

УДК 581.9 (470.325)

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПОДХОДЫ К ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАНЫХ ПРИ ИЗУЧЕНИИ АНТРОПОГЕННО ТРАНСФОРМИРОВАННЫХ ФЛОР*

В.К. Тохтарь

Белгородский государственный национальный исследовательский университет

Традиционные методы анализа антропогенно трансформированных флор достаточно информативны для определения лишь основных тенденций, которые происходят в их структурах. В то же время, для углубленного изучения мозаичных синантропных флор необходимо более широкое внедрение современных методов многомерной статистики и разработка новых методов анализа. Перспективность этих методов определяется возможностью установления взаимосвязей между широким комплексом флористических данных и характеристиками окружающей среды, которые могут быть легко визуализированы. Эти методы дают возможность анализировать огромные объемы неоднородных данных с помощью пакетов компьютерных программ, определять главные факторы, вызывающие те или иные изменения во флорах. Использование методов визуализации данных при исследовании флор, которые формируются в техногенных экотопах, подтвердило их целесообразность и перспективность относительно определения главных действующих факторов, которые детерминируют процессы антропогенной трансформации флор.

Ключевые слова: *антропогенно трансформированные флоры, сравнительная флористика, методы многомерной статистики, визуализация данных*

Создание глобальной сети техногенных экотопов во всем мире кардинально влияет на ход естественного флорогенеза, что приводит к существенной антропогенной трансформации фитобиоты большинства регионов. Вследствие этого возникла необходимость исследования проблем формирования и развития не только флор региональных, но и флор топологического уровня, изменения которых, под влиянием антропогенных факторов, могут идти в разных, даже противоположных направлениях.

В техногенных экотопах значительному изменению подверглись косные и биотические их компоненты. Флора здесь практически полностью уничтожена и во многих случаях формируется заново за счет останцев флор, апофитов и адвентивных видов [1; 2; 18]. Использование традиционных методов сравнительной флористики для выявления

* Исследования выполнены в рамках реализации государственного задания Министерства образования и науки РФ Белгородским государственным национальным исследовательским университетом на 2013 год (№ проекта 5.2614.2011)

специфики этих крайне мозаичных, динамичных и нестабильных флор чаще всего позволяет выявить лишь общие закономерности их формирования, не раскрывая сути тех или иных процессов.

В ходе изучения флор, которые развиваются в техногенных экотопах степной зоны сопредельных областей России (в пределах административных границ Белгородской обл.) и юго-востока Украины (Донецкая и Луганская обл.) были опробованы как традиционные методы флорогенетического анализа, так и методы многомерной статистики, в частности, дискриминантный, факторный анализы, анализ соответствий и анализ соответствия канонических корреляций (Тохтарь, 2005; Тохтарь и др., 2009). Использовались также оригинальные методы визуализации данных структур флор и процедуры классификации флор. Данные обрабатывались с помощью современных пакетов компьютерных программ Microsoft Excel XP, Statistica 4.7, Statistica 6.0, Canoco for Windows 4.02, CanoDraw 3.1., CanoPost 1.0. Использование методов многомерной статистики на примере изучения флор техногенных экотопов позволило выявить характерные черты и основные факторы, детерминирующие их развитие. Это позволяет создавать модели развития флоры, которые, в зависимости от целей исследования могут быть классификационными, историческими и прогностическими.

В основе формирования антропогенно трансформированных флор функционируют универсальные механизмы, которые характерны и для развития естественных флор. Однако визуализация данных с помощью использования методов многомерной статистики дает особенно большие возможности для выявления взаимозависимостей между синантропными флорами в силу сходства видового состава и процессов их формирования в различных природно-климатических зонах.

На основании данных, полученных в наших исследованиях, в сферу действия методов сравнительной флористики следует вводить методы многомерной статистики: факторного и дискриминантного анализов и методов соответствия канонических корреляций. Они дают возможность провести классификацию объектов и установить точные статистические дистанции между флорами на основании, например, коэффициентов Жаккара, которые могут быть визуализированы в факторном пространстве. Кроме того, во многих случаях статистические методы позволяют определить "скрытые" закономерности и факторы формирования флор.

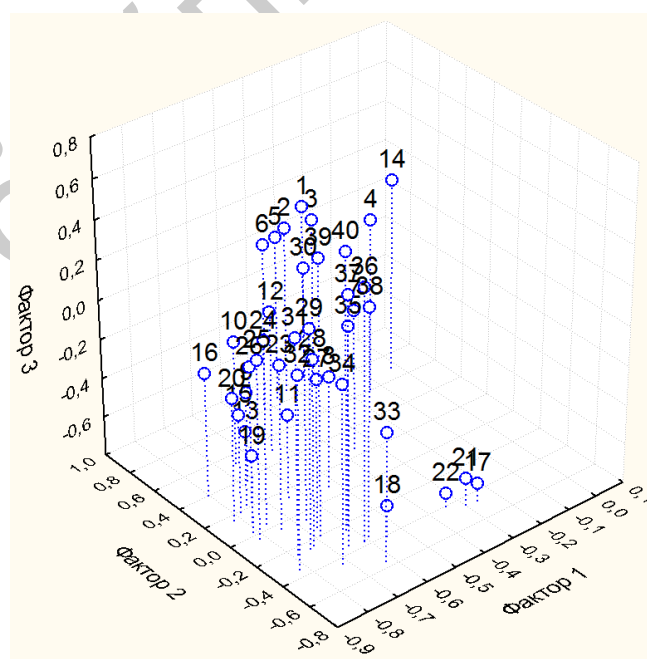
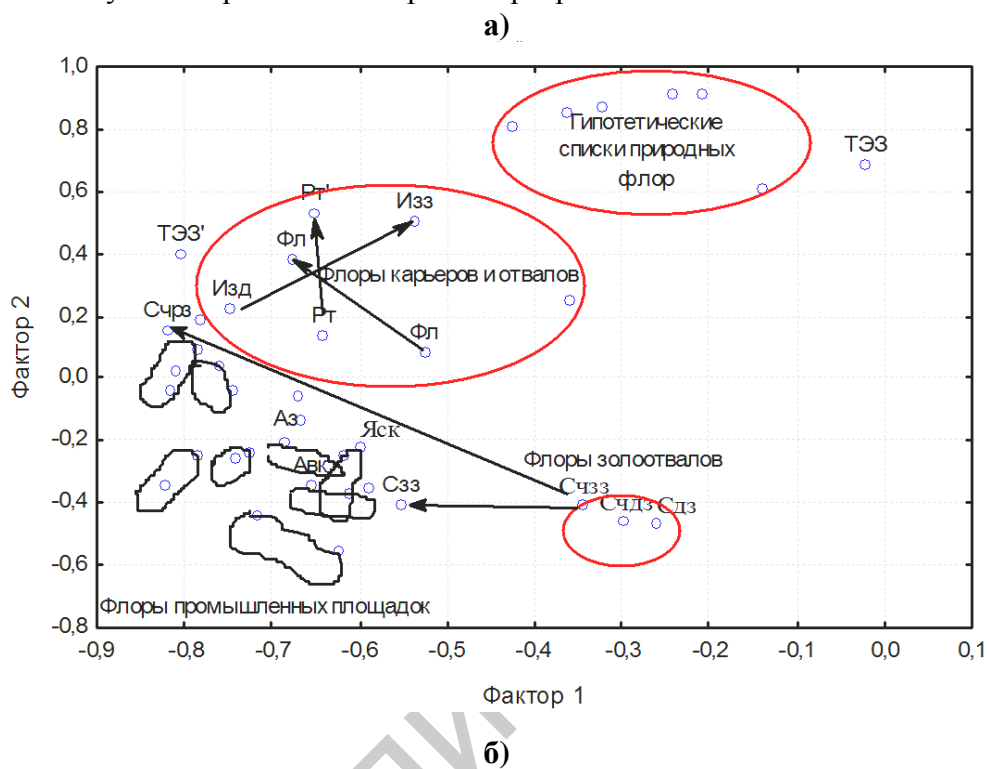
Исследование флористических данных с помощью факторного анализа (рис. 1) позволило дифференцировать изученные списки флор в многомерном пространстве и визуализировать значительный объем статистических данных, основанных на 1599-ти коэффициентах сходства Жаккара. При статистическом анализе были выделены три

фактора, объясняющие около 70% варьирования флористических данных, а также основные нагрузки, вносимые флорами в эти факторы. Анализ значений, вносимых флорами в выделенные факторы, свидетельствует о том, что первый фактор связан с преобладанием техногенной нагрузки во флорах. Второй фактор может быть идентифицирован как «фактор силы антропогенного воздействия». Учитывая то, что значимые нагрузки в формирование третьего фактора вносят лишь флоры золоотвалов, он может быть назван «фактором первичных техногенных экотопов». Таким образом, изучение диаграммы разброса статистических данных на рис. 1 позволяет сделать некоторые выводы о степени сходства крайне мозаичных, сходных по структуре флор, степени их взаимосвязи и особенностях динамики (смещения флор во времени в факторном пространстве отмечены на рис. 1 стрелками).

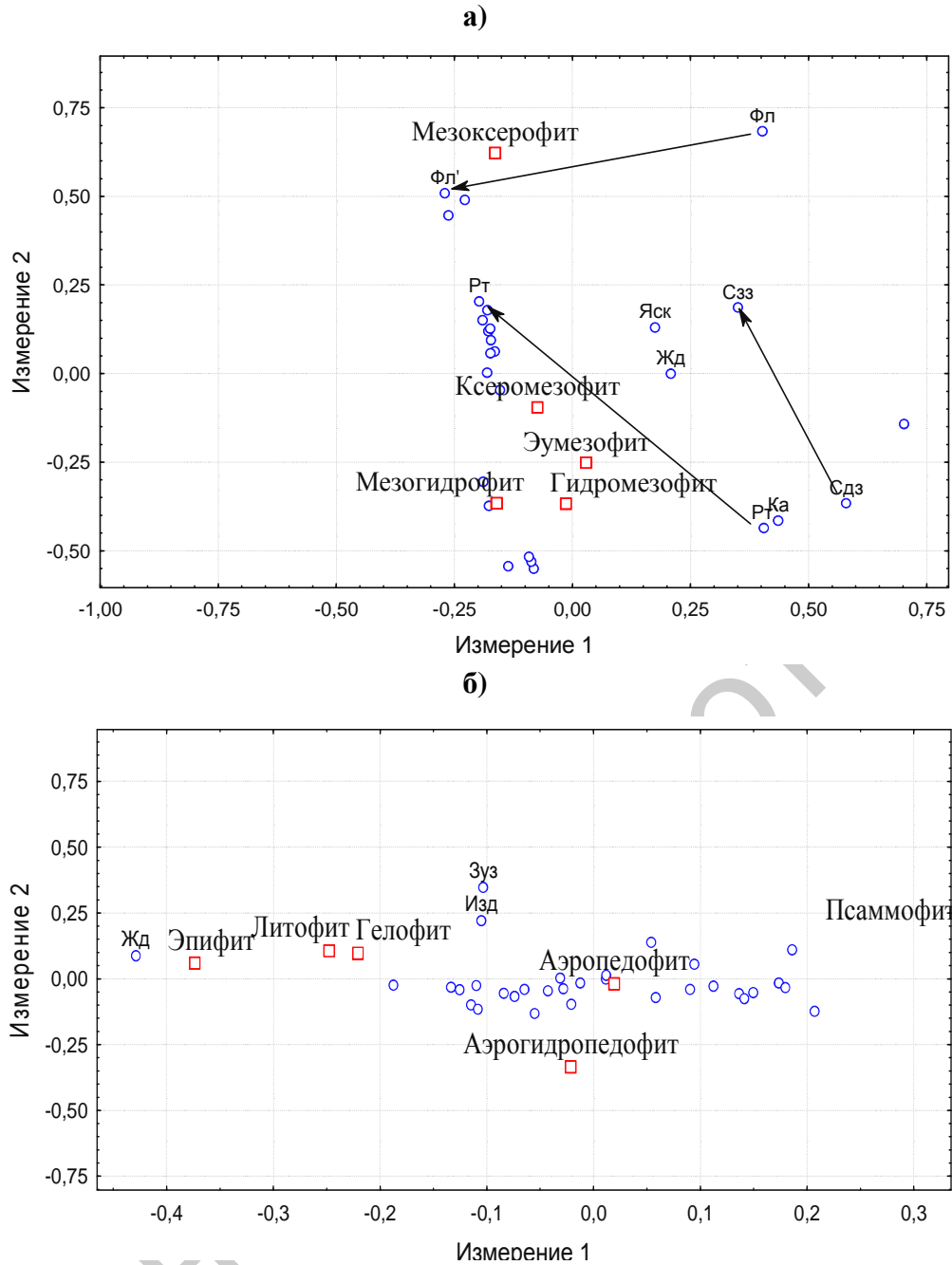
Другим перспективным методом в оценке флор является анализ соответствий (Correspondence Analysis), который позволяет получить визуальную количественную оценку структуры таблиц сопряженности признаков большой размерности на основе вычисления расстояний χ -квадрат между категориальными данными. Поэтому этот метод был впервые опробован и успешно применен для анализа типологических структур флор в процессе их развития [3]. С его помощью, в факторном пространстве, впервые проведена визуальная оценка сходства частот встречаемости жизненных форм видов в структурах флор, находящихся на разных этапах их формирования.

Выявление закономерностей формирования флор в зависимости от особенностей экологических ниш видов по отношению к специфичному антропогенному субстрату является достаточно сложной исследовательской задачей. Многочисленные, разработанные для видов экологические шкалы по их отношению к факторам среды до настоящего времени не дали возможности четко оценить ни эти условия, ни осуществить достоверный прогноз распространения видов или сообществ вдоль градиентов среды, хотя такие попытки происходят постоянно и, в некоторых случаях, могут давать неплохие результаты. Несмотря на то, что индикаторные оценки видов, полученные по шкалам, и результаты ординации иногда имеют достаточно высокую корреляцию, характеристики видов, установленные ранее по отношению к отдельно взятому градиенту среды, изменяются при их взаимодействии. До сих пор еще до конца не известны главные экологические детерминанты развития популяций различных видов и растительных группировок, в особенности, если это касается антропогенных факторов, которые не имеют природных аналогов. Поэтому использование биоиндикационных методов исследований вместе с методами, позволяющими выявить экологические ниши видов, следует считать одними из наиболее перспективных для изучения

закономерностей формирования антропогенно трансформированных флор. В этом отношении многообещающими являются методы, используемые в различных версиях программ CANOCO for Windows.



Р и с . 1 . Расположение флор техногенных экотопов в факторном пространстве: а) двух, б) трех факторов



Р и с . 2 . Увеличенные фрагменты диаграммы, отражающая степень сходства структур флор техногенных экотопов в факторном пространстве по: а) водному режиму, б) среде жизни.

Условные обозначения: кружки – структуры флор, квадратики – жизненные формы; стрелки показывают направление изменения структуры исторической флоры к ее современному состоянию

Изучение особенностей пространственной дифференциации видов в зависимости от экологических свойств почвогрунтов и выявление их экологических ниш проводилось с использованием метода анализа канонических соответствий (Canonical Correspondence Analysis), разработанного группой ученых в Голландии под руководством Тер Браака [16; 17] и довольно успешно применяемого в последнее время. Очевидно, что, поиск закономерностей распределения видов вдоль градиентов среды необходимо искать, применяя методы, учитывающие большие объемы наборов данных, многофакторность процессов формирования флор и унимодальность функции взаимодействия видов и окружающей среды. Этот метод является непрямым методом анализа данных, связывающих между собой виды, местообитания и факторы окружающей среды. С его помощью можно визуализировать данные и выявить ряд закономерностей распределения видов и местообитаний между каноническими осями и одновременно вдоль градиентов факторов среды. Использование метода анализа канонических корреляций позволяет сформировать линейные комбинации факторов окружающей среды и коварирующие факторы, вдоль которых удастся максимально разделить экологические ниши видов. Положение вида в пространстве (центроид вида) на диаграмме разброса обычно является количественной оценкой его оптимума между осями изучаемых характеристик окружающей среды. Ординационные оси этих характеристик выражают линейные комбинации абиотических компонентов [17].

Поскольку полученные результаты исследований антропогенно трансформированных флор необходимо трактовать на фоне действующих антропогенных факторов, возникает вопрос о наиболее достоверных методах оценки его степени и интенсивности. По результатам наших исследований к одному из наиболее надежных методов оценки степени антропогенного воздействия является использование индексов гемеробии, хотя существующие модификации этого метода иногда несколько отличаются по конечным результатам и также требуют усовершенствования [14; 15].

Для получения классификационной модели флор техногенных экотопов на основе изучения степени взаимосвязи их структур и систематизации полученных в ходе исследования результатов использовался дискриминантный анализ, который позволяет разграничить объекты исследования, отличающиеся между собой, и объединить наиболее близкие. Основными характеристиками изученных флор были количественные соотношения, которые отражают основные черты их таксономической и типологической структур, степень антропогенной трансформации, степень сформированности, стабильности, стойкости и динамичности (рис. 3).

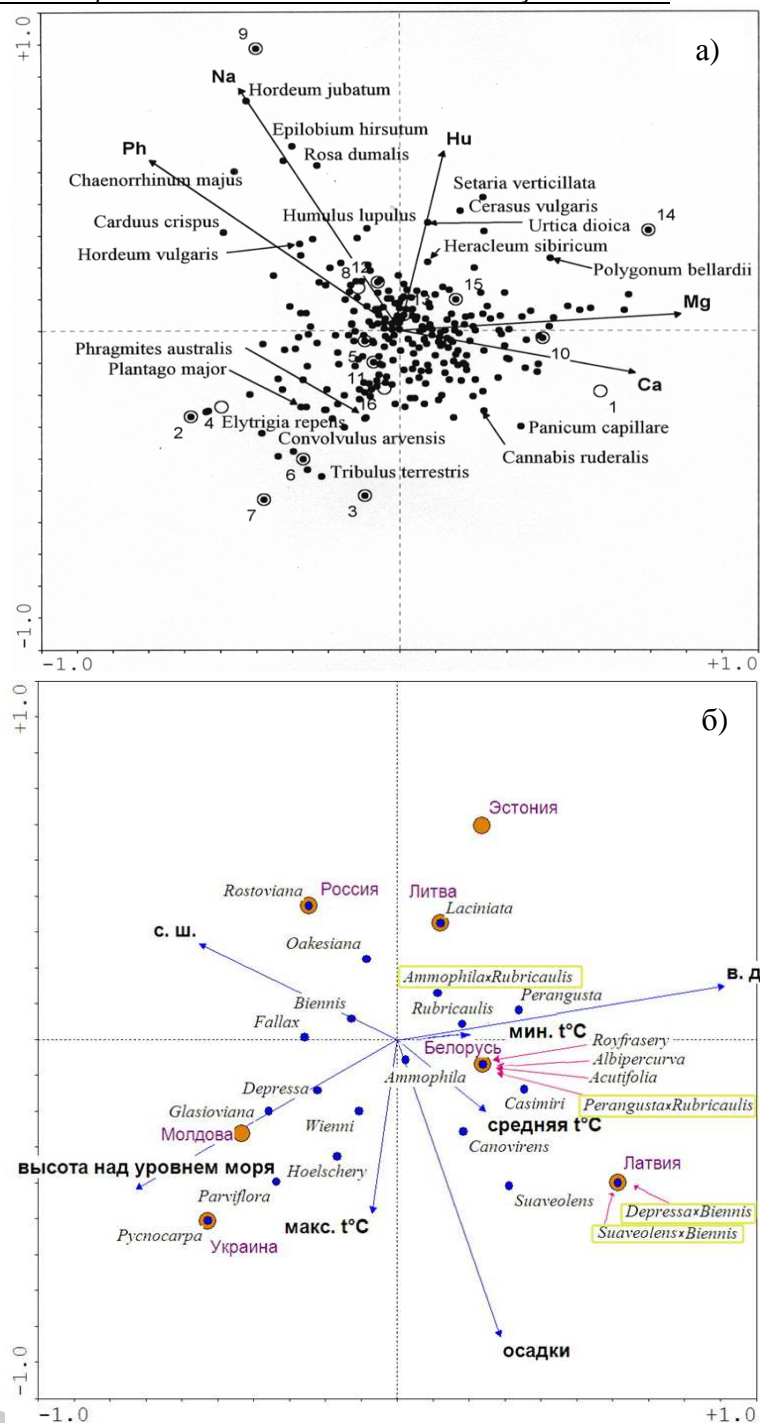


Рис. 3. Ординационная диаграмма взаимодействия видов: а) с факторами, присутствующими в техногенных экотопах: Ph – кислотность среды, Na – содержание натрия, Hu – содержание органических веществ, Mg – содержание магния, Ca – содержание кальция, №№ 1-16 – техногенные экотопы, б) природно-климатическими факторами.

• – центроиды экологических ниш видов энотер

Таким образом, для раскрытия внутренних взаимосвязей между многими компонентами фитосистем и окружающей средой крайне необходимо введение новейших статистических исследовательских приемов в сравнительную флористику [4; 7; 8; 10; 11]. Это дает огромные возможности для понимания сути явлений, а не только констатирования фактов существования последствий антропогенной трансформации фитобиоты: увеличения количества синатропных, адвентивных, широкоареальных видов, космополитизация и вульгаризация флор. В этом отношении очень перспективным представляется использование методов создания экологических классификационных (дискриминантных) и прогностических моделей флор, основанных на статистическом анализе.

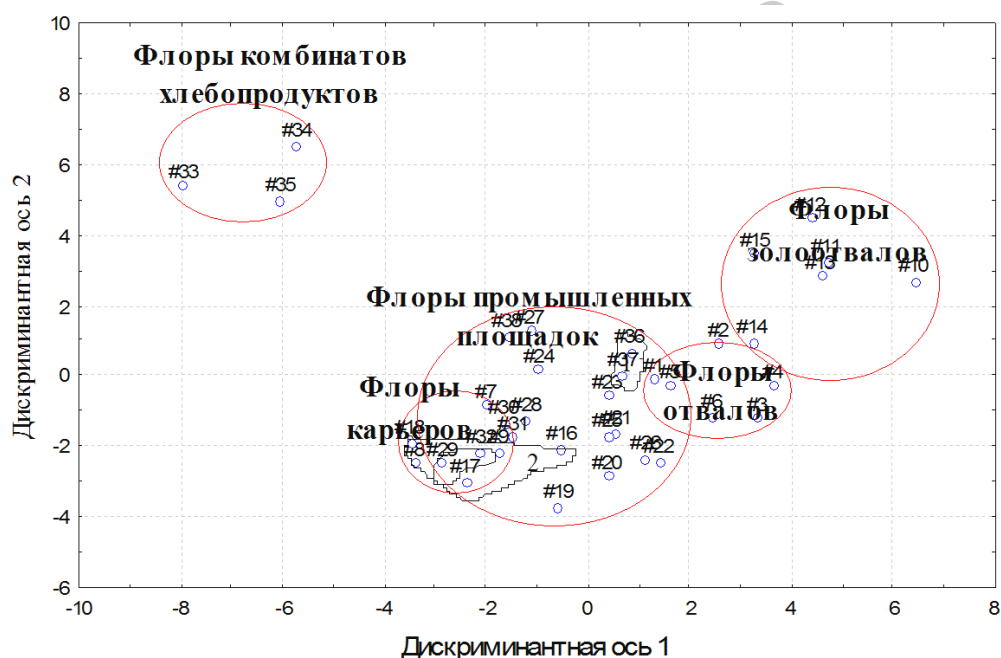


Рис. 4. Сходство и отличие структур флор техногенных экотопов по данным дискриминантного анализа: \circ – структуры флор, \square – структуры флор, формирующихся в условиях коксохимических заводов, \triangle – структуры флор, формирующихся в условиях ГРЭС

Объединение эмпирического и статистического подходов к созданию классификации флор техногенных экотопов дает возможность построить модель развития флоры в техногенной среде. Она отражает закономерности формирования флор техногенных экотопов разного топологического уровня и является следствием изменений их структур в ответ на усиление степени антропогенной трансформации среды. В случае создания прогностической модели правильность разработанного алгоритма, который устанавливает основные внутренние взаимосвязи и

закономерности, определяется на основе созданного с его помощью прогноза формирования флоры, ее элементов и их истинного состояния в будущем. Создание достоверной модели антропогенно трансформированной флоры является конечной целью такого исследования. Использование таких подходов становится все более привлекательным для исследователя, поскольку они дают новые возможности для анализа огромных объемов данных, которые в силу крайней своей мозаичности очень сложно оценить визуально. Таксономические и типологические соотношения жизненных форм и биотипов в структурах таких флор очень близки. Именно поэтому сделать выводы об особенностях их формирования достаточно сложно. Современные методы статистики позволяют визуализировать все корреляционные взаимоотношения, которые формируются между флорами и их элементами и осуществлять достоверный прогноз развития флор с помощью мощных пакетов компьютерных программ [3; 6].

Таким образом, глобализация процессов антропогенной трансформации и увеличение территорий, занимаемых синантропными флорами, требует углубленного изучения их внутренних механизмов и установления главных действующих факторов, которые детерминируют их формирование.

Традиционные методы анализа антропогенно трансформированных флор достаточно информативны для определения основных тенденций, которые происходят в их структурах. В то же время, для углубленного изучения синантропных флор необходимо более широкое внедрение современных методов многомерной статистики и разработка новых методов анализа на основе создания прогностических экологических моделей развития флор. Перспективность предложенных методов определяется возможностью установления взаимосвязей между широким комплексом флористических данных и характеристиками окружающей среды, которые могут быть визуализированы. Эти методы дают возможность анализировать огромные объемы неоднородных данных с помощью пакетов компьютерных программ, определять главные факторы, вызывающие те или иные изменения во флорах, а в будущем, - направленно формировать искусственные стойкие фитосистемы с адаптированными к конкретным условиям существования свойствами [9; 12; 13]. Использование всех приведенных выше методов при исследовании флор, которые формируются в техногенных экотопах, подтвердило их целесообразность и перспективность относительно определения главных действующих факторов, которые детерминируют процессы антропогенной трансформации флор.

Список литературы

1. *Бурда Р.И.* Антропогенная трансформация флоры. Киев, 1991. 169 с.
2. *Горчаковский П.Л.* Антропогенные изменения растительности: мониторинг, оценка, прогнозирование // *Экология*. 1984. № 5. С. 3-16.
3. *Тохтарь В.К.* Флоры техногенных экотопов и их развитие (на примере юго-востока Украины): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Киев, 2005. 36 с.
4. *Тохтарь В.К., Виноградова Ю.К.* Исследование распространения чужеродных видов в антропогенно трансформированных экотопах методом факторного анализа // *Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология*. 2009. Вып. 15, № 34. С. 139-145.
5. *Тохтарь В.К., Фомина О.В., Петин А.Н., Шевера М.В., Губарь Л.М.* Сравнение урбанофлор различных природно-климатических зон методом факторного анализа // *Проблемы региональной экологии*. 2009. С. 27-30.
6. *Тохтарь В.К.* Прогнозирование формирования флор техногенных экотопов в степной зоне // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2010. №15, вып.12. С. 13-19.
7. *Тохтарь В.К., Голусов П.В., Афанасьев Е.Г.* Анализ структуры почвенного покрова антропогенно нарушенных территорий в разработке проектов по их экологической реставрации: на примере Ботанического сада БелГУ // *Проблемы региональной экологии*. 2011. №2. С. 67-71.
8. *Тохтарь В.К., Голусов П.Г.* Взаимосвязь формирования почвенного и растительного покровов на участках с антропогенно нарушенной поверхностью // *Промышленная ботаника*. 2011. Вып. 11. С. 14-18.
9. *Тохтарь В.К., Мартынова Н.А.* Некоторые подходы к направленному подбору видов при создании устойчивых культурфитоценозов в антропогенно нарушенных экотопах // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2011. Т. 15/1, № 9 (104). С. 308-312.
10. *Тохтарь В.К., Фомина О.В.* Особенности формирования урбанофлор в различных природно-климатических и антропогенных условиях: факторный анализ и визуализация данных // *Научные ведомости БелГУ. Сер. Естественные науки*. 2011. № 9, вып.15. С. 23-29.
11. *Тохтарь В.К.* Исследование антропогенно трансформированных флор с помощью дискриминантного анализа // *Промышленная ботаника*. 2012. Вып. 12. С. 81-87.
12. *Тохтарь В.К., Мартынова Н.А., Корнилов А.Г.* Опыт разработки эффективных способов биологической рекультивации отвалов ГОКов на юге Среднерусской возвышенности // *Проблемы региональной экологии*. 2012. №2. С. 83-86.

13. *Тохтарь В.К., Петин А.Н.* Эволюция и дифференциация фитобиоты при антропогенном воздействии в степной и лесостепной зонах // Изв. РАН. Сер. Географическая. 2012. №6. С. 83-91.
14. *Jackowiak B.* The hemeroby concept in the evaluation of human influence on the urban flora of Vienna // *Phytocoenosis*. 1998. № 10. P. 79- 96.
15. *Kim Ye. M., Kowarik I.* Human impact on flora and habitats in Korean rural settlements // *Phytogeographical problems of synanthropic plants / eds. A. Zajac, M. Zajac, B. Zemanek. Cracow, 2003. P. 29-39.*
16. *Ter Braak C.J.F., Verdonschot P. F.M.* Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology // *Aquatic Sciences*. 1995. Vol. 57/3. P. 153-187.
17. *Ter Braak C.J.F.* Unimodal models to relate species to environment. Wageningen. - 1996. - 262 p.
18. *Wittig R., Tokhtar V.* Die Haufigkeit von *Oenothera*-Arten im westlichen Mitteleuropa // *Feddes Repertorium*. 2003. Vol. 114. Bd. 5-6. S. 372-379.

PERSPECTIVE APPROACHES TO VISUALIZATION OF DATA WHEN STUDYING ANTHROPOGENICALLY TRANSFORMED FLORAE

V.K. Tokhtar

Belgorod State National Research University

Traditional methods of the analysis of anthropogenically transformed floras are informative for definition only the main tendencies which occur in their structures. At the same time, study of mosaic sinanthropic floras requires more widespread introduction of multidimensional statistics modern methods and development of new approaches of the analysis. Prospects of these methods are defined by possibility of revealing of interrelations between wide complex of floristic data and environment characteristics which can be easily visualized. These methods give the chance to analyze huge volumes of non-uniform data with the help of packages of computer programs, to define the main factors causing these or those changes in floras. Use of methods of visualization of the floras given at research which are formed in technogenic ecotops, confirmed their expediency and prospects concerning definition of the main operating factors which determine processes of anthropogenous transformation of floras.

Keywords: *anthropogenically transformed floras, comparative floristics, methods of multidimensional statistics, visualization of data.*

Об авторах:

ТОХТАРЬ Валерий Константинович—доктор биологических наук, директор ботанического сада НИУ «Белгородский государственный университет», 308015, Белгород, ул. Победы, д. 85, e-mail: tokhtar@bsu.edu.ru