УДК 582.2

**Ю. КАМЕНИР[1], Т.И. МИХАЙЛЮК[2], А.Ф. ПОПОВА[2], Р. КЕМП[3], Ц. ДУБИНСКИЙ[1]**

[1] Лаборатория морской экологии, отдел биол. наук, фак-т биол. наук им. Мины и Эверарда Гудман, Бар-Иланский ун-т, 52900 Рамат-Ган, Израиль

[2] Ин-т ботаники им Н.Г. Холодного НАН Украины,
01001 Киев, ул. Терещенковская, 2, Украина

[3] Ин-т биологических наук, Университет Уэльса, Аберистуит,
SY23 3DA, Уэльс, Великобритания

# ВЛИЯНИЕ АНТРОПОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ФИТОПЛАНКТОН КАНЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (УКРАИНА). 2. СРАВНЕНИЕ РАЗМЕРНЫХ СПЕКТРОВ

Приведены результаты сравнения структуры фитопланктона двух участков Каневского водохранилища с различным уровнем загрязнения. Анализ изменчивости нескольких типов размерных спектров, а именно размерного спектра биомассы (BSS), нормализованного размерного спектра (NBS) и традиционного таксономического размерного спектра (TTSS), осуществлен на основе проб, собранных при мониторинговом исследовании на протяжении 24-месячного периода на двух станциях Каневского водохранилища (Украина). Ст. 1 была расположена в относительно чистой речной части Каневского водохранилища, тогда как ст. 2 находилась ниже по течению, в устье реки Сырец, которая загрязнена сточными водами г. Киева. Обе станции характеризовались разным составом и динамикой фитопланктона. В то время как кривые BSS были различны, годовые кривые NBS и TTSS имели сходный характер, с некоторыми различиями в тонкой структуре каждого спектра. Полученные индексы сходства (TTSS), характеризующие состояние фитопланктона в относительно чистом участке Каневского водохранилища (1 ст.) и в загрязненном сточными водами участке в устье р. Сырец (2 ст.), сравниваются с такими же индексами пресноводного незагрязненного водохранилища – озера Киннерет (Израиль). Детально обсуждается влияние загрязнения, проявляющееся через деформации структуры размерных спектров.

*Ключевые слова:* фитопланктон, антропогенное загрязнение, размерно-частотное распределение, размерный спектр.

## Введение

Структура фитопланктона, характеризующаяся высокой таксономической сложностью и пространственно-временной гетерогенностью, довольно часто анализируется с помощью размерных спектров. Два из них, а именно размерный спектр биомассы (BSS) и нормализованный размерный спектр (NBS), описывают размерное распределение организмов, независимо от их таксономии, т. е. они по существу являются "атаксономическими". В то же время размерно-частотное распределение таксономических единиц в сообществе фитопланктона успешно использовалось в качестве особого типа размерного спектра – традиционного таксономического размерного спектра (TTSS) (Kamenir et al., 2006).

Целью данного исследования было сравнение размерных спектров биомассы (BSS), численности клеток (NBS) и количества видов (TTSS) фитопланктона двух соседних участков Каневского водохранилища с различным уровнем загрязнения, в частности с относительно низким загрязнением в речной части Каневского водохранилища (ст. 1), с более высоким уровнем загрязнения городскими стоками в устье р. Сырец (ст. 2), а также с незагрязненным пресноводным водохранилищем (оз. Киннерет, Израиль).

**Материалы и методы**

Экологические свойства изученных речных участков Каневского водохранилища, гидрологический режим и типы загрязнений двух исследованных станций, методы сбора и обработки проб приведены в первой части данного исследования (Mikhailyuk et al., 2008). Отбор проб проводили на двух указанных станциях. Для характеристики фитопланктона использовали показатели, применяемые в гидробиологии – численность, биомассу и общую поверхность клеток (после префиксации образцов фитопланктона формалином, концентрации клеток осадочным методом и их микрокопирования).

Все виды фитопланктона с индивидуальным размером клеток диаметром более 2 мкм (объем клетки *V*, 4 мкм$^3$) были идентифицированы и измерены с помощью микроскопа. Средний объем индивидуальных клеток каждого вида водорослей фитопланктона рассчитывали на основе линейных измерений клеток под микроскопом с последующей идентификацией их формы, наиболее близкой к соответствующей геометрической фигуре. Объем клеток использовали для отнесения каждого вида водорослей к определенному размерному классу. Исключение составляли нитчатые водоросли родов *Oscillatoria* Vauch., *Anabaena* Bory ex Born. et Flah., *Aphanizomenon* Morr. ex Born. et Flah. и др. Поскольку довольно трудно выделить под микроскопом индивидуальные клетки в трихомах, использовали объем целой нити. Так как некоторые таксоны не всегда строго соответствовали таксономическому виду, а иногда и размерной категории в пределах вида, они были описаны в качестве оперативных таксономических единиц (OTU) (Sneath, Sokal, 1973).

Размерные классы клеток водорослей выделяли путем удвоения объема клетки, т. е. стандартных приращений логарифма размера клетки. Так, наименьший размерный класс клеток составлял 4 мкм$^3$, далее 8-16 мкм$^3$, вплоть до крупнейшего размерного класса клеток фитопланктона (131000 мкм$^3$). В данной работе для размерных классов клеток мы использовали обозначение lg *V*xx, где xx – логарифм правой границы класса [так, lg *V* 1,20 означает $lg_{10}V$ (мкм$^3$) = 1,20, т.е. объем клетки составляет от >8 до 16 мкм$^3$]. Каждый размерный класс включает правую "границу" (т .е. максимальный объем клетки), поэтому класс 0,60 составляет *V* = 4, как $lg_{10}(4) = 0,60$, в то время как его левая

граница принадлежит предыдущему классу (lg $V$ = 0,30) (Kamenir et al., 2006). Десять размерных классов удвоения объема клетки соответствуют приблизительно 10-кратному увеличению линейного размера (диаметра) клетки – $D$. Размеры $D$ 2 и 20 мкм разграничивают зоны пико/нано/микропланктона (Sieburth et al., 1978).

Собраны два 12-месячных набора данных, каждый из которых охватывал полный годовой цикл (Mikhailyuk et al., 2008). В результате этого были выделены четыре размерных спектра каждого типа – по одному для каждого года и по каждому из двух станций. Размерный спектр биомассы (BSS) был построен путем распределения суммарной биомассы фитопланктона по размерным классам логарифма объема клетки (Sheldon et al., 1972). Распределение численности клеток фитопланктона по размерным классам объема клеток представляло размерный спектр численности, который близок к наиболее популярному в последнее время нормализованному размерному спектру (NBS), получаемому через нормализацию BSS к ширине размерных классов (Platt, Denman, 1978).

Распределение общего числа OTU по размерным классам объема клеток приводит к TTSS (Kamenir et al., 2006). Все OTU, зарегистрированные в течение каждого годового цикла, использовали для анализа. Для каждого OTU применяли фиксированный (среднегодовой) показатель объема клетки (Численко, 1981; Smith et al., 2004). Поэтому каждый TTSS создавался как дискретное распределение (гистограмма) совокупного числа OTU, зарегистрированного в течение одного года, по размерным классам. Гистограммы создавали с помощью процедур Histogram и Crosstab и обозначали в соответствии с годом, который они представляли. Так, в обозначении TTSSyy, yy указывает на год, в частности TTSS01 обозначает TTSS для первого годового цикла. Иерархический кластерный анализ (связь между группами, коэффициент корреляции Пирсона, без трансформации входных данных и полученных оценок) применяли для вычисления мер сходства между TTSS-гистограммами (Kamenir et al., 2006). Для всех статистических вычислений использовали статистический пакет программ SPSS 13.0 (SPSS Inc., Чикаго, IL 60606, США).

**Результаты и обсуждение**

Показатели размерных спектров биомассы (BSS) фитопланктона на двух исследованных станциях в течение двух годовых циклов значительно отличались (рис. 1). Эти различия можно объяснить доминированием разных видов водорослей на двух станциях и даже различных их групп в течение первого и второго годовых циклов на одной и той же станции. Кривая BSS для ст. 1 в 1-й годовой цикл имела один небольшой пик, соответствующий объему клеток около 1100-1500 мкм$^3$ (размерный класс lg $V$ = 3,31). Данный размерный класс фитопланктона включал преимущественно крупные диатомовые водоросли, среди

которых *Stephanodiscus hantzschii* был особенно многочисленным и являлся доминантом летнего фитопланктона ст. 1.

Размерный спектр биомассы фитопланктона (BSS) ст. 1 в течение 2-го годового цикла характеризовался более высокими показателями общей биомассы водорослей. Пик lg $V$ = 3,31 на кривой отмечался также благодаря наличию указанных выше видов водорослей. Кроме того, на данной кривой выявлены еще два дополнительных пика, соответствующие объему клеток водорослей 40-60 мкм$^3$ (lg $V$ = 1,81) и 10600 мкм$^3$ (lg $V$ = 4,21). Первый из этих пиков вызван массовым развитием *Microcystis aeruginosa*, второй – *Anabaena flos-aque* в течение летне-осеннего периода. Указанные виды встречались на ст. 1 также в течение первого годового цикла, но характеризовались более низкой численностью и биомассой.

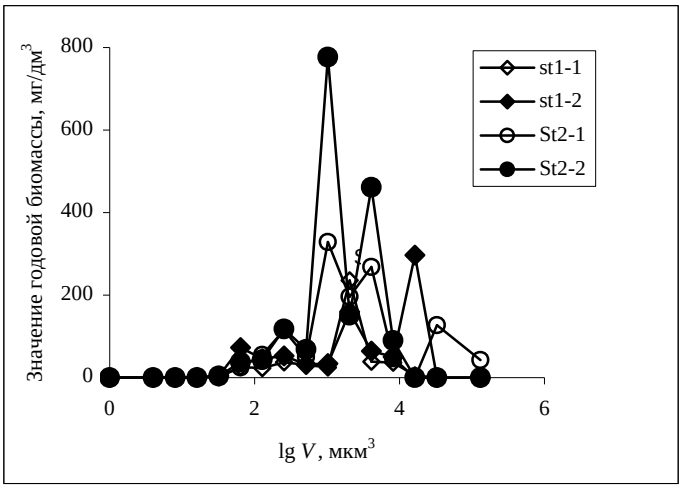
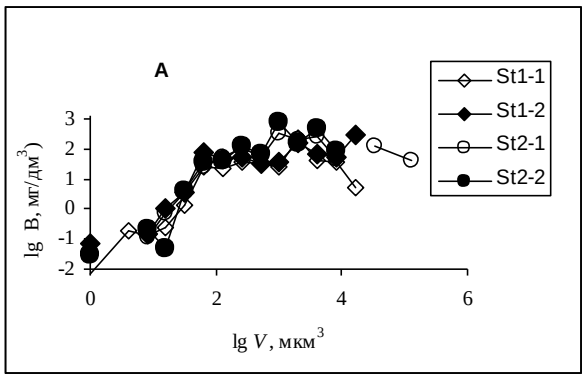



Рис. 1. Распределение суммарной биомассы фитопланктона Каневского водохранилища по размерным классам логарифма объема клеток (среднегодовые величины, вычисленные на основе 12-месячных проб для двух станций (St1 и St2) двух годовых циклов

Размерные спектры биомассы (BSS) на ст. 2 в течение двух годовых циклов имели три постоянных пика, которые различались только уровнем биомассы в течение двух лет. Первый пик, соответствующий объему клеток 130-240 мкм$^3$ (lg $V$ = 2,41), вызван интенсивным развитием диатомовых и зеленых водорослей с мелкими клетками. Эти виды, в частности *Cyclotella stelligera, Chlorella vulgaris, Coelastrum indicum, Desmodesmus denticulatus* и *Tetraedron caudatum,* наблюдались в течение весенне-летнего периода. Второй пик, соответствующий объему клеток (или нитей) 530-970 мкм$^3$ (lg $V$ = 3,01), вызван массовым развитием нитчатых цианопрокариот с тонкими трихомами (*Oscillatoria splendida, O. acutissima и Pseudoanabaena catenata*), диатомовых водорослей с узкими длинными клетками (*Synedra acus, Diatoma tenue, Asterionella formosa*), а также золотистой водоросли с большим объемом клеток

(*Mallomonopsis* sp.). Цианопрокариоты и диатомовые водоросли развивались, главным образом, в течение осенне-зимнего периода в фитопланктоне ст. 2, а ранней весной доминировали преимущественно золотистые водоросли. Развитие цианопрокариот повторялось в течение обоих годовых циклов, тогда как золотистые водоросли отмечались только в 1-й годовой цикл, а во 2-й – диатомовые. Третий пик, соответствующий объему клеток 2500-3990 мкм$^3$ (lg $V$ = 3,61), вызван интенсивным развитием в фитопланктоне ст. 2 нитчатых цианопрокариот с толстыми трихомами, в частности *Oscillatoria agardhii*, а также криптофитовых водорослей с крупными клетками – *Cryptomonas borealis*. Первый вид принадлежит к комплексу цианопрокариот, которые развиваются осенью, тогда как второй вид является представителем жгутиковых водорослей, характерных для весеннего фитопланктона. Четвертый пик размерного спектра биомассы (BSS) ст. 2 отмечался только в течение 1-го годового цикла и соответствовал объему клеток 17000-28800 мкм$^3$ (lg $V$ = 4,52). Данный пик определялся развитием динофитовой водоросли *Gymnodinium* sp. с крупными клетками. Указанный вид встречался только однажды (осенью 2004 г.) в незначительном количестве, хотя его вклад в общую биомассу был достаточно значительным благодаря очень большому объему клеток.



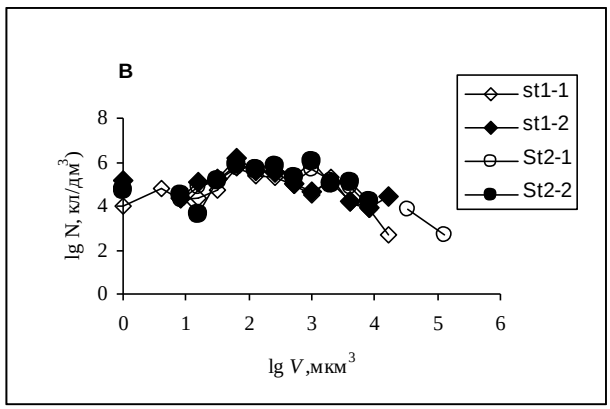




Рис. 2. *A* – lg-lg преобразованные спектры NBS. Виден устойчивый общий вид (колоколо-образная кривая), тогда как высота и положение пиков вариабельны; *B* – Размерное распределение суммарного числа клеток

В то же время, несмотря на полученные различия BSS-кривых в процессе исследования фитопланктона на разных станциях в течение различных годовых циклов, lg-lg преобразованные спектры имели почти одинаковый (колоколо-подобный) вид размерного распределения биомассы и численности водорослей (рис. 2). Такое размерное распределение, построенное на основе прямого подсчета клеток, соответствует абсолютно обычному нормализованному размерному спектру (NBS), в котором вертикальная ось представляет суммарную численность (кл/дм$^3$) организмов, распределенную по размерным классам логарифма объема клеток. Таким образом, в противоположность размерным спектрам биомассы (BSS) (см. рис. 1), общий вид lg-lg преобразованных спектров оказался почти одинаковым для всех четырех кривых. Общая биомасса фитопланктона и численность клеток были выше на ст. 2 в течение 2-го года исследований. Эти два показателя были заметно выше на ст. 2 для клеток с lg $V$ = 3,0 и lg $V$ > 4. Такая же закономерность наблюдалась в фитопланктоне ст. 1 в течение 2-го года исследований для мелких клеток с lg $V$ = 1,20; 1,81.

Размерно-частотное распределение таксономических единиц (видов) (TTSS) оказалось довольно сходным для всех наборов данных (рис. 3). Виды фитопланктона, доминирующие в Каневском водохранилище, приведены в таблице в соответствии с их размерными классами. Кривые TTSS ст. 2 (см. рис. 3) указывают на наличие бóльшего числа видов в центральной части размерного распределения (lg $V$ = 2,41-3,61, соответствующего объемам клеток 130-3500 мкм$^3$). Каждая TTSS-кривая создавалась как дискретное распределение (гистограмма) совокупного числа операционных таксономических единиц (OTU), зарегистрированных в течение одного полного годового цикла, по размерным классам в соответствии с типичной оценкой клеточного объема ($V$, мкм$^3$) каждого OTU. Кривая TTSS ст. 1 более сходна с таковой ст. 2 в течение 2-го года исследований, но несколько отличается от кривой TTSS ст. 1 в 1-й год исследований структуры фитопланктона. Эти различия особенно четко проявлялись в области lg $V$ = 2,41-3,31.

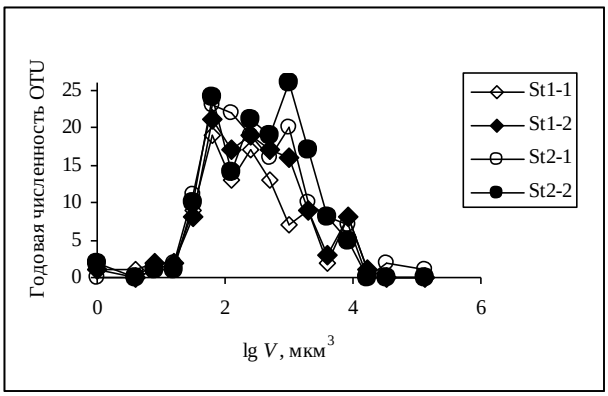



Рис. 3. Традиционный таксономический размерный спектр (TTSS) фитопланктона Каневского водохранилища.

На протяжении 2-го года исследований обе станции характеризовались более высокой численностью видов. Общий вид TTSS сохранялся на протяжении обоих годичных циклов: бимодальные распределения с пиками lg *V* = 1,81 и 3,01 и с меньшими пиками – lg *V* = 2,41 и 3,91. Для фитопланктона ст. 2 было характерно наличие нескольких крупных видов ( lg *V* > 4,21), что деформировало правую сторону кривых BSS и NBS (см. рис. 1, 2).

Как видно из рис. 3, все четыре TTSS-кривые сходны между собой, т.к. имеют по два основных пика в центральной части, с более низкими, но еще значительными частотами между этими пиками, а также низкий пик справа. Первый пик (lg *V* = 1,81) соответствовал высокому видовому разнообразию зеленых планктонных ценобиальных водорослей родов *Desmodesmus* (Chod.) An., *Coelastrum* Näg. и *Monoraphidium* Kom.-Legn., которые были особенно многочисленны в фитопланктоне ст. 2. Но благодаря небольшому размеру клеток эти виды не влияли на общую биомассу фитопланктона. Второй (субдоминантный) пик (lg *V* = 2,41) отражал высокое разнообразие диатомовых и зеленых водорослей из родов *Cyclotella* Kütz., *Navicula* Bory, *Nitzschia* Hass., *Coelastrum* и *Tetraedron* Kütz. со средним размером клеток на обеих станциях. Третий пик (lg *V* = 3,01) определялся существенным разнообразием нитчатых цианопрокариот, а также диатомовых водорослей со значительным объемом клеток (трихомов) из родов *Oscillatoria, Pseudoanabaena* Lauterb., *Diatoma* Bory emend. Heiberg., *Asterionella* Hass. и *Synedra* Ehr. Многие из указанных водорослей массово развивались и вносили существенный вклад в биомассу фитопланктона обеих станций, особенно на ст. 2.

Таким образом, все типы размерных спектров (см. рис. 1-3) показали значительную роль видов в пределах центральной части спектров (с объемом клеток от нескольких десятков до нескольких сотен мкм$^3$), что характерно для биомассы (BSS), численности клеток (NBS) и количества видов (TTSS).

Сравнение таксономических размерных спектров фитопланктона Каневского водо-хранилища с таковыми субтропического мезоэвтрофного оз. Киннерет (Kamenir et al., 2006) показало огромное их сходство (рис. 4). Обе водные экосистемы имели почти симметричное распределение по шкале lg *V*, с парой главных пиков в средней части кривых, разделенных с четко различимой центральной впадиной. Эта высокая центральная часть сопровождалась более низкими длинными хвостами в обоих (правом и левом) направлениях. Центральная часть кривых была намного выше у TTSS Каневского водохранилища (см. рис. 4). Причиной тому является значительно бóльшее число видов в фитопланктоне данного водоема (150-250 видов), что в 2-3 раза превышает количество видов оз. Киннерет (65-90 видов). Высокое видовое разнообра-зие фитопланктона Каневского водохранилища подтверждают и литературные данные (Щербак, Майстрова, 1996, 2000).

Положение пиков и впадин на кривых TTSS двух экосистем несколько различалось. В частности, первый большой пик при значении lg *V* = 1,81 отмечался для Каневского водохранилища, тогда как для оз. Киннерет такой пик наблюдался при

lg $V$ = 2,11. Горизонтальное положение данного пика фитопланктона оз. Киннерет совпадало с основной впадиной кривой TTSS Каневского водохранилища. Второй главный пик имел такое же положение (lg $V$ = 3,01) для обеих экосистем, однако для кривой Каневского водохранилища он был в два и более раза выше. Правый „хвост" традиционного таксономического размерного спектра (TTSS) показал четкое различие между двумя экосистемами, т. к. он был намного длиннее для фитопланктона оз. Киннерет. Это объясняется тем, что фитопланктон Каневского водохранилища не имеет видов с объемом клеток более 90000 мкм$^3$, тогда как субтропический фитопланктон оз. Киннерет включает крупные клетки динофитовых водорослей объемом свыше 100000 мкм$^3$ (см. рис. 4).

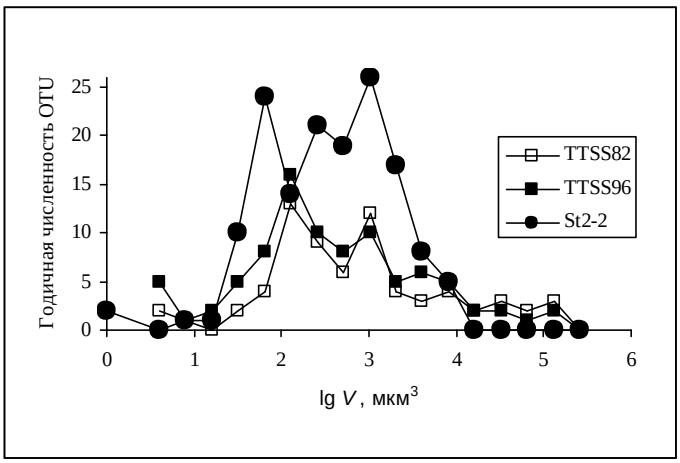



Рис. 4. Сравнение традиционных таксономических размерных спектров (TTSS) фитопланктона Каневского водохранилища ст. 2 (St-2) с TTSS фитопланктона двух разных периодов оз. Киннерет (Израиль) (типичные и экстремально-необычные годы – TTSS82 и TTSS96 соответственно) (Kamenir et al., 2006)

Озеро Киннерет расположено вдали от зон городского загрязнения и используется как пресноводное водохранилище национального значения. Но по уровню биогенов оно близко к таковым р. Сырец (Mikhailyuk et al., 2008), в частности: до 0,15 мг/дм$^3$ $PO_4^{3-}$ и 1,23 мг/дм$^3$ $NH_4$, 0,19 мг общего фосфора и 1,61 мг общего азота на 1 дм$^3$ (Zohary et al., 2000; Zohary, 2004). Поэтому вышеупомянутое сходство кривых TTSS обоих водоемов может быть доказательством наличия важных механизмов саморегуляции водного сообщества. Такие типовые примеры спектров могут быть ценны для диагностики влияния загрязнения с помощью анализа специфических различий в некоторых деталях спектров.

Размерные классы логарифма объема клеток основных представителей фитопланктона Каневского водохранилища приведены в таблице.

*Таблица.* **Основные представители фитопланктона Каневского водохранилища соответственно размерным классам логарифма объема клеток ( lg *V*, мкм$^3$)**

| Размерный класс, lg *V* | Кол-во OTU | Виды операционных таксономических единиц (OTU) | *V* клеток, мкм$^3$ |
|---|---|---|---|
| 0.00 | 2 | *Merismopedia tenuissima* Lemm. | 0.70 |
| 0.60 | 1 | *Microcystis pulverea* (Wood) Forti emend. Elenk. | 3.05 |
| 0.90 | 2 | *Monoraphidium contortum* (Thur.) Kom.-Legn. | 6.27 |
| | | *Tetrastrum elegans* Playf. | 5.56 |
| 1.20 | 3 | *Chroococcus minor* (Kütz.) Hollerb. | 14.13 |
| | | *Snowella lacustris* (Chod.) Komárek et Hindák | 8.38 |
| | | *Oscillatoria amphibia* J. Agardh ex Gomont | 12.54 |
| 1.51 | 15 | *Desmodesmus armatus* (Chod.) Hegew. var. *bicaudatus* (Gugl.) Hegew. | 30.44 |
| | | *Dictyosphaerium chlorelloides* (Naum.) Kom. et Perm. | 25.66 |
| | | *Kephyrion moniliferum* (Schmid) Bourr. | 30.14 |
| | | *Lagerheimia genevensis* (Chod.) Chod. | 31.36 |
| | | *Nephrochlamys rostrata* Nyg. et al. | 25.09 |
| | | *Phormidium mucicola* Hub.-Pest. et Naum. | 17.44 |
| | | *Pseudodidymocystis planctonica* (Korsch.) Hegew. et Deason | 31.36 |
| | | *Raphidocelis subcapitata* (Korsch.) Nyg. et al. | 18 |
| | | *Tetrastrum staurogeniaeforme* (Schröd.) Lemm. | 18.83 |
| 1.81 | 41 | *Choricystis minor* (Skuja) Fott | 53.25 |
| | | *Chromulina* sp. | 62.83 |
| | | *Chroomonas acuta* Uterm. | 38.79 |
| | | *Coelastrum reticulatum* (Dang.) Senn | 50.97 |
| | | *Desmodesmus armatus* (Chod.) Hegew. | 60.29 |
| | | *D. armatus* (Chod.) Hegew. var. *spinosus* (Fritsch et Rich) Hegew. | 54.18 |
| | | *D. brasiliensis* (Bohl.) Hegew. | 62.72 |
| | | *D. communis* (Hegew.) Hegew. | 50.16 |
| | | *D. costato-granulatus* (Skuja) Hegew. | 47.33 |
| | | *D. grahneisii* (Heynig) Hegew. | 47.18 |
| | | *D. granulatus* (W. et G.S. West) Tsar. | 47.16 |
| | | *Kephyrion inconstans* (W.G.G. Schmid) Bourr. | 43.55 |
| | | *K. rubri-claustri* W. Conrad | 62.88 |
| | | *Microcystis aeruginosa* (Kütz.) Kütz. | 50.97 |
| | | *Monoraphidium griffithii* (Berk.) Kom.-Legn. in Fott | 54.45 |
| | | *Monoraphidium minutum* (Näg.) Kom.-Legn. in Fott | 37.63 |
| | | *Nitzschia fonticola* Grun. in Cl. et Müll. | 48 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | *N. pusilla* Grun. | 48.13 |
| | | *Planothidium lanceolata* (Bréb. in Kütz.) Round et Bukht. var. *elliptica* (Cl.) Bukht. | 45.62 |
| | | *Tetrastrum triangulare* Chod. | 44.6 |
| 2.11 | 33 | *Achnanthidium minutissima* (Kütz.) Czarn. | 78.73 |
| | | *Acutodesmus dimorphus* (Turp.) Tsar. | 95.83 |
| | | *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim. var. *angustissima* (O. Müll.) Hust. | 112.9 |
| | | *A. italica* (Ehr.) Sim. | 112.28 |
| | | *Coelastrum microporum* Näg. in A. Br. | 65.45 |
| | | *Desmodesmus abundans* (Kirchn.) Hegew. | 89.2 |
| | | *D. serratus* (Corda) An et al. | 108.91 |
| | | *Golenkiniopsis parvula* (Woronikh.) Korsch. | 87.12 |
| 2.11 | 33 | *Micractinium pusillum* Fres. | 87.11 |
| | | *Ochromonas* sp. | 91.63 |
| | | *Stephanodiscus minutulus* (Kütz.) Cl. et Möll. | 99.79 |
| | | *Synedra acus* Kütz. var. *radians* (Kütz.) Hust. | 77.76 |
| 2.41 | 35 | *Amphora pediculus* (Kütz.) Grun. in A.S. et al. | 141.40 |
| | | *Chlorella vulgaris* Beijer. | 130.92 |
| | | *Chrysococcus biporus* Skuja | 137.26 |
| | | *Coelastrum indicum* Turn. | 220.89 |
| | | *Cyclotella stelligera* Cl. et Grun. in Cl. | 204.28 |
| | | *Desmodesmus denticulatus* (Lagerh.) An, Friedl et Hegew. | 166.31 |
| | | *D. opoliensis* (P. Richt.) Hegew. | 178.41 |
| | | *Microcystis wesenbergii* (Komárek) Komárek | 143.79 |
| | | *Navicula cryptocephala* Kütz. | 217.5 |
| | | *Nitzschia acicularis* (Kütz.) W. Sm. | 188.17 |
| | | *Oocystis lacustris* Chod. | 142.67 |
| | | *Placoneis elginensis* (Greg.) Cox f. *exigua* (Greg.) Bukht. | 190.58 |
| | | *Planothidium delicatula* (Kütz.) Round et Bukht. | 174.27 |
| | | *Staurosirella pinnata* (Ehr.) Will. et Round | 240 |
| | | *Tetraedron caudatum* (Corda) Hansg. | 192.03 |
| | | *T. minimum* (A. Br.) Hansg. | 232.31 |
| 2.71 | 33 | *Achnanthes hungarica* Grun. in Cl. et Grun. | 334.5 |
| | | *Chlamydomonas globosa* Snow | 434.89 |
| | | *Ch. pseudopertusa* Ettl | 465.31 |
| | | *Ch. reinhardtii* Dang. | 335.46 |
| | | *Cryptomonas* sp. 1 | 362.58 |
| | | *Cyclostephanos dubius* (Fricke) Round | 282.74 |
| | | *Cyclotella meneghiniana* Kütz. | 293.15 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | *Fragilariforma constricta* (Ehr.) Will. et Round | 400 |
| | | *Golenkiniopsis solitaria* (Korsch.) Korsch. | 268.08 |
| | | *Nitzschia palea* (Kütz.) W.Sm. | 304.43 |
| | | *Tetraedron minimum* (A.Br.) var. *apiculato-scorbiculatum* (Reinsch) Skuja | 425.36 |
| 3.01 | 35 | *Asterionella formosa* Hass. | 967.56 |
| | | *Cryptomonas marssonii* Skuja | 616.91 |
| | | *Cryptomonas* sp. 2 | 716.77 |
| | | *Cryptomonas* sp. 4 | 1015.99 |
| | | *Diatoma tenue* Ag. | 750.68 |
| | | *Dinobryon divergens* Imhof | 802.84 |
| | | *Franceia tenuispina* Korsch. | 837.76 |
| 3.01 | 35 | *Mallomonopsis* sp. | 708.44 |
| | | *Oocystis borgei* Snow | 535.23 |
| | | *Oscillatoria acutissima* Kuff. | 774.19 |
| | | *O. geminata* Menegh. ex Gomont | 677.4 |
| | | *O. splendida* Grev. ex Gomont | 744.87 |
| | | *Pseudoanabaena catenata* Lauterborn | 912.32 |
| | | *Rhoicosphenia abbreviata* (Ag.) L.-B. | 551.95 |
| | | *Siderocystopsis punctifera* (Boloch.) Hegew. et Schnepf | 846.75 |
| | | *Synedra acus* Kütz. | 608.4 |
| 3.31 | 22 | *Chilomonas paramaecium* Ehr. | 1475.71 |
| | | *Chlamydomonas* sp .2 | 1192.37 |
| | | *Cyclotella radiosa* (Grun.) Lemm. | 1534.42 |
| | | *Navicula radiosa* Kütz. | 1916.64 |
| | | *Stephanodiscus hantzschii* Grun. in Cl. et Grun. | 1094.78 |
| | | *Synedra ulna* (Nitzsch) Ehr. | 1248.87 |
| | | *Trachelomonas hispida* (Perty) F.F. Stein | 1415.81 |
| 3.61 | 12 | *Aulacoseira granulata* (Ehr.) Sim. | 2529.79 |
| | | *Cocconeis placentula* Ehr. | 3126.77 |
| | | *Cryptomonas borealis* Skuja | 3995.5 |
| | | *Oscillatoria agardhii* Gomont | 3463.3 |
| 3.91 | 13 | *Aphanizomenon flos-aquae* (L.) Ralfs | 4280.43 |
| | | *Chlamydomonas monadina* Stein | 5283.29 |
| | | *Diatoma vulgare* Bory | 7762.34 |
| | | *Gymnodinium* sp. 1 | 6064.22 |
| | | *Gymnodinium* sp. 2 | 7238.25 |
| | | *Melosira varians* Ag. | 4281.82 |
| | | *Peridiniopsis quadridens* (F. Stein) Bourr. | 5296.54 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| | | *Peridinium* sp. 1 | 5296.43 |
| 4.21 | 1 | *Anabaena flos-aquae* Bréb. | 10609.00 |
| 4.52 | 2 | *Euglena spirogyra* Ehr. | 28821.43 |
| | | *Gymnodinium* sp. 3 | 17137.03 |
| 5.12 | 1 | *Ceratium hirundinella* (O. Müll.) Bergh. | 83455.52 |

Самыми очевидными различиями для двух экосистем являются намного большее видовое разнообразие фитопланктона Каневского водохранилища и намного больший максимальный объем клеток фитопланктона оз. Киннерет (см. рис. 4). На основе применения статистических методов (иерархический кластерный анализ) для классификации спектров и количественной оценки их сходства (Kamenir et al., 2006) построена дендрограмма (рис. 5), на которой две экосистемы представлены в виде двух отдельных субкластеров. Иерархический кластерный анализ (дендрограма) показывает сходство между размерными спектрами, представленными как числовые векторы. Коэффициент корреляции Пирсона (*r*) использовали как меру подобия; для всех пар TTSS Каневского водохранилища $r$ = 0,868-0,975 и снижался до $r$ = 0,635 для пар из разных экосистем. Величины сходства пересчитаны в соответствующие расстояния с применением программы SPSS (при $n$ = 19).

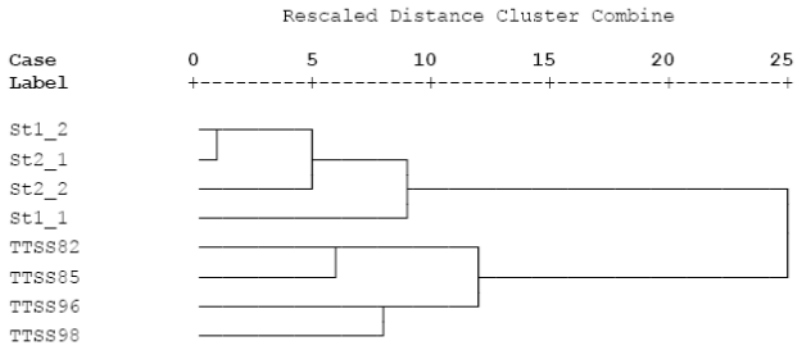



Рис. 5. Сравнение спектров TTSS фитопланктона Каневского водохранилища с TTSS двух разных периодов существования оз. Киннерет (по: Kamenir et al., 2006)

Все оценки сходства (коэффициент корреляции Пирсона *r*) были довольно высокие ($r$ > 0,63), тогда как для всех пар TTSS-кривых фитопланктона Каневского водохранилища $r$ = 0,868-0,975. Самая низкая оценка для Каневского водохранилища ($r$ = 0,868) описывает сравнение пар St1-1 (ст. 1, 1-й год) и St2-2 (ст. 2, 2-й год), что хорошо согласуется визуально (см. рис. 3). При рассмотрении всех типов размерных

спектров размерная фракция lg $V$ = 3,01 оказалась самой информативной для поиска влияния загрязнения на фитопланктон водных экосистем (см. рис. 2-4).

Посредством построения размерных спектров всего фитопланктонного сообщества для каждого полного годового цикла и сравнения пар таких годовых спектров мы показали долгосрочное сохранение общего вида размерных спектров фитопланктона, включая размерное распределение биомассы, и таксономическую размерную структуру, а также продемонстрировали некоторую чувствительность этих спектров к значительным воздействиям на экосистему. Одновременное использование нескольких типов размерных спектров можно рекомендовать при дальнейшем изучении фитопланктона для получения более полной информации об изменениях структуры водного сообщества (Kamenir, 2007).

Если климатические, гидрологические и многие другие важные экологические факторы могут быть причиной различий между двумя водными сообществами (Каневского водохранилища и оз. Киннерет), то городские загрязнения сточными водами, вероятно, являются основным фактором, ответственным за различия между двумя станциями Каневского водохранилища. Несмотря на некоторые различия „тонкой структуры", поразительное наглядное сходство общего вида TTSS-кривых является самым интересным и новым результатом этого сравнения.

**Заключение**

Сравнительный анализ структуры размерного спектра биомассы (BSS), нормализованного размерного спектра (NBS) и традиционного таксономического размерного спектра (TTSS), проведенный на образцах, собранных в течение мониторинга на протяжении 24 месяцев, позволяет выявить устойчивые характеристики экосистемы, а также получить информацию о деформациях структуры фитопланктона, вызванных значительным антропогенным загрязнением. Все три показателя (биомасса, численность фитопланктона и видовое разнообразие) были более высокими на загрязненной станции в устье р. Сырец. Размерная фракция lg $V$ = 3,01 оказалась самой информативной для поиска более детальных методов выявления влияния загрязненных вод на пресноводный фитопланктон.

**Благодарности**

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке гранта ИНТАС № 03-51-6196.

*Y. Kamenir[1], T.I. Mikhailyuk[2], A.F. Popova[2], R.B. Kemp[3] , Z. Dubinsky[1]*

[1] Marine Ecology Laboratory, Department of Biological Sciences,
The Mina & Everard Goodman Faculty of Life Sciences, Bar-Ilan University, Ramat-Gan, Israel

[2] M.G. Kholodny Institute of Botany, National Academy of Science of Ukraine,
2, Tereschenkovskaya St., 01001 Kiev, Ukraine

[3] Institute of Biological Sciences, University of Wales, Aberystwyth, SY23 3DA, Wales,UK

## THE EFFECTS OF ANTHROPOGENIC POLLUTION ON THE KANEV RESERVOIR (UKRAINE) PHYTOPLANKTON. 2. COMPARISON OF SIZE SPECTRUM PATTERNS

The results of a comparative study of the phytoplankton assemblage structure in two parts of the Kanev Reservoir, characterized by different levels of urban pollution, are presented. Analysis of pattern variability for several types of size spectra, namely the biomass size spectrum (BSS), the normalized biomass size spectrum (NBS) and the traditional taxonomic size spectrum (TTSS), was performed on the basis of a dataset produced by routine monitoring during a 24–month period at two stations in the Kanev Reservoir (Ukraine). Station 1 was situated in a relatively pure riverine part of the reservoir, whereas station 2 was located further down, at the mouth of the Syrets River, which carries the outflow of Kiev sewage. Both stations were characterized by markedly different phytoplankton composition and dynamics. While the BSS curves were very different, the annual NBS and TTSS curves exhibited a similar general pattern, with some differences evidenced in the fine structure of each spectrum. The obtained indices of the traditional taxonomic size spectrum (TTSS) that characterize the state of phytoplankton in a relatively pure area of the Kanev Reservoir (st. 1) and in st. 2, which was contaminated by urban drains of Kiev sewage at the mouth of the Syrets River, are compared with the same indices of a clean fresh-water reservoir, in particular Lake Kinneret (Israel). The impact of this urban pollution, as evidenced through the deformations of the size spectrum patterns, is discussed in detail.

*K e y w o r d s :* phytoplankton**,** anthropogenic pollution, size-frequency distribution, size spectra.

*Численко Л.Л.* Структура флоры и фауны в связи с размером организмов. – М.: МГУ, 1981. – 208 с.

*Щербак В.И., Майстрова Н.В.* Фитопланктон Каневского водохранилища, приустьевых областей основных притоков и его роль в формировании качества воды // Hydrobiol. J. – 1996. – **32**. – С. 16-26.

*Щербак В.И., Майстрова Н.В.* Сукцессии фитопланктона Каневского водохранилища (Украина) // Альгология. – 2000. – **10**, № 1. – С. 44-53.

*Kamenir Y.* Stability of Lake Kinneret phytoplankton structure as evidenced by several types of size spectra // Fund. and Appl. Limnol. – 2007. – **168**. – P. 345-354.

*Kamenir Y., Dubinsky Z., Zohary T.* The long-term patterns of phytoplankton taxonomic size-structure and their sensitivity to perturbation: A Lake Kinneret case study // Aquat. Sci. – 2006. – **68**. – P. 490-501.

*Mikhailyuk T.I., Kamenir Y., Popova A.F., Kemp R., Dubinsky Z.* The Kanev reservoir phytoplankton under anthropogenic pollution. 1. The phytoplankton dynamics in regions with different pollution effects // Algologia. – 2008. – **18**, N 1. – P. 37-49.

*Platt T., Denman K.* The structure of pelagic ecosystems // Rap. Proc. Réun. Cons. Intern. Explor. Mer. – 1978. – **173**. – P. 60-65.

*Sheldon R.W., Prakash A., Sutcliffe W.H.* The size distribution of particles in the ocean // Limnol. Oceanogr. – 1972. – **17**. – P. 327-340.

*Sieburth J.M., Smetacec V., Lenz J.* Pelagic ecosystem structure: Heterotrophic compartments and their relationship to plankton size fractions // Ibid. – 1978. – **23**. – P. 1256-1263.

*Smith F.A., Brown J.H., Haskell J.P. et al.* Similarity of mammalian body size across the taxonomic hierarchy and across space and time // Amer. Natur. – 2004. – **163**. – P. 672-691.

*Sneath P.H. A., Sokal R.R.* Numerical Taxonomy. – San Francisco: Freeman, 1973. – 573 p.

*Zohary T.* Changes to the phytoplankton assemblage of Lake Kinneret after decades of a predictable, repetitive pattern // Freshwat. Biol. – 2004. – **49**. – P. 1355-1371.

*Zohary T., Gal G., Imberger J.* Lake Kinneret water quality management support system. IOLR Rep., T19/00, KLL-IOLR. – 2000. – 117 p.

Получена 22.06.07

Подписала в печать О.Н. Виноградова