

## МОДЕЛЬ САМООРГАНИЗАЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА В УСЛОВИЯХ ДЕФИЦИТА РЕСУРСОВ: СРАВНЕНИЕ НАБЛЮДАЕМЫХ И МОДЕЛЬНЫХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПАТТЕРНОВ «ВЕДЬМИНЫХ КРУГОВ»

Грабовский В.И.<sup>1</sup>, Грабарник П.Я.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, Москва, Россия*  
[wgrabo@mail.ru](mailto:wgrabo@mail.ru)

<sup>2</sup>*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия*  
[pavel.grabarnik@issp.psn.ru](mailto:pavel.grabarnik@issp.psn.ru)

**Аннотация:** В работе проведен статистический анализ пространственного размещения так называемых «ведьминых кругов» в Намибии – участков в травянистом покрове, лишенных растительности. Показано, что расположение таких участков хорошо соответствует предложенной модели (Грабовский, 2017) и значительно усиливает позиции объяснений этого феномена с позиций гипотезы самоорганизации растительного покрова.

Известно, что в условиях дефицита ресурсов, например, воды, растительный покров теряет целостность: участки, покрытые растительностью, перемежаются участками открытого грунта (Tongway et al., 2001). В полупустынях Намибии и Австралии разрывы в травянистом покрове (матриксе) имеют округлую форму и названы «ведьмиными кругами» (ВК) (Cramer et al., 2013). Существуют две основные конкурирующие гипотезы формирования ВК, в первой из которых формирование ВК объясняют активностью насекомых (главным образом, термитов) (Juergens, 2013), а во второй самоорганизацией растительного покрова (Getzin et al., 2015, Tarnita et al., 2017). Ранее была предложена модель образования ВК на основе клеточного автомата (Грабовский, 2017), которая имитирует самоорганизацию растительности и хорошо воспроизводит основные характеристики ВК в Намибии: форму, размеры, расстояния между ВК, тип пространственного распределения, а также характерные времена жизни отдельных ВК. Известно, что ВК «рождаются» (часть травы в матриксе вымирает, образуя округлую проплешину), «созревают» (образуют венчик высокой травы по периферии круга), относительно длительное время пребывают без видимых изменений и затем внезапно «умирают» (зарастают травой). Жизненный цикл длится десятилетия. Именно объяснение жизненного цикла ВК остается главной проблемой моделей, отвечающих гипотезе самоорганизации (Getzin et al., 2015).

Детальное описание алгоритма модели приведено в предыдущей работе (Грабовский, 2017). Суть алгоритма сводится к тому, что ресурс, поступающий извне и необходимый для построения биомассы растительности, в локальном масштабе (т.е. некоторой области, например, круга радиуса  $R$ ) не может быть ниже выбранного предельно допустимого порогового значения. Если при расчете суммарного ресурса в пределах круга радиуса  $R$  оказывается, что пороговая величина не достигнута, то биомасса в фокусной клетке «умирает», а доступный ресурс распределяется между всеми «живыми» клетками в радиусе  $R$ . Было показано, что в зависимости от величины притока ресурса и скорости метаболизма в модели образуются структуры по многим свойствам неотличимые от ВК в природе. В данной работе мы модифицировали модель, позволив радиусам  $R$  изменяться, и провели сравнение данных, полученных с помощью модели, и натурными данными. Для сравнения модельного пространственного размещения ВК и размещения, наблюдаемого в природе, были использованы методы стохастической геометрии, основанные на  $L$  и  $g$  статистиках (Грабарник, 2010). Натурные данные были получены из спутниковых карт картографического сервиса Google Maps. На выбранных площадках 400x400 м определялись геометрические центры каждого ВК и сравнивались наблюдаемое пространственное распределение с теми, которые были получены с помощью модели.

Для сравнения пространственного распределения результатов модели и натуральных данных были проведены по 20 повторных симуляций со следующими параметрами: приток ресурса на уровне 4,4 единицы, коэффициент скорости метаболизма равен 0,26. Для коррекции соответствия модели натурным данным варьировали пределы радиуса взаимодействий. В данном случае радиус был в пределах 1 – 6 единиц. Результаты  $L$  и  $g$ -тестов приведены на Рис. 1.

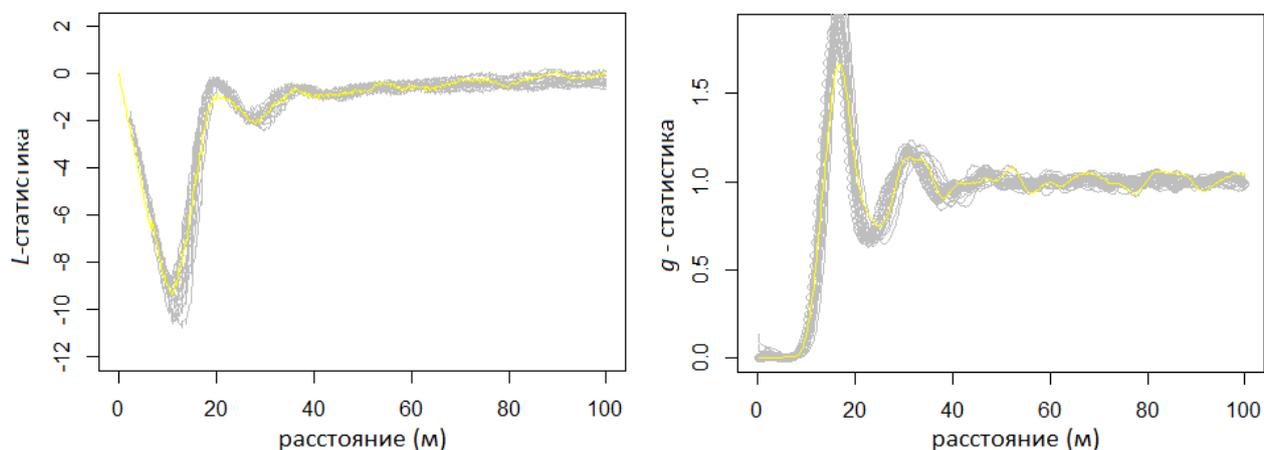


Рисунок 1. Результаты  $L$ -теста (справа) и  $g$ -теста (слева) пространственного распределения ВК, генерируемого моделью (серые линии), и натуральных данных (желтая линия).

Результаты, представленные на Рис.1, позволяют заключить о наличии строгого порядка в размещении «ведьминых кругов». Центры кругов располагаются в основном не ближе, чем на расстоянии 10-12 м, что соответствует минимуму  $L$ -статистики. Первый пик графика  $g$ -статистики характеризует типичное расстояние до ближайших соседей (~18 м). Второй пик отвечает удаленности второго слоя соседей (~30-34 м). Модель идеально воспроизводит пространственное распределение центров кругов, что выражается в соответствии поведения функциональных статистик для модельных прогонов и натуральных данных. Заметим, что такое точное соответствие трудно достижимо для других моделей самоорганизации растительного покрова.

Часть работы, соответствующая статистическому анализу данных, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-04-01348-а).

## Литература

- Грбарник П.Я. Анализ горизонтальной структуры древостоя: модельный подход // Лесоведение. 2010. № 2. С. 77–85.
- Грабовский В.И. Модель растительного покрова в условиях дефицита ресурса: “ведьмины круги” в Намибии // Журн. Общ. Биол., 2017, т. 78, №4, С. 65-79.
- Cramer M. D., Barger N. N., 2013. Are Namibian “Fairy Circles” the consequence of self-organizing spatial vegetation patterning? // PloS One. V. 8. №. 8. e70876..
- Getzin S., Wiegand K., Wiegand T., Yizhaq H., von Hardenberg J., Meron E., 2015. Adopting a spatially explicit perspective to study the mysterious fairy circles of Namibia // Ecography. V. 37. №. 1. P. 1-11.
- Juergens N., 2013. The biological underpinnings of Namib Desert fairy circles // Science. V. 339. №. 6127. P. 1618-1621.
- Tarnita, C. E., Bonachela, J. A., Sheffer, E., Guyton, J. A., Coverdale, T. C., Long, R. A., & Pringle, R. M. 2017. A theoretical foundation for multi-scale regular vegetation patterns // Nature. V. 541. №. 7637. P. 398-401.
- Tongway D. J., Valentin C., Seghieri J. (ed.). 2001. Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments: ecological processes and consequences for management. – Springer Science & Business Media. V. 149.