Концентрации хлорофилла, содержание биомассы, параметры флуоресценции F_o и фотосинтетической активности (F_v/F_m) в фотобиореакторах

| | Колонна 1 | Колонна 2 | Колонна 3 |
|----------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Хлорофилл «а» мг/л | 1,48±0,24 | 0,72±0,39 | 0,90±0,28 |
| Суммарная биомасса, мг/л | 287±41 | 125±28 | 165±62 |
| Продуктивность, мг/(л сут) | 149±36 | 206±48 | 135±34 |
| F_o , отн.ед. | 4475±484 | 2029±901 | 2918±942 |
| F_v/F_m | 0,51±0,07 | 0,55±0,05 | 0,50±0,02 |

Параметры флуоресценции (F_o) и (F_v/F_m) определяли в пробах из реакторов, различающихся скоростью роста культуры и при разной степени угнетенности токсическими веществами. Показано, что коэффициент корреляции между средними значениями F_o для трех реакторов и концентрацией хлорофилла «а» составляет 0,98, коэффициент корреляции между F_o и содержанием биомассы составляет 0,99. (рис. 2).

Активность реакционных центров ФС 2, связанную с выделением кислорода при фотосинтезе, можно оценивать по параметру флуоресценции F_v/F_m . Этот параметр, отражающий максимальный квантовый выход ФС2, позволяет судить о фотосинтетической

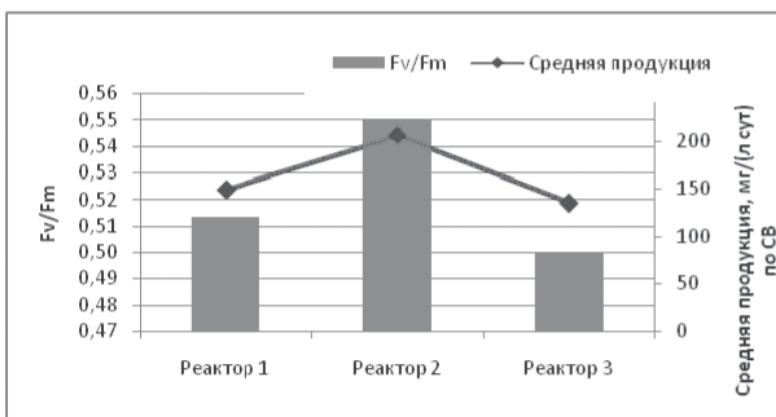
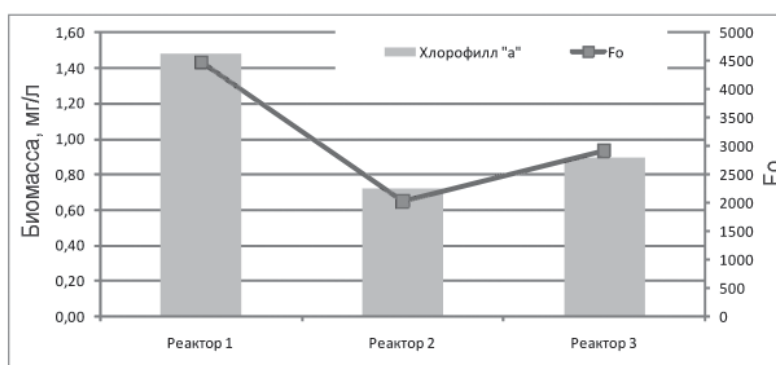
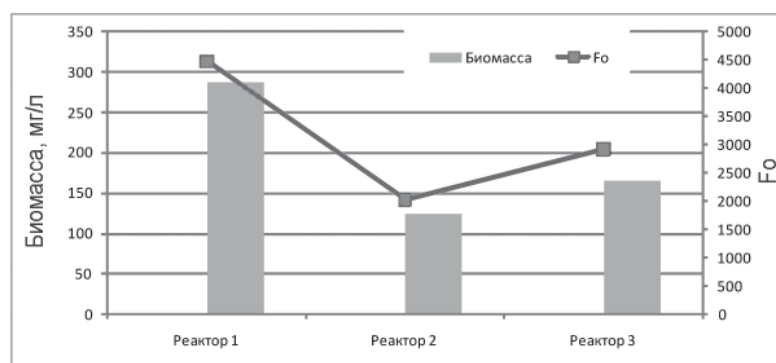


Рис. 2. Характеристика концентрации хлорофилла, содержания биомассы, средней продукции биомассы и параметров флуоресценции (F_o и F_v/F_m) в фотобиореакторах.

активности культуры микроводорослей фотобиореактора. В природных водоемах, богатых элементами минерального питания, значения F_v/F_m могут достигать 0,6-0,7. При действии стрессовых факторов и загрязняющих веществ этот показатель может уменьшаться. У мертвых клеток он равен 0.

Для трех реакторов значения F_v/F_m составляли 0,46-0,58. Статистически значимых различий между тремя реакторами не выявлено (табл. 1), однако выявлена тенденция прямой корреляционной зависимости показателя F_v/F_m от продукции реакторов. Коэффициент корреляции между средними значениями F_v/F_m и продукцией составляет 1,00 для трех реакторов (рис. 2).

Таким образом, флуориметрический метод позволяет оценить не только количество биомассы водорослей (по показателю F_o), находящихся в фотобиореакторе, но и продуктивность реактора. При увеличении продукции возрастает значение F_v/F_m . Соответственно, снижение последнего показателя может свидетельствовать о возрастании токсичности воды или о недостатке биогенных элементов, либо о другом изменении технологического режима, который снижает эффективность работы фотобиореактора. Непрерывный контроль приборами двух названных показателей позволит своевременно применить технологические меры по стабилизации продукции фотобиореакторов.

Оценка применения флуориметрического метода для экологического мониторинга р. Москва

Краткая характеристика р. Москва и ее экологического состояния в пунктах флуориметрического анализа

По данным экологического мониторинга участок р. Москва до входа в город (Тушино) является наиболее чистым. Точка отбора проб «Воробьевы горы» находится в черте города, и качество воды зависит, прежде всего, от поверхностных водовыпусков, которые несут в реку такие загрязняющие вещества, как нефтепродукты, тяжелые металлы, фенолы, СПАВ. Выше этого пункта находится устье весьма загрязненной р. Сетунь. Пункт наблюдений в г. Держинский находился в нижнем течении реки, ниже выпусков Курьяновских очистных сооружений, после выпуска которых увеличивается концентрация, прежде всего, биогенных элементов — ионов аммония, нитритов, фосфатов.

Содержание в водах реки биогенных соединений, имеющих важное значение для развития фитопланктона — фосфатов (по Р), азота нитратов и азота аммонийных солей увели-

Таблица 2

Характеристика качества воды в пунктах наблюдений

| Пункт | Год | pH | Взвешенные вещества, мг/л | БПК ₅ , мг O ₂ /л | ХПК, мг O ₂ /л | Азот аммонийных солей, мг/л | Азот нитратов, мг/л | Фосфаты (по P), мг/л |
|----------------|------|------|---------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|---------------------|----------------------|
| Тушино | 2009 | 7,92 | 2,8 | 1,2 | 20 | 0,14 | 0,45 | 0,02 |
| Тушино | 2010 | 8,15 | 9,6 | 1,5 | 17 | 0,17 | 0,50 | 0,09 |
| Воробьевы горы | 2009 | 7,6 | 5,2 | 1,4 | 19 | 0,30 | 0,60 | 0,11 |
| Воробьевы горы | 2010 | 7,7 | 3,3 | 1,4 | 15 | 0,20 | 0,60 | 0,08 |
| Дзержинск | 2009 | 7,57 | 1,2 | 1,3 | 28 | 3,45 | 3,15 | 0,39 |
| Дзержинск | 2010 | 7,57 | 8,2 | 3,9 | 25 | 2,54 | 3,69 | 0,13 |

Таблица 3Характеристика фитопланктона, параметры флуоресценции F_o и фотосинтетической активности (F_v/F_m) в пунктах наблюдений

| Показатели | Тушино | | Воробьевы горы | | Дзержинск | |
|--------------------------------|---------|---------|----------------|---------|-----------|---------|
| | 2009 г. | 2010 г. | 2009 г. | 2010 г. | 2009 г. | 2010 г. |
| Биомасса водорослей, мг/л | | | | | | |
| диатомовые | 2,07 | 3,04 | 0,76 | 1,63 | 0,37 | 1,21 |
| зеленые | 0,48 | 0,05 | 1,26 | 0,01 | 0,83 | 1,38 |
| золотистые | 0,01 | 0,00 | 0,09 | 0,01 | 0,00 | 0,00 |
| сине-зеленые | 0,28 | 0,09 | 0,00 | 0,00 | 0,11 | 0,03 |
| эвгленовые | 0,03 | 0,00 | 1,29 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| прочие | 0,02 | 0,09 | 0,07 | 0,00 | 0,61 | 0,01 |
| Суммарная биомасса, мг/л | 2,90 | 3,28 | 3,45 | 1,65 | 1,92 | 3,07 |
| F _o , отн.ед. | 185 | 289 | н/о | 115 | 120 | 125 |
| F _v /F _m | 0,43 | 0,7 | н/о | 0,27 | 0,12 | 0,36 |
| Хлорофилл «a» | 0,046 | 0,057 | 0,043 | 0,027 | 0,032 | 0,028 |

н/о – измерение не проводилось

чиваются в пункте «Воробьевы горы» на 20-40 % по сравнению с пунктом «Тушино», однако этот пункт находится в зоне реки с наивысшей токсичностью, что показано многолетними наблюдениями [16]. Ниже городской черты (г. Дзержинск) содержание солей азота и фосфора возрастает в несколько раз, достигая значений 2,54-3,45 мг/л для аммонийных солей, 3,15-3,69 мг/л – для нитратов и 0,13-0,39 мг/л для фосфатов (по P).

Температура воды по пунктам наблюдений была 12-15 °С в «Тушино» и «Воробьевы горы», в г. Дзержинск – на 2-3 °С выше по сравнению с первыми двумя пунктами.

Исследования проводились в 2009 и 2010 гг. в сентябре – в период отмирания фитопланктона. Оба года сильно различались предшествующими летними сезонами. В 2010 г. наблюдалось аномально жаркое лето, приведшее к активному «цветению» реки по всему руслу (по затонам и в предплотинных зонах). Биомасса фитопланктона летом 2010 г. была выше по основным постам

наблюдения МГУП «Мосводоканал» в 2-10 раз по сравнению с остальными годами наблюдений. В сентябре температура уже вернулась к обычным для этого периода значениям, однако содержание фитопланктона оставалось повышенным в двух пунктах наблюдений – в пунктах «Тушино» и «г. Дзержинск» (на входе реки в город и ниже городской черты) (табл. 2, 3).

Обилие фитопланктона в 2010 г. сказалось на повышенном значении биохимического потребления кислорода (БПК₅) ниже города, оно увеличивалось в 3 раза по сравнению с 2009 г.

Биомасса фитопланктона и характеристики флуоресценции

Основным параметром экологического мониторинга, позволяющим оценить структуру и полноту экосистемы реки, является оценка биомассы фито-, зоо- и бактериопланктона. Система экомониторинга МГУП «Мосводоканал» включает в себя

ежемесячные измерения биомассы планктонных сообществ и оценку хлорофилла «а». Последний показатель коррелирует с биомассой фитопланктона и является более быстрым и менее трудозатратным способом оценить состояние фотоавтотрофных организмов планктона.

Исследования показали достаточно хорошую корреляцию между F_o с концентрацией хлорофилла «а», определенной в ацетоновых экстрактах (данные не приведены в табл. 3). Коэффициент корреляции для всех пунктов составлял 0,88. Коэффициент корреляции между F_o и содержанием биомассы фитопланктона – 0,61.

Активность реакционных центров ФС 2, оцениваемая по параметру флуоресценции F_v/F_m , имела более тесную связь с биомассой (0,8).

Окончание летнего цветения, как правило, всегда характеризуется резким уменьшением F_v/F_m [8]. В течение осеннего периода с конца сентября до конца декабря (до момента замерзания реки) активность водорослей обычно составляет в реке около 0,3. Снижение F_v/F_m в этот период относительно летних величин согласуется с развивающимся процессом осенней депрессии фитопланктона и связано, вероятно, с интенсивным охлаждением поверхностных вод и последующей сменой осеннего комплекса фитопланктона на зимний. Выявлено, что аномальные условия 2010 г. привели к повышению активности реакционных центров ФС 2 в р. Москва.

Заключение

Иntenсивность фотосинтеза планктонных водорослей в естественных условиях и в условиях культивирования может служить универсальным показателем качества водной среды благодаря высокой чувствительности фотосинтеза к загрязняющим веществам разного генезиса. Возможность применения флуоресцентных методов, дающих быструю и эффективную информацию о функционировании первичных реакций фотосинтеза, при оценке состояния фитопланктонных сообществ показана во многих работах.

Данные, полученные в настоящей работе, продемонстрировали, что флуоресцентный метод оценки фотосинтеза применим как для проведения экомониторинга, так и для оценки технологических процессов при выращивании биомассы микроводорослей. Метод позволяет значительно снизить трудозатраты при проведении мониторинга и осуществлять технологический контроль в режиме непрерывного наблюдения.

Литература

1. Benemann, J. R. 2003 Biofixation of CO₂ and greenhouse gas abatement with microalgae - technology roadmap. Report No. 7010000926 prepared for the U.S. Department of Energy National energy technology laboratory.
2. Щеголькова Н.М. Фотобиореактор для очистки сточной воды от биогенных элемен-



тов и обеззараживания / Н.М. Щеголькова, О.В. Мойжес, П.С. Шашкина // Вода: химия и экология. 2010. № 2. С. 9-16.

3. Chen P. Nutrient removal by the integrated use of high rate algal ponds and macrophyte systems in China / Chen P., Zhou Q., Paing, J., Le H., Picot B. // Water Science and Technology. 2003. V. 48. N 2. P. 251–257.

4. Eisenberg D.M. Algal bioflocculation and energy conservation in microalgae sewage ponds / Eisenberg D.M., Koopman B.L., Benemann J.R., Oswald W.J. // Bioengineering and Biotechnology. 1981. V. N 11. P. 429–448.

5. Weissman J.C. Photobioreactor design: comparison of open ponds and tubular reactors. Weissman J.C., Goebel R.P., Benemann J.R. // Bioengineering and Biotechnology. 1988. N 31. P. 336–344.

6. ГОСТ 17.1.4.02-90. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла «a». М.: Изд-во стандартов, Утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по охране природы от 03.07.90 № 28.

7. Falkowski P.G, Raven J. Aquatic Photosynthesis, Blackwell, Oxford. 1997. 375 p.

8. Matorin D.N. Assessment of the state of plants and algae based on chlorophyll fluorescence // Matorin D.N., Osipov V.A., Yakovleva O.V., Pogosyan S.I. // Guidance manual. Moscow: MSU. Max Press. 2010. 117 p.

9. Маторин Д.Н., Венедиктов П.С. Люминесценция хлорофилла в культурах микроводорослей и природных популяциях фитопланктона // Итоги науки и техн. ВИНТИ. Сер. Биофизика. 1990. Т. 40. С. 49-100.

10. Matorin D.N. Fluorescence Methods of the Photosystem II Activity Biomonitoring in



Phytoplankton // Biophysics, 2000. V. 45. No 3. P. 479–482.

11. Рубин А.Б. Биофизика фотосинтеза и методы экологического мониторинга // Технология живых систем. 2005. Т. 2. С. 47-68.

12. Matorin D.N. Chlorophyll fluorometry as a method for studying light absorption by photosynthetic pigments in marine algae / Matorin D.N., Antal T.K., Ostrowska M., Rubin A.B., Ficek D., Majchrowski R // Oceanologia. 2004. V. 46. № 4. P. 519-531.

13. Хромов В.М. Структурно-функциональные характеристики фитопланктона – показатели качества воды р. Москва / В.М. Хромов, Т.В. Витвицкая, Ю.И. Харченков, М.М. Телитченков // Водн.ресурсы. 1991. № 2. С. 45-52.

14. Пат. 2354958 РФ / Погосян С.И., Казимирко Ю.В., Маторин Д.Н., Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Способ флуорометрического определения параметров фотосинтеза фототрофных организмов, устройство для его осуществления и измерительная камера. Заявлено 13.09.2006 Опубликовано 10.05.2009. Бюл. №13. Приоритет 13.09.2006.

15. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. Абакумова В.А. СПб: Гидрометеиздат. 1992. 318 с.

16. Козлов М.Н. Оценка качества очищенной воды Московских очистных сооружений методами биотестирования / М.Н. Козлов, Д.А. Данилович, Н.М. Щеголькова, О.Ф. Филенко, В.Я. Пушкарь / Водоснабжение и санитарная техника. 2006. № 11, ч. 1. С. 31-39.

N.M. Schegolkova, P.S. Shashkina, D.N. Matorin, V.A. Osipov, A.B. Rubin

FLUORESCENT TECHNIQUES FOR BIOTECHNOLOGICAL PROCESS MONITORING AND ASSESSMENT OF MOSCOW RIVER WATER QUALITY

The process of algae biomass obtaining using water treated on «Mosvodokanal», as well as seasonal changes in chlorophyll concentration and chlorophyll fluorescence

parameters of natural phytoplankton of river Moscow have been studied. In photobioreactor the connections between chlorophyll-a, algal biomass and indicator of fluorescence

F_0 as well as biomass growth and the value of F_v/F_m have been analysed.

Key words: monitoring, chlorophyll, fluorescence, photobioreactor