

УДК 574.5 : 556.535.8 : 574.583 : 561.26

**ПРИМЕНЕНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ТАКСОНОМИЧЕСКИХ ПРОПОРЦИЙ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ФИТОПЛАНКТОНА РЕКИ МОСКВА**

© 2017 В.Л. Разумовский, Л.В. Разумовский

Институт водных проблем РАН, г. Москва

Статья поступила в редакцию 20.10.2017

В работе описывается метод графического анализа, разработанный для озерных экосистем. В дальнейшем аналогичные закономерности были установлены для проточных водоемов. При анализе таксономической структуры пресноводных диатомовых комплексов было выделено три сценария их трансформации. Два сценария развиваются при воздействии на экосистему извне. Третий сценарий может развиваться в экосистеме, если меняются физико-химические свойства самой водной среды или морфометрические параметры водоема. Впервые при анализе изменений структуры фитопланктонных сообществ р. Москва (2006–2012 гг.) использован метод графического анализа таксономических пропорций. Исследования проводились на участке протяженностью 34 км, в пределах воздействия московского мегаполиса. Анализ трансформации структуры фитопланктона был основан на данных по общему количеству видов и их численности, с учетом и без учета редких таксонов. Выявлены закономерности поэтапной пространственной трансформации структуры речного фитопланктона.

Ключевые слова: графический анализ, фитопланктонные сообщества, таксономическая структура

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-05-00673

ВВЕДЕНИЕ

Проблема прогнозирования возможных негативных изменений в результате комплексного загрязнения речных вод, является приоритетным направлением в области природопользования и охраны окружающей среды. Как в планетарном, так и в региональном масштабе, гидросфера является системой, которая мобильно реагирует на подобное воздействие. К наиболее чувствительным системам относятся все речные системы, в том числе используемые для водоснабжения, рекреационного использования и сброса сточных вод городов.

В любой речной системе можно вычленить отдельные подсистемы, которые наиболее показательно регистрируют смену природных и антропогенных воздействий. В эту категорию, безусловно, входят фитопланктонные сообщества, поскольку они являются структурообразующей группой для большинства речных экосистем.

Река Москва является зарегулированным водоемом, который испытывает многокомпонентное антропогенное воздействие различного масштаба и генезиса [2, 3]. Кроме того, акватория реки испытывает значительное воздействие со стороны биологически очищенных сточных вод поступающих из очистных сооружений [18].

Разумовский Викентий Львович, кандидат географических наук, научный сотрудник. E-mail: nethaon@mail.ru
Разумовский Лев Владимирович, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник.
E-mail: lazy-lion@mail.ru

Метод графического анализа (МГА) неоднократно описывался в научной литературе [11, 13]. Однако он никогда не применялся к фитопланктонным комплексам в целом, а исключительно к комплексам и ассоциациям диатомовых водорослей. Поэтому, в этой статье, приведено краткое изложение МГА.

Основная цель проведенных исследований: оценить степень информативности МГА и допустимость его применения при анализе пространственно-временных трансформаций фитопланктонных комплексов.

Для этого было необходимо решить следующие задачи:

1. Проанализировать видовой состав и сезонную изменчивость фитопланктонных комплексов Реки Москва в районе мегаполиса.
2. Адаптировать метод графического анализа, разработанный для диатомовых комплексов, для анализа таксономической структуры фитопланктонных комплексов в целом.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Исходно МГА был разработан при пространственных исследованиях донных комплексов диатомовых водорослей из современных озерных осадков. Были изучены более 120 озер из различных регионов Европейской части России [11, 13, 6]. Анализ трансформации структуры диатомовых комплексов во времени был изучен по колонкам донных отложений из 15 озер, расположенных в различных ландшафтно-клима-

тических областях [11, 7, 15]. При применении разработанной методики анализа, озера были разделены по двум категориям размерности: с площадью водного зеркала менее 1 км² (малые) и с площадью водного зеркала от 1 до 4 км² (средние).

Закономерности трансформации, которые были выявлены для диатомовых комплексов из озер, имеют аналоги, которые наблюдаются в речных экосистемах [9, 14].

Метод графического анализа состоит в следующем: при построении графиков по оси абсцисс откладывается число идентифицированных таксонов видового и более низкого рангов (далее в тексте – таксонов), а по оси ординат – их относительная численность. Таксоны ранжируются по показателю относительной численности в сторону его уменьшения. По относительной численности таксоны разделяют на группы: доминирующие (обычно не менее 8-10 % от комплекса), сопутствующие (более 1-2 %) и редкие (обычно менее 1 %). В результате, в линейной системе координат строится исходный график или гистограмма (рис. 1 а, б).

Анализ полученных графиков (гистограмм) проводится в линейной и логарифмической системе координат (рис. 1). В логарифмической системе координат анализируются не сами графики, а их тренды, представленные результирующими прямыми линиями (рис. 1 в, г). Эти линии образуют генерации определенных очертаний.

В линейной системе координат были выделены два типа графиков естественной, ненарушенной структуры таксономических пропорций в диатомовых комплексах.

Один из них своим очертаниям близок к экспоненциальной зависимости и характерен для малых озер («простых» систем). Для озер среднего размера («сложных» систем) форма полученных графиков имеет определенное подобие с логистической зависимостью [17].

Оба типа графиков отражают, в той или иной степени, исходные, прижизненные таксономические пропорции в диатомовых комплексах. Они соответствуют двум из трех основных нециклических форм зависимостей, которые возникают в экосистемах при их ответных реакциях на внешнее воздействие [17].

В линейной системе координат у полученных графиков или гистограмм всегда образовывался «хвост» состоящий из редких и случайных таксонов, имеющих незначительную относительную численность в комплексе. Это представители таксонов, присутствие или отсутствие которых в каждом биотопе имеет спорадический или случайный характер. Общая совокупность этих таксонов полностью попадает под определение «статистический шум».

Доминирующие и сопутствующие таксоны составляют около 2/3 от общей относительной численности в комплексе [4]. Это приблизительно соответствует 2σ (где σ – стандартное от-

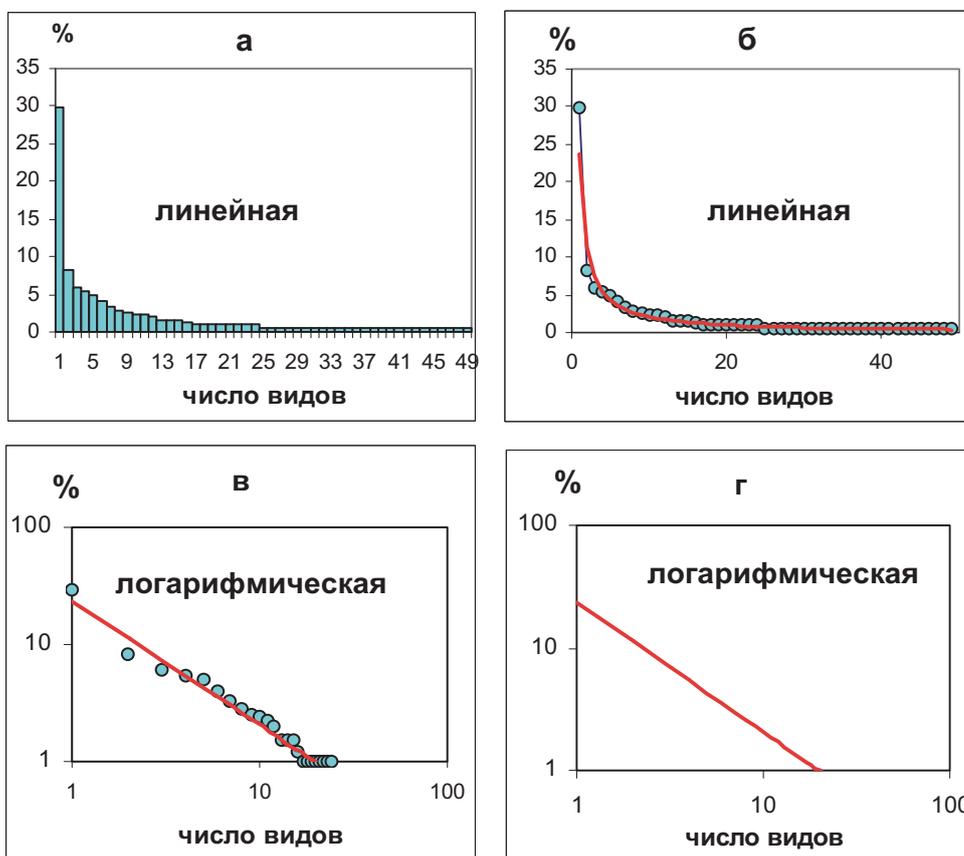


Рис. 1. МГА таксономической структуры диатомовых комплексов [11]

клонение при нормальном распределении). Поэтому, в логарифмической системе координат результирующие линии строились двумя способами: с учетом всего спектра таксонов (чтобы не потерять часть информации) и только с учетом доминирующих и сопутствующих таксонов. В последнем случае 1/3 от общей относительной численности («хвост» гистограммы) не учитывалась.

Во всех случаях, в логарифмической системе координат, для результирующих линий рассчитывался коэффициент детерминации (R^2), позволяющий оценить статистическую достоверность проводимых графических построений. Достоверность оценивается по коэффициенту корреляции (r), который должен быть более 0,75 (соответственно $R^2 > 0,57$).

При анализе в логарифмической системе координат были выделены три основных сценария пространственно-временной трансформации таксономических пропорций (рис.2).

Первый сценарий подразумевает образование «пучка» результирующих линий с единым центром локализации (рис. 2 а). При усилении внешнего негативного воздействия происходит «вращение» результирующих линий вокруг некой точки или локальной области. Этот процесс происходит до определенного предела, после чего результирующие линии перемещаются из области гипотетического «вращения», что соответствует стадии деградации экосистемы и распаду единой генерации результирующих линий.

Второй из выделенных сценариев трансформации таксономической структуры диатомовых комплексов в логарифмической системе координат

этапе трансформации это выражается в форме веерообразного «разворота» вокруг некой общей области или центра локализации (рис. 2 б). При увеличении негативного воздействия происходит фазовый переход, и дальнейшая трансформация происходит по первому сценарию.

Существует третья модель (сценарий) трансформации, которую нельзя свести к двум первым – параллельное расположение линий (рис. 2в). Такое расположение результирующих линий было впервые выявлено вдоль температурного градиента подогретых вод поступающих из сбросового канала Кольской атомной электростанции (оз. Имандра) [8]. Аналогичное явление было отмечено для группы озер с разным показателем pH [1]. Кроме того, параллельное расположение результирующих линий характерно для озер, в которых протекают процессы быстрого изменения глубин (обмеления или повышения уровня воды). Эти процессы были отмечены в озерах: Галичское (Костромская обл.), Большое (Краснодарский край), Глубокое (Московская обл.), Нижнее Хаймашинское (Республика Кабардино-Балкария) [6-8, 12, 15].

Структуру и объем первичного материала составили 355 интегральных проб, отобранных с 2006 по 2012 год с 6 створов Москвы-реки (рис. 3). Пробы отбирались ежемесячно в течение года (кроме Тушино – ежесезонно). Отбор проб, подсчет и идентификация видового состава фитопланктона проводился по стандартным методикам [16]. Всего было идентифицировано более 900 видов.

Анализ всего массива данных, полученных в результате обработки фитопланктонных проб, вынудил пересмотреть классификационные определения «доминирующие таксоны» и «сопутствующие таксоны», сформулированные ранее для озерных диатомовых комплексов, применительно к фитопланктонным комплексам. К категории доминирующих таксонов были отнесены таксоны, достигающие не менее 10% относительной численности в комплексе [5], а к категории сопутствующих таксонов были отнесены таксоны, достигающие не менее 5% относительной численности в комплексе. Кроме того, при анализе первичного массива данных и построении графиков характеризующих таксономические пропорции в фитопланктонном комплексе был использован ряд методологических приёмов, позволивших наиболее объективно описать их пространственно-временные трансформации.

Обычно, подсчет процентных пропорций в микрофлористических комплексах из поверхностных осадков водоемов проводится в конце осени, после окончания сезона вегетационной активности, когда произошло отмирание клеток и их оседание на дно.

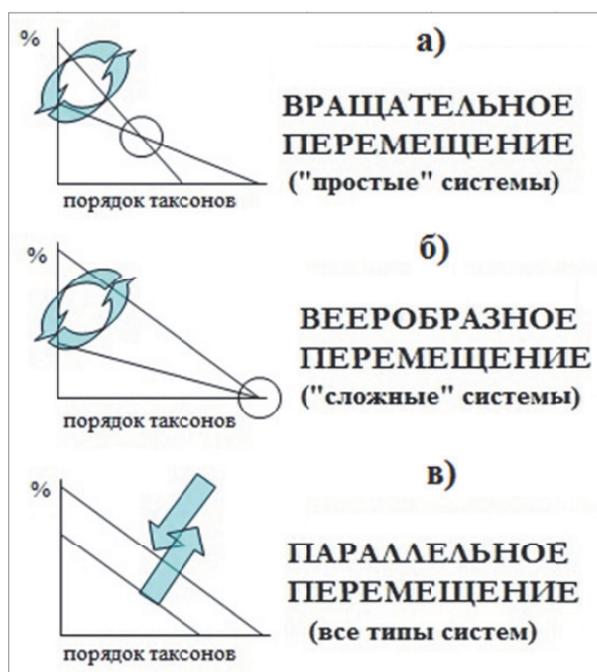


Рис. 2. Основные сценарии трансформации таксономической структуры диатомовых комплексов в логарифмической системе координат

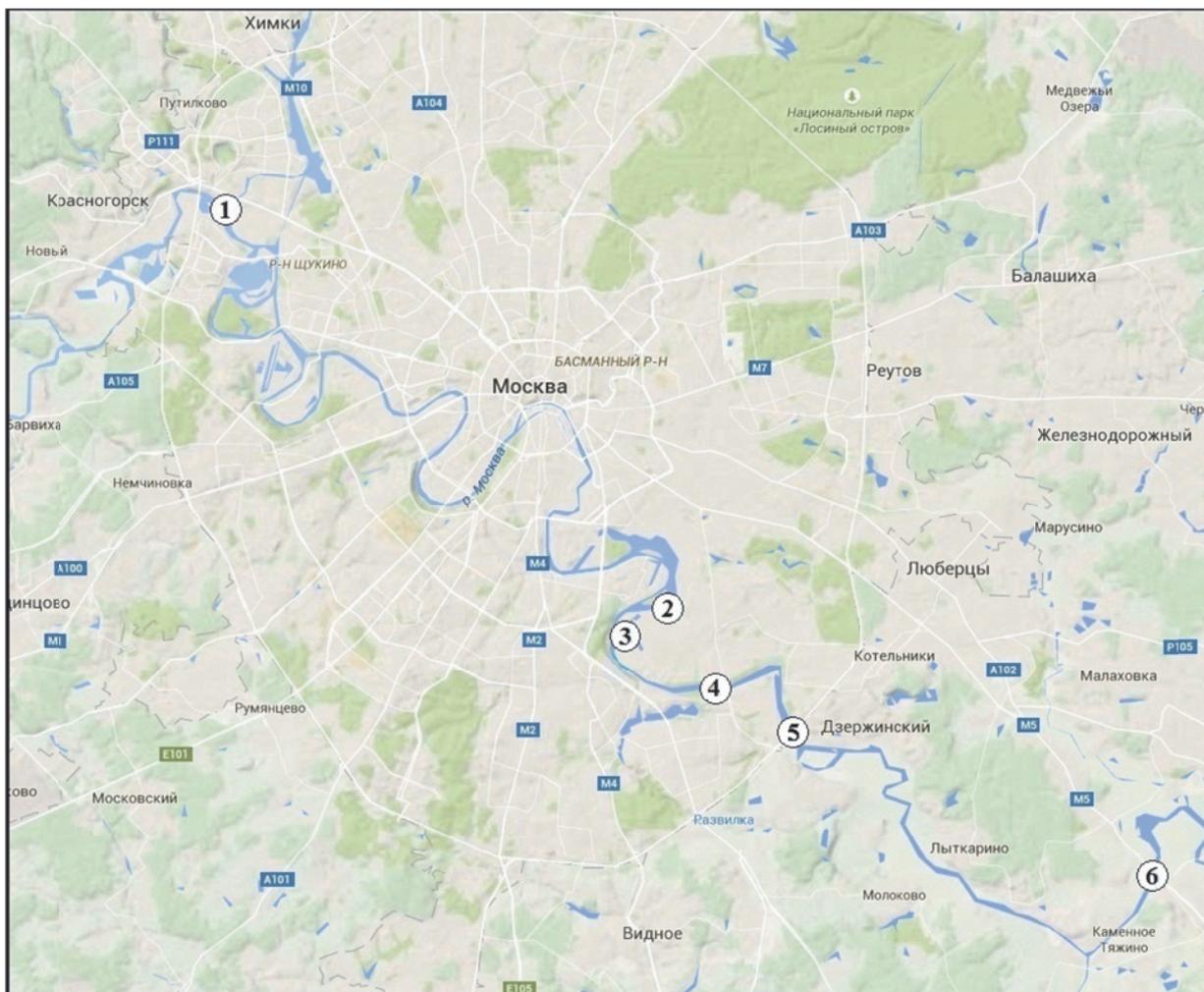


Рис. 3. Карта-схема расположения пунктов отбора проб на р. Москва: 1 – Тушино; 2 – Перерва; 3 – Курьяново (КОС); 4 – Братеево; 5 – Беседы; 6 – Заозерье

При анализе фитопланктонных комплексов реки была симитирована эта ситуация: все просмотренные фитопланктонные комплексы, развивавшиеся водной среде с весны по осень в данном пункте наблюдения, были совместно проанализированы и абсолютная численность клеток всех идентифицированных таксонов просуммирована.

В итоге для всех идентифицированных таксонов была рассчитана их относительная численность за весь сезон вегетационной активности в данном пункте за конкретный год. Полученные процентные пропорции послужили исходным информационным материалом для всех дальнейших графических построений. Проведенные расчеты позволили сопоставить таксономическую структуру фитопланктонных комплексов во времени и пространстве, вне зависимости от сроков отбора фитопланктонных проб (которые могли не совпадать) и числа наблюдений в каждом пункте (если эти наблюдения проводились в течение всего периода вегетационной активности).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графический анализ таксономической структуры фитопланктонных комплексов проводился в логарифмической системе координат. При анализе всего спектра таксонов часть информации было невозможно выявить. Это определялось присутствием в фитопланктонных комплексах большого количества видов с оценкой «редко», которые попадали под понятие «статистический шум».

Анализ группы доминирующих и сопутствующих таксонов оказался более информативным. Он позволил установить картину трансформации фитопланктонных комплексов вдоль русла реки Москва в пунктах ежегодного наблюдения.

В пункте наблюдения Тушино была выявлена единая область локализации полученных результирующих линий (рис. 4а), несмотря на выраженное присутствие двух типов фитопланктонных сообществ: речного и озерного (поступающего из водохранилищ). Можно с достаточной степенью уверенности предположить, что

при объединении речного фитопланктона и фитопланктона поступающего из водохранилища, в районе Тушино уже произошло формирование единого комплекса.

Далее, в районе пункта наблюдения Перерва фитопланктонные сообщества испытывают выраженное влияние загрязненных диффузионных стоков, негативное воздействие которых на фитопланктонные комплексы выходит за рамки локального.

Поэтому полученные результирующие линии не образуют выраженной генерации: имеется только некая, весьма «размытая» область локализации (рис. 4б). Следует отметить, что данная область локализации расположена «ниже» значения 10% по оси у. Это свидетельствует об отсутствии в этой части речного русла

сформировавшейся и устойчивой группировки доминирующих видов. Кроме того, результирующая линия, построенная для 2010 г., когда были отмечены аномально-высокие летние температуры, не включена в единую генерацию результирующих линий. Линия располагается ниже области локализации, что указывает на хаотизацию и разрушение таксономической структуры диатомовых комплексов в сезон 2010 г.

На выходе из Курьяновских очистных сооружений (КОС) единый центр локализации также нарушен. Только часть построенных результирующих линий образуют единый центр локализации (2008-2010 гг., 2012 г.). Результирующие линии, построенные для сезонов 2006 г., 2007 г. и 2011 г. образуют вторую генерацию (рис. 4в). В этой генерации линии расположены парал-

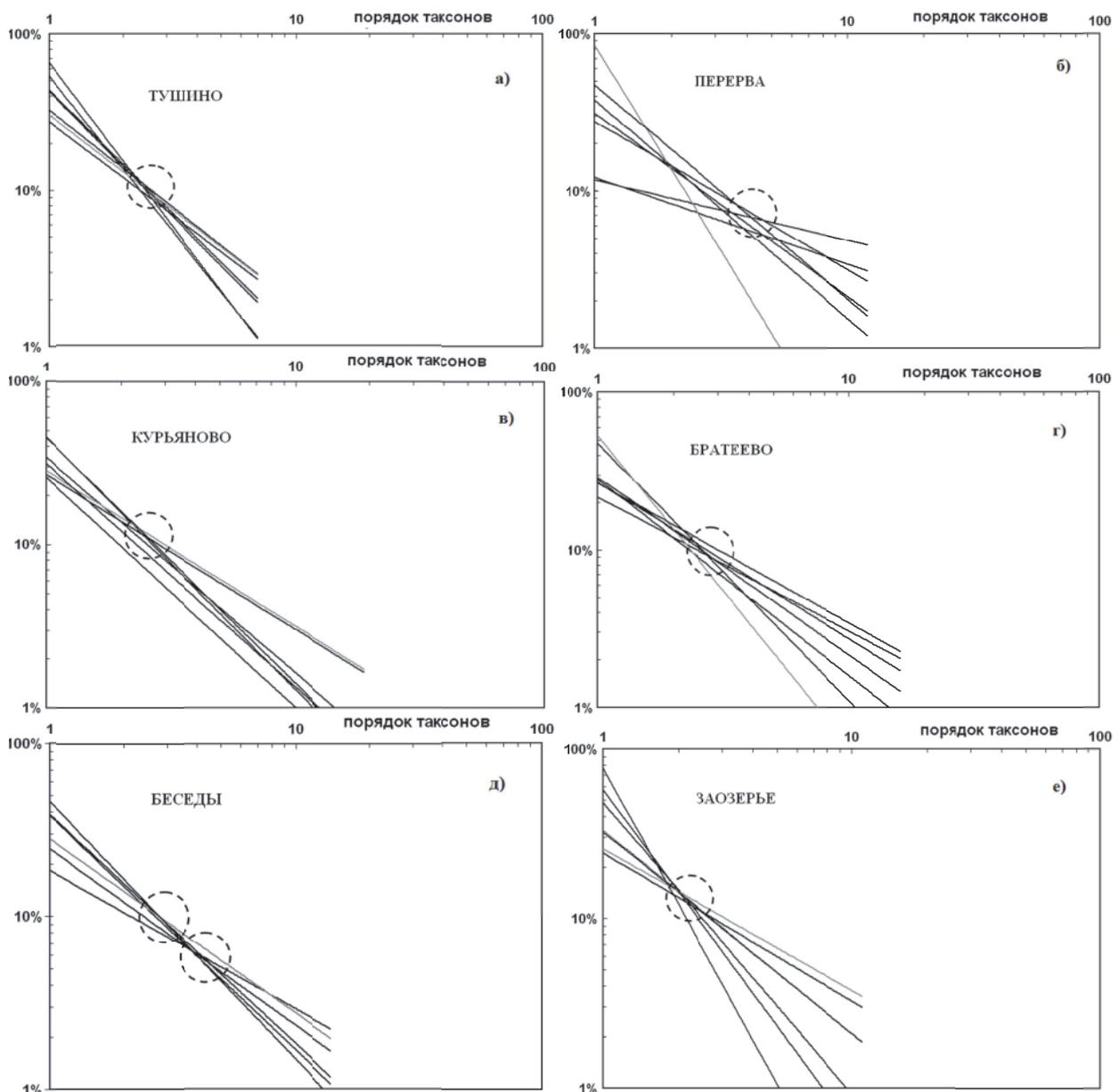


Рис. 4. Трансформация таксономической структуры фитопланктонных комплексов р. Москва (2006-2012 гг.) в логарифмической системе координат. Серым цветом выделены результирующие линии, построенные для 2010 г.

тельно. Это объясняется тем, что в КОС фитопланктон непрерывно получает питательный субстрат в виде поступающих стоков и отсутствует возможность поступления новых видов. Структура поддерживается внешними факторами, а не внутренними закономерностями самого сообщества.

Следует так же отметить, что результирующая линия, построенная для сезона 2010 г. включена в генерацию линий с единым центром локализации. Следовательно, воздействие очищенных вод благотворно повлияли на фитопланктонные сообщества. Несмотря на аномально-высокие температуры, процесс хаотизации в их таксономической структуре не наблюдался. Следовательно, воздействие очищенных вод благотворно повлияли на фитопланктонные сообщества. Несмотря на аномально-высокие температуры, процесс хаотизации в их таксономической структуре не наблюдался.

Это естественно, так как температурный режим КОС в 2010 году не был столь аномальным для этого сообщества, которое каждое лето функционирует при температуре около 25°C, в 2010 г. температура была выше, лишь на 2-3°C. В то же время для речного сообщества разница по отношению к средним значениям составляла около 10 °С.

В районе Братеево наблюдается несколько разнонаправленных процессов. С одной стороны, происходит восстановление единой генерации результирующих линий. Зона локализации результирующих линий по-прежнему имеет достаточно «размытые» границы. С другой стороны, наблюдается смещение зоны локализации по оси *x* влево (рис. 4г). Это свидетельствует об уменьшении числа доминирующих видов, которые формируют целостность таксономической структуры фитопланктонных комплексов.

В районе пункта Беседы для полученной генерации результирующих линий выявлено два центра локализации (рис. 4д). Один из них расположен выше значений 10%, а другой в области значений 5%. Это свидетельствует о том, что помимо группы доминирующих видов в фитопланктонном комплексе начала формироваться устойчивая группа сопутствующих видов.

В районе Заозерья генерация результирующих линий приобретает упорядоченный характер с единой областью локализации (рис. 4е). Область локализации лежит по оси *y* выше значения 10%: фитопланктонное сообщество сформировалось, и его трансформация и целостность определяется, в первую очередь, устойчивой группировкой доминирующих видов.

Общий сценарий пространственно-временной трансформации фитопланктонного сообщества в черте мегаполиса можно описать следующим образом: в районе Тушино сфор-

мировавшееся фитопланктонное сообщество имеет достаточно устойчивые параметры. В дальнейшем, под воздействием загрязненных диффузионных стоков в районе Перервы, фитопланктонное сообщество подвергается существенной деструктуризации. Его целостность частично восстанавливается после поступления очищенных вод из КОС. Здесь в районе выпуска наблюдается самое высокое разнообразие фитопланктонного сообщества. Однако, следует отметить, что фитопланктонные комплексы КОС сами не обладают единой целостной структурой, так функционируют в «искусственных условиях» повышенной температуры и избытка питательных элементов. Поэтому их воздействие имеет двойственный характер: они обогащают речное сообщество новыми видами, но поступивший фитопланктон не адаптирован к речным условиям и менее «конкурентноспособен». Далее, в результате поэтапного формирования доминирующей и сопутствующей группы видов на участке Братеево – Беседы – Заозерье происходит сокращение видового разнообразия и стабилизация фитопланктонных сообществ.

ВЫВОДЫ

1. МГА применим при анализе таксономического состава речного фитопланктона, и позволяет получить значимую информацию о происходящих в фитопланктонных сообществах изменениях во времени и пространстве.

2. В черте города антропогенное воздействие существенно преобладает над естественными процессами трансформации структуры речных фитопланктонных сообществ.

3. Нарушение таксономической структуры фитопланктонных сообществ в равной степени выражено как при негативном воздействии со стороны загрязненных диффузионных стоков, так и при воздействии со стороны биологически очищенных вод, поступающих в р. Москва.

4. В дальнейшем происходит естественное уменьшение таксономического разнообразия за счет доминирования видов наиболее адаптированных к гидрологическим условиям в черте мегаполиса, что выражается в процессах естественной трансформации структуры фитопланктонных сообществ.

5. Из природных процессов выраженное воздействие (негативного характера) было установлено только для аномально-высоких летних температур в 2010 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алимов А.Ф. Элементы теории функционирования водных экосистем. СПб.: Наука, 2000. 147 с.
2. Государственный доклад «О состоянии окружаю-

- щей природной среды Московской области в 2000 году». М.: НИИ-Природа, 2001. 114 с.
3. Государственный доклад «О состоянии окружающей природной среды Московской области в 2002 году». М.: НИИ-Природа, 2003. 314 с.
 4. *Джонгман Р.Г.Г., Тер Браак С.Дж.Ф., Ван Тонгерен О.Ф.Р.* Анализ данных в экологии сообществ и ландшафтов. / Под ред. *Гельфанда А.Н., Новиковой Н.М., Шадринной М.Б.* М.: РАСХН, 1999. 306 с.
 5. *Кузьмин Г.В.* Фитопланктон // Методика изучения биогеоценозов внутренних водоемов. М.: Наука, 1975. С. 73–90.
 6. *Разумовский В.Л.* Оценка экологического состояния высокогорных озер Приэльбрусья по результатам диатомового анализа // *Водные ресурсы.* 2014. Т. 41. № 2. С. 200–205.
 7. *Разумовский В.Л.* Формирование экосистемы карстового озера в степном поясе гор Кавказа (диатомовый анализ) // *Аридные экосистемы.* 2014. № 2 (59). С. 69 – 73.
 8. *Разумовский Л.В.* Биоиндикация уровня антропогенной нагрузки на тундровые и лесотундровые ландшафты по диатомовым комплексам озер Кольского полуострова. М.: ИРЦ Газпром, 1997. 92 с.
 9. *Разумовский Л.В.* Оценка качества вод на основе анализа структуры диатомовых комплексов // *Водные ресурсы.* 2004. Т. 31. №6. С.742–750.
 10. *Разумовский Л.В.* Реконструкция температурных циклов и сукцессионных изменений по диатомовым комплексам из донных осадков на примере Галичского озера // *Водные ресурсы.* 2008. Т. 35. № 6. С. 595 – 608.
 11. *Разумовский Л.В.* Оценка трансформации озерных экосистем методом диатомового анализа. М.: ГЕОС, 2012. 199 с.
 12. *Разумовский Л.В., Гололобова М.А.* Трансформация диатомовых комплексов из озер Борое и Глубокое в конце позднего голоцена // *Вестник Московского Государственного Университета. Биологическая серия.* 2014. №1. С.19 – 23.
 13. *Разумовский Л.В., Моисеенко Т.И.* Оценка пространственно-временных трансформаций озерных экосистем методом диатомового анализа // *Докл. РАН.* 2009. Т. 429. №2. С. 274–277.
 14. *Разумовский Л.В., Чермных Л.П.* Метод графического сопоставления структуры перифитонных диатомовых комплексов в оценке влияния природной и антропогенной нагрузки на качество среды малых рек // *Труды кафедры химии, новых технологий и материалов: Международный университет природы, общества и человека «Дубна»,* 2014. Вып. 1. С. 232 – 246.
 15. *Разумовский Л.В., Шелехова Т.С., Разумовский В.Л.* Новейшая история озер Большое и Зеркальное по результатам диатомового анализа // *Водные ресурсы.* 2015. Т. 42. №2. С. 222 – 227.
 16. Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем [ред. В.А. Абакумов]. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 320 с.
 17. *Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. М.: Наука. 2005. Кн.1. 281 с.
 18. *Щеголькова Н.М., Венецианов Е.В.* Охрана загрязненной реки: интенсификация самоочищения и оптимизация водоотведения. М.: РАСХН, 2011. 388 с.

THE TAXONOMIC PROPORTIONS GRAPHICAL ANALYSIS USAGE IN THE STUDY OF MOSCOW RIVER PHYTOPLANKTON

© 2017 V.L. Razumovskiy, L.V. Razumovskiy

Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow

The method of graphic analysis elaborated for the lake ecosystems is described. Subsequently the similar regularities were established to the flowing water bodies. When analysing the taxonomic structure three scenarios of the transformation of freshwater diatom assemblages were allocated. Two scenarios develop in reply to the impact on the ecosystem from without. The third scenario could develop in the ecosystem, if changing the physicochemical properties of the aqueous medium or morphometric parameters of the reservoir. The taxonomic composition of phytoplankton communities in the Moscow River was studied in the area of Moscow megalopolis during 2006–2012. The samples were collected in 34 km length section of Moscow megalopolis impact zone. To analyze the structural transformation we estimated the total number of species and abundance of phytoplankton, and also used the analysis of taxonomic structure of diatom complexes with and without taking into account rare taxa. The basic regularities of spatial transformation of river phytoplankton were revealed.

Keywords: graphical analysis, phytoplankton assemblages, taxonomic structure.

Vikenty Razumovskiy, Candidate of Geography, Research Fellow. E-mail: nethaon@mail.ru

Lev Razumovskiy, Doctor of Geography, Leading Research Fellow. E-mail: lazy-lion@mail.ru