

УДК 57:51-76:581.9

Б.С. Петропавловский

Б.И. Семкин

Д.Е. Кислов

А.А. Брижатая

B.S. Petropavlovsky

B.I. Semkin

D.E. Kislov

A.A. Brizhataya

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ МЕТОДА МНОГОМЕРНОГО АНАЛИЗА СООТНОШЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ЭКОЛОГИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ

### APPLIED ASPECTS OF THE USE THE METHOD OF MULTIVARIATE ANALYSIS OF THE CORRELATION BETWEEN VEGETATION AND ECOLOGICAL FACTORS

В статье рассматриваются наиболее актуальные задачи лесоведения, геоботаники, биогеографии, экологии, географии и математико-картографического моделирования растительности на основе использования метода многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами. Результаты исследований могут быть использованы в области решения проблем охраны растительности, организации ее мониторинга и в других направлениях.

Целью предлагаемой работы является анализ перспектив использования метода многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами для задач составления корреляционных геоботанических карт, восстановления расчетной структуры растительности и других задач математико-картографического моделирования. Первоначально метод был предложен в работе Б.И. Семкина (1986) с соавторами. Проблема многоплановая и многоаспектная, учитывая, например, что восстановление растительных характеристик по среде связано с ординацией растительности, способы которой весьма разнообразны.

Необходимым этапом установления количественных сопряженностей между факторами среды и растительностью является составление матриц, которые представляют собой комбинационные таблицы (информационные решетки). По столбцам матриц приводятся градации факторов среды, а по строчкам – градации «явлений», или в нашем случае, – категорий биоты, в качестве которых могут выступать любые характеристики растительного покрова. В клетках матрицы (в пересечениях градаций фактора и категорий биоты) проставляется число совместных встреч, наблюдений. Техника их составления довольно хорошо отражена в работах (Пузаченко, Мошкин, 1969; Берлянт, 1971). В самой нижней, суммирующей, строке определяются суммы частот по конкретной градации растительности, а в правой, крайней, также суммирующей колонке, или столбце таблицы, подсчитываются суммы частот по всем градамциям растительности. Естественно, не все возможные ячейки могут быть заполнены из-за того, что в ряде экстремальных экологических условиях растительность не встречается. Такая структура матрицы с исходными данными является основой для расчета, как частных, так и интегральных показателей, характеризующих зависимость факторов среды с категориями биоты.

Одними из наиболее распространенных показателей являются – «прямая» мера, количественно выражающая влияние фактора среды на растительность –  $K(B;A)$  и «обратная» мера, характеризующая индикаторное значение растительности –  $K(A;B)$ ; степень совместности событий –  $K_{ij}$ ; мера Дайса-Брея, характеризующая сопряженность, совместимость показателей структурно-функциональных характеристик растительности и градаций факторов среды, а также все необходимые для расчета этих мер «промежуточные» количественные показатели, имеющие самостоятельное значение, и которые являются весьма информативными. Кроме того, рассматривают энтропийные характеристики, отражающие неупорядоченность, неопределенность, разнообразие того или иного анализируемого показателя среды и растительности –  $H$ -функции, для растительности –  $H(A)$ , для фактора среды –  $H(B)$  и их совместная неопределенность –  $H(A,B)$ .

$$H(A) = -\sum_i p(a_i) \log_2 p(a_i), H(B) = -\sum_i p(b_i) \log_2 p(b_i)$$

$$H(A, B) = - \sum_j p(a_i b_j) \log_2 p(a_i b_j)$$

где  $p(a_i)$ ,  $p(b_j)$  – соответственно, вероятности событий  $a_i$  и  $b_j$ .

В случае, когда известны меры неопределенности (или разнообразия фактора среды и состояния структуры растительности и их совместное состояние, можно определить меру зависимости между ними  $T(A, B)$  по формуле:  $T(A, B) = H(A) + H(B) - H(A, B)$ , где  $H(A)$  – неопределенность структуры растительности («явления»),  $H(B)$  – неопределенность фактора среды,  $H(A, B)$  – совместная неопределенность фактора, определенная выше.

При фактически независимых состояниях  $A$  и  $B$  совместная неопределенность  $H(A, B)$  равна сумме  $H(A)$  и  $H(B)$  и тогда  $T(A, B) = 0$ .

Таким образом, мера зависимости  $T(A, B)$  выражает определенное «количество» информации, по существу, является в биологических системах мерой связи, аналогичной коэффициенту корреляции, но в отличие от последнего применяется без ограничения, которые накладываются при корреляционном анализе. Величина связи, оцениваемая через  $T(A, B)$ , размерная, определяется в битах. Размерность устраняется путем нормирования через  $H(A)$  или через  $H(B)$ .

При определении влияния фактора среды на «явление» (в нашем случае это различные характеристики растительности) вычисляется «прямая» мера:  $K(A, B) = T(A, B)/H(A)$ . При оценке индикационной роли растительности используется «обратная» мера:  $K(B, A) = T(A, B)/H(B)$ ,

Данные меры изменяются от 0 до 1. По величине меры можно судить о характере связи или сопряженности явлений, и, в частности, о влиянии фактора среды (если однофакторный анализ) или о влиянии нескольких факторов на растительность – при многофакторном анализе, в этом случае при формировании матрицы колонка ее, характеризующая факторы среды, представляет собой комбинацию двух (в принципе может быть и более) факторов среды, что сделать технически несложно.

Степень совместимости каждой категории (таксона) растительности с каждой из градаций среды от каждого из факторов среды характеризуется обобщенной мерой Дайса-Брея:

$$K_j = \frac{2P_j}{\sum_i P_i + \sum_j P_j}$$

где  $P_{ij}$  – частота совместных встреч  $i$ -той категории растительности и  $j$ -той градации среды. Эту меру можно использовать в прямых ординациях растительности.

Довольно близка к мере Дайса-Брея мера (коэффициент) наиболее специфических отношений «С».

$$C_j = P(a_i | b_j) / p(a_i)$$

где  $p(a_i)$  – условная вероятность «явления» (в нашем случае – конкретных градаций конкретных ха-

рактеристик растительности при данном состоянии фактора среды;  $p(a_i)$  – априорная вероятность состояния «явления». Эта мера изменяется от нуля и теоретически до бесконечности. Характерным, типичным принимается то состояние  $a_i$  из  $A$ , для которого условная вероятность больше априорной, т.е. при значениях  $C \geq 1$ .

**Метод восстановления растительности.** Рассмотренные меры могут быть использованы для восстановления растительности по факторам среды. Один из подходов к восстановлению растительности сводится к определению максимальной суммы коэффициентов (мер) Дайса-Брея для потенциально возможной для данного участка категории биоты. Максимальная сумма показывает на наиболее вероятную характеристику растительности.

Порядок восстановления растительности в этом случае заключается в: 1) определении влияния факторов среды на растительность (на основе использования информационных мер); 2) вычисления мер Дайса-Брея; 3) нахождении наибольшего значения суммы мер и определения соответствующего наиболее вероятного показателя растительности в каждой ячейке регулярной сетки.

На соответствующей картосхеме такой наиболее вероятный таксон (вид или сообщество) маркиру-

ется как точка путем «заливки» конкретной ячейки регулярной сетки или с помощью прочих обозначений. Такой подход используется при математико-картографическом моделировании, в частности, при восстановлении исходной растительности.

Восстановление расчетной растительности проводилось практически на всех основных уровнях структурно-функциональной организации растительности: в планетарном (глобальном), субрегиональном (территория бывшего СССР), региональном (Дальний Восток России и Приморский край), локальном, или ландшафтном, (заповедники, лесные стационары), ценоотическом и популяционном (ключевые участки, геоботанические профили лесных стационаров), и выявило однотипность результатов исследований. При восстановлении растительности в экологических оптимумах при использовании не менее 10 ведущих (с повышенными показателями мер влияния на растительность) исходная растительность восстанавливалась полностью. Чем меньше сумма экологического соответствия, тем больше отмечалась ошибка в восстановлении исходной растительности.

**Методика составления корреляционных геоботанических карт.** Первый опыт составления подобных карт (эколого-фитоценологических комплексов) отражен в работах академика В.Б. Сочавы (1979), И.И. Букс (1976), хотя корреляции в математическом смысле отсутствуют, если есть лишь территориальная совместимость контуров. Поэтому, если бы оценивались меры сопряженности, то и «прямая» и «обратная» равнялись бы 1, что искажает реальную ситуацию. Это примерно то же самое, если бы контуры почв вырисовывались бы по типам растительности. Естественно, в этих случаях одному и тому же типу растительности соответствует только один тип экологических условий.

Таблица 1

Ординация растительности мира

Крайне недостаточное увлажнение, РИС (радиационный индекс сухости) свыше 3				XIII 6–38 14–18	XVIII 12–58 6–32 11–20	
Недостаточное увлажнение, РИС от 2 до 3			VIII 5–16 6–6	XII 13–12 14–9 6–6	XVII 10–20 11–13 13–13	XXI 10–8
Умеренное недостаточное увлажнение, РИС от 1 до 2			VII 5–45 2–3	XI 3–27 15–19 5–17	XVI 11–42 10–35 4–11	XX 9–24 8–12 10–12
Умеренное увлажнение, РИС от 0,7 до 1,0			VI 5–23 2–23 3–21	X 3–52 4–7	XV 4–58 8–23 9–12	XIX 8–27 9–4 10–4
Влажные, РИС от 0,3 до 0,7		III 7–24 2–16 1–16	V 2–75 1–10	IX 7–8 3–4	XIV 9–5 8–4	
Избыточное увлажнение, РИС до 0,3	I 1–24	II 1–63 7–30 2–8	IV 7–11 2–9 1–5			
Теплообеспеченность (радиационный баланс, ккал на 1 см <sup>2</sup> в год)	Очень холодные, до 10	Холодные, 10–20	Умеренно теплые, 20–40	Теплые, 40–60	Очень теплые, 60–80	Жаркие, свыше 80

Примеч.: РИС – радиационный индекс сухости. Римскими цифрами обозначены номера эколого-фитоценологических комплексов, арабскими – коды растительности (первая цифра), меры Дайса, умноженные для удобства на 100 (вторая, после тире). Приведены наиболее характерные типы растительности: 1 – тундры; 2 – бореальная; 3 – неморальная; 4 – кустарниково-древесная; 5 – степная; 6 – внетропических пустынь северного полушария; 7 – высокогорная тундрового и бореальных типов; 8 – влажный вечнозеленый тропический лес; 9 – листопадный и вечнозеленый переменновлажный тропический лес; 10 – тропические сухие ксерофильные леса; 11 – тропических саванн; 12 – тропических пустынь; 13 – ксерофильная древесно-кустарниковая подтропическая; 14 – внетропических пустынь южного полушария; 15 – широколиственные и хвойно-широколиственные субантарктические леса.

Несколько практических аспектов по составлению подобных карт. Возьмем планетарный уровень, который наиболее удобен для демонстрации методики, поскольку в этом случае рассматриваются наиболее контрастные местообитания (условия произрастания).

В разные годы созданы серии карт эколого-фитоценологических комплексов, которые можно назвать корреляционными геоботаническими картами. Предварительно составлялись ординации растительности, включающие количественную сопряженность между ведущими факторами среды и основными таксонами растительности.

Основой подобных карт являются их легенды, отражающие прямую ординацию растительности по двум ведущим факторам, обычно это тепло- и влагообеспеченность (табл. 1). В таблице характеризуются 18 эколого-фитоценологических комплексов (ЭФК) мира. Каждый из ЭФК включает три составляющие: 1) тип экологических условий как сочетание градаций факторов ведущих среды, 2) растительность и 3) меру количественной сопряженности – меру Дайса-Брея, умноженную для удобства на 100. Собственно сама ординационная схема (таблица) является табличной формой подобной классификации ЭФК или легендой аналогичной карты, которую в равной мере можно назвать корреляционной двухфакторной геоботанической картой мира. Для примера приведем ЭФК с №№ II и XVI:

**II. Местообитания: холодные и избыточно увлажненные.** РБ (радиационный баланс) – 20 ккал на 1 см<sup>2</sup>, РИС (радиационный индекс сухости) – до 0,3. Типы растительности: тундра, ЭС (экологическое соответствие) – 63; высокогорная тундрового и бореального типов, ЭС – 30, бореальная, ЭС – 8.

**XVI. Местообитания: очень теплые и умеренно недостаточное увлажнение.** РБ – 60–80 ккал на 1 см<sup>2</sup>, РИС – от 1 до 2. Типы растительности: тропические саванны, ЭС – 42; тропические сухие склерофильные леса, ЭС – 35; кустарниково-древесная растительность, ЭС – 11.

Следующим этапом составления корреляционных экологических карт является нанесение цветных контуров пяти градаций экологического соответствия растительности (по структуре и продуктивности растительности). Сами типы растительности можно показывать с помощью комбинаций штрихов и оттенков черного цвета.

Подобные карты дают возможность непосредственно оценивать в известной мере экологическую устойчивость растительных таксонов (по значениям ЭС, предсказать изменение в структуре растительности при изменении сочетаний градаций тепло-влажностности, что позволяет рассматривать подобные карты как потенциальные картографические модели возможных изменений структуры и функционирования (при внесении дополнительной информации, например, по продуктивности растительности) при различных вариантах экологических изменений.

Растительность с высоким и очень высоким уровнем экологического соответствия занимает экологические оптимумы и наиболее экологически устойчивая. Растительность с градациями пониженного экологического соответствия, как правило, находится в экотонной, или переходной, зоне. При каких-либо изменениях климата в первую очередь происходят перестройка и смена растительности в экотонной области. Здесь растительность наиболее чувствительна к происходящим изменениям. В связи с этим, такие участки являются наиболее уязвимыми, они отличаются повышенными индикаторными свойствами. Поэтому организация биосферных станций для задач мониторинга природной среды, в первую очередь, растительного покрова в подобных местах наиболее предпочтительна.

Таким образом, метод многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами позволяет решать задачи в области биогеографии, геоэкологии, что может быть использовано для решения многих задач прикладного плана, например, при выявлении экологических особенностей лесобразующих видов, составлении экологических паспортов растительных таксонов (Петропавловский, 1989, 1993, 1996), составлении многофакторной экологической классификации лесной растительности (Петропавловский, Онищенко, 1989), при составлении корреляционных в математическом смысле геоботанических карт (Петропавловский, 1980), математико-картографическом моделировании, в частности при восстановлении, растительности (Петропавловский, 2004, 1997), прогнозировании процессов усыхания пихтово-еловых лесов (Петропавловский, 1987). При этом нет принципиальной разницы, на каком структурно-функциональном уровне растительности проводятся соответствующие исследования (Петропавловский, 2004).

## ЛИТЕРАТУРА

- Берлянт А.М.* Картографический метод исследования природных явлений. – М.: Изд-во МГУ, 1971. – 75 с.  
*Букс И.И.* Методика составления и краткий анализ корреляционной эколого-фитоценологической карты Азиатской России М. 1:7 500 000 // Геоботаническое картографирование, 1976. – Л., 1976. – С. 44–51.  
*Петропавловский Б.С.* К вопросу об изучении эколого-ценологических особенностей основных лесобразующих

пород Среднего Сихотэ-Алиня // Антропогенная и естественная динамика лесов юга Дальнего Востока. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. – С. 55–63.

**Петропавловский Б.С.** Методика составления экологических паспортов растительности // Популяции и сообщества растений: экология, биоразнообразие, мониторинг: Тез. докл. V науч. конф. памяти проф. А.А. Уранова (16–19 октября 1996 г.). Ч. I. – Кострома, 1996. – С. 96–97.

**Петропавловский Б.С.** Экологические особенности лесообразующих пород Приморского края // Комаровские чтения. – Владивосток: ДВО РАН, 1993. – Вып. 41. – С. 16–28.

**Петропавловский Б.С., Онищенко В.В.** Методика разработки многофакторной экологической классификации типов леса (на примере лесной растительности Тебердинского заповедника). Препринт. – Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1980. – 60 с.

**Петропавловский Б.С.** Принципы составления корреляционных эколого-фитоценологических карт мира и ее использование с целью оптимального размещения биосферных станций мониторинга окружающей среды // Разработка и внедрение на комплексных станциях методов биологического мониторинга: Материалы первой междунар. школы биологического мониторинга (9–12 декабря 1980 г., Рига). – Рига: Зинатне, 1983. – Т. I. – С. 99–104.

**Петропавловский Б.С.** Леса Приморского края: (Эколого-географический анализ). – Владивосток: Дальнаука, 2004. – 317 с.

**Петропавловский Б.С.** Опыт и перспективы геоботанического картографирования на основе математико-картографического моделирования с применением ГИС-технологий, интегрированных картографических программ // Картография на рубеже тысячелетий: Доклады первой всероссийской научной конференции по картографии (Москва, 7–10 октября 1997 г.). – М., 1997. – С. 552–556.

**Петропавловский Б.С.** Оценка состояния пихтово-еловых лесов Среднего Сихотэ-Алиня // Методы и практика мониторинга природных объектов. – Владивосток: ДВО АН СССР, 1987. – С. 88–97.

**Пузаченко Ю.Г., Мошкин А.В.** Информационно-логический анализ в медико-географических исследованиях // Итоги науки. Медицинская география. – М., 1969. – Вып. 3. – С. 5–74.

**Семкин Б.И., Петропавловский Б.С., Кошкарёв А.В., Варченко Л.И., Усольцева Л.А.** О методе многомерного анализа соотношения растительности с экологическими факторами // Бот. журн., 1986. – Т. 71, № 9. – С. 1167–1981.

**Сочава В.Б.** Растительный покров на тематических картах. – Новосибирск: Наука, 1979. – 189 с.

## SUMMARY

In the article methodical aspects of the use the method of the multivariate analysis of the correlation to vegetation with ecological factor are considered for problems of the study to ecologies of the wood plants and forests of association, reconstruction of the initial (calculated) places of the growth of forest-forming species. The results of the studies can be used in the field of decisions of the problems of protection and organizations of the monitoring the vegetable cover. The method enables to value stability vegetable community, to build the forecast situations of the dynamics of the structure of vegetation with the different versions of a change in the leading ecological factors of medium and for other tasks of the mathematical-cartographic modeling of vegetation.