

УДК 628.356.63

О. В. Трифонов, Т. А. Макаревич

**ПЕРИФИТОН И ЕГО РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ
КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПРОШЕДШЕЙ БИОЛОГИЧЕСКУЮ
ОЧИСТКУ В АЭРОТЕНКАХ**

Приведены результаты изучения перифитона, формирующегося во вторичных отстойниках городских очистных сооружений (г. Минск, Беларусь). Показано, что по структурной организации перифитон очистных сооружений принципиально сходен с перифитоном природных вод, в то же время для него характерно превышение деструкции органического вещества над продукцией и высокое содержание тяжелых металлов и биогенных элементов (азота и фосфора). Использование перифитона для доочистки сточных вод, прошедших биологическую очистку в аэротенках, может значительно снизить содержание в них загрязняющих веществ, прежде всего тяжелых металлов и биогенных элементов (азота и фосфора).

Ключевые слова: перифитон, сточные воды, биологическая очистка, водоросли, протисты.

Современные станции биологической очистки городских сточных вод представляют собой комплексы сооружений, состоящие из ряда конструктивных элементов: решеток, песколовок, преаэраторов, аэротенков, первичных и вторичных отстойников, распределительных камер, водосборных и водоотводных каналов и др. На всех этапах очистки вода постоянно контактирует с твердыми субстратами, где, как и в природных водах, на границе раздела твердой и жидкой фаз развивается перифитон, играющий определенную роль в очистке воды.

Целью настоящей работы явилось изучение перифитона, развивающегося на стенках вторичных отстойников станции биологической очистки сточных вод, и оценка его роли в формировании качества воды, прошедшей одноступенчатую биологическую очистку в аэротенках.

Материал и методика исследований. Исследования выполнены на Минской очистной станции (УП «Минскводоканал», г. Минск, Беларусь) с 2006 по 2008 г. Пробы перифитона с поверхности железобетонных стенок вторичных отстойников отбирали с помощью пробоотборника собственной конструкции, с площадью отбора 100 см².

© Трифонов О. В., Макаревич Т. А., 2011

Видовой состав беспозвоночных перифитона определяли методом прижизненного микроскопирования. Водорослевую компоненту изучали в живом и фиксированном состоянии (фиксатор Утермея). Суммарную массу перифитона (автотрофных и гетеротрофных организмов, а также детрита) определяли после высушивания до постоянной массы при температуре 65—70°C путем взвешивания на аналитических весах.

Содержание тяжелых металлов анализировали методом рентгено-флуоресцентного анализа [10]. Содержание хлорофилла с учетом феопигментов определяли стандартным спектрофотометрическим методом ацетоновых экстрактов. По содержанию хлорофилла *a* (ХлФ_{*a*}) оценивали долю автотрофной компоненты в общей массе перифитона, приняв на основании собственных исследований и данных, имеющихся в литературе, что ХлФ_{*a*} в перифитоне, так же как и в планктоне, составляет 1,5% сухого вещества водорослей и цианобактерий [11].

Содержание общего азота в перифитоне определяли по методу Кьельдаля, содержание общего фосфора — стандартным фотометрическим методом с молибдатом аммония и аскорбиновой кислотой [9]. Коэффициент накопления рассчитывали как отношение концентрации элемента в сухой массе перифитона (мг/кг) к его концентрации в воде (мг/л).

Величину валовой первичной продукции перифитона оценивали исходя из содержания в перифитоне ХлФ_{*a*} и средних величин ассимиляционных чисел (АЧ), характерных для водорослей континентальных вод в умеренных широтах [1]. Учитывая специфические условия функционирования перифитона в системе очистных сооружений, приняли, что величина АЧ в среднем равна 1 мг С/мг ХлФ_{*a*}·ч.

Деструкцию перифитона определяли методом изолированных объемов. Мерой деструкции служило количество кислорода, потребленного всей совокупностью организмов перифитона, эквивалентное количеству минерализованного органического вещества. В наших расчетах было принято, что 1 мг потребленного кислорода эквивалентен 0,3 мг углерода.

Соотношение между органической и минеральной фракцией в перифитоне определяли прямым методом по потерям при прокаливании при температуре 450°C. Содержание кислорода устанавливали электрохимическим методом с помощью оксиметра «Нанна НН 9143».

Результаты исследований и их обсуждение

Методологической основой выполненных исследований является представление о перифитоне как о метаболическом единстве водорослей, бактерий, грибов, беспозвоночных и мертвого органического вещества (детрита). Детрит непосредственно участвует в процессах переноса вещества и энергии, лежащих в основе очистительных способностей перифитона. Основная доля детрита является продуктом жизнедеятельности перифитонного сообщества, хотя определенное количество его, как и живых организмов, поступает из омывающей субстрат воды и включается в перифитонный комплекс.

Наблюдения за развитием перифитона на бетонных стенках вторичных отстойников очистной станции показали, что они обильно обрастают в течение всего годового цикла. Среднегодовая величина общей массы перифитона (2007—2008 гг., $M \pm m$, $n = 38$) составила $175,4 \pm 44,0$ г сух. в-ва/м², что значительно выше, чем в естественных водоемах. Так, например, количество перифитона на макрофитах в разнотипных озерах Беларуси составляет от 0,6 до 50,0 г сух. в-ва/м² поверхности [3]. Существенных различий в уровне накопления массы в разные сезоны года не выявлено (рис. 1). Так, средняя масса перифитона за период с июля по октябрь 2007 г. и с апреля по июнь 2008 г. составила $177,2 \pm 49,9$ г сух. в-ва/м² ($n = 23$), а за период с ноября 2007 г. по март 2008 г. — $172,7 \pm 34,3$ г ($n = 15$). Объяснить это можно достаточно стабильными физико-химическими показателями среды — в зимнее время года средняя температура воды во вторичных отстойниках составляет +19°C (не опускается ниже +18°C), а в летнее — +23°C (максимально +25°C). Содержание растворенного кислорода в течение года изменяется в пределах 0,8—1,3 мг/л.

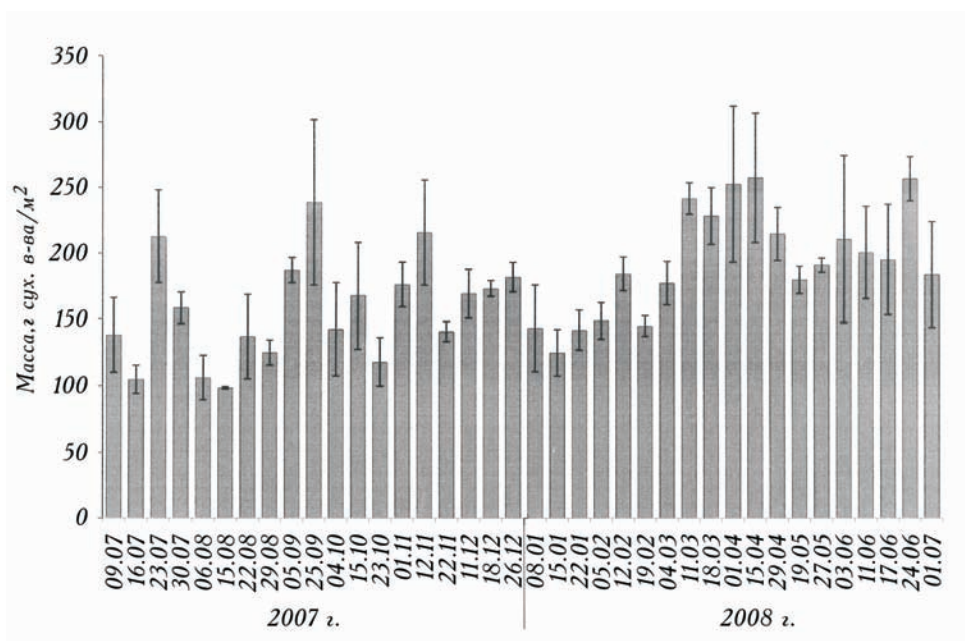
В течение года соотношение между органической и минеральной фракцией в сухом веществе перифитона было постоянным. Среднегодовая величина зольности составила $45,50 \pm 2,5$ ($n = 12$).

Как и в природных экосистемах, основными группами организмов-обработелей стенок очистных сооружений являются водоросли и бактерии. Доля водорослей и цианобактерий в общей массе перифитона в среднем составила $8,2 \pm 4,0\%$ ($n = 37$), что сопоставимо с величинами, известными для перифитона естественных водоемов [4]. В весенне-летний период (с июля по октябрь 2007 г. и с апреля по июнь 2008 г.) масса водорослей и цианобактерий составляла в среднем $10,3 \pm 3,5\%$ ($n = 22$) общей массы перифитона, в осенне-зимний период (с ноября 2007 г. по март 2008 г.) их доля была примерно вдвое ниже — $4,7 \pm 1,7\%$ ($n = 15$) (рис. 2).

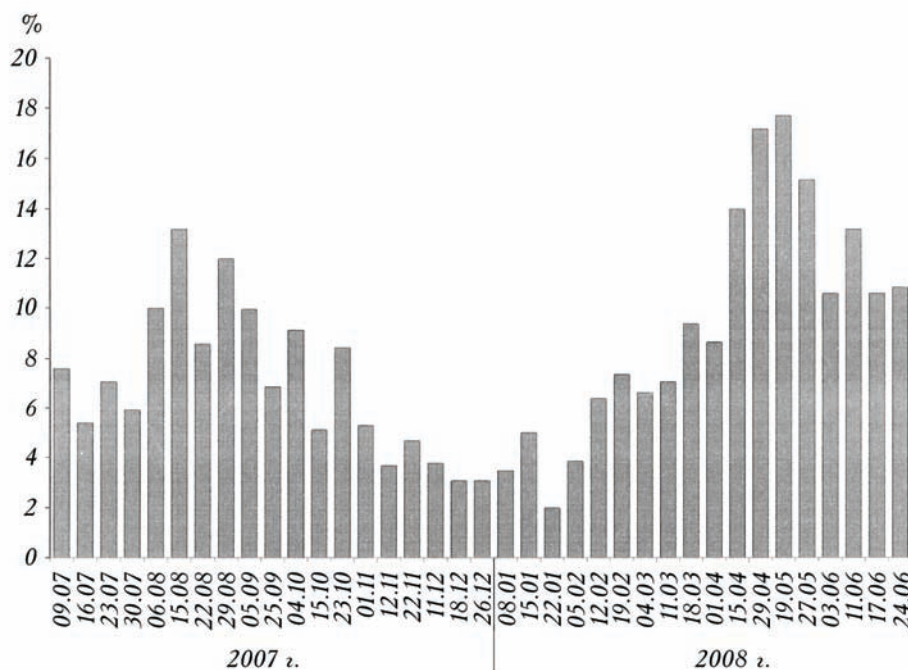
Всего в перифитоне вторичных отстойников обнаружено 62 вида водорослей из 6 отделов: Chlorophyta — 27 видов, Bacillariophyta — 20, Cyanophyta (цианобактерии) — 11, Chrysophyta — 2, Cryptophyta и Euglenophyta — по 1 виду.

Наиболее разнообразны зеленые водоросли (Chlorophyta), представленные 3 классами, 5 порядками, 13 семействами. На первом месте по количеству видов находятся хлорококковые водоросли (13 видов), на втором — улотриксковые (11 видов). Также разнообразны диатомовые, из которых преобладали представители родов *Cymbella*, *Nitzschia* и *Gomphonema*.

Большинство выявленных в перифитоне водорослей широко распространены в природных водах Беларуси. Исключение составляют несколько видов: золотистая водоросль *Bicosoeca petiolata* Stein на территории Беларуси не отмечена, улотриксковая *Schizomeris leibleinii* Kütz. — найдена единично [6], диатомея *Pinnularia lundii* Hustedt известна только из наших исследований метафитона р. Свислочь. Доминирующий комплекс видов на протяжении года оставался достаточно постоянным. Диатомовые были абсолютными доминантами по численности (56—99% общей). Преобладали *P. lundii*,



1. Динамика общей массы перифитона на внутренних стенках вторичных отстойников, г сух. в-ва/м² ($M \pm m$).



2. Суммарная доля водорослей и цианобактерий в общей массе перифитона.

виды родов *Nitzschia* и *Fragilaria*. Эти же виды входят и в доминирующий комплекс по биомассе. В формировании биомассы также существен вклад зеленых водорослей класса улотриковых (виды родов *Stigeoclonium* и *Ulothrix*) и цианобактерий родов *Oscillatoria* и *Plectonema*.

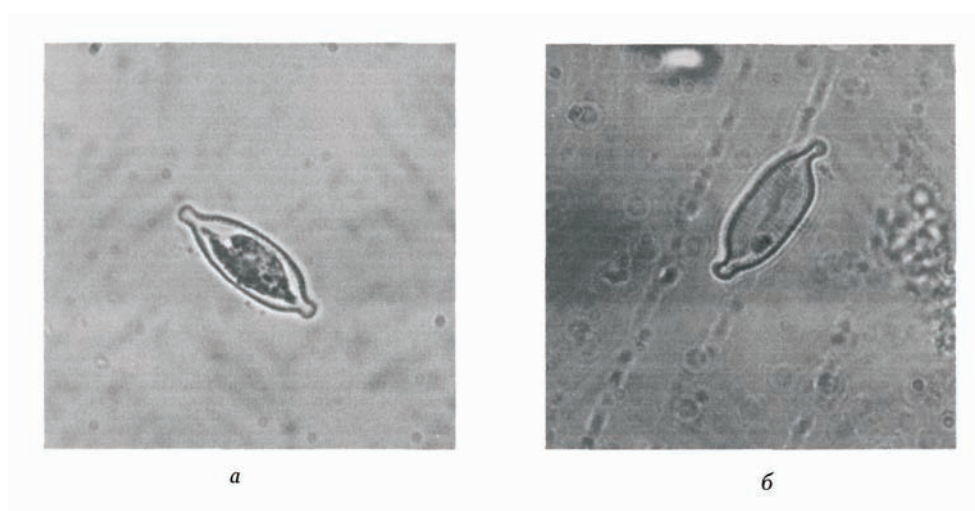
Массовым видом в перифитоне была также диатомея *Symbella amphicephala* Näg. В конце лета 2006 г. отмечены уродливые (тератологические) формы клеток этого вида (рис. 3). Интересна динамика обилия тератологических клеток: 14.08 отмечены единичные уродливые экземпляры, 28.08 практически все клетки имели уродливую форму, 3.09 клетки уродливой формы не выявлены. В качестве причин, приводящих к образованию тератологических форм, называют неблагоприятные экологические условия: повышенные температуру, соленость, содержание органических веществ, низкую скорость течения и концентрацию кислорода, высокое содержание тяжелых металлов [8]. В условиях очистных сооружений причиной появления уродливых форм диатомей может быть высокое содержание как органического вещества, так и тяжелых металлов в воде. Однако этим нельзя объяснить наблюдавшуюся динамику обилия тератологических форм, поскольку содержание органического вещества и тяжелых металлов в воде, поступающей во вторичные отстойники, достаточно постоянно.

Отличительной особенностью перифитона очистных сооружений является наличие хлопьев активного ила аэротенков. Поскольку активный ил (частицы детрита с ассоциированными с ними микроорганизмами) состоит преимущественно из живых бактерий, то увеличение его количества происходит не столько за счет пассивного оседания хлопьев, сколько за счет естественного прироста адсорбированного ила в самом обрастании.

В перифитоне постоянно присутствовали простейшие и многоклеточные беспозвоночные. Из них 28 видов принадлежат к подцарству Protozoa и 10 — к Metazoa. Среди простейших преобладали голые и раковинные амёбы (*Amoeba proteus* Leidy, *Arcella vulgaris* Ehrenberg), жгутиконосцы (*Peranema fusiforme* Stein, виды рода *Bodo*), инфузории-бактериофаги (*Aspidisca costata* Dujardin, *Chilodonella uncinata* Ehrenberg, *Trachelophyllum pusillum* Claparede), изредка встречались хищные инфузории семейства Amphileptidae. Среди многоклеточных беспозвоночных преобладали коловратки-микрофаги (*Rotaria rotatoria* Pallas, *Cephalodella gibba* Ehrenberg) и брюхохоресничный червь *Chaetonotus* sp. Иногда встречались круглые и малощетинковые черви. По сравнению с водорослями биомасса данных групп гидробионтов незначительна. Большинство видов беспозвоночных перифитона — постоянные члены сообщества активного ила.

Перифитон, развивающийся в очистных сооружениях, характеризуется высокими величинами продукции и деструкции. Так, интенсивность валовой первичной продукции в среднем за период наблюдений составила $0,014 \pm 0,005$, а деструкции — $0,053 \pm 0,014$ мг сух. в-ва/сут.

Таким образом, значения деструкции почти вчетверо превышают значения продукции, что свидетельствует о преобладании процессов окисления органических веществ. Значительные величины валовой первичной продук-



3. *Symbella amphicephala*: а — нормальная форма, б — тератологическая форма.

ции указывают на то, что, помимо окисления органических веществ, в перифитоне происходят процессы фотосинтеза, и следовательно, из воды изымаются соединения азота и фосфора.

Используя полученные в экспериментах значения продукции, деструкции и массы перифитона, можно оценить его роль в доочистке воды от остаточного загрязнения. Поскольку, как уже было отмечено, 1 м² субстрата удерживает в среднем 175,4 г сухого вещества перифитона, то за сутки на этой площади минерализуется около 10 г и ассимилируется в процессе фотосинтеза 2,5 г углерода.

Перифитон очистных сооружений характеризуется высоким уровнем аккумуляции тяжелых металлов и биогенных элементов (азота и фосфора), среднегодовое содержание некоторых химических элементов представлено в таблице.

Коэффициент накопления перифитоном цинка составляет 46 609, меди — 13 080, хрома — 28 380, никеля — 3834, железа — 34 630. Все эти показатели в несколько раз превышают аналогичные для природных вод. Так, по нашим данным 2004 года, в р. Неман коэффициент накопления метафитоном (отделившийся от субстрата перифитон) цинка составил — 2102, меди — 1238 и никеля — 1481.

Высокие значения коэффициента накопления химических элементов дают все основания считать перифитон важнейшим компонентом в системе очистки сточных вод. Как показывает практика, биологическая очистка, включающая в себя отстаивание и обработку в аэротенках, не может обеспечить полное удаление из воды соединений тяжелых металлов [2]. Кроме того, способность металлов в высокой концентрации подавлять биохимическую активность или влечет за собой и ухудшение качества очистки воды в целом. Поэтому, в случае залповых сбросов тяжелых металлов, и соответст-

Среднегодовое содержание (2007—2008 гг.) химических элементов в сухой массе перифитона

Химические элементы	Содержание, мг/кг сух. в-ва ($M \pm m, n = 24$)
Калий (K)	8886,7 ± 1826,3
Кальций (Ca)	28608,0 ± 7344,0
Титан (Ti)	1130,9 ± 576,9
Ванадий (V)	108,2 ± 93,1
Хром (Cr)	851,4 ± 360,3
Марганец (Mn)	227,8 ± 62,2
Железо (Fe)	10389,5 ± 2862,5
Кобальт (Co)	33,8 ± 9,4
Никель (Ni)	88,2 ± 40,0
Медь (Cu)	274,7 ± 105,3
Цинк (Zn)	2983,0 ± 1000,8
Мышьяк (As)	29,2 ± 9,7
Бром (Br)	68,9 ± 26,7
Рубидий (Rb)	29,9 ± 8,0
Стронций (Sr)	133,1 ± 44,2
Цирконий (Zr)	1651,8 ± 403,0
Молибден (Mo)	0,8 ± 0,6
Свинец (Pb)	684,3 ± 223,2
Висмут (Bi)	9,7 ± 30,5

венно снижения биохимической активности активного ила, часть нагрузки может взять на себя перифитон как элемент третьей ступени очистки воды, обеспечив тем самым высокие показатели качества воды на выходе из очистных сооружений. Накопление тяжелых металлов перифитоном происходит за счет тех же процессов, что и в активном иле — биоаккумуляции (живые организмы) и сорбции (органическое вещество детрита и живые организмы). Однако, учитывая повышенную метаболическую активность перифитона вследствие его существования на границе раздела фаз, а также большего количества организмов-седиментаторов и наличия водорослей, можно предположить, что процессы сорбции и аккумуляции в нем будут идти интенсивнее, чем в активном иле. Поскольку для перифитона характерно чередование нарастания и сбрасывания биомассы (с ее последующим удалением и утилизацией), то его сорбционная емкость всегда будет довольно высокой.

Измерение концентрации биогенных элементов показало, что в среднем в перифитоне содержится 0,48% фосфора (или 4,8 мг/г сух. в-ва) и 4,35% азо-

та (43,5 мг/г), что сопоставимо с величинами, характерными для перифитона естественных водоемов [5]. Достаточно высокая концентрация азота и фосфора в перифитоне указывает на его важную роль в очистке воды от биогенных элементов.

Несмотря на то, что перифитон, развивающийся в очистных сооружениях, активно изымает из воды загрязняющие вещества, его вклад в очистку сточных вод незначителен, поскольку площадь поверхности, занимаемая перифитоном в классических очистных сооружениях, невелика. Для повышения его роли необходимо создавать дополнительные поверхности для обрастания. В качестве их могут служить различные конструкции из полимерных материалов: гофрированные и перфорированные пластины, сетки, «ерши» и др. Погружать носители перифитона можно в любые сооружения, где происходит очистка воды (отстойники, аэротенки), и даже в водоотводные каналы. На наш взгляд, наилучшим местом установки носителей обрастания являются вторичные отстойники, куда поступает уже очищенная прозрачная вода, что создает условия для активного развития водорослей — основных поглотителей биогенных элементов. Избыточная биомасса перифитона легко оседает и вместе с осадком активного ила постоянно удаляется из отстойника. В качестве носителя перифитона мы рекомендуем синтетические водоросли («ерши») из полипропиленовых нитей. Благодаря разветвленной поверхности они быстро обрастают и удерживают высокую массу — по нашим данным, на одном погонном метре «ерша» диаметром 5,5 см удерживается 60 г сухого вещества перифитона.

Заключение

Таким образом, полученные данные позволяют заключить, что перифитон, развивающийся в световой зоне вторичных отстойников, является мощным агентом трансформации и аккумуляции практически всех видов загрязняющих веществ, содержащихся в воде, прошедшей биологическую очистку в аэротенках.

Для повышения роли перифитона в очистке воды необходимо создавать дополнительные поверхности для обрастания. Согласно литературным данным [7], использование перифитона в уже существующих сооружениях позволит повысить степень очистки на 30—40%. Данный метод высокоэффективен и экологически выгоден, при минимальных вложениях он позволит в ряде случаев обойтись без дорогостоящих сооружений по доочистке сточных вод как крупных городов, так и мелких населенных пунктов.

**

Наведено результати дослідження перифітону, що формується на твердих субстратах у вторинних відстійниках станції очистки міських стічних вод (м. Мінськ, Білорусь). Зроблено висновок, що застосування перифітону для доочистки стічних вод може значно знизити у воді вміст багатьох речовин-забрудників, насамперед важких металів і біогенних елементів (азоту та фосфору).

**

The paper gives the analysis of the periphyton composition of the waste water treatment plant (Minsk City, Belarus). Due to high growth rate, periphyton of the settling tanks of the Minsk WWTP is considered as perspective element in system of sewage water after-purification. Periphyton use can considerably lower concentration of many pollutants, first of all, heavy metals, nitrogen and phosphorus.

**

1. Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. — Л.: Гидрометеоиздат, 1989. — 152 с.
2. Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. — М.: Акварос, 2003. — 512 с.
3. Макаревич Т.А. Перифитон и его роль в продукции органического вещества и миграции радионуклидов в озерных экосистемах: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Минск, 1995. — 20 с.
4. Макаревич Т.А., Деренговская Р.А., Никитина Л.В. Компонентный состав эпифитона в водоемах и водотоках Беларуси // Стратегия развития аквакультуры в условиях XXI века: Материалы междунар. науч.-практ. конф., Минск, 23—27 авг. 2004 г. — Минск: ОДО «Тонпик», 2004. — С. 216—219.
5. Макаревич Т.А., Жукова Т.В., Остапеня А.П. Химический состав и энергетическая ценность перифитона в мезотрофном озере // Гидробиол. журн. — 1992. — Т. 28, № 1. — С. 30—34.
6. Михеева Т.А. Альгофлора Беларуси. Таксономический каталог. — Минск: Изд-во Белорус. ун-та, 1999. — 396 с.
7. Панасенкова Л.П., Панасенков Ю.В. Использование метода прикрепленной микрофлоры в очистке сточных вод крупного предприятия ЦБП // Проблемы экологии: Материалы конф., Иркутск, 25—28 окт. 1999 г. — Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1999. — Ч. 2. — С. 61—66.
8. Смирнова С.В., Уланова А.А., Балашова Н.Б. Варианты аномальных изменений в строении панциря диатомовых водорослей // Диатомовые водоросли как биоиндикаторы современного состояния окружающей среды и их роль в палеоэкологии и биостратиграфии: Материалы XI Междунар. науч. конф. диатомологов стран СНГ. — Минск: Экономика и право, 2009. — С. 17—18.
9. Унифицированные методы исследования качества вод. Методы химического анализа вод. — М.: Изд. отдела Управления делами Секретариата СЭВ, 1977. — Ч. 1. — 831 с.
10. Beckhoff B., Kanngießer B., Langhoff N. et al. Handbook of practical X-ray fluorescence analysis. — Springer, 2006. — 863 p.
11. Lorenzen C.J. Determination of chlorophyll and phaeopigments: spectrophotometric equations // Limnol. Oceanogr. — 1967. — Vol. 12, N 2. — P. 343—346.