

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ В ОЦЕНКЕ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЛЕСНУЮ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ

Р. С. Пищулин, Ю. А. Семенищенков

Брянский государственный университет имени академика

И. Г. Петровского, Брянск, Россия,

e-mail: norvegiya137@yandex.ru, yuricek@yandex.ru

ON THE USE OF MATHEMATICAL INDICATORS IN THE ASSESSMENT OF ANTHROPOGENIC IMPACT ON FOREST VEGETATION

Roman S. Pishchulin, Yury A. Semenishchenkov

Аннотация. Рассмотрено три пространственных индекса, отражающих антропогенное воздействие на растительный покров, на примере лесного массива в староосвоенном регионе России (Брянская обл.). На основании интерпретации полученных данных сделан вывод о необходимости поиска статистически достоверных метрик для выявления антропогенного воздействия на пространственную структуру лесной растительности.

Ключевые слова: лесная растительность, пространственная гетерогенность, Жирятинское участковое лесничество

Abstract. This article discusses three spatial indexes that reflecting the anthropogenic impact on vegetation cover, using the example of a forest area in the old-developed region of Russia (Bryansk region). Based on the interpretation of the data obtained, it is concluded that it is necessary to search for statistically reliable metrics to identify the anthropogenic impact on the spatial structure of forest vegetation.

Keywords: forest vegetation, spatial heterogeneity, Zhiryatinskoe forestry

За последние несколько десятилетий наука встала на «рельсы математического моделирования», этот процесс не обошел стороной и фитоценологию. Математизация полученных сведений сейчас формирует огромную базу данных, и главной задачей специалиста становится ее грамотное интерпретирование и использование. Полагается, что на основе анализа достаточного объема информации открывается перспектива спрогнозировать дальнейшее состояние растительного сообщества, оценить и предотвратить потен-

циальные риски его существования. Интересным представляется разработка и совершенствование алгоритмов оценки антропогенного воздействия на пространственную структуру растительных сообществ.

Важным направлением в фитоценологии является изучение пространственной структуры растительности, которую можно рассматривать как сочетание взаимодействующих пространственных элементов, которые, в свою очередь, характеризуются площадью, конфигурацией, ориентацией, соседством и фрагментированностью (Forman, Godron, 1986). В среде информационных технологий на основе экспериментальных данных есть возможность смоделировать существующую пространственную структуру фитоценоза, а также варианты его развития в будущем при взаимодействии с различными переменными (Гончаренко, 2004). Данное направление в фитоценологии способно значительно увеличить функционал исследователя, а полученные в ходе исследования сведения могут быть использованы не только в региональном природообустройстве (например, лесохозяйственной деятельности), но и в реконструкции нарушенных человеком биомов, а в перспективе даже при терраформировании других планет.

В последние десятилетия широко используются специальные математические метрики, которые позволяют связать показатели пространственной неоднородности растительности с видовым разнообразием и богатством, а также таксационными показателями древостоев (Биогеоценотический..., 1999; Wangen et al., 2006; Hu et al., 2011; Molina et al., 2015; Crouzeilles, 2016; Котлов, 2023). Отмечена недостаточная изученность связи количественных параметров структуры биогеоценозов с их типами, устойчивостью, сукцессионным статусом и внутренними ландшафтно-экологическими процессами (Викторов, 1998; Пищулин, 2024). При совместном использовании данных дистанционного зондирования Земли, полевых измерений и картографического моделирования возможна разносторонняя математическая оценка типологического разнообразия лесной растительности. При этом наиболее распространены показателями, имеющими широкое применение в современных фитоценологии, картографии и ландшафтоведении являются: разнообразие на основе адаптированной к картографируемым объектам растительности меры энтропии Шеннона, сложность и дробность растительности, степень доминантности растительности на основе меры выровненности (индекс Симпсона), индексы Менхника и Маргалефа и др. (Марцинкевич, Счастливая, 2005; Черных, 2011; Кобозев, Семенищенков, 2014; Пищулин, 2024).

Большой интерес вызывает изучение пространственной структуры антропогенно нарушенной растительности, мозаичность которой формируется под воздействием выпасывания ввиду рекреационной нагрузки, выпаса сельскохозяйственных и охраняемых животных, выкашивания травяных и рубок лесных растительных сообществ, ресурсных заготовок, заноса эпидемиологических болезней и вредителей, пожаров (Смирнова, 1998; Восточно-европейские..., 2004; Дымова, 2010; Майорова, Рябухин, 2012; Уланова, 2015; Сапронова, Балабина, 2016; Кутявин, Бобкова, 2017). Вследствие этого появляются характерные ландшафты, пространственные пустоты, ячейки с растительностью, отличной от типичной растительности окружающего сообщества и некоторые другие изменения ее пространственной структуры.

Применительно к пространственной организации разнообразие и масштабы антропогенного преобразования лесной растительности могут быть отражены следующими показателями: количество и вклад в общую площадь лесного массива выделов с геометрически ровными очертаниями (возникают при сплошных рубках и при лесопосадках), а также мелкоконтурность и многочисленность выделов на небольшой площади в связи с интенсивным преобразованием (рубки леса, создание лесных культур), однако последний показатель может быть обусловлен и физико-географическими условиями (Пишулин, 2024). Массивы естественных насаждений, как правило, не имеют правильных очертаний (круг, квадрат, трапеция и т. д.).

В настоящей статье обсуждаются проблемные вопросы интерпретации математических показателей для оценки антропогенного воздействия на растительный покров.

Материалы и методы. В качестве модельного для изучения закономерностей пространственной структуры лесной растительности нами был выбран лесной массив Жирятинского участкового лесничества, расположенный в центральной части Брянской области. Эта территория занимает значительно преобразованный хозяйственной деятельностью участок древнеаллювиальной террасы р. Судость, изрезанной долинами малых рек, в пределах Судость-Среднедеснинского ботанико-географического района широколиственных лесов с участием ели (зона широколиственных лесов). Леса этой полосы соответствуют «северной» ботанико-географической полосе широколиственных лесов, которую отличает небольшое присутствие *Picea abies* (Пишулин, 2024). Территория лесничества разделена р. Крупец (левый приток р. Судость) на «северную» и «южную» части.

Анализ гетерогенности лесной растительности проведен на основе плана лесонасаждений лесничества масштаба 1 : 25 000 (Лесохозяйственный..., 2018). Для отражения антропогенного пространственного преобразования растительности использованы геометрические коэффициенты:

- индекс округлости формы: $CIRC (circularity) = 4\pi S/P^2$, где S — площадь выдела, а P — его периметр (Getzin et al., 2012);

- комплексный индекс формы (gap shape complexity index): $GSCI = P\sqrt{4\pi S}$ (Getzin et al., 2012);

- коэффициент кривизны: $K_k = 1 - 2\pi\sqrt{(S/\pi)}/P$ (Пищулин, 2024).

Результаты и обсуждение. Как показало проведенное исследование, возникают трудности в интерпретации перечисленных математических показателей в оценке неоднородности растительности.

Индекс округлости формы (circularity index) (Getzin et al., 2012). Его значения варьируют от 0 до 1, где при приближении к 1 форма фигуры стремится к кругу. По всей видимости, индекс округлости форм может быть использован при определении отклонения фигуры от круга, т. к. при сопоставлении данных выяснилось, что очертания выдела растительности, индекс для которого максимально приближен к единице, не обязательно напоминает круг, но имеет преимущественно внутренние углы менее 180° . По-другому, это может быть правильный многогранник, центры вписанной и описанной окружностей которого будут стремиться к совпадению. Поэтому интерпретация данного показателя вызывает трудности.

Комплексный индекс формы (gap shape complexity index). Данный индекс использовался S. Getzin с соавторами (Getzin et al., 2012) применительно к незанятым растительностью окнам в лесном пологе (forest gaps). В нашем случае окно может рассматриваться как выдел особого типа. Наш опыт показывает, что интерпретация данного индекса вызывает трудности. Например, крупный лесной выдел с визуально сложными очертаниями действительно характеризуется высокими показателями сложности формы. Однако из-за того, что в формуле задействована площадь фигуры, значения индекса будут возрастать при увеличении площади фигуры (даже если это круг) и, закономерно, периметра. Следовательно, этот коэффициент требует доработки.

Коэффициент кривизны. Использование коэффициента кривизны основано на том, что минимальный периметр выдела заданной площади — длина окружности круга с данной площадью,

а кривизну можно оценить соотношением длины контура выдела к длине окружности круга такой же площади. Чем выше значение, тем больше кривизна контура выдела, которая определяется как физико-географическими условиями, так и антропогенным воздействием (формирование как сложных искусственных границ выделов, так и наоборот их упрощение), независимо от площади выдела. По-видимому, низкие значения данного индекса могут свидетельствовать о значительной равномерности в пространственной структуре распределения экологических условий, в то время как высокие могут указывать на их высокую мозаичность. Данные территориальные параметры можно оценить через общую площадь, занимаемую, условно, выделами с низкой или высокой кривизной. По аналогии с индексом округлости формы, значения коэффициента кривизны могут варьировать от 0 до 1. Для наглядности полученные значения индекса мы разделили на 3 интервала: $< 0,32$ — низкое значение кривизны; $0,33-0,65$ — среднее; $> 0,65$ — высокое. Проведенный сравнительный анализ двух участков лесничества показал, что в среднем около 61 % выделов по площади попадают в интервал «низких» значений K_k . Отличия между двумя участками лесничества невелики (59,4 % — в северном против 62,3 % — в южном). «Высокие» значения K_k характерны менее чем для 2 % от всех выделов по площади (1 % в северном фрагменте, против 1,4 % — в южном). Интерпретация этих данных с позиций антропогенного формирования границ выделов требует анализа. По крайней мере, выявлены некоторые антропогенные выделы с искусственными прямолинейными границами с неожиданно высокими значениями коэффициента K_k . По нашему мнению, индекс также требует доработки.

Таким образом, мы не можем рекомендовать рассмотренные индексы для оценки степени преобразования растительного покрова в результате рубок. Необходим дальнейший поиск статистически достоверных показателей для выявления антропогенного воздействия на пространственную структуру лесной растительности.

ЛИТЕРАТУРА

- Викторов А. С. Математическая морфология ландшафта. М.: Тратек, 1998. 180 с.
- Восточноевропейские леса: история в голоцене и современность: в 2 кн. М.: Наука, 2004. Т. 1. 479 с.
- Гончаренко И. В., Дидух Я. П. Моделирование потенциального флористического состава растительных сообществ // Вісник Донец. ун-ту: Сер. А. Природн. науки. 2004. С. 429–441.

- Дымова Т. В. Оценка состояния растительного покрова пастбищ дельты Волги по состоянию растений-индикаторов // Естественные науки. 2010. № 1. С. 18–24.
- Евстигнеев О. И., Коротков В. Н., Беляков К. В. и др. Биогеоценотический покров Неруссо-Деснянского полесья: механизмы поддержания биологического разнообразия. Брянск, 1999. 176 с.
- Кобозев Д. А., Семенищенков Ю. А. К оценке пространственной гетерогенности лесной растительности при крупномасштабном картографировании на основе эколого-флористической классификации // Вестник Брянского гос. ун-та. Сер.: точные и естественные науки. 2014. № 4. С. 93–97.
- Котлов И. П. Пространственная структура лесного покрова Московской области (оценка на основе количественных метрик фрагментации): Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 2023. 25 с.
- Кутявин И. Н., Бобкова К. С. Влияние лесных пожаров на возрастную структуру древостоев и фитомассу сосновых фитоценозов Печоро-Илычского государственного биосферного заповедника // Природные и исторические факторы формирования современных экосистем Среднего и Северного Урала. Якша: Изд-во Печоро-Илычского заповедник, 2017. С. 87–90.
- Лесохозяйственный регламент Выгоничского лесничества Брянской области. Брянск, 2018. 361 с.
- Майорова Л. П., Рябухин П. Б. Воздействие лесозаготовок на окружающую среду // Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та. 2012. № 8. С. 73–77.
- Марцинкевич Г. И., Счастливая И. И. Оценка ландшафтного разнообразия природных и природно-антропогенных комплексов Беларуси // Природопользование. Минск, 2005. Вып. 11. С. 98–105.
- Пищулин Р. С. К вопросу об интерпретации математических показателей пространственной неоднородности лесной растительности // Уч. записки Брянского гос. ун-та. 2024. № 2. С. 29–35.
- Сапронова С. Г., Балабина И. П. Динамика растительных сообществ под влиянием сенокосения // Современные тенденции развития науки и технологий. 2016. № 7–1. С. 49–51.
- Смирнова О. В. Популяционная организация биоценотического покрова лесных ландшафтов // Успехи современной биол. 1998. Т. 118. № 2. С. 148–165.
- Уланова Н. Г. Гибель ели после вспышки численности короеда-типографа в европейской части России. Катастрофа, климатический тренд, сукцессия или просто динамические изменения? // Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сб. науч. тр. М., 2015. С. 19–22.
- Черных Д. В. Количественная оценка сложности и разнообразия ландшафтного покрова Русского Алтая // Изв. Алтайского гос. ун-та. Сер.: Биологические науки. Науки о Земле. Химия. 2011. № 3/2. С. 60–65.
- Crouzeilles R., Curran M. Which landscape size best predicts the influence of forest cover on restoration success? A global meta-analysis on the scale of effect // Journ. of Appl. Ecol. 2016. Vol. 53. No 2. P. 440–448.

- Forman R. T. T., Godron M. Landscape Ecology. N.-Y.: John Wiley & Sons, 1986. 648 p.
- Getzin S., Wiegand K., Schöning I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles // Methods in Ecology and Evolution. 2012. No 3. P. 397–404. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210X.2011.00158.x>.
- Hu G. et al. Determinants of plant species richness and patterns of nestedness in fragmented landscapes: evidence from land-bridge islands // Landscape Ecology. 2011. Vol. 26. No 10. C. 1405–1417.
- Molina J. R. et al. Fragmentation of *Araucaria araucana* forests in Chile: quantification and correlation with structural variables // Forest-Biogeosciences and Forestry. 2015. Vol. 9. No 2. P. 244.
- Wangen S. R., Webster C. R., Griggs J. A. Spatial characteristics of the invasion of *Acer platanoides* on a temperate forested island // Biol. Inv. 2006. Vol. 8. No 5. P. 1001–1012.