

**В.К. Тохтарь**

## **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МНОГОМЕРНОЙ СТАТИСТИКИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФИТОИНВАЗИЙ**

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»*

Инвазионные растения угрожают биоразнообразию и функционированию экосистем во всем мире, приводят к значительным экономическим, экологическим и социальным потерям и даже полномасштабным экологическим катастрофам. В связи с этим становится особенно актуальной разработка методов изучения особенностей распространения растений для выявления закономерностей фитоинвазий. Целью исследования был анализ данных о характере распространения чужеродных видов в различных регионах методами многомерной статистики. Показана перспективность применения методов визуализации данных для выявления особенностей распространения и инвазии чужеродных видов на данных макроэкологического (Западная – Восточная Европа; Транссибирская магистраль) и регионального уровней.

**Ключевые слова:** чужеродные виды, фитоинвазии, визуализация данных

---

**Цитирование:** Тохтарь В.К. Перспективы применения методов многомерной статистики для выявления скрытых закономерностей фитоинвазий // Промышленная ботаника. 2024. Вып. 24, № 2. С. 168–172. DOI: 10.5281/zenodo.13323992

---

Влияние чужеродных организмов на флору, фауну и, в целом, на общество приобретает глобальное значение, поскольку в настоящее время проблемы, связанные с их распространением в мире, могут быть решены лишь на международном уровне [1, 12, 13]. Занос и распространение чужеродных видов несет прямую угрозу существованию местных видов, а потери урожая от сорных видов, многие из которых являются адвентивными, составляют от 9 до 30 %. В связи с этим одной из наиболее важных теоретических задач в исследовании чужеродных видов растений является определение основных закономерностей их распространения в зависимости от комплекса природных и антропогенных факторов. Решение этой задачи может быть существенно упрощено при использовании методов, позволяющих визуализировать значительные объемы разнородных данных.

В настоящее время разработано значительное количество подходов и методов к оценке процессов адвентизации растительного покрова и инвазионного успеха чужеродных видов. Одни из них основаны на традиционных эмпирических подходах, другие – на статистическом анализе переменных и макроэкологическом анализе данных. Все они имеют свои преимущества и недостатки.

Традиционные методы исследования часто дают похожие результаты, отражающие глобальные и универсальные процессы синантропизации, которые обычно отмечаются в большинстве флористических исследований: нарушение природных флорокомплексов и упрощенность их структуры, вульгаризация, унификация, адвентизация и ксерофитизация растительного покрова, появление широкоареальных

и исчезновение stenотопных видов. Многие распространенные пространственно-статистические методы, например, ГИС-моделирование, Bioclim, Domain и др. основаны на вероятностном, потенциальном нахождении того или иного вида в новых местообитаниях в зависимости от пригодности климатических условий этих участков для его произрастания. Однако успех внедрения чужеродных видов в растительные сообщества зависит в значительной мере и от конкурентных способностей растений, взаимосвязей компонентов сообщества. Поэтому модели, построенные на данных о потенциальных ареалах инвазионных видов, не учитывают влияние антропогенных факторов, хотя во многих случаях оно оказывает решающее влияние на характер распространения видов.

Модели распространения чужеродных растений, созданные на основе анализа лишь климатических данных нативного ареала, могут быть вполне жизнеспособны. Однако если учесть, что в Канаде произрастает около 12 видов рода *Ambrosia*, а в России только три вида – не ясно, почему другие виды до сих пор не стали инвазионными в Европе при совпадении климатических условий. Это же касается и других модельных видов, например, рода *Oenothera* L. Климатическое моделирование ареала позволяет лишь определить потенциальные способности растения к распространению. Поэтому создание моделей, основанных только на этом принципе, требует избирательного подхода.

Визуализация морфологических и/или генетических различий между популяциями одного вида может быть успешно достигнута при использовании дискриминантного анализа, который применяется для этих целей достаточно часто. Однако при изучении подобных различий в структурах локальных популяций одного региона, которые формируются вдоль экологически обусловленных градиентов, перспективным для использования является факторный анализ корреляционных структур различных признаков [3, 7].

Для изучения факторов, лимитирующих распространение видов рода *Oenothera* (subsect *Oenothera* L., Onagraceae), нами был использован метод соответствия канонических корреля-

ций. Это позволило нам визуализировать зависимости распространения видов в конкретных условиях среды и определить пространственное расположение центроидов экологических ниш энотер в Восточной Европе по отношению к лимитирующим их распространение факторам [14]. Ранее для энотер Западной Европы подобное исследование провели чешские ботаники [11]. Исходя из приведенных результатов, можно сделать вывод о том, что существенным фактором, влияющим на видовой состав энотер различных территорий Европы, являются условия увлажнения и температура.

К более сложным проблемам, чем задача определения закономерностей распространения отдельных близкородственных чужеродных видов, относится проблема, связанная с выявлением закономерностей распространения целых групп разнородных видов, которые мигрируют в разные типы природных (в случае натурализации) и антропогенно трансформированных экотопов. Исследование адвентивных фракций флор показало, что колонизация техногенных экотопов заносными видами происходит не хаотически, а имеет упорядоченный характер. Размещение данных в факторном пространстве позволило разделить анализируемые фракции флор на три группы: виды, распространенные во вторичных техногенных экотопах, растения, отмеченные как в условиях вторичных техногенных экотопов, так и в квазиприродных условиях и адвентивные фракции флор первичных техногенных экотопов, которые отличаются крайне экстремальными, специфическими экологическими условиями.

В результате проведенного исследования чужеродных видов на юго-западе Среднерусской возвышенности, сформировавшихся в: 1) естественных местообитаниях (овражно-балочные экотопы, меловые и степные территории; 2) антропогенно преобразованных экотопах (железные дороги, парки); чужеродные растения агрофитоценозов (кукуруза, подсолнечник, пшеница, соевые поля) установлено, что инвазионные виды растений заселяют природные и антропогенные экотопы региона избирательно, в зависимости от экологических и ценотических условий среды [15]. Это приводит к отбору растений с опреде-

ленными свойствами и, как следствие, к сходству видового состава различных типов экотопов.

Использованные в исследовании макроэкологические подходы позволили установить, что чужеродные виды колонизируют различные местообитания, проявляя групповую стратегию, которая определяется степенью толерантности видов к уровню техногенного воздействия и степенью антропогенной трансформации экотопа.

Для конкретизации влияния результатов действия факторов среды в дополнение к факторному анализу перспективным является метод соответствия канонических корреляций. С его помощью нами установлено, что различия в видовом составе адвентивных видов в техногенных экотопах во многом обусловлены действием эдафических факторов, в частности, кислотностью и плодородием почв.

Визуализация данных корреляционных матриц, основанных на коэффициентах Жаккара и Спирмена, позволила выявить степень взаимосвязанности групп инвазионных растений, колонизирующих степные и лесные местообитания на юго-западе Среднерусской возвышенности. Изучение данных структур разных групп инвазионных видов с помощью анализа соответствий свидетельствуют о том, что структуры групп видов «лесных» и «овражно-балочных» местообитаний расположились вблизи точки пространства, отражающей позицию фанерофитов. Группы растений, произрастающих на железных дорогах и в парках, находятся в «зоне влияния» категории «Терофиты». Таким образом, данный анализ позволяет визуализировать особенности структур групп инвазионных растений на основе корреляций между ними. По времени заноса в структуре групп инвазионных видов различных местообитаний преобладают кенофиты, а большинство археофитов сконцентрированы на железных дорогах. В структуре групп инвазионных видов в изученных местообитаниях большинство относятся к растениям первого и второго статуса, и практически отсутствуют растения четвертого статуса. Проведенный анализ позволяет определить месторасположение любой группы растений не только по отношению к изученным категориям признаков, но и выявить их взаиморасположе-

ние между собой на основании коррелятивных взаимосвязей между их структурами.

Исследование особенностей распространения чужеродных растений вдоль Транссибирской магистрали [2] с помощью макроэкологических подходов свидетельствует об определенном влиянии природно-климатических факторов на формирование комплексов инвазионных видов. Визуализация данных структур групп инвазионных видов по географическому происхождению на межрельсовом пространстве свидетельствует об их относительном сходстве. На откосах железнодорожных насыпей и прилегающих к ним территориях представленность инвазионных видов в различных регионах смещается в сторону азиатских и сибирских растений. Это также обусловлено разнообразием экотопов прилегающих территорий и более сильным влиянием природно-климатических факторов на растения в этих местообитаниях.

Новые возможности в изучении фитоинвазий открываются и при анализе массивов данных «Черных книг» и black lists различных регионов. В них растения распределяются по инвазионным статусам согласно признанным критериям, которые определяют их принадлежность к этим группам. Вместе с тем необходимо отметить, что некоторые виды могут занимать промежуточное положение в отношении отнесения их к тому или иному статусу, иметь неясный статус, либо находится «на подходе» к изменению своего статуса. К тому же в ряде случаев авторами могут использоваться несколько отличающиеся друг от друга критерии выделения инвазионных статусов видов, различные трактовки объема вида и др. [9]. В связи с этим возникает необходимость разработки комплексных подходов, которые могли бы способствовать получению более точной цифровой оценки инвазионного статуса растений. Основная трудность такого анализа заключается в правильном подборе надежных формализованных признаков-дескрипторов, опираясь на которые, можно с высокой долей вероятности определить и даже прогнозировать инвазионную способность конкретного вида. Определение статистических дистанций между видами на основе методов многомерной

статистики может дать новые возможности в понимании особенностей их распространения и прогнозирования инвазии [6].

Таким образом, для понимания процессов распространения чужеродных видов в различные природные и антропогенные местообитания необходимо использование комплексных эмпирико-статистических подходов, основанных как на применении традиционных методов анализа, так и методах многомерной статистики [5, 8, 10]. Использование данных методов дает возможность вплотную подойти к пониманию процесса взаимодействия эколого-биологических особенностей чужеродных растений с конкретными условиями среды, которое и определяет их успешную инвазию. Перспективность методов многомерной статистики заключается и в том, что они могут быть применены при изучении любых корреляционных матриц и любых коэффициентов, характеризующих биоразнообразие и параметры окружающей среды [4]. Результаты анализа распространения видов при использовании статистических методов являются результирующей функцией, которая отражает множество формализованных переменных: эколого-биологические особенности видов, их конкурентные возможности при внедрении в местные сообщества, взаимосвязи компонентов среды и фитобиоты. Это позволяет моделировать процессы распространения чужеродных видов в различные местообитания и прогнозировать возможность появления как отдельных видов, так и групп растений в конкретных экотопах [16; 17]. В зависимости от задач исследования создаваемые модели могут быть классификационными, историческими и прогностическими.

1. Виноградова Ю.К., Майоров С.Р., Хорун Л.В. Черная книга флоры Средней России. М.: ГЕОС, 2010. 494 с.
2. Виноградова Ю.К., Тохтарь В.К., Зеленкова В.Н., Галкина М.А., Курской А.Ю., Третьяков М.Ю., Стогова А.В. Флора Транссибирской железнодорожной магистрали и ее сопряженность с характеристиками естественных биомов на территории Восточно-Европейской равнины // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Биология и экология. 2020. N 4(60). С. 61–82.
3. Ростова Н.С. Изменчивость системы корреляций морфологических признаков. 1. Естественные популяции *Leucanthemum vulgare* (Asteraceae) // Ботанический журнал. 1999. Т. 84, N 11. С. 50–66.
4. Тохтарь В.К. Региональная флористика и современные методы анализа антропогенно трансформированных флор: учебное пособие. Белгород: ИД «Белгород», 2016. 106 с.
5. Тохтарь В.К. Перспективные подходы к визуализации данных, характеризующих особенности распространения чужеродных видов растений // Российский журнал биологических инвазий. 2018. Т. 11, N 2. С. 76–85.
6. Тохтарь В.К., Виноградова Ю.К. Исследование распространения чужеродных видов в антропогенно трансформированных экотопах методом факторного анализа // Вестник Тверского государственного университета. Серия: биология и экология. 2009. N 15. С. 139–145.
7. Тохтарь В.К., Мазур Н.В. Изменчивость корреляционных структур морфологических признаков популяции *Coryza canadensis* (L.) Cronq // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2011. N 9(104), Вып. 15/1. С. 252–256.
8. Тохтарь В.К., Хархота А.И., Ростаньски А., Виттиг Р. Сравнение локальных флор техногенных территорий Европы // Промышленная ботаника. 2003. Вып. 3. С. 7–13.
9. Черная книга флоры Белгородской области / Тохтарь В.К., Решетникова Н.М., Курской А.Ю., Зеленкова В.Н., Третьяков М.Ю. Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2023. 252 с.
10. Чибрик Т.С., Елькин Ю.А. Формирование фитоценозов на нарушенных промышленностью землях. Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1991. 220 с.
11. Mihulka S., Rušek P. Invasion history of *Oenothera congeners* in Europe: a comparative study of spreading rates in the last 200 years //

- Journal of Biogeography. 2001. Vol. 28, Iss. 5. P. 597–609.
12. Pyšek P., Richardson D.M. The biogeography of naturalization in alien plants // Journal of Biogeography. 2006. Vol. 33, Iss. 12. P. 2040–2050.
  13. Seebens H., Bacher S., Blackburn T.M., Capinha C., Dawson W., Dullinger S., Genovesi P., Hulme P.E., Kleunen M., Kühn I., Jeschke J.M., Lenzner B., Liebhold A.M., Pattison Z., Pergl J. Projecting the continental accumulation of alien species through to 2050 // Global Change Biology. 2021. Vol. 27, Iss. 5. P. 970–982.
  14. Tokhtar V.K., Groshenko A.S. Differentiation of the climatic niches of the invasive *Oenothera* L. (subsect. *Oenothera*, Onagraceae) species in the Eastern Europe // Advances in Environmental Biology. 2014. Vol. 8, Iss. 10. P. 529–531.
  15. Tokhtar V.K., Vinogradova Yu.K., Zelenkova V.N., Kurskoy A.Yu. Can invasive plant species «differentiate» colonized ecotopes? // Eurasian journal of Biosciences. 2020. Vol. 14, Iss. 1. P. 2285–2292.
  16. Tokhtar V.K., Vinogradova Yu.K., Notov A.A., Kurskoy A.Yu., Danilova E.S. On approaches to the study of plant invasion in Russia // Environmental and Socio-economic Studies. 2021. Vol. 9, Iss. 4. P. 45–56.
  17. Vinogradova Yu.K., Tokhtar V.K., Notov A.A., Mayorov S.R., Danilova E.S. Plant invasion research in Russia: basic project and scientific fields // Plants. 2021. Vol. 10, Iss. 7. P. 1–26.

Поступила в редакцию: 21.01.2024

UDC 581.9:632.531

## PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF MULTIVARIATE STATISTICAL METHODS TO DETECT HIDDEN PATTERNS OF PHYTOINVASIONS

V.K. Tokhtar

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education  
«Belgorod State National Research University»*

Invasive plants threaten biodiversity and functioning of ecosystems all over the world, cause significant economic, ecological and social losses and even full-scale ecological catastrophes. In this regard, it becomes particularly relevant to develop methods for studying the peculiarities of plant distribution to identify patterns of phytointvasions. The aim of the study was to analyze the results of the peculiarities of alien species distribution in various regions obtained using multivariate statistics methods. Promising application of data visualization methods for revealing the peculiarities of alien species distribution and invasion on macroecological data level (Western – Eastern Europe, Trans-Siberian Railway) and regional one was shown.

**Key words:** alien species, invasions, methods, data visualization

---

**Citation:** Tokhtar V.K. Prospects for the application of multivariate statistical methods to detect hidden patterns of phytointvasions // Industrial botany. 2024. Vol. 24, N 2. P. 168–172. DOI: 10.5281/zenodo.13323992

---