

# ОСОБО ОХРАНЯЕМЫЕ ПРИРОДНЫЕ ТЕРРИТОРИИ

УДК 574.522

## СОСТОЯНИЕ ГЕТЕРОТРОФНОГО БАКТЕРИОПЛАНКТОНА ПРИБРЕЖЬЯ ОЗЕР СВЯТОЕ И БЕЛОЕ ПРИРОДНО- ИСТОРИЧЕСКОГО ПАРКА «КОСИНСКИЙ» (ГОРОД МОСКВА) В 2011 ГОДУ

© 2014 А.Ю. Акулова<sup>1</sup>, В.В. Ильинский<sup>1</sup>, И.В. Мошарова<sup>1</sup>, М.И. Москвина<sup>1</sup>,  
С.А. Мошаров<sup>2</sup>, Т.А. Комарова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию 25.05.2014

С декабря 2010 г. по декабрь 2011 г. исследовали общую численность бактерий, численность бактерий с активной электронно-транспортной цепью, количество сапротрофных бактерий, а также концентрации хлорофилла *a* и некоторые другие гидрохимические параметры в пробах воды из поверхностного слоя озер Святое и Белое, расположенных в районе Косино-Ухтомский г. Москвы. Обнаружено, что в этих озерах присутствует многочисленный активно функционирующий гетеротрофный бактериопланктон, а его количество значительно возросло по сравнению с наблюдавшимся в 30-х годах прошлого века сотрудниками Косинской лимнологической станции. Сезонная динамика развития бактериопланктона Косинских озер с тех пор существенно изменилась. Максимум численности ЦТХ+ бактерий в оз. Святом приходился на конец августа, а в оз. Белом – на конец декабря. Наибольшая величина доли клеток ЦТХ+ бактерий от общей численности бактериопланктона в обоих озерах наблюдалась в конце августа. Максимальная доля клеток с поврежденной мембраной («мертвых») от общего количества жизнеспособных клеток на Святом и Белом озерах наблюдалось летом, в конце июля, при наиболее высокой температуре воды в озерах.

Ключевые слова: *Косинское Трехозерье, гетеротрофный бактериопланктон, численность, сапротрофные бактерии, хлорофилл «a»*

Лимнологический комплекс «Косинские озера» расположен в районе Косино-Ухтомское Восточного административного округа г. Москвы. Косинские озера издавна привлекали внимание ученых, поскольку на небольшом расстоянии друг от друга находятся озера различной трофности, с разным гидрохимическим режимом и с разной историей развития. В 1908 г. на берегу Белого озера была организована стационарная Косинская биологическая станция, на которой успешно проводились гидробиологические исследования и студенческие практики, однако в 1941 г. она была

В дальнейшем систематических гидробиологических и, в частности, микробиологических исследований на этих озерах не проводилось. Они были вновь возобновлены в 2009 г. сотрудниками кафедры гидробиологии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова [4].

Сравнительная близость от промышленных районов г. Москвы и сочетание на небольшом пространстве разнотипных водоемов предоставляют широкие возможности для изучения влияния антропогенного воздействия на состояние озерных биоценозов. Известно, что гетеротрофный бактериопланктон (БП) – важный их компонент, а его основная функция – ассимиляция и трансформация органических соединений, в том числе и загрязняющих веществ антропогенного происхождения. При этом основная нагрузка по их утилизации ложится на те бактериальные клетки, которые обладают активным метаболизмом, в частности, дыхательной активностью, обычно выявляемой по их способности к восстановлению соединений тетразолия. Доля таких клеток в составе озерного БП может варьировать в широких пределах – от 9 до 47% [20]. Вместе с тем известно, что 50-70% клеток БП имеет неповрежденную клеточную мембрану, т.е. может считаться жизнеспособной [21, 31, 34]. Вопрос о том, почему

Акулова Анастасия Юрьевна, инженер-лаборант кафедры гидробиологии. E-mail: anastasiabio@mail.ru.

Ильинский Владимир Викторович, доктор биологических наук, профессор кафедры гидробиологии. E-mail: vladilinskiy@gmail.com.

Мошарова Ирина Викторовна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры гидробиологии. E-mail: ivmpost@mail.ru.

Москвина Мария Игоревна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры гидробиологии. E-mail: masha\_moskvina@mail.ru.

Мошаров Сергей Александрович, доцент. E-mail: sampost@list.ru

Комарова Татьяна Игоревна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник кафедры гидробиологии. E-mail: komar75@mail.ru

относительное количество жизнеспособных клеток БП значительно превышает относительное количество клеток, проявляющих дыхательную активность, остается до сих пор открытым.

**Цель исследования:** оценка состояния гетеротрофного БП и его сезонной изменчивости в поверхностном слое (0,5 м) прибрежья оз. Святое и Белое в 2010-2011 гг., в частности, оценка его жизнеспособности наряду с выявлением и учетом численности активно функционирующей фракции БП. В результате впервые дана комплексная оценка современного состояния гетеротрофного БП оз. Святое и Белое, основанная на результатах, полученных с использованием современных методов микробиологического анализа.

**Материалы и методы.** Станции отбора проб на всех озерах располагались на расстоянии 5-10 м от береговой линии. Пробы отбирали с глубины около 0,5 м либо ежемесячно, либо раз в два месяца. Для этого использовали батометр-бутылку со стерильной склянкой объемом 250 мл. В лабораторию пробы доставляли в переносной сумке-холодильнике не позднее 2-х часов после их отбора и сразу же проводили их анализ. Для определения общей численности бактерий (ОЧБ) использовали метод эпифлуоресцентной микроскопии с окрашенной клеткой водным раствором флуорохрома акридинового оранжевого [3].

Для учета численности бактерий с активной электронно-транспортной цепью применяли соль тетразолия – 5-циано-2,3-дитолил тетразолиум хлорид (ЦТХ). Рабочий раствор ЦТХ готовили согласно [26]. Пробы воды инкубировали в присутствии ЦТХ в концентрации 5 мМ в течение 4-х часов в условиях *in situ*. Долю ЦТХ+ бактерий рассчитывали в процентах от ОЧБ. Учет количества жизнеспособных клеток БП был основан на анализе целостности их мембран. Для определения численности клеток с поврежденными и неповрежденными (интактными) мембранами применяли набор флуоресцентных красителей LIVE/DEAD BacLight Bacterial Viability Kit, L13152 [21]. Эти наблюдения выполняли с апреля по декабрь 2011 г. Долю клеток бактерий с поврежденной мембраной («мертвых») рассчитывали в процентах от суммарной численности бактерий с поврежденными и неповрежденными мембранами. Численность сапротрофных бактерий (СБ) определяли с помощью метода предельных разведений. Для этого использовали жидкую модифицированную среду Зобелла 2216Е [16] без NaCl. Определение концентрации хлорофилла *a* проводилось флуориметрическим методом [22] с помощью флуориметра МЕГА-25 (Россия). Пробы воды (300 мл) в течение 3-4 часов после отбора были профильтрованы через стекловолокнистые фильтры GF/F фирмы Whatman. Фильтры помещали в 90% ацетон, хлорофилл *a* экстрагировали при температуре +4°C в темноте в течение 18-24 часов с последующей флуориметрией экстракта.

Основные гидрохимические параметры определяли трижды: в подледный период 21.02.2011 г., после окончания весенней вспышки развития фитопланктона 26.05.2011 г. и к моменту наступления гидрологической зимы – 03.11.2011 г. Определения были выполнены специалистами Аналитического центра контроля качества воды ЗАО «РОСА».

#### **Результаты и обсуждение.**

Озеро Святое располагается на восточной окраине района Косино-Ухтомский г. Москвы. Оно имеет площадь 0,08 км<sup>2</sup>, среднюю глубину 3 м и максимальную глубину 5,1 м. Форма озера – округлая, со всех сторон оно окружено сфагновым болотом [2]. По химическим свойствам вода оз. Святого отличается от вод других Косинских озер: она содержит много гуминовых соединений. В период с первой декады декабря 2010 г. по первую декаду апреля 2011 г. озеро было покрыто льдом. Толщина ледяного покрова варьировала от 3 см в ноябре 2011 г. до 60 см в начале апреля 2011 г. Температура в поверхностном слое воды (0,5 м) в озере в этот период варьировала в пределах +0,1-+0,5°C. В безледный период температура воды в оз. Святом изменялась от +5 °С в ноябре до +28°C в июле 2011 г (табл. 1). Концентрация водородных ионов в поверхностном слое воды озера была близка к нейтральной, значения рН в среднем составляли 7,28. В конце мая после окончания первой апрельской вспышки массового развития фитопланктона, о чем можно судить по концентрациям хлорофилла *a* (табл. 1), вода в поверхностном слое оз. Святое слегка подщелачивалась – до рН 7,7 (табл. 2). Содержание кислорода в поверхностных водах озера варьировало от минимальных значений 8,4 мг/л в конце мая до 11,4 мг/л – в ноябре.

Присутствие ионов аммония в водоеме связано главным образом с процессами биохимической деградации белковых веществ. Наибольшая концентрация ионов аммония была отмечена в подледный период в феврале, она составила 0,45 мг/л (табл. 2). В мае содержание ионов аммония значительно снизилось, а к ноябрю вновь возросло до 0,076 мг/л. Нитриты как промежуточная форма окисления соединений азота, присутствовали в оз. Святом в очень малых количествах – от < 0,003 мг/л до 0,027 мг/л (табл. 2). Наибольшее их содержание обнаружено в подледный период в феврале, что, видимо, объясняется большей интенсивностью в это время процессов нитрификации. Сразу после окончания массового весеннего развития фитопланктона в начале мая, а также в начале ноября содержание нитритов было минимальным - < 0,003 мг/л. Нитраты являются конечным продуктом окисления аммония, высокие концентрации нитратов, также как и нитритов, в поверхностных водах озера были обнаружены в феврале, а минимальные – < 0,1 мг/л – в мае и в ноябре (табл. 2). Таким образом, сезонная динамика нитритов и нитратов в оз. Святом была типичной и характеризовалась максимумом в зимний период и минимумом – в летне-осенний.

**Таблица 1.** Микробиологические показатели, содержание хлорофилла *a*, температура воды и состояние ледяного покрова в озере Святом в 2011 г.

Дата отбора проб	ОЧБ	Численность СБ	ОЧБ / СБ	Численность ЦТХ+ бактерий	Доля ЦТХ+ бактерий от ОЧБ	Доля клеток с поврежденной мембраной от суммы всех клеток	Хлорофилл <i>a</i>	Температура воды	Толщина льда
ед. изм.	млн. кл/мл	кл/мл	–	млн. кл/мл	%	%	мкг/л	°С	см
06.12.2010	3,36±0,00	2500	1344	0,07±0,00	1,93	н/д	4,21	0,1	30
14.01.2011	2,73±0,01	2500	1092	0,08±0,01	2,97	н/д	1,47	0,1	40
21.02.2011	1,86±0,00	2500	742	0,01±0,00	0,38	н/д	0,40	0,1	40
04.04.2011	2,84±0,00	25000	114	0,18±0,00	6,41	3,34	0,75	0,1	60
29.04.2011	1,15±0,00	9500	121	0,01±0,00	0,43	4,73	10,64	11	нет
26.05.2011	6,80±0,00	4500	1512	0,08±0,00	1,12	7,58	3,26	19,5	нет
28.06.2011	5,65±0,00	25000	226	н/д	н/д	13,36	9,60	27	нет
28.07.2011	2,35±0,00	95000	25	0,01±0,00	0,51	32,84	16,34	28	нет
25.08.2011	2,73±0,00	95000	29	0,89±0,00	32,48	2,08	17,10	21	нет
06.10.2011	4,01±0,01	25000	161	0,60±0,00	14,87	3,28	11,92	5	нет
01.11.2011	4,53±0,01	9500	477	0,59±0,00	13,12	3,3	11,49	6	нет
28.11.2011	6,20±0,01	2500	2478	0,14±0,00	2,32	18,42	15,33	0,5	3
28.12.2011	5,57±0,00	25000	223	0,08±0,00	1,49	7,89	44,12	0,5	5

Примечание: н/д – нет данных

**Таблица 2.** Гидрохимические показатели в поверхностном слое (0,5 м) водной толщи озер Святое и Белое в феврале, мае и ноябре 2011 г.

Дата отбора проб	pH	Азот органический, мг N/л	Аммоний-ион, мг NH <sub>4</sub> /л	БПК <sub>5</sub> , мг O <sub>2</sub> /л	Кислород растворенный, мг/л	Нитраты, мг NO <sub>3</sub> /л	Нитриты, мг NO <sub>2</sub> /л	Окисляемость перманганатная, мг O <sub>2</sub> /л	Фосфаты, мг PO <sub>4</sub> /л
озеро Святое									
21.02.2011	7,19	2,3	0,45	4	8,8	0,47	0,027	13,1	0,046
26.05.2011	7,7	0,65	<0,05	2	8,4	<0,1	<0,003	6,13	0,029
03.11.2011	6,96	1	0,076	3	11,4	<0,1	<0,003	3,1	0,032
озеро Белое									
21.02.2011	7,24	1,2	1,73	4,6	3,1	3,86	0,047	4,71	0,33
26.05.2011	9,11	1,1	<0,05	2,5	10,7	0,74	0,066	4,82	0,022
03.11.2011	7,58	1,7	0,52	2,4	8,8	0,22	0,038	3,7	0,14

Известно, что в водоемах, не подвергшихся эвтрофированию, развитие фитопланктона лимитируется фосфатами, однако в оз. Святом фосфаты постоянно присутствовали в поверхностных слоях водной толщи, тогда как концентрации нитратов весной и осенью были ниже предела чувствительности метода их определения (0,1 мг/л). Биохимическое потребление кислорода (БПК<sub>5</sub>) в поверхностных водах оз. Святого варьировало от 2 мг/л в мае до 4 мг/л в феврале, что позволяет охарактеризовать воды озера как загрязненные (табл. 2). При этом в водах озера в заметных количествах присутствовало легкоокисляемое органическое вещество – диапазон изменений перманганатной окисляемости в 2011 г. составил 3,1-13,1 мг O<sub>2</sub>/л при среднем значении 7,44 мг O<sub>2</sub>/л. Наибольшее значение перманганатной окисляемости было обнаружено в феврале, также как и максимальная величина БПК<sub>5</sub>.

Минимальная концентрация хлорофилла *a* в воде оз. Святое (0,40 мкг/л) была обнаружена в

феврале, а максимальная (44,1 мкг/л) – в декабре 2011 г. (табл. 1), среднегодовое содержание хлорофилла *a* в озере составило 11,28 мкг/л. Всего в течение года было отмечено три пиковых значения этого показателя – в апреле (10,64 мкг/л), августе (17,10 мкг/л) и в декабре (44,1 мкг/л). По содержанию хлорофилла *a* воды оз. Святого можно охарактеризовать как мезотрофные в период максимальной толщины ледяного покрова – с января по начало апреля 2011 г. В период с последней декады апреля до конца декабря 2011 г. по содержанию хлорофилла *a* воды оз. Святого характеризуются как мезотрофные с тенденцией к эвтрофности [6].

Значения ОЧБ в поверхностном слое вод оз. Святого варьировали от минимальных (1,15 млн. кл/мл), обнаруженных в конце апреля 2011 г., в момент вспышки весеннего развития фитопланктона, до максимальных (6,8 млн. кл/мл), обнаруженных в мае, когда «цветение» фитопланктона уже пошло на спад. Сравнительно невысокие значения ОЧБ (менее 3 млн. кл/мл) были

характерны для зимнее-весеннего подледного периода с январь по апрель, а также летом в июле и в августе (табл. 1). В конце мая значения ОЧБ резко возрастали до годового максимума (6,80 млн. кл/мл), однако в июле-августе численность бактерий вновь снижалась практически до январского уровня. В начале октября ОЧБ вновь увеличивалась до 4,01 млн. кл/мл и затем продолжала возрастать до 6,20 млн. кл/мл в конце ноября. В декабре 2011 г. ОЧБ несколько снижалась по сравнению с ноябрем, но все равно оставалась высокой – 5,57 млн. кл/мл. В целом за годовой период наблюдений на оз. Святом, максимумы развития гетеротрофных бактерий наблюдались в конце мая и в конце ноября, а минимумы – в феврале и апреле.

Абсолютное количество ЦТХ+ бактерий в воде оз. Святого (табл. 1) колебалось от минимальных значений (0,01 млн. кл/мл) (февраль-апрель-июль) до максимальных (0,89 млн. кл/мл) – в августе, при среднегодовом значении 0,21 млн. кл/мл. Доля этих бактерий от ОЧБ варьировала от 0,38% (в феврале) до 32,48% (в августе). В целом, наиболее высокая дыхательная активность гетеротрофных бактерий (если судить по количеству ЦТХ+ бактерий и величине их доли от ОЧБ) наблюдалась в оз. Святом в осенний период (с конца августа по начало ноября), при довольно высоких концентрациях хлорофилла *a* в воде.

Численность СБ варьировала в оз. Святом от 2500 (с декабря 2010 по февраль 2011 и в ноябре

2011 гг.) до 95000 кл/мл (в июле и августе) (табл. 1). Соотношение между ОЧБ и численностью СБ в период наблюдений колебалось от 25 (в июле) до 2478 (в ноябре) (табл. 1). Согласно ГОСТ 17.1.2.04-77, если судить по средним для сезонов величинам этого показателя, вода поверхностного слоя оз. Святого в период гидрологической зимы (конец ноября-начало апреля 2011 г.) может быть охарактеризована как чистая (среднее значение соотношения ОЧБ/СБ для этого сезона составило 999), а в летний период (июль-август) при величинах соотношения ОЧБ/СБ 25 и 29 соответственно как грязная. Среднегодовое значение ОЧБ/СБ составило 657, что позволяет оценить поверхностные воды оз. Святого как загрязненные.

Доля нежизнеспособного гетеротрофного БП (т.е. «мертвых» клеток, имеющих поврежденные клеточные мембраны) от общего числа клеток (интактные клетки + клетки с поврежденной мембраной) варьировала от 2,08% (в августе) до 32,84% (в июле), при среднегодовой величине 9,68% (табл. 1). Относительное количество нежизнеспособных клеток постепенно возрастало: от 3,34% в начале апреля до 32,84% в конце июля, при наиболее высокой температуре воды в озере (28<sup>0</sup> С). В августе этот показатель резко снижался (до 2,08%) и вновь возрастал до 18,42% только к концу ноября (табл. 1). Таким образом, есть все основания полагать, что на протяжении практически всего года более 67% клеток БП сохраняло свою жизнеспособность.

**Таблица 3.** Микробиологические показатели, содержание хлорофилла *a*, температура воды и состояние ледяного покрова в озере Белом в 2011 г.

Дата отбора проб	ОЧБ	Численность СБ	ОЧБ/СБ	Численность ЦТХ+ бактерий	Доля ЦТХ+ бактерий от ОЧБ	Доля клеток с поврежденной мембраной от суммы всех клеток	Хлорофилл <i>a</i>	Температура воды	Толщина льда
ед. изм.	млн. кл/мл	кл/мл	–	млн. кл/мл	%	%	мкг/л	°С	см
06.12.2010	3,04±0,00	950	3196	0,06±0,00	1,85	н/д	8,75	0,1	30
14.01.2011	3,73±0,01	950	3921	0,20±0,01	5,26	н/д	3,17	0,1	35
21.02.2011	7,03±0,00	2500	2811	0,01±0,00	0,10	н/д	0,31	0,1	40
04.04.2011	3,67±0,00	9500	387	0,18±0,00	4,87	1,77	1,09	0,1	60
29.04.2011	4,15±0,00	95000	44	0,02±0,00	0,51	11,62	95,39	11	нет
26.05.2011	3,68±0,00	45000	82	0,08±0,00	2,12	10,03	3,25	19,5	нет
28.06.2011	6,29±0,01	25000	251	н/д	н/д	9,9	1,44	27	нет
28.07.2011	3,303±0,00	45000	73	0,04±0,00	1,15	14,63	6,12	28	нет
25.08.2011	2,46±0,02	95000	26	1,14±0,00	46,40	1,72	5,99	21	нет
06.10.2011	3,63±0,00	45000	81	0,40±0,00	10,71	2,33	12,74	5	нет
01.11.2011	5,65±0,01	9500	594	0,93±0,00	16,49	2,76	15,14	6	нет
28.11.2011	6,74±0,01	4500	1497	0,22±0,00	3,28	3,87	55,48	0,5	3
28.12.2011	11,52±0,01	95000	121	1,30±0,00	11,29	3,76	32,08	0,5	5

Примечание: н/д – нет данных

Озеро Белое имеет площадь 0,2 км<sup>2</sup> и является самым глубоким (13,5 м) в Косинском Трехозерье. Оз. Белое – эвтрофный водоем, содержащий много растворенных и взвешенных органических веществ. Дно сложено илами,

мощность их отложений достигает 10 м. В придонных слоях воды часто присутствует сероводород. Так же, как и оз. Святое, оз. Белое с первой декады декабря 2010 г. по первую декаду апреля 2011 г. было покрыто льдом. Толщина

ледового покрова варьировала от 3 см в ноябре 2011 г. до 65 см в начале апреля 2011 г. (табл. 1). Температура в поверхностном слое воды (0,5 м) в озере варьировала от +0,1–+0,5°C в ноябре-апреле, во время периода ледостава, до 27–28 °C в июне-июле 2011 г. (табл. 3).

Концентрация водородных ионов в поверхностном слое озера была близка к нейтральной, а значения pH варьировали от почти нейтральной (7,24) в феврале до щелочной (9,11) в конце мая. В ноябре концентрация водородных ионов вновь становилась нейтральной (табл. 2). Таким образом, динамика изменений этого показателя в оз. Белом была сходна с таковой в оз. Святом, хотя подщелачивание воды в оз. Белом в мае было значительно более сильным. Содержание кислорода в поверхностных водах озера варьировало от 3,1 мг/л в конце февраля до 10,7 мг/л в мае.

Наибольшая концентрация ионов аммония в оз. Белом, также как и в оз. Святом, была отмечена в подледный период в феврале (табл. 2), однако она была значительно выше, чем в озере Святом и составила 1,73 мг/л. В мае содержание ионов аммония снизилось до < 0,05 мг/л, а в ноябре вновь возросло до 0,52 мг/л. Согласно ГОСТ 17.1.2.04-77 воды оз. Святое во время периода ледостава можно охарактеризовать как грязные, а в осенний период – как загрязненные. Содержание нитритов в оз. Белом было также выше, чем в оз. Святом и варьировало от 0,038 до 0,066 мг/л (табл. 2). Наибольшее содержание нитритов было определено в мае, сразу после окончания весеннего пика цветения фитопланктона. Максимальное содержание нитратов в поверхностных водах оз. Белое наблюдалось, также как и в оз. Святом, в феврале. Оно составило 3,86 мг/л, и было значительно выше, чем максимальная концентрация нитратов в оз. Святом (табл. 2). Концентрации фосфатов в поверхностных слоях водной толщи оз. Белое в среднем были почти на порядок выше, чем в оз. Святом (табл. 2). Максимальное их содержание в воде составляло 0,33 мг/л, и было обнаружено также в подледный период в феврале, минимальное содержание фосфатов было определено в мае – 0,022 мг/л.

Воды оз. Белое в мае и феврале 2011 г. содержали значительно меньшие количества легко-разлагаемого органического вещества по сравнению с водами оз. Святое, если судить по диапазону изменений величин перманганатной окисляемости (4,71–4,82 мг O<sub>2</sub>/л против 13,1–6,13 мг O<sub>2</sub>/л, табл. 2). Средняя величина перманганатной окисляемости для проб воды из поверхностного слоя воды оз. Белое составила 4,41 мг O<sub>2</sub>/л, что оказалось почти в 1,7 раза ниже аналогичного параметра в водах оз. Святое. Значения БПК<sub>5</sub> в пробах из поверхностных вод оз. Белое варьировали от 2,4 мг/л в ноябре до 4,6 мг/л в феврале и существенно не отличались от таковых в оз. Святом.

Минимальная концентрация хлорофилла *a* в воде оз. Белое (0,31 мкг/л) была обнаружена в феврале, а максимальная (95,39 мкг/л) – в конце апреля 2011 г. (табл. 3), среднегодовое содержание

хлорофилла *a* в озере составило 18,54 мкг/л. Всего за годовой период наблюдений было отмечено только два пиковых значения этого показателя – в конце апреля и в декабре 2011 г., они совпадали по времени с таковыми в оз. Святом. Интересно отметить, что судя по содержанию хлорофилла *a*, фитопланктонное сообщество в двух исследованных озерах достигало высокого уровня развития в осенне-зимний период – в ноябре и декабре 2011 г., тогда как в декабре 2010 г. ничего подобного не наблюдалось. По содержанию хлорофилла *a* воды оз. Белое можно охарактеризовать как мезотрофные в период максимальной толщины ледяного покрова – с января по начало апреля 2011 г. В последнюю декаду апреля во время вспышки весеннего цветения фитопланктона – как гиперэвтрофные, а в летний период – с мая по август как мезотрофные, с тенденцией к эвтрофности. В осенне-зимний период с октября по декабрь – как эвтрофные [6].

Значения ОЧБ в поверхностном слое воды оз. Белого варьировали от минимальных значений 2,46 млн. кл/мл (в августе) до максимальных значений 11,52 млн. кл/мл в конце декабря (табл. 3). Всего за годовой период наблюдений было отмечено три пиковых значения этого показателя – в феврале, июне и декабре 2011 г., они составили 7,03; 6,29 и 11,52 млн. кл/мл соответственно. Невысокие значения ОЧБ были характерны для декабря 2010 г. и летнего периода (июль-август), а в осенне-зимний период с первой декады ноября по декабрь 2011 г. величины ОЧБ возрастали.

Общее количество ЦТХ+ бактерий в воде оз. Белого (табл. 3) колебалось от 0,01 (в феврале) до 1,30 млн. кл/мл (в декабре 2011 г.) при среднегодовом значении 0,35 млн. кл/мл. Доля этих бактерий от ОЧБ изменялась от 0,1 (в феврале) до 46,40% (в августе). Высокая дыхательная активность гетеротрофных бактерий в оз. Белом наблюдалась не только в осенний период, с конца августа по начало ноября, то есть также как и в оз. Святом, но и, в отличие от оз. Святого, также и в декабре при максимальных значениях ОЧБ в оз. Белом. Численность СБ варьировала в оз. Белом от 950 (в декабре 2010 и январе 2011 гг.) до 95000 кл/мл (в апреле, августе и декабре 2011 г.) (табл. 3). Соотношение между ОЧБ и численностью СБ в период наблюдений колебалось от 26 (в августе) до 3921 (в январе). Согласно ГОСТ 17.1.2.04-77, по средним для сезонов величинам этого показателя вода оз. Белого в период гидрологической зимы (с конца ноября по февраль) может быть охарактеризована как чистая (среднее значение ОЧБ/СБ для этого сезона составило 2309), а в летне-осенний период (с апреля по октябрь) при средней величине ОЧБ/СБ равной 99 – как загрязненная. Среднегодовое значение ОЧБ/СБ составило 1006, что позволяет охарактеризовать воды поверхностного слоя оз. Белого по этому показателю, в отличие от вод оз. Святого, как чистые.

Доля клеток с поврежденной клеточной мембраной («мертвых») от общего количества

клеток варьировала в оз. Святом от 1,72 до 14,63% (табл. 3). Среднегодовое значение этого показателя составило 5,31%. Доля «мертвых» клеток существенно возрастала в конце апреля, после таяния ледового покрова и достигала максимального значения (14,63%) к концу июля, при наиболее высокой температуре воды в этом озере (28<sup>0</sup>С). В августе доля мертвых клеток снижалась до минимума (1,72%) и оставалась на низком уровне до конца наблюдений в декабре 2011 г.

Результаты наших годовых исследований гетеротрофного БП и концентраций хлорофилла *a* в озерах Святое и Белое в разные сезоны 2011 г. показывают заметную сезонную изменчивость как численности и активности бактерий, так и обилия фитопланктона. По соотношению исследованных микробиологических показателей поверхностные воды озер в зависимости от сезона варьируют от чистых до грязных, а по степени трофии – либо от мезотрофных до гиперэвтрофных (оз. Святое), либо от мезотрофных до мезотрофных с тенденцией к эвтрофности (оз. Белое).

Более ранние исследования состояния микробных ценозов Косинских озер были проведены в 1931-34 гг., их результаты отражены в трудах Косинской лимнологической станции и в публикациях С.И. Кузнецова [8-11]. Согласно этим работам, максимальные величины ОЧБ в поверхностных слоях воды оз. Белого наблюдались в период летней стагнации в июле и составляли в 1932 г. 2,672 млн. кл/мл [11] при среднегодовом значении этого показателя 1,126 млн. кл/мл. По нашим данным, в 2011 г. максимальное значение ОЧБ в оз. Белом наблюдалось в декабре и составило 11,52 млн. кл/мл при среднегодовом значении ОЧБ 5,154 млн. кл/мл. Это означает, что максимальная численность БП в оз. Белом в период с 1932 г. по 2011 гг., т.е. за 79 лет, увеличилась почти в 4,3 раза, а среднегодовая – в 4,6 раза. Сравнивая эти величины, надо иметь в виду, что по сравнению с 1932 г. методы учета ОЧБ сильно изменились. Использованная нами современная эпифлуоресцентная методика с использованием красителя-флуорохрома позволяет намного точнее определить величину ОЧБ, чем это позволял старый метод световой микроскопии с использованием в качестве красителя эритрозина. Однако в любом случае тенденция к значительному росту величин ОЧБ налицо, также как и изменения сезонной динамики этого показателя в 2011 г по сравнению с 1932 г.

По данным С.И. Кузнецова, полученным в 1932-1937 гг. для двух Косинских озер – Белого, Черного, а также для оз. Глубокого, расположенного в Рузском районе Московской области [11], максимальное количество бактерий в этих озерах наблюдается обычно в конце периода летней стагнации или во время осенней циркуляции, а наименьшее – зимой. В то же время по данным настоящего исследования в 2011 г. высокие (пиковые) значения ОЧБ на оз. Белом наблюдались в феврале, июне и декабре. В 2010 г. картина была несколько иной [4] – летний максимум ОЧБ отсутствовал (что могло быть связано с аномально

жарким летом 2010 г.), а пиковые значения этого показателя были отмечены только в январе (4,76 млн. кл/мл) и в апреле (6,71 млн. кл/мл). Несмотря на эти различия, наличие зимних максимумов ОЧБ на оз. Белом в 2010 и 2011 гг. не вызывает сомнения. Они присутствовали в 2011 г. и на оз. Святом – в конце ноября и в декабре (табл. 11), хотя в 2010 г на этом озере зимнего максимума ОЧБ обнаружено не было [4]. Аналогичные особенности сезонной динамики численности БП отмечались также и зарубежными исследователями в загрязненных водоемах умеренных широт [28]. Возможно, что в случае озер Белого и Святого их загрязнение в результате высокой рекреационной нагрузки и воздействия прочих антропогенных факторов также сыграло свою роль и вызывало наблюдавшиеся нами изменения естественной сезонной динамики гетеротрофного БП, т.е. той, которая была описана С.И. Кузнецовым для незагрязненных озер. Важно отметить, что в 2011 г. численность БП в оз. Белом и Святом еще более возросла по сравнению с 2010 г. Если в 2010 г. среднегодовое значение ОЧБ в оз. Белом составило 3,09 млн. кл/мл [4], то в 2011 – уже 5,15 млн. кл/мл. Для оз. Святого увеличение среднегодового значения ОЧБ в 2011 г. не было столь заметным и составило 3,88 млн. кл/мл против 3,52 млн. кл/мл в 2010 г, что могло быть связано со значительно меньшей рекреационной нагрузкой на это озеро.

Еще больше по сравнению с тридцатыми годами прошлого века возросла в Косинских озерах численность сапротрофных бактерий. По данным С.И. Кузнецова в этот период в оз. Белом она составляла всего 154 КОЕ/мл, а в оз. Святом – 800 КОЕ/мл. Согласно нашим данным (табл. 3), в 2011 г. в оз. Белом она варьировала от 950 до 95000 кл/мл, а в оз. Святом – от 2500 до 95000 кл/мл. Даже с учетом различий в методах определения численности сапротрофных бактерий (чашечный метод у С.И. Кузнецова и метод предельных разведений в настоящем исследовании) разница более чем на два порядка величин позволяет говорить о существенном росте содержания в этих озерах концентраций лабильного органического вещества. Причина остается все той же – резкое возрастание антропогенной нагрузки на эти озера, которые в 1986 г. вошли в черту г. Москвы и активно используются многочисленным населением близлежащих районов для рекреационных целей.

Определение численности ЦТХ+ бактерий и их доли от ОЧБ нами было проведено на Косинских озерах впервые в 2010 г. [4]. Известно, что к ним относятся бактерии с активной электронно-транспортной цепью, то есть реально функционирующие в водоеме в период отбора проб [20]. Их доля в составе пресноводного БП может варьировать от 0,04 до 100% [20], однако в большинстве случаев в озерах средней полосы величина этого показателя составляет от 2,5 до 20% [30]. Это означает, что значительная часть популяции гетеротрофного БП состоит из покоящихся клеток, которые, однако, могут переходить в активное состояние, когда условия окружающей

среды становятся благоприятными для их развития.

По нашим данным в 2010 г. доля ЦТХ+ бактерий в оз. Святом составляла от 2,4 до 19,2% от ОЧБ. Пики как абсолютной, так и относительной численности ЦТХ+ бактерий для этого озера были обнаружены в январе (18,2%) и в сентябре (19,2%) [4]. По результатам настоящего исследования в 2011 г. доля ЦТХ+ бактерий от ОЧБ в оз. Святом составляла 0,38-32,48%. Высокие значения абсолютной и относительной численности ЦТХ+ бактерий были обнаружены в период с конца августа по начало ноября, в остальное время численность и доля активно дышащих бактерий от ОЧБ не превышали 0,18 млн. кл/мл и 6,4% соответственно (табл. 1). Таким образом, сезонная динамика ЦТХ+ бактерий в этом озере была подвержена заметным межгодовым изменениям.

В оз. Белом доля активно функционирующих бактерий от ОЧБ в 2010 г. составила 1,8-63,0%, причем наибольшее количество активных бактерий было выявлено в сентябре. В 2011 г. доля ЦТХ+ бактерий от ОЧБ варьировала от 0,10 до 46,40%, а наибольшее их количество было обнаружено в августе, т.е. в близкий по сравнению с 2010 г. период времени. Сходные результаты были получены Копыловым и Косолаповым для прибрежных загрязненных участков Рыбинского водохранилища [7]. Эти авторы отмечают, что для бактериальных сообществ, развивающиеся в таких своеобразных биотопах, характерны как высокая численность, так и высокая активность, а доля ЦТХ+ бактерий в них может достигать 76,6% от ОЧБ.

Доля «мертвых» бактерий в озерах оказалась относительно невысока и в оз. Белом не превышала 15%, а в оз. Святом – 33% при среднегодовых значениях 5% и 10% соответственно. Это означает, что подавляющая часть гетеротрофного бактериального населения, обитающего в поверхностных водах этих водоемов, на протяжении всего года являлась потенциально жизнеспособной. Однако насколько оно будет проявлять дыхательную активность, то есть регистрироваться как ЦТХ+ бактерии, скорее всего, зависит от наличия благоприятных условий для развития гетеротрофного БП, в частности, присутствия лабильного органического вещества. Можно полагать, что именно такие условия создаются в озерах в период с конца августа по начало ноября, а в оз. Святом – возможно также и в зимний период, в декабре. Источником такой лабильной органики в осенний период, скорее всего, является отмирающий фитопланктон.

Проведенные нами исследования показали рост общей численности гетеротрофного бактериального населения Косинских озер за время, прошедшее с начала наблюдений на Косинской лимнологической станции, т.е. с 30-х годов прошлого века. Значительно изменилась и сезонная динамика этого показателя. Особенно резко возросла численность наиболее реактивной части гетеротрофного бактериоценоза – сапротрофных бактерий, которые наиболее быстро отзываются на

все изменения окружающей водной среды. По уровню их развития воды обеих озер в летний период согласно ГОСТ 17.1.2.04-77 можно отнести к полисапробным.

Массовое развитие сапротрофных бактерий может быть связано с резко возросшей эвтрофикацией Косинских озер в период после 1986 г., когда эти озера вошли в черту г. Москвы. После этого началась массовая застройка близлежащих районов, и их население многократно возросло. Как следствие, усилилось рекреационное использование Белого и Святого озер, наиболее пригодных для этих целей. В подобных неблагоприятных для озер условиях сильного антропогенного пресса существенно возрастает значение систематических гидробиологических (в частности – микробиологических) и гидрохимических комплексных наблюдений за состоянием Косинских озер, которое уже сейчас вызывает тревогу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бульон, В.В. Закономерности первичной продукции в лимнических экосистемах // Труды Зоол. ин-та. – СПб., 1994. Т. 216. 222 с.
2. Вагнер, Б.Б. Озера и водохранилища московского региона / Б.Б. Вагнер, В.Т. Дмитриева // Учебное пособие по курсу «География и экология Московского региона». – М.: МГПУ, 2004. 105 с.
3. Ильинский, В.В. Гетеротрофный бактериопланктон // Практическая гидробиология: учеб. для студ. биол. спец. университетов под ред. Федорова В.Д. и Капкова В.И. – М.: ПИМ, 2006. С. 331-365.
4. Ильинский, В.В. Современное состояние гетеротрофного бактериопланктона Косинского Трехозерья / В.В. Ильинский, И.В. Мошарова, А.Ю. Акулова, С.А. Мошаров // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 5. С. 477-487.
5. Карзинкин, Г.С. Новые методы в лимнологии / Г.С. Карзинкин, С.И. Кузнецов // Труды лимнол. станции в Косине. 1931. Вып. 13-14. С. 367.
6. Китаев, Н.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. Монография – М.: Наука, 1984. 129 с.
7. Копылов, А.И. Бактериопланктон водохранилищ Верхней и Средней Волги. Монография / А.И. Копылов, Д.Б. Косолапов. – М.: Изд-во СГУ, 2008. 377 с.
8. Кузнецов, С.И. Микробиологические исследования при изучении кислородного режима озер // Микробиология. 1934. Т. 3. Вып. 4. С. 66.
9. Кузнецов, С.И. Применение микробиологических методов к изучению органического вещества в водоемах // Микробиология. 1949. Т. 18. Вып. 3. С. 203-215.
10. Кузнецов, С.И. Распространение в озерах бактерий, окисляющих газообразные и жидкие углеводороды // Микробиология. 1947. Т. 16. Вып. 5. С. 429-435.
11. Кузнецов, С.И. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. Монография. – М.: Изд-во АН СССР, 1952. 278 с.
12. Новобранцев, П.В. Развитие бактерий в озерах в зависимости от наличия легкоусвояемого органического вещества // Микробиология. 1937. Т. 6. Вып. 1. С. 28-36.
13. Разумов, А.С. Прямой метод учета бактерий в воде. Сравнение его с методом Коха // Микробиология. 1932. Т. 1. Вып.2. С. 131-146.
14. Семин, В.А. Основы рационального водопользования и охраны водной среды. Монография. – М.: Высш. шк., 2001. 320 с.
15. Сиделев, С.И. Анализ связей пигментных и структурных характеристик фитопланктона высокоэвтрофного

- озера / С.И. Сиделев, О.В. Бабаназарова // Журнал Сибирского Федер. унив. Биология. 2008. № 2. С. 153-168.
16. Aaronson, A.A. Experimental Microbial Ecology. Monograph. – New York and London: Academic Press, 1970. P. 236.
  17. Berman, T. Metabolically active bacteria in Lake Kinneret / T. Berman, B. Kaplan, S. Chava et al. // Aquat. Microb. Ecol. 2001. V.23. P. 213-224.
  18. Del Giorgio, P.A. Increase in the proportion of metabolically active bacteria along gradients of enrichment in freshwater and marine plankton: implication for estimates of bacterial growth and production rates / P.A. del Giorgio, G. Scarborough // Journal of Plankton Research. 1995. V. 17. № 10. P. 1905-1924.
  19. Ducklow, H.W. Oceanic bacterial production / H.W. Ducklow, C.A. Carlson // Adv. Microb. Ecol. 1992. V. 12. P. 113-181.
  20. Dufour, P. Advantages of distinguishing the active fraction in bacterioplankton assemblages: some examples / P. Dufour, J.P. Torreton, M. Colon // Hydrobiologia. 1990. V. 207. P. 295-301.
  21. Gasol, J.M. Significance of Size and Nucleic Acid Content Heterogeneity as Measured by Flow Cytometry in Natural Planktonic Bacteria / J.M. Gasol, U. L. Zweifel, F. Peters et al. // Appl. Env. Microb. 1999. Vol.65, №. 10. P. 4475-4483.
  22. Holm-Hansen O. Deep chlorophyll *a* maxima (DCMs) in pelagic Antarctic. II. / O. Holm-Hansen, M. Kahru, C.D. Hewes // Marine Ecology Progress Series. 2005. V. 297. P. 71-81.
  23. Jepras, R.I. Development of a robust flow cytometric assay for determining numbers of viable bacteria / R.I. Jepras, J. Carter, S. C. Pearson et al. // Appl. Environ. Microbiol. 1995. V. 61. P. 2696-2701.
  24. Jugnia, L.B. Variations in the number of active bacteria in the euphotic zone of a recently flooded reservoir / L.B. Jugnia, M. Richardot, D. Debros et al. // Aquat Microb Ecol. 2000. V. 22. P. 251-259.
  25. Maurin, N. Phytoplankton excretion and bacterial re-assimilation in an oligomesotrophic lake: molecular weight fractionation / N. Maurin, C. Amblard, G. J. Bourdier // Plankton Res. 1997. V. 19. P. 1045-1068.
  26. Methods in Stream Ecology // Ed. Hauer F.R., Lamberti G.A. Monograph. – Elsevier, 2006. 876 p.
  27. Nagata, T. Production mechanisms of dissolved organic matter. Microbial ecology of the oceans –N. Y.: John Wiley & Sons, 2000. P. 121-152.
  28. Niewolak, S. Vertical distribution of the bacterioplankton and the thermal oxygen relations in the water of the Ilawa Lakes // Acta Hydrobiol. 1974. V. 16. P. 173-187.
  29. Overbeck, J. Bakterien und Phytoplankton eines Kleingewässers im Jahreszyklus / J. Overbeck, H. D. Babenzien // Z. allg. Microbiol. 1964. V. 4. P. 59-76.
  30. Rheinheimer, G. Aquatic Microbiology 4th ed. – London : Wiley, 1992. 363 p.
  31. Sommaruga, R. Seasonal variability of metabolically active bacterioplankton in the euphotic zone of a hypertrophic lake / R Sommaruga, D. Conde // Aquat. Microb. Ecol. 1997. V. 13. P. 241-248.
  32. Sondergaard, M. Active bacteria (CTC+) in temperate lakes: temporal and cross-system variations / M. Sondergaard, M. Danielsen // Journal of plankton research. 2001. V. 23. № 11. P. 1195-1206.
  33. Schumann, R. Viability of bacteria from different aquatic habitats. II. Cellular fluorescent markers for membrane integrity and metabolic activity / R. Schumann, U. Schiewer, U. Karsten, T. Rieling // Aquat. Microb. Ecol. 2003. Vol. 32. P. 137-150.
  34. Tietjen, T.E. Seasonal and spatial distribution of bacterial biomass and the percentage of viable cells in a reservoir of Alabama / T.E. Tietjen, R.G. Wetzel // J. Plank. Res. 2003. Vol. 25, № 12. P. 1521-1534.
  35. Ulrich, S. Toxic effects on bacterial metabolism of the redox dye 5-cyano-2,3-ditolyl tetrazolium chloride / S. Ulrich, B. Karrasch, H. Hoppe et al. // Appl. Environ. Microbiol. 1996. V.62. № 12. P. 4587-4593.

## STATE OF GETEROTROPHIC BAKTERIOPLANKTON IN COASTAL ZONE OF SVYATOE AND BELOE LAKES IN NATURAL AND HISTORICAL PARK "KOSINSKIY" (MOSCOW CITY) IN 2011

© 2014 A.Yu. Akulova<sup>1</sup>, V.V. Ilyinskiy<sup>1</sup>, I.V. Mosharova<sup>1</sup>, M. I. Moskvina<sup>1</sup>, S.A. Mosharov<sup>2</sup>, T.A. Komarova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University named after M.V. Lomonosov

<sup>2</sup> Moscow State Technical University named after N.E. Bauman

From December 2010 to December 2011 it was investigated the total number of bacteria, number of bacteria with active electronic and transport chain, quantity the saprotrophic bacteria, and also concentration of chlorophyll "a" and some other hydrochemical parameters in water tests from a surface layer in lakes Svyatoe and Beloe, located in Kosino-Ukhtomskiy district of Moscow. It is revealed that at these lakes there is numerous actively functioning geterotrophic bacterioplankton, and its quantity considerably increased in comparison with observed in the thirties of last century the staff of Kosinskiy limnological station. Seasonal dynamics of bacterioplankton development in Kosinskiy lakes significantly changed since then. Maximum of number of TsTH+ of bacteria in Svyatoe lake had for the end of August, and in Beloe lake – for the end of December. The greatest size of TsTH+ cells of bacteria from total number of bacterioplankton in both lakes was observed at the end of August. The maximum number of cells with damaged membrane ("dead") from total of viable cells in Svyatoe and Beloe lakes it was observed in summer, at the end of July, at the most high temperature of water in lakes.

Key words: *Kosinskoye Trekhozerye*, *geterotrophic bacterioplankton*, *number*, *saprotrophic bacteria*, *chlorophyll "a"*

Anastasiya Akulova, Engineer-Assistant at the Hydrobiology Department. E-mail: [anastasiabio@mail.ru](mailto:anastasiabio@mail.ru); Vladimir Ilyinskiy, Doctor of Biology, Professor at the Hydrobiology Department Ильинский. E-mail: [vladilinskiy@gmail.com](mailto:vladilinskiy@gmail.com); Irina Mosharova, Candidate of Biology, Senior Research Fellow at the Hydrobiology Department. E-mail: [ivmpost@mail.ru](mailto:ivmpost@mail.ru); Maria Moskvina, Candidate of Biology, Senior Research Fellow at the Hydrobiology Department. E-mail: [ma-sha\\_moskvina@mail.ru](mailto:ma-sha_moskvina@mail.ru); Sergey Mosharov, Associate Professor. E-mail: [sampost@list.ru](mailto:sampost@list.ru); Tatiana Komarova, Candidate of Biology, Senior Research Fellow at the Hydrobiology Department. E-mail: [komar75@mail.ru](mailto:komar75@mail.ru)