

В. С. Ипатов, Л. А. Кирикова

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КВАНТОВАННОСТИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА

IPATOV V. S., KIRIKOVA L. A. STATISTICAL ANALYSIS OF THE QUANTUM CHARACTER OF THE VEGETATIONAL COVER

Рассматривая непрерывность и дискретность как свойства, присущие растительному покрову и проявляющиеся одновременно, авторы предлагают методику выделения участков (квантов), достоверно различающихся по заданным признакам: уровню, степени варьирования, наличию или отсутствию тренда. Использован дисперсионный анализ. Объектом исследования явился напочвенный покров зеленомошно-лишайниковых сосняков северо-запада РСФСР.

Обсуждению методики авторы считают необходимым кратко предпослать определение некоторых теоретических позиций, касающихся вопроса организации растительного покрова. В современной геоботанике существуют представления о пространственной структуре растительности, в основе которых лежит концепция континуума. Согласно им, возможно лишь условное выявление контуров, дискретность же допускается в строго определенных обстоятельствах. Континуум и дискретность рассматриваются как явления, дополняющие друг друга: там, где сильнее выражен континуум, меньше дискретность, и наоборот. Мы также считаем континуум коренным свойством растительного покрова, и в качестве коренного свойства он должен быть выражен повсюду. Бесчисленные геоботанические материалы, представляющие собой описания рядов примыкающих друг к другу пробных площадей любых размеров, свидетельствуют о том, что как бы ни проводилась граница, по обе стороны ее всегда присутствует какое-либо число одних и тех же видов. Это можно объяснить тем, что перепады в среде соседних точек и экологические амплитуды видов находятся в таком соотношении, что первые не выходят за пределы вторых. Даже в тех редких случаях, когда абиотическая среда меняется исключительно резко (в том числе и на границе двух сред), воздействие самих растений на среду размывает эту границу. Иными словами, между соседними точками растительного покрова всегда наблюдается хотя бы минимальное сходство. Мы определяем континуум как свойство растительности, присущее любому участку растительного покрова и выражающееся в том, что примыкающие друг к другу участки независимо от размеров и способа определения их границы всегда имеют общие признаки. Этим обеспечивается непрерывность растительного покрова.

Вместе с тем в соответствии с закономерностями пространственного варьирования среды (а она может быть на известном протяжении либо относительно однородной, имея ненаправленное варьирование, причем степень его на соседних участках может быть разной, либо меняется постепенно, имея тренд; изменение может быть и резким; возможен также тренд варьирования, его увеличение или затухание и т. д.) растительный покров должен различаться закономерностями изменения признаков по территории, что порождает его квантованность. Квантованность мы считаем столь же коренным свойством, как и континуум.

Простые модели пространственного распределения значений признаков могут быть следующие. Два участка (кванта) различаются: 1) уровнем признаков, 2) трендом уровня, 3) уровнем варьирования, 4) трендом уровня варьирования, 5) любой комбинацией этих закономерностей. Контур, в пределах которых признаки случайно колеблются около средней, назван В. И. Василевичем (1967) гомогенным, а с трендом уровня — клинальными. Использование указанных нами моделей приводит к большому числу типов контуров по характеру варьирования признаков. Мы также различаем гомогенные (без тренда уровня) и клинальные контуры, характеризуемые трендом уровня признаков. Среди них возможны варианты: 1) гомогенные диффузные контуры с низким варьированием, 2) гомогенные пестротные (с высоким уровнем варьирования) без тренда варьирования, 3) гомогенные пестротные с трендом варьирования

ния, 4) клинальные с низким уровнем варьирования и без его тренда, 5) клинальные с высоким уровнем варьирования и без его тренда, 6) клинальные с высоким уровнем варьирования и его трендом.

В настоящей работе авторы предлагают методику выделения в растительном покрове участков (квантов), достоверно различающихся заданными признаками. Объектом, на котором разрабатывалась и была опробована методика, служил напочвенный покров сухих сосняков северо-запада РСФСР. Кроме того, были использованы опубликованные материалы других авторов. Сравнительная простота сложения выбранных объектов позволила оценить полученные результаты.

Решение задачи проводится в 2 этапа: определение места подозреваемой границы между квантами и сравнение двух соседних квантов по указанным ранее признакам. Строго говоря, можно было бы перебрать все возможности, разбивая трансекты последовательно на участки разного размера, каждый раз проверяя различия соседних квантов. Оптимальным разбиением можно считать то, при котором выявляется наибольшее число статистически достоверных различающихся квантов. Но такой способ крайне трудоемок даже при современной вычислительной технике. Возможно предварительное расчленение трансекта по зонам высокого и низкого обилия видов, как это делает Василевич (1975), с последующей проверкой различия выделенных участков на квантованность. Но в некоторых случаях, например при соседстве двух клинальных квантов и тем более отличающихся уровнем варьирования, нащупать границу между ними не удается.

По предлагаемой методике поиск границ объективно, обеспечивая воспроизводимость результатов, проводится с использованием расстояния между площадками в гиперпространстве. В качестве основного рассчитывается расстояние между исходной и последующими площадками — $R_{1,i}$. При этом мы исходили из того, что при изменении закономерности распределения по трансекте исходных признаков (обилия видов) меняется и характер распределения $R_{1,i}$. Так, если рядом друг с другом находятся 2 гомогенных кванта, то наблюдаются 2 примыкающих ряда $R_{1,i}$ с низкими и высокими значениями (пример различия уровнем признака). Если соседствующие контуры различаются уровнем варьирования исходных признаков, то образуется 2 зоны $R_{1,i}$: одна с малыми и вторая с большими и малыми значениями. Таким образом, появление в ряду хотя бы одного значения $R_{1,i}$, существенно отличающегося от предыдущих, может свидетельствовать о переходе одного кванта в другой. Достоверность скачка $R_{1,i}$ проверяется статистически. Относятся ли отскакивающие значения $R_{1,i+k}$ к совокупности предыдущих, проверяется с помощью нормированного отклонения

$$t = \frac{\bar{R}_{1,i} - R_{1,i+k}}{S_{R_{1,i}}},$$

где $\bar{R}_{1,i}$ — среднее значение ряда, $S_{R_{1,i}}$ — среднее квадратическое отклонение этого ряда, $R_{1,i+k}$ — проверяемое значение.

Иногда на границе с клинальным квантом первое подозреваемое значение оказывается недостоверным, тогда следует проверять следующее. После обнаружения скачка строится новый ряд, где исходной берется площадка, на которой обнаружен скачок. В случае визуального выраженного тренда начало нового ряда совмещается с началом тренда. Такой сдвиг не противоречит теории, так как в силу континуума (в том виде, как это свойство растительного покрова определено ранее) фиксированных границ между квантами не существует, а имеется зона перехода одного кванта в другой.

При соседстве двух клинальных квантов, различающихся трендом, определить границу между ними по ряду $R_{1,i}$ не удается, поэтому анализируется также ряд последовательных разниц $\Delta R_{1,i}$. На границе клинальных квантов возникают перепады значений $\Delta R_{1,i}$, поэтому и здесь можно воспользоваться нормированным отклонением

$$t = \frac{\Delta \bar{R}_{1,i} - \Delta R_{1,i+k}}{S_{\Delta R_{1,i}}}.$$

Наконец, в некоторых, по-видимому, весьма редких случаях, например при соседстве двух квантов, различающихся трендом варьирования, обнаруживается скачок только в ряду вторых разниц $\Delta|\Delta R_{1,i}|$ (берутся модули первых разниц), достоверность его также определяется с помощью критерия t .

Итак, анализ трех рядов $-R_{1,i}, \Delta R_{1,i}, \Delta|\Delta R_{1,i}|$ — приводит к выявлению возможных границ между квантами. Как уже говорилось, границы эти условны в том смысле, что указывают на зону перехода одного кванта в другой. По этой причине при дальнейшей обработке материала одинаково правомерным является: 1) исключение пограничных площадок, 2) включение одних и тех же пограничных площадок в оба кванта, 3) проведение границы между любыми площадками в зоне контакта квантов. Необходимо иметь в виду, что второй и третий варианты при статистическом сравнении соседних квантов приводят к снижению различий между ними.

Установление границ между квантами еще не доказывает выявления самих квантов, их достоверности. Требуется подтверждение различия соседних предельно выделенных участков трансекта хотя бы по одному из указанных ранее признаков: уровню исходных признаков, тренду уровня, варьированию или тренду варьирования. Это составляет второй этап работы.

Для выявления различий в уровне признаков вопрос поставлен следующим образом: отличаются ли среднее, полученное из расстояний каждой площадки первого кванта от средней площадки этого кванта, и среднее из расстояний каждой площадки второго кванта от средней площадки также первого кванта? Для этого для отрезка трансекта, включающего 2 участка (кванта), рассчитываем новый ряд $R_{1,i}$ (расстояния каждой площадки от средней площадки первого кванта). Последовательный ряд $R_{1,i}$ оказывается организованным в однофакторный дисперсионный комплекс из двух блоков, соответствующих двум квантам. Различие между средними блоков определяется по критерию Фишера $F_{x/z} = S_x^2/S_z^2$, число степеней свободы $\nu_x=1$, $\nu_z=n-2$, где n — число значений $R_{1,i}$ во всем ряду. Здесь S_x^2 — факториальное варьирование, S_z^2 — случайное варьирование определяются следующим образом

$$S_x^2 = \frac{(\bar{R}_{(I,i)I} - \bar{R}_{1,i})^2 n_I + (\bar{R}_{(I,i)II} - \bar{R}_{1,i})^2 n_{II}}{\nu_x},$$

$$S_z^2 = \frac{\Sigma (R_{(I,i)I} - \bar{R}_{(I,i)I})^2 + \Sigma (R_{(I,i)II} - \bar{R}_{(I,i)II})^2}{\nu_z},$$

где $R_{(I,i)I}$, $R_{(I,i)II}$ — расстояние между площадками соответственно первого (I) и второго (II) блоков и средней площадкой первого блока. $\bar{R}_{(I,i)I}$, $\bar{R}_{(I,i)II}$ — средние расстояния в первом и втором блоках, $\bar{R}_{1,i}$ — среднее всего комплекса. При $F_{x/z} \geq F_\alpha$ (табличное значение на принятом доверительном уровне — 0.95) различие уровня признаков считается обнаруженным. Иными словами, участки достоверно различаются.

Различие в варьировании признаков двух квантов устанавливается в том же дисперсионном комплексе с помощью $F_z = S_{zI}^2/S_{zII}^2$ при $S_{zI}^2 > S_{zII}^2$ либо $F_z = S_{zII}^2/S_{zI}^2$ при $S_{zII}^2 > S_{zI}^2$; число степеней свободы $\nu_{zI} = n_I - 1$, $\nu_{zII} = n_{II} - 1$, где n_I и n_{II} — число значений $R_{1,i}$ в квантах I и II. Варьирование определяется

$$S_{zI}^2 = \frac{\Sigma (R_{(I,i)I} - \bar{R}_{(I,i)I})^2}{n_I - 1},$$

$$S_{zII}^2 = \frac{\Sigma (R_{(I,i)II} - \bar{R}_{(I,i)II})^2}{n_{II} - 1}.$$

Тренд уровня (постепенное увеличение или уменьшение признаков в пределах кванта) определяется порознь для каждого кванта. Для этого используются те же ряды, что и для определения границ квантов ($R_{1,i}$ — расстояния от исходной площадки данного кванта до каждой последующей). Для оценки достоверности тренда применен критерий $F_T = \Sigma(\Delta R_{1,i})^2 / (\Sigma(R_{1,i} - \bar{R}_{1,i})^2)$ при числе степеней свободы $n-1$. Критические значения для этого критерия привел

Л. Закс (1976). Если $F_{\text{тв}} < F_{\alpha}$, то тренд можно считать обнаруженным. Знак тренда определяется по возрастанию или уменьшению значений $R_{1,i}$ в данном кванте. Оценки трендов проводятся в обоих сравниваемых квантах. Различие квантов по тренду уровня признаков может считаться установленным, если в одном из них тренд обнаружен, а в другом его нет или же тренд имеют оба кванта, но знаки трендов противоположные.

Тренд варьирования признаков в пределах кванта (постепенное увеличение или уменьшение варьирования) приводит к тренду в последовательном ряду $R_{i,i+1}$ расстояний между соседними площадками. В этом случае мы поступаем аналогично предыдущему, рассчитывая для каждого кванта

$$F_{\text{тв}} = \frac{\sum (\Delta R_{i,i+1})^2}{\sum (R_{i,i+1} - \bar{R}_{i,i+1})^2}$$

— число степеней свободы $\nu = n - 1$. Вообще говоря, можно было бы пойти дальше — устанавливая различные степени выраженности тренда в квантах, имеющих тренд одного знака. Для этого потребовалось бы существенно усложнить методику, особенно учитывая, что тренд может иметь ускорение (на графике криволинеен). Поскольку в нашу задачу не входит детальная характеристика квантов, мы ограничимся простыми моделями и они демонстрируют возможность обнаружить квантованность растительного покрова.

Как уже говорилось, кванты могут различаться либо одним из типов закономерностей распределения признаков в пространстве, либо их комбинацией.

Теперь схематически определим порядок работы. Вначале проводим членение трансекта на кванты. С этой целью строятся ряды евклидовых расстояний. Поскольку мы не знаем, с какими контурами имеем дело и какими рядами R должны пользоваться, сразу рассчитываем 3 ряда — первый или основной $R_{1,i}$ (расстояние между исходной площадкой или средней из 2—3 первых площадок) и ряды первой и второй производных — $\Delta R_{1,i}$ и $\Delta |\Delta R_{1,i}|$. Расчет рядов ведется до появления в каком-либо из них значения, существенно отличающегося от предыдущих. Это подозреваемое значение проверяется, как было показано ранее, с помощью нормированного отклонения. Строго говоря, следовало бы проверить принадлежность каждого значения R к совокушности предыдущих, но на практике этого не требуется. Если скачок, как мы его называем, достоверен, т. е. намечена граница первого контура, вновь рассчитываются 3 ряда расстояний; исходной берется площадка, на которой обнаружен скачок. Вновь повторяется вся процедура, в результате которой трансекта оказывается расчлененной на контуры. Иногда встречаются случаи, когда указанным способом невозможно выявить «отскакивающее» значение, поэтому анализ проводится и в обратном направлении, начиная с конца трансекты, двигаясь к ее началу. На втором этапе, используя приведенные ранее формулы, последовательно сравниваются попарно намеченные участки по уровню признака $F_{x/z}$, варьированию F_z , тренду уровня $F_{\text{тв}}$, тренду варьирования $F_{\text{тв}}$. Если 2 соседних контура не различаются своими закономерностями, они объединяются, и этот новый объединенный контур сравнивается с соседним следующим. Здесь необходимо сделать одно замечание. Разрешающая способность предлагаемой нами методики, как и любых других, имеет свои пределы. Так, малое число площадок в пределах кванта может не позволить выявить его отличие от соседнего. В частности, чем меньше тренд, тем большее число учетных единиц требуется для его выявления с достаточно высокой вероятностью. В принципе размер кванта может быть равен 1—2 площадкам, и тогда единственным указанием на его существование является скачок в ряду $R_{1,i}$, либо одной из разностей. Как же поступить при конкретном анализе трансект, если предварительно выделенный квант оказался неотличимым от предыдущего? Если строго следовать методике, эти 2 кванта должны быть объединены и считаться одним. Если же принять во внимание только что указанные ограничения возможности метода, то вполне логично признать такие участки (кванты) не подлежащими дальнейшему анализу и исключить из рассмотрения. Таким образом, любой трансект будет содержать отрезки, вполне расчлененные на кванты, и отрезки, заключающие в себе неопределенность.

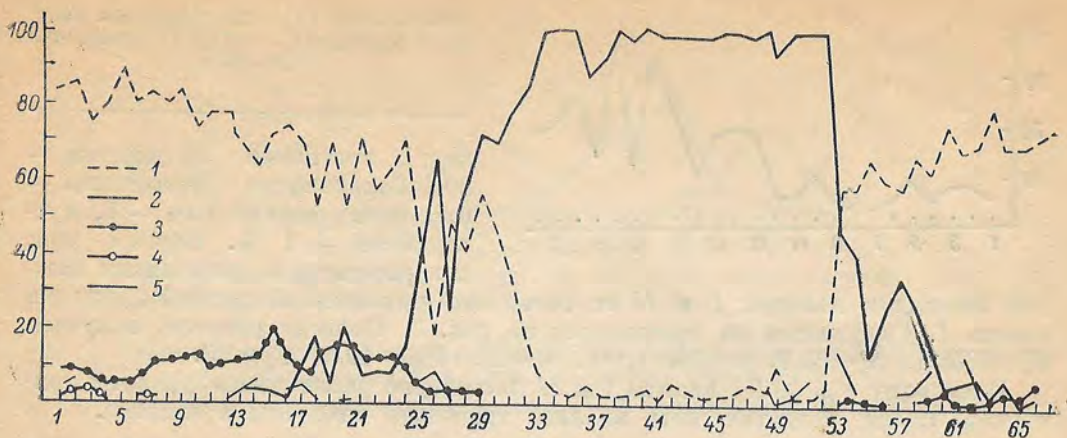


Рис. 1. Трансект в напочвенном покрове зеленомошно-лишайникового сосняка (Псковская обл., Гдовский р-н).

Здесь и на рис. 4: по оси абсцисс — номера площадок; по оси ординат — проективное покрытие, %: 1 — кустистые лишайники, 2 — зеленые мхи, 3 — бокальчатые лишайники, 4 — политриховые мхи, 5 — кустарнички.

Рассмотрим результаты анализа конкретного трансекта, представленного на рис. 1. Методика описания — мелкие площадки (0.1 м^2), расположенные впритык. На рис. 2 показан весь ход разбиения трансекта на участки, ограниченные отскакивающими значениями $R_{1,i}$. Видно, что в одних случаях граница между квантами выражена четко и хорошо определяется (рис. 2, II, IV), в других ее уловить труднее. Не всякое отскакивающее значение $R_{1,i}$ следует принимать за начало следующего кванта. Так, площадка 10 (соответствующее ей значение $R_{1,10}$) достоверно отличается от совокупности предыдущих, но за ней следуют более низкие значения R , указывающие, что первый квант еще продолжается, поэтому условную границу мы проводим между площадками 12 и 13. Видно, что после площадки 13 начинается квант, отличающийся от предыдущего уровнем и более варьирующий (мозаичный). Переход от одного кванта к другому, показанный на рис. 2, III, очень плавный. В этом случае нам пришлось применить прием, указанный ранее, а именно проверить достоверность скачка не на площадке 33, а на площадке 34. Наш трансект оказался разбитым на пять квантов: площадки 1—12, 13—24, 25—32, 33—52 и 53—67. Теперь встает задача сравнить выделившиеся участки. Для примера покажем сравнение квантов I (площадки 1—12) и II (площадки 13—24). Находим среднюю площадку кванта I (среднее обилие всех видов, встреченных на площадках с 1 по 12). Она имеет

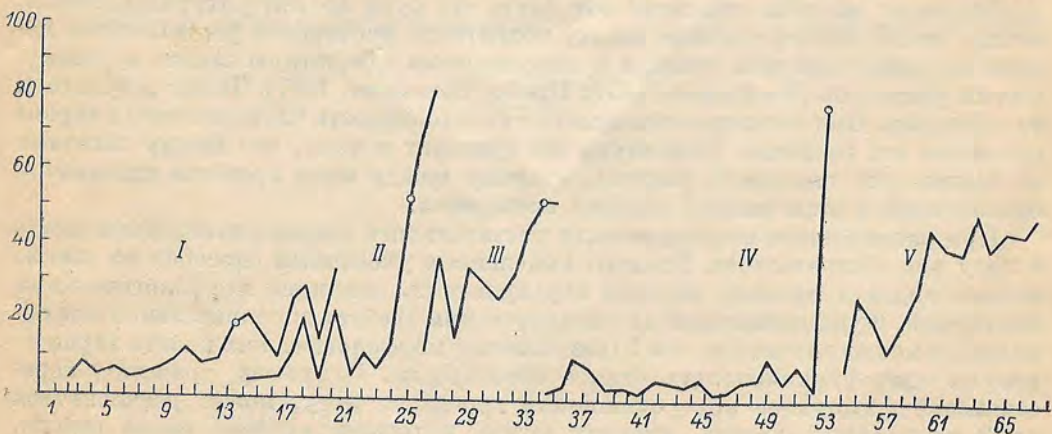


Рис. 2. Разбиение трансекта на кванты.

Здесь и на рис. 3: по оси абсцисс — номера площадок; по оси ординат значения R : I — $R_{1,i}$, II — $R_{13,i}$, III — $R_{25,i}$, IV — $R_{33,i}$, V — $R_{53,i}$.

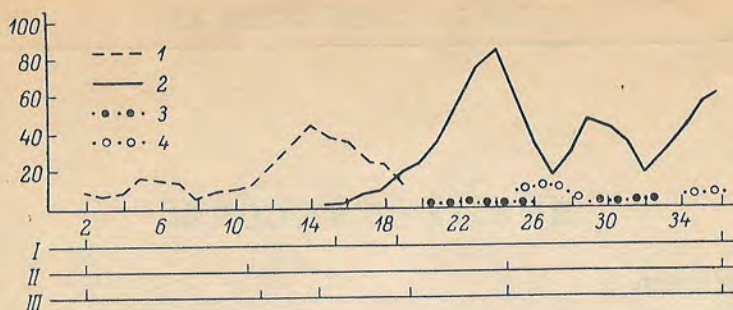


Рис. 4. Членение трансекта разными способами: при традиционном подходе (I), по методу Василевича (II) и по методу авторов статьи (III).

1 — *Halocnemum strobilaceum*, 2 — *Petrosimonia brachiata*, 3 — *Echinopsilon sedoides*, 4 — *Artemisia monogyra*.

тельного покрова — коном (Ипатов, 1970). Мелкие кванты, выделенные на основе небольших площадок, могут быть организованы по тем же законам в более крупные, в своего рода «пачки» квантов. Выделение таких крупных квантов возможно с применением той же самой методики обработки материала, но с использованием более крупных учетных единиц (площадок). Такая квантованность растительного покрова на разных масштабных уровнях нашла свое отражение в выделении микро-, мезо- и макрокомбинаций (Исаченко, 1966). Наконец, использование разных признаков — обилия видов, суммарного проективного покрытия синузид, обилия видов с поправкой на их ценотическую значимость, с учетом распространения их корневых систем и т. д. — может привести к выявлению разного рода квантов. Все это разнообразие форм квантов свидетельствует о сложной организации растительного покрова; оно же нередко, по-видимому, подталкивает исследователя к простому пути — признанию постулата о континууме растительного покрова, освобождающего его (исследователя) от порой весьма трудного выделения в природе квантов.

ЛИТЕРАТУРА

- Василевич В. И. К методике анализа границ фитоценозов. — Бюл. МОИП, отд. биол., 1967, т. 72, вып. 3, с. 85—93. — Василевич В. И. Выявление границ в растительном покрове. — Бюл. МОИП, отд. биол., 1975, т. 80, вып. 3, с. 94—103. — Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с. — Ипатов В. С. Некоторые вопросы теории организации растительного покрова. — Бот. журн., 1970, т. 56, № 2, с. 184—195. — Исаченко Т. И. Изучение и картографирование структуры растительного покрова. — Тез. докл. совещ. по геобот. картир. и районир., Рига, 1966, с. 65—70. — Прейс Ю. И., Самойлов Ю. И. Опыт выявления границ между элементами мозаики в луговой растительности. — Бюл. МОИП, отд. биол., 1977, т. 82, вып. 4, с. 55—67.

Ленинградский государственный университет.

Получено 24 V 1983.