

Использование классов эквивалентности и фактор-множеств в анализе ботанических данных

А. А. ЗВЕРЕВ

Томский государственный университет
634050, Томск, просп. Ленина, 36
E-mail: ibiss@rambler.ru

АННОТАЦИЯ

Вводится известная из теории множеств концепция классов эквивалентности и фактор-множеств применительно к теории и практике ботанических исследований. Рассматриваются свойства таксономических, типологических и градиентных фактор-множеств, их связь со сравнительно-флористическим и фитоиндикационным анализом. Предлагаются укрупненные группы режимов для 10 экологических факторов фитоиндикационных шкал Д. Н. Цыганова. Описывается компьютерная реализация обработки данных о растительном покрове с помощью фактор-множеств в интегрированной ботанической информационной системе IBIS.

Ключевые слова: фактор-множество, экологические шкалы, фитоиндикация, градиентный анализ, система IBIS.

ФАКТОР-МНОЖЕСТВА: КОНЦЕПЦИЯ

Основатель научной теории множеств Георг Кантор определил множество как «соединение в некое целое M определенных хорошо различимых предметов t нашего созерцания или нашего мышления (которые будут называться “элементами” множества M)» [1: с. 173]. Математическое понятие множества выделилось из привычных представлений о совокупности, собрании, классе, семействе и т. д. [2]. Любое множество может быть разбито на подмножества (множества следующего порядка), в том числе и пустые. В случае, когда некоторое множество является объединением своих подмножеств, из которых никакие два не пересекаются, подмножества выступают по отношению к родительскому множеству в качестве классов эквивалентности.

Более строгое определение говорит, что два класса эквивалентности либо не пересекаются

(пересечение пусто), либо совпадают [3]. Второй случай не представляет интереса для биологической практики, поскольку классификации, созданные на основе совпадающих классов, не отвечают одному из двух методологических критериев адекватности классификаций [4] – критерию эксклюзивности: ни один дискриминируемый объект (единица классификации) не может попасть одновременно в два класса.

Существование классов эквивалентности возможно при наличии между элементами множества отношения эквивалентности (если это отношение одновременно является рефлексивным, симметричным и транзитивным) [3]. Если элемент A эквивалентен элементу B , то их можно объединить в одно подмножество и свойства элемента становятся выражением свойств класса эквивалентности.

Совокупность всех классов эквивалентности называется фактор-множеством [2]. Иначе говоря, фактор-множества определяются по отношению к универсальному множе-

ству (набору операционных единиц исходного уровня) как объединение взаимно непересекающихся классов эквивалентности. На концепции, выраженной этим не столь привычным для нашей ботанической литературы определением, базируется значительное число традиционных методик. В отечественный ботанический контекст понятие “фактор-множество”, заимствованное из терминологии теории множеств, впервые введено в работах Б. И. Семкина и Б. А. Юрцева [5, 6].

Все элементы, попавшие в один класс эквивалентности, являются носителями как минимум одного определенного общего свойства, которое и позволяет считать их эквивалентными. При этом число исходных элементов, принадлежащих одному классу эквивалентности, служит выражением абсолютного веса данного класса. Из аксиоматики теории множеств следует, что фактор-множество как набор всех возможных классов при заданном отношении эквивалентности охватывает совокупность всех элементов, а это значит, что классификации, построенные на таких классах, отвечают второму критерию их адекватности [4] – критерию экстенсивности: все объекты классификации должны найти в ней свое место.

По сути, преобразование исходного множества в фактор-множество есть процесс укрупнения единиц, характеризующих разнообразие геоботанических и флористических объектов – например, переход от рассмотрения флоры как множества видов к рассмотрению флоры как системы географических, экологических, биоморфологических и т. д. классов. Основой такого преобразования служит существование некоторой классификации подобных групп (классов) и таблицы соответствия биологических видов (наиболее часто выступают в роли исходных элементов) этим классам (укрупненным элементам, классам эквивалентности).

Цель настоящей публикации – попытка выявить общий методологический базис использования классов эквивалентности и фактор-множеств при анализе ботанических данных в привычной для ботаников терминологической системе, описать их свойства и дать примеры типовых операций с ними.

ФАКТОР-МНОЖЕСТВА: ТИПЫ И СВОЙСТВА

Часто используемые в практике флористических исследований таксономические спектры, характеризующие разной детальности систематическую структуру флор, являются частным случаем фактор-множеств, которые предлагается называть *таксономическими* фактор-множествами. Классами эквивалентности таких фактор-множеств выступают таксоны надвидового ранга, т. е. отношения эквивалентности задаются принадлежностью видов к родам, семействам и т. д. Во флористических работах, посвященных высшим растениям, наиболее часто используются таксономические спектры трех уровней: семейственно-видовые, семейственно-родовые и родо-видовые. Абсолютный вес классов – число видов и родов в семействе, видов в роде и т. д.

В отличие от таких таксономических классов эквивалентности, которые в результате консенсуса систематиков являются относительно устойчивыми во времени, наборы других возможных типологических структур не являются столь общепринятыми. Система типологических классов в этом случае создается исследователем исходя из целей работы и территориальной приуроченности ботанического материала. Такие фактор-множества предлагается называть *типологическими* фактор-множествами. Примерами могут служить системы географических элементов, жизненных форм, экологические группы, выделяемые по различным факторам среды, пояснo-зональные и эколого-ценотические группы и т. д. Некоторые из таких фактор-множеств опубликованы и широко используются при анализе данных (например, системы жизненных форм С. Раункиера [7] и И. Г. Серебрякова [8]), другие создаются для целей конкретного исследования и носят региональный, локальный или частный характер (например, система долготных хорологических групп и фракций [9]). При исследовании флор, видовой состав которых меньше, чем у модельных флор, для которых разрабатывалась та или иная классификация, фактор-множества должны редуцироваться – из системы типологических классов эквивалентности удаляются те, что не имеют представителей.

Дополнительно предлагается различать *градиентные* фактор-множества, классы которых выделяются на непрерывном градиенте некоторого (чаще экологического) фактора. В этом случае параллельно существуют набор точек оптимума исходных элементов (например, видов) на градиенте фактора и система непересекающихся классов, охватывающих всю амплитуду данного фактора, такая, что число классов меньше, чем число различаемых градаций фактора (т. е. каждый класс охватывает минимум две градации). В этом случае вид получает назначение в укрупненный класс опосредованно через значение своего оптимума на градиенте фактора. Хорошим примером служат экологические группы, выделяемые на основе фитоиндикационных экологических шкал, которые мы рассматриваем в следующем разделе.

Все фактор-множества можно разделить на ординируемые, допускающие ранжирование классов эквивалентности в порядке старшинства и, следовательно, сортировку исходных элементов (видов) в этом же порядке, и неординируемые. В первом случае мы имеем дело с порядковыми данными, а во втором — с номинальными. Все градиентные фактор-множества ординируемы по своей природе, тогда как классы таксономических фактор-множеств (надвидовые таксоны) допускают построение в различном порядке, в зависимости от принимаемой таксономической системы или некоторого индекса относительной таксономической продвинутости. Ординируемость типологических фактор-множеств зависит от природы классификации, используемой исследователем.

Преобразование исходного множества видов в фактор-множество называется *генерализацией*. Результатом являются таксономические, типологические или градиентные спектры — наборы классов эквивалентности (возможно, ранжированных) с выражением веса каждого класса в абсолютных или относительных единицах. Набор классов в спектре может быть меньше полного набора классов фактор-множества в случае отсутствия в исходном списке видов — представителей каких-либо классов. Флористические спектры после ранжирования иногда сокращают до набора наиболее представленных таксо-

номических классов, тогда говорят о *головных* таксономических спектрах. Если же виды в исходном списке кроме присутствия имеют весовые атрибуты (встречаемость, активность, обилие, покрытие и т. д.), их сумму можно учесть при генерализации, в результате получают “взвешенные” спектры, которые часто точнее отражают отношения классов в структуре флор.

Генерализованные спектры находят свое основное применение в дескриптивном таксономическом и типологическом анализе, в сравнительно-флористическом и экологическом анализе; особенности компьютерной интерпретации и примеры приводятся в последнем разделе.

ФАКТОР-МНОЖЕСТВА: ГРАДИЕНТНЫЙ АНАЛИЗ

По литературным данным известно более 25 опубликованных экологических шкал [10, 11]. Набор факторов, для которых определяются требования растений, и число выделяемых градаций различаются у разных авторов. По характеру предоставляемой информации все шкалы можно разделить на три основных типа: оптимумные, когда для каждого вида указывается только точка экологического оптимума (шкалы многих западно-европейских авторов, например Р. Хундта [12], Э. Ландольта [13], Х. Элленберга [14], из отечественных работ — Н. Г. Ильминских [15] и А. Ю. Королюка [16]); амплитудные, где указываются пределы экологической толерантности вида (шкалы Д. Н. Цыганова [17], Д. Франка и С. Клотца [18]), за точку оптимума при этом принимается медиана; амплитудно-оптимумные, наиболее информативные, при этом амплитуды толерантности указываются для нескольких уровней обилия, а точкой оптимума считается медиана амплитуды при наибольшем обилии (шкалы Л. Г. Раменского с соавторами [19], И. А. Цаценкина [20 и др.], И. А. Цаценкина с соавторами [21, 22], а также В. П. Селедца [23]). В практике отечественной ботаники и экологии наиболее востребованы стандартные экологические шкалы Л. Г. Раменского [19] и Д. Н. Цыганова [17] для европейской части России, И. А. Цаценкина для Сибири [21, 22].

Как уже сказано, аутэкологические статусы видов на градиенте фактора позволяют провести не прямое назначение их в экологические классы эквивалентности и создать градиентные фактор-множества. В случае шкал с малым (3–9) числом различаемых режимов фактора [13–15, 18] естественно использовать в качестве классов непосредственно авторские баллы. Для многоградационных шкал Л. Г. Раменского и его последователей [19–23] разработано большое число классификаций (в основном для наиболее востребованных факторов увлажнения и богатства почв), укрупняющих группы смежных баллов до набора классов, называемых разными авторами группами режимов факторов, сериями местообитаний, группами экоморф, свитами экогрупп [19, 23, 24].

Остановимся подробнее на известных шкалах Д. Н. Цыганова [17], нашедших применение и доказавших свою эффективность при анализе геоботанических данных за пределами модельного района – подзоны хвойно-широколиственных лесов Восточной Европы [23, 25, 26 и др.]. Весьма высокая дробность шкал Д. Н. Цыганова (число выделяемых на градиенте фактора градаций) делает неэффективным применение их непосредственно в качестве классов эквивалентности при генерализации списков видов до экологических спектров. В отличие от применения малобалльных шкал Х. Элленберга [14], а особенно 5-балльных шкал Е. Ландольта [13], часть градаций по Д. Н. Цыганову имеет возможность остаться с малым числом видов или вовсе оказаться пропущенными, вероятность чего возрастает при генерализации маловидовых списков, например парциальных флор определенных экотопов, ценофлор редких сообществ и т. д. Дальнейший сравнительный анализ таких списков по их экологическим спектрам может привести к искусственному занижению сходства и искажению картины связей между сравниваемыми объектами. Укрупнение индицируемых экологических режимов в данном случае позволяет выявить более общие тенденции и связи, репарировав возможные пропуски при выявлении видового состава, нивелируя разночисленность списков и выводя на передний план сходство групп видов, имеющих близкие, но неидентичные экологические требования. Это осо-

бенно важно при работе в регионах, значительно удаленных от модельного региона разработки шкал, поскольку позволяет в известной степени снизить влияние изменения экологических предпочтений отдельных видов, вызванного географическим сдвигом, в случае невозможности коррекции оригинальных индикаторных статусов видов и создания региональных экологических шкал. Несомненно, это справедливо не только для шкал Д. Н. Цыганова.

Необходимо сказать еще об одном аспекте, отличающем использование шкал Д. Н. Цыганова при сравнительном анализе. Наличие в составе его шкал статусов по макроэкологическим факторам (термо- и криоклиматическая, аридности-гумидности и континентальности климата) позволяет применять их и при анализе сходства составных флористических списков (локальных флор, флор крупных географических выделов или административных территорий), представляющих широкий спектр экотопических условий. При оценке сходства таксономического состава удаленных и различающихся по численности флор ранее нами показана большая эффективность сравнения их систематических структур – полных или головных таксономических спектров [27, 28]. Использование укрупненных классов экорежимов по макроэкологическим факторам должно приводить к сходным результатам.

Мы предлагаем систему укрупненных групп режимов для 10 факторов из шкал Д. Н. Цыганова. Данный набор групп уже используется на практике и включен в числе прочих градиентных классификаций в комплект поставки информационной системы IBIS в составе модуля градиентного анализа [29], однако в полном и систематизированном виде приводится здесь впервые (см. таблицу). Необходимо отметить, что предлагаемая система укрупнения не является дублированием предложенных самим Д. Н. Цыгановым наборов экогрупп [17: с. 61], выделяемых с учетом как широты амплитуды толерантности, так и положения медианы этой амплитуды. Число выделяемых им экогрупп всегда больше числа предлагаемых нами групп режимов; экогруппы не являются фактор-множеством (т. е. полным набором классов эквивалентности) по отношению к множеству раз-

Система типов и укрупненных групп режимов экологических факторов

Балл	Тип режима / экологическая свита	Группа режимов
1	2	3
1. Термоклиматическая шкала (Тм)		
1 А	Арктический / Полярная	Арктическая
2 +	Промежуточный / Мезоарктическая	
3 а	Субарктический / Субарктическая	
4 +	Промежуточный / Арктобореальная	Бореальная
5 В	Бореальный / Эубореальная	
6 +	Промежуточный / Мезобореальная	
7 б	Суббореальный / Суббореальная	
8 +	Промежуточный / Бореонеморальная	Неморальная
9 N	Неморальный / Эунеморальная	
10 +	Промежуточный / Термонеморальная	
11 m	Субсредиземноморский / Субсредиземноморская	
12 +	Промежуточный / Мезосредиземноморская	Субтропическая
13 М	Средиземноморский / Эусредиземноморская	
14 +	Промежуточный / Субтропическая	
15 t	Тропический / Тропическая	Тропическая
16 +	Промежуточный / Субэкваториальная	
17 Т	Экваториальный / Экваториальная	
2. Шкала континентальности климата (Кп)		
1 Е	Экстраокеанический / Экстраокеаническая	Океаническая
2 +	Промежуточный / Океаническая 1	
3 О	Океанический / Океаническая 2	
4 +	Промежуточный / Субокеаническая	Морская
5 о	Морской / Морская	
6 +	Промежуточный / Приморская	
7 m	Субматериковый / Субматериковая	Материковая
8 +	Промежуточный / Материковая 1	
9 М	Материковый / Материковая 2	
10 +	Промежуточный / Полукоинтентальная	
11 k	Субконтинентальный / Субконтинентальная	Континентальная
12 +	Промежуточный / Мезоконтинентальная	
13 К	Континентальный / Континентальная 1	
14 +	Промежуточный / Континентальная 2	Резко континентальная
15 U	Ультраконтинентальный / Ультраконтинентальная	
3. Омброклиматическая шкала аридности-гумидности (Om)		
1 А	Экстрааридный / Экстрааридная	Аридная
2 +	Промежуточный / Пераридная	
3 В	Эуаридный / Эуаридная	
4 +	Промежуточный / Мезоаридная 1	
5 С	Мезоаридный / Мезоаридная 2	Мезоаридная
6 +	Промежуточный / Субаридная 1	
7 D	Субаридный / Субаридная 2	
8 +	Промежуточный / Семиаридная	
9 Е	Субгумидный / Субгумидная 1	Гумидная
10 +	Промежуточный / Субгумидная 2	

1	2	3
11 F	Гумидный / Мезогумидная	
12 +	Промежуточный / Эугумидная	
13 G	Пергумидный / Пергумидная 1	Гипергумидная
14 +	Промежуточный / Пергумидная 2	
15 H	Гипергумидный / Гипергумидная	
4. Криоклиматическая шкала (Cg)		
1 K	Очень суровых зим / Гиперкриотермная 1	Суровых зим
2 +	Промежуточный / Гиперкриотермная 2	
3 L	Суровых зим / Перкриотермная 1	
4 +	Промежуточный / Перкриотермная 2	
5 M	Довольно суровых зим / Криотермная 1	Умеренных зим
6 +	Промежуточный / Криотермная 2	
7 N	Умеренных зим / Субкриотермная 1	
8 +	Промежуточный / Субкриотермная 2	Мягких зим
9 O	Мягких зим / Гемикриотермная 1	
10 +	Промежуточный / Гемикриотермная 2	
11 P	Теплых зим / Акриотермная	
12 +	Промежуточный / Субтермофильная 1	Теплых зим
13 Q	Очень теплых зим / Субтермофильная 2	
14 +	Промежуточный / Термофильная 1	
15 R	Невыраженных зим / Термофильная 2	
5. Шкала увлажнения почв (Hd)		
1 D	Пустынный / Сухопустынная	Пустынная
2 +	Промежуточный / Среднепустынная	
3 d	Полупустынный / Полупустынная	
4 +	Промежуточный / Пустынно-степная	Степная
5 s	Сухостепной / Субстепная	
6 +	Промежуточный / Сухостепная	
7 S	Среднестепной / Среднестепная	
8 +	Промежуточный / Свежестепная	Луговая
9 C	Лугово-степной / Влажно-степная	
10 +	Промежуточный / Сублесолуговая	
11 c	Сухолесолуговой / Сухолесолуговая	Лесолуговая
12 +	Промежуточный / Свежелесолуговая	
13 f	Влажно-лесолуговой / Влажно-лесолуговая	
14 +	Промежуточный / Сыровато-лесолуговая	Лесная
15 F	Сыролесолуговой / Сыролесолуговая	
16 +	Промежуточный / Мокролесолуговая	
17 p	Болотно-лесолуговой / Болотно-лесолуговая	Болотная
18 +	Промежуточный / Субболотная	
19 P	Болотный / Болотная	
20 +	Промежуточный / Водно-болотная	
21 a	Прибрежно-водный / Прибрежно-водная	Водная и прибрежно-водная
22 +	Промежуточный / Мелководная	
23 A	Водный / Водная	
6. Шкала солевого режима почв (Tr)		
1 O	Особо бедных почв / Гликоолиготрофная	Бедных почв

1	2	3
2 +	Промежуточный / Гликосуболиготрофная	
3 o	Бедных почв / Гликосемиолиготрофная	
4 +	Промежуточный / Гликосубмезотрофная	Небогатых почв
5 M	Небогатых почв / Гликомезотрофная	
6 +	Промежуточный / Гликопермезотрофная	
7 e	Довольно богатых почв / Гликосемиэвтрофная	
8 +	Промежуточный / Гликосубэвтрофная	Богатых почв
9 E	Богатых почв / Гликоэвтрофная	
10 +	Промежуточный / Пертрофная	
11 g	Слабозасоленных почв / Галозэвтрофная	Слабозасоленных почв
12 +	Промежуточный / Галосубэвтрофная	
13 h	Среднезасоленных почв / Галосемиэвтрофная	
14 +	Промежуточный / Галопермезотрофная	Сильнозасоленных почв
15 H	Сильнозасоленных почв / Галомезотрофная	
16 +	Промежуточный / Галосубмезотрофная	
17 P	Резко засоленных почв / Галосемиолиготрофная	
18 +	Промежуточный / Галосуболиготрофная	Солончаков
19 s	Злостных солончаков / Галоолиготрофная	
7. Шкала кислотности почв (Rc)		
1 a	Очень кислых почв / Гиперацидофильная 1	Сильнокислых почв
2 +	Промежуточный / Гиперацидофильная 2	
3 b	Сильнокислых почв / Перацидофильная 1	
4 +	Промежуточный / Перацидофильная 2	
5 c	Кислых почв / Мезоацидофильная 1	Кислых почв
6 +	Промежуточный / Мезоацидофильная 2	
7 d	Слабокислых почв / Субацидофильная 1	
8 +	Промежуточный / Субацидофильная 2	
9 e	Нейтральных почв / Нейтрофильная	Нейтральных почв
10 +	Промежуточный / Субалкалифильная 1	
11 f	Слабощелочных почв / Субалкалифильная 2	
12 +	Промежуточный / Мезоалкалифильная	Щелочных почв
13 g	Щелочных почв / Алкалифильная	
8. Шкала богатства почв азотом (Nt)		
1 j	Безазотных почв / Анитрофильная	
2 +	Промежуточный / Субанитрофильная 1	Бедных азотом почв
3 k	Очень бедных азотом почв / Субанитрофильная 2	
4 +	Промежуточный / Геминитрофильная 1	
5 l	Бедных азотом почв / Геминитрофильная 2	Умеренно богатых азотом почв
6 +	Промежуточный / Субнитрофильная 1	
7 m	Хорошо обеспеченных азотом почв / Субнитрофильная 2	
8 +	Промежуточный / Нитрофильная 1	
9 n	Богатых азотом почв / Нитрофильная 2	
10 +	Промежуточный / Нитрофильная 3	Богатых азотом почв
11 o	Избыточно богатых азотом почв / Нитрофильная 4	
9. Шкала переменности увлажнения почв (fH)		
1 p	Устойчивого увлажнения / Константофильная 1	
2 +	Промежуточный / Константофильная 2	Устойчивого увлажнения

1	2	3
3 q	Относительно устойчивого увлажнения / Субконстантофильная 1	
4 +	Промежуточный / Субконстантофильная 2	
5 r	Слабопеременного увлажнения / Гемиконтрастофильная 1	
6 +	Промежуточный / Гемиконтрастофильная 2	Переменного
7 s	Умеренно-переменного увлажнения / Субконтрастофильная 1	увлажнения
8 +	Промежуточный / Субконтрастофильная 2	
9 t	Сильно переменного увлажнения / Контрастофильная 1	Сильно переменного
10 +	Промежуточный / Контрастофильная 2	увлажнения
11 u	Резко переменного увлажнения / Контрастофильная 3	
10. Шкала освещенности-затенения (Lc)		
1 G	Открытых пространств / Внелесная (световая)	Открытых
2 +	Промежуточный / Полянная (субсветовая)	пространств
3 g	Полуоткрытых пространств / Кустарниковая	
4 +	Промежуточный / Разреженно-лесная	
5 M	Светлых лесов / Светлолесная	Лесов
6 +	Промежуточный / Густосветлолесная	
7 s	Тенистых лесов / Тенисто-лесная	
8 +	Промежуточный / Чащобно-теневая	Тенистых лесов
9 S	Особо тенистых лесов / Ультратеневая	

Примечание. Номера и символы баллов, типы экологических режимов и экологические свиты приведены по Д. Н. Цыганову [17], в скобках за названием шкалы – ее символическое обозначение.

личаемых режимов фактора, а поэтому не могут использоваться для операции генерализации видовых списков до экологических спектров с возможностью их последующего сравнения по формализованным компьютерным алгоритмам. Сказанное ничуть не снижает значения концепции экогрупп (в понимании Д. Н. Цыганова), наполнение которых с точки зрения аутоэкологии значительно существеннее в содержательном плане.

ФАКТОР-МНОЖЕСТВА: КОМПЬЮТЕРНЫЙ ПОДХОД В АНАЛИЗЕ ДАННЫХ

Наиболее полным и естественным образом концепция фактор-множеств реализуется с помощью компьютерных баз данных, построенных по реляционной модели. Для ботаников, вероятно, лучшим решением служит использование специализированных информационных систем (ИС), объединяющих в себе управление экстенсивной базой исходных данных, описывающих растительный покров (геоботанические описания, флоры различных рангов и т. д.), с инструментами их обработки. При наличии логичного пользо-

вательского интерфейса работа в таких ИС не требует никаких специальных знаний в области информатики.

Нами разработана интегрированная ботаническая ИС IBIS [28, 30], которая является универсальным отчуждаемым продуктом (не имеет какой-либо территориальной или таксономической специфики) и позволяет работать с фактор-множествами. В систему интегрирована библиотека таксонов и их синонимов на территорию бывшего СССР (лишайники, бриофиты, сосудистые растения) общим объемом более 55 тыс. единиц и библиотека семейств, т. е. работа с таксономическими фактор-множествами определяется отношениями эквивалентности между видами, родами и семействами и не требует создания специальных классификаций. Исследователь имеет возможность менять таксономические библиотеки по своему усмотрению.

Пользовательские типологические фактор-множества можно определять на основе любой классификации, задаваемой исследователем. Ограничение по числу классов эквивалентности в одном фактор-множестве – 512, количество самих множеств не ограни-

чено. Модуль градиентного анализа позволяет работать со всеми типами экологических шкал; большинство из упомянутых шкал уже включены в ИС и таксономически синхронизированы с основной библиотекой таксонов. Исследователи могут добавлять свои шкалы и создавать на основе каждой до 10 градиентных классификаций.

Таким образом, в системе IBIS реализована возможность обрабатывать ботанические данные с использованием всех трех типов фактор-множеств. Конспективно перечислим наиболее важные операции с применением фактор-множеств:

– сортировка таксонов в описаниях, сводных списках (флорах) и сводных таблицах в порядке классов фактор-множеств, к которым относятся таксоны;

– поиск и селекция описаний и флор по таксонам с учетом их вхождения в классы фактор-множеств;

– построение таксономических, типологических и градиентных спектров: генерализация сводных описаний и сводных таблиц на основе соответствующих фактор-множеств с возможностью взвешивания классов;

– представление веса генерализованных классов в абсолютных и относительных (доли и проценты) единицах;

– осуществление контроля за экстенсивностью классификации по каждому фактор-множеству: при генерализации таксоны, не имеющие назначения ни в один класс фактор-множества, объединяются в особый “неизвестный класс”;

– сравнительный анализ описаний и флор по их спектрам на основе вычисления коэффициентов ранговой корреляции или бинарных мер сходства в варианте для весовых множеств [31];

– анализ сопряженности двух фактор-множеств с вычислением ряда показателей связи на основе критерия χ^2 [32–34];

– экспорт спектров и результатов анализа для дальнейшего использования их во внешних программах статистической обработки и графической визуализации.

Инструменты обработки данных, основанные на применении фактор-множеств в системе IBIS, в сочетании с возможностью работать с большими наборами данных (до 4 тыс. описаний и флор одновременно) позволяют

многократно снизить трудоемкость рутинных операций в исследованиях растительного покрова.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор Г. Труды по теории множеств. М.: Наука, 1985. 431 с.
2. Баскаков А. Г. О бинарных отношениях и фактор-множествах // Соросовский образовательный журнал. Математика. 1998. № 6. С. 112–115. [Электронный ресурс]. URL: http://www.pereplet.ru/nauka/Soros/pdf/9806_112.pdf (дата обращения: 04.06.2010).
3. Казимиров Н. И. Введение в аксиоматическую теорию множеств: Учебное пособие. Петрозаводск, 2000. 104 с. [Электронный ресурс]. URL: http://www.sampro.ru/~rishe/Math/Set_theory/zf_theor_ps.zip (дата обращения: 19.05.2010).
4. van der Steen W. J. Algemene methodologie voor biologen. Bohn, Scheltema and Holkema, Utrecht, 1982. 115 p.
5. Семкин Б. И. О теоретико-множественных методах изучения растительных сообществ // Тез. докл. V делегат. съезда ВБО. Киев, 1973. С. 210–211.
6. Юрцев Б. А., Семкин Б. И. Изучение конкретных и парциальных флор с помощью математических методов // Ботан. журн. 1980. Т. 65, № 12. С. 1706–1718.
7. Raunkier C. Types biologiques pour la geographie botanique // Bull. Acad. Roy. Sc., Danemark. 1905. N 5. P. 346–437.
8. Серебряков И. Г. Жизненные формы высших растений и их изучение // Полевая геоботаника. М.; Л.: Наука, 1964. С. 146–205.
9. Королева Т. М., Зверев А. А., Катенин А. Е. и др. Долготная географическая структура локальных и региональных флор Азиатской Арктики (по данным сети пунктов мониторинга биоразнообразия) // Ботан. журн. 2008. Т. 93, № 2. С. 193–220.
10. Дідух Я. П., Плюта П. Г. Фітоіндикація екологічних факторів. Київ: Наук. думка, 1994. 280 с.
11. Ипатов В. С., Кирикова Л. А. Фитоценология: Учебник. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. 316 с.
12. Hundt R. Ökologisch-geobotanische Untersuchungen an Pflanzen der mitteleuropäischen Wiesenvegetation // Botanische Studien. 1966. N 16. VEB G. Fischer Verlag, Jena. S. 1–176.
13. Landolt E. Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora // Veröff. Geobot. Inst. der Eidgen. Techn. Hochschule, Zürich, 1977. Vol. 64. P. 1–208.
14. Ellenberg H., Weber H.E., Düll R. et al. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Ed. 2 // Scripta Geobot. 1992. Vol. 18. P. 1–258.
15. Ильминских Н. Г. Флорогенез в условиях урбанизированной среды (на примере городов Вятско-Камского края): автореф. дис. ... д-ра биол. наук. СПб., 1993. 35 с.
16. Королюк А.Ю. Экологические оптимумы растений юга Сибири // Ботанические исследования Сибири и Казахстана. Сб. науч. трудов. Вып. 12. Барнаул; Кемерово: КРЭОО “Ирбис”, 2006. С. 3–28.
17. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических режимов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. М.: Наука, 1983. 196 с.

18. Frank D., Klotz S. Biologisch-okologische Daten zur Flora der DDR. Halle, 1990. 167 p.
19. Раменский Л. Г., Цаценкин И. И., Чижиков О. Н., Антипин Н. А. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову. М.: Сельхозгиз, 1956. 472 с.
20. Цаценкин И. А. Экологические шкалы для растений пастбищ и сенокосов горных и равнинных районов Средней Азии, Алтая и Урала. Душанбе: Дониш, 1967. 226 с.
21. Методические указания по экологической оценке кормовых угодий лесостепной и степной зон Сибири по растительному покрову. М.: ВНИИК им. В. Р. Вильямса, 1974. 246 с.
22. Методические указания по экологической оценке кормовых угодий лесостепной и степной зон Сибири по растительному покрову. М.: ВНИИК им. В. Р. Вильямса, 1978. 302 с.
23. Селедец В. П. Метод экологических шкал в ботанических исследованиях на Дальнем Востоке России. Владивосток: Дальнаука, 2000. 245 с.
24. Прокопьев Е. П. Экология растений (особи, виды, экогруппы, жизненные формы): Учебник. Томск: Томский гос. ун-т, 2001. 340 с.
25. Клещева Е. А. Использование экологических шкал для индикации современного состояния лесных сообществ // Экология. 2007. № 2. С. 104–110.
26. Shirokikh P. S., Martynenko V. B. Comparison of different ecological scales with respect to efficiency in assessing ecological conditions in forests of the Southern Ural region // Russian J. of Ecology, 2009. Vol. 40, N 7. P. 457–465.
27. Пяк А. И., Зверев А. А. Опыт сравнительного анализа локальных флор с помощью прикладного статистического пакета BIOSTAT // Ботан. журн. 1997. Т. 82, № 5. С. 64–75.
28. Зверев А. А. Информационные технологии в исследованиях растительного покрова: Учебное пособие. Томск: Изд-во "ТМЛ-Пресс", 2007. 304 с.
29. Зверев А. А. Фитоиндикационный анализ: компьютерный подход // Проблемы ботаники Южной Сибири и Монголии. Барнаул, 2009. С. 344–347.
30. Зверев А. А. Компьютерный банк геоботанических описаний как основа биогеоценотических и ландшафтно-экологических исследований // Чтения памяти Ю. А. Львова: Сб. статей. Томск, 1995. С. 127–129.
31. Песенко Ю. А. Принципы и методы количественного анализа в фаунистических исследованиях. М.: Наука, 1982. 287 с.
32. Шмидт В. М. Математические методы в ботанике: Учебное пособие. Л.: Изд-во ЛГУ, 1984. 288 с.
33. Галанин А. В. Опыт сопряженного анализа типологических структур конкретных флор // Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики. Л.: Наука. Ленингр. отд-ние, 1987. С. 167–189.
34. Sokal R. R., Rohlf F. J. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. 3rd ed. N.Y.: W. H. Freeman, 1995. 850 p.

Use of Equivalence Classes and Factor-Sets in the Analysis of Botanic Data

A. A. ZVEREV

*Tomsk State University
634050, Tomsk, Lenin ave., 36
E-mail: ibiss@rambler.ru*

The concept of equivalence classes and factor-sets, known from ensemble theory, is introduced in application to the theory and practice of botanical investigations. The properties of taxonomic, typological and gradient factor-sets and their connection with the comparative floristic and phytoindicative analysis are considered. Upsized groups of regimes for 10 ecological factors of D. N. Tsyganov's phytoindicative scales are proposed. Computer realization of processing the data on plant cover with the help of factor-sets in the integrated botanical information system IBIS is described.

Key words: factor set, ecological scales, phytoindication, gradient analysis, IBIS system.