

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ БИОИНДИКАЦИОННОЙ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

© 2016

С.Л. Молчатский, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры химии, географии и методики их преподавания

И.В. Казанцев, кандидат биологических наук, декан естественно-географического факультета,
доцент кафедры химии, географии и методики их преподавания

Т.Б. Матвеева, кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии, экологии и методики обучения
Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара (Россия)

Аннотация. В данной статье проанализированы существующие на данный момент биоиндикационные методы исследования антропогенного загрязнения окружающей среды и рассмотрены особенности и область их применения. Особое внимание из данной группы методов уделено лишеноиндикации и оценке степени выраженности флуктуирующей асимметрии листовой пластинки и её изрезанности, т.к. они основаны на изучении геометрических характеристик структуры биологических объектов с помощью математической обработки данных с использованием специальных компьютерных программ. Показана возможность и перспективность применения метода измерения фрактальной размерности для качественной и количественной оценки загрязнения окружающей среды. Представленные в работе данные показывают, что учёт фрактальной природы в биологических системах позволяет обнаружить и исследовать принципиально новый круг явлений в биологии. Адекватность этого метода поставленным целям и задачам обеспечивается соответствующим математическим аппаратом. В рамках этого подхода оказывается возможным разработка и использование новых перспективных мониторинговых методов. В заключительной части работы предложена новая концепция биоиндикации, основанная на синтезе как классических, так и инновационных подходов к изучению и оценке качества окружающей среды в условиях техногенного загрязнения.

Ключевые слова: антропогенное загрязнение; биоиндикация; биологические индикаторы; флуктуирующая асимметрия; листовая пластинка; древесные растения; лишеноиндикация; лишайник; антропогенное воздействие; загрязнители; поллютанты; фрактальная размерность; фрактальный анализ; фрактальные кластеры.

В последнее время особенно актуальными являются постоянные наблюдения за изменениями состояния окружающей среды, вызванные антропогенными факторами. Система подобных наблюдений и прогнозов является основной составляющей экологического мониторинга. Для этих целей наиболее часто применяется достаточно эффективный и сравнительно недорогой способ мониторинга среды – биоиндикация, основанный на использовании живых организмов для оценки состояния окружающей среды [1–5], имеющий ряд преимуществ перед другими методами:

- высокая точность и объективность;
- чувствительность;
- территориальная локализованность;
- низкая трудоёмкость и быстрота получения материалов для исследования;
- сравнительная дешевизна проведения анализа.

В настоящее время значительное распространение получил биоиндикационный метод оценки загрязнения окружающей среды по морфологическим изменениям в целом растения или его органов. В частности, к наиболее перспективным направлениям биоиндикационного метода относится изучение флуктуирующей асимметрии листовой пластинки и характера ее изрезанности [6–10], а также лишеноиндикация [11–15]. Данные показатели отражают результат невозможности как организма в целом, так и его отдельных органов развиваться в направлении его генетической траектории, а нарушение стабильности развития проявляется при воздействии широкого спектра различных негативных факторов – загрязнения атмосферы и почв выбросами транспортных средств, промышленных предприятий, повышенным радиационным фоном.

Метод биоиндикации с использованием листьев растений (преимущественно древесных) широко рас-

пространён и применяется уже давно в экологических исследованиях для биомониторинга окружающей среды. Изучая отдельные морфометрические показатели листьев можно качественно судить о наличии загрязнителей в атмосферном воздухе и в почвах, на которых произрастают растения, а также количественно определить величину определённого загрязнения. Многими исследователями [16–20] отмечается зависимость выраженности степени флуктуирующей асимметрии листовой пластинки и, возможно, характера ее изрезанности от интенсивности загрязнения окружающей среды различными веществами, что является результатом накапливаемых ошибок в ходе индивидуального развития организма. При нормальном, ненарушенном состоянии окружающей среды, их уровень минимален, а при возрастании негативного воздействия – увеличивается, что приводит к существенному проявлению асимметрии и, как следствие, изрезанности. Таким образом, в условиях значительного загрязнения среды асимметрия и изрезанность листьев должны быть наиболее ярко выражены. Необходимо отметить, что исследования флуктуирующей асимметрии в основном связаны с работами, которые касаются изучения билатерально-симметричных организмов [21].

Лишеноиндикация как метод биоиндикационных исследований часто применяется в экологической практике [22–27] и основан на изучении как изменения структуры таллома под воздействием загрязнителей, так и количественного соотношения видового состава лишайников или их проективного покрытия на определенной территории. Долговременное воздействие даже малых концентраций загрязняющих веществ в окружающей среде вызывает у лишайников

такие повреждения, которые не исчезают вплоть до гибели их слоевищ, что влияет на их рост и развитие, а, следовательно, и на геометрию.

В целом, можно подчеркнуть, что на данный момент изучены основные области применения биоиндикаторов, определены их реакции на различную интенсивность загрязнения поллютантами, разработано и апробировано большое число методик биоиндикационных исследований, среди которых наиболее перспективными являются изучение флуктуирующей асимметрии листовой пластинки и характера ее изрезанности, а также степень развития таллома лишайника. Данные характеристики бесспорно являются геометрическими показателями и могут быть обработаны с помощью метода фрактального анализа.

Исходя из того, что геометрические характеристики листовых пластинок и талломов лишайников могут изменяться в зависимости от негативного воздействия окружающей среды, то эффективнее было бы использование метода, более точно отражающего зависимость геометрических характеристик живых объектов от условий и механизмов их роста. Это – метод измерения фрактальной размерности, получивший распространение с начала 80-х гг. благодаря работе Б. Мандельброта [28]. То, что все природные объекты природного происхождения являются фракталами, или правильнее сказать могут быть изучены с помощью метода фрактального анализа, показано во многих работах [28–37]. В них рассмотрены различные аспекты исследования фрактальных кластеров: механизм образования, компьютерное моделирование и т.д.

С точки зрения фрактальной геометрии, лист растения и таллом лишайника являются структурами, которые могут быть описаны особой величиной – фрактальной размерностью. Фрактальная размерность – это отношение, описывающее статистическую меру сложности изменения шаблона фрактала при его масштабировании. Так же она считается мерой возможности заполнения пространства фрактальным кластером и говорит о том, как фрактал изменяется относительно евклидова пространства, в котором он находится.

При изменении соотношения размеров полупластинки листа и их изрезанности, а также изменения ветвистости таллома лишайника при увеличении концентрации поллютантов в окружающей среде, фрактальная размерность так же будет закономерно изменяться. Поэтому значение фрактальной размерности достоверно можно использовать в качестве показателя в биоиндикационных исследованиях окружающей среды.

Одним из наиболее простых методов определения фрактальной размерности объекта является компьютерная обработка его цифрового изображения. Для вычисления фрактальной размерности при помощи компьютерных программ требуются цифровые фотографии или отсканированные изображения листовых пластинок. Масштаб изображения не важен, поскольку данный показатель не влияет на фрактальную размерность.

То, что, например, листья растений и таллом лишайника являются фрактальными объектами, легко доказать используя следующее наглядное сравнение листа берёзы и смоделированного на компьютере

фрактального объекта (рис. 1) или структуру дендритного фрактального кластера с фотографией лишайника (рис. 2). Если сравнить только границу обоих объектов в первом случае или соответствие структуры таллома лишайника структуре дендритных фрактальных кластеров во-втором, то аналогия не вызывает никаких сомнений.

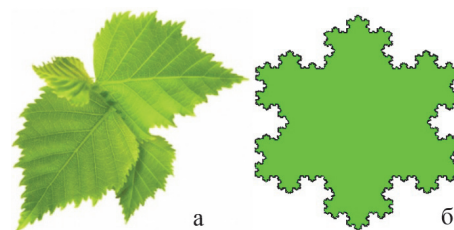


Рисунок 1 – Сравнение листа берёзы (а) с геометрическим объектом (б), смоделированным на компьютере

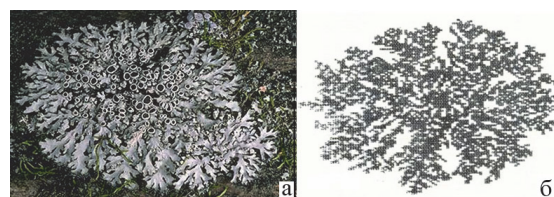


Рисунок 2 – Сравнение лишайника *Physcia stellaris* (а) с дендритным фрактальным кластером (б), смоделированным на компьютере [13]

На наш взгляд, представляется интересным проведение исследований, касающихся влияния антропогенной нагрузки на фрактальную размерность, структуру и морфометрические показатели органов растений. В качестве объектов можно использовать виды, ранее успешно зарекомендовавшие себя в биоиндикационных исследованиях и фрактальная размерность которых достаточно чётко прослеживается: *Betula pendula* Roth., *Tilia cordata* Mill., *Acer platanoides* L., *Populus balsamifera*, а так же *Physcia stellaris*, *Parmelia sulcata* и др.

Таким образом, применение метода биоиндикации, основанного на использовании метода фрактального анализа, позволяет удовлетворить требованиям к современным методам контроля окружающей среды, однозначно сформулированных в работе В.М. Захарова [38]:

1. Оценка степени отклонения от оптимума – предлагаемый нами подход позволяет легко, а в большинстве случаев автоматически провести статистическую обработку полученных результатов.

2. Оценка наиболее общих параметров – для решения задачи оценки качества среды используются наиболее общие морфометрические показатели, характеризующие важнейшие принципиальные черты рассматриваемой биологической системы и ее функционирования, которые напрямую зависят от внешних условий формирования данного природного объекта.

3. Чувствительность – предлагаемый метод работает на надмолекулярном уровне и поэтому даже малейшие отклонения от нормы им фиксируются.

4. Универсальность – применим для всех биологических объектов, образованных в результате протекающих глубоко неравновесных процессов.

5. Пригодность для оценки реальной природной ситуации – методы, основанные на определении гео-

метрических характеристик изучаемых биологических объектов, уже доказали свою состоятельность.

6. Пригодность для широкого использования – предлагаемый метод оценки качества окружающей среды, основанный на концепции фрактальной геометрии прост и «дешев» в применении. Для его реализации не требуется дорогостоящее оборудование.

В итоге, для проведения мониторинговых исследований наряду с традиционными возможно применение методов и инструментов фрактальной геометрии. Такой подход применим при оценке воздействия на биологические объекты, т.к. они обладают фрактальными свойствами, масштабной инвариантностью или самоподобием. Определение фрактальной размерности биологических объектов даёт основу для разработки перспективных методов биоиндикации, которые являются менее трудоёмкими, более точными и удобными.

В заключение можно отметить, что, к сожалению, теоретическое обоснование методов оценки качества окружающей среды, основанных на концепции фрактальной геометрии довольно сложны и неочевидны, особенно для специалистов биологов. Эта видимая на первый взгляд сложность и непонятность отпугивает многих исследователей от такого простого, надежного и самое главное финансово мало затратного в практическом исполнении метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Груздев В.С. Биоиндикация состояния окружающей среды. М.: Изд-во ГУЗ, 2008. 142 с.
2. Биологический контроль окружающей среды, биоиндикация и биотестирование / под ред. О.П. Мелеховой и Е.И. Егоровой. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 288 с.
3. Заболотских В.В., Васильев А.В. Мониторинг токсического воздействия на окружающую среду с использованием методов биоиндикации и биотестирования. Самара: СНЦ РАН, 2012. 232 с.
4. Рассадина Е.В. Биоиндикация и ее место в системе мониторинга окружающей среды // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2007. № 2(5). С. 48–53.
5. Выходцева И.С., Рыхлова Т.А. Биоиндикация как метод оценки окружающей среды: актуальность и перспективы исследования // Вестник ландшафтной архитектуры. 2015. № 6. С. 44–47.
6. Филиппов Е.С., Иванисова Н.В., Куринская Л.В. О биоиндикации транспортно-селитебных ландшафтов методом флуктуирующей асимметрии // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2014. № 6(184). С. 68–72.
7. Майджи О.В., Буланкина Е.Г. Исследование качества окружающей среды методом флуктуирующей асимметрии // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2012. № 13. С. 33–38.
8. Гуртяк А.А. Экологическая оценка урбанизированных территорий с применением коэффициента флуктуирующей асимметрии: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Тюмень, 2013. 16 с.
9. Попова Е.И. Применение коэффициента флуктуирующей асимметрии для экологической оценки антропогенной нагрузки // В мире научных открытий. 2013. № 11(47). С. 305–314.
10. Трубина Л.К., Храмова Е.П., Луговская А.Ю. Оценка качества окружающей среды урбанизированной территории по величине флуктуирующей асим-

метрии листа // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. Т. 4. № 2. С. 185–188.

11. Кулябина Е.Ю. Региональные особенности лишеноиндикационного мониторинга качества атмосферного воздуха на примере урбанизированных и особо охраняемых территорий нижегородской области: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2003. 26 с.

12. Рутман В.В., Резник Е.Н. Применение фрактального анализа и изучения цветометрических характеристик в лишеноиндикации // Экология родного края: проблемы и пути решения: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Киров, 2016. С. 328–331.

13. Миннуллина Г.Р. Совершенствование методов лишеноиндикации для оценки качества атмосферного воздуха урбанизированной территории: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Уфа, 2006. 21 с.

14. Giordani P., Brunialti G., Alleteo D. Effects of atmospheric pollution on lichen biodiversity (LB) in a mediterranean region (Liguria, northwest Italy) // Environmental Pollution. 2002. Т. 118. № 1. P. 53–64.

15. Бязров Л.Г. Лишайники в экологическом мониторинге. М.: Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН, 2002. 336 с.

16. Коротченко И.С. Флуктуирующая асимметрия листьев тополя как тест-система в условиях автотранспортного загрязнения // Международный журнал экспериментального образования. 2014. № 11–2. С. 56–57.

17. Гуртяк А.А., Углев В.В. Оценка состояния среды городской территории с использованием березы повислой в качестве биоиндикатора // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2010. Т. 317. № 1. С. 200–204.

18. Федорова Т.А. Флуктуирующая асимметрия листа липы мелколистной (*Tilia cordata* Mill.) как биоиндикационный параметр оценки качества среды // Вестник Курганского государственного университета. Серия: Естественные науки. 2013. № 3(30). С. 41–43.

19. Бабушкина Е.А., Белокопытова Л.В., Костякова Т.В. Оценка флуктуирующей асимметрии листьев нескольких видов древесных растений как индикатора состояния окружающей среды // В мире научных открытий. 2013. № 7.3(43). С. 11–29.

20. Коротченко И.С. Влияние теплоэнергетического комплекса г. Красноярска на величину флуктуирующей асимметрии листовой пластинки тополя бальзамического // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2015. № 8. С. 15–20.

21. Гелашвили Д.Б., Чупрунов Е.В., Иудин Д.И. Структурные и биоиндикационные аспекты флуктуирующей асимметрии билатерально-симметричных организмов // Журнал общей биологии. 2004. Т. 65. № 5. С. 433–441.

22. Bruteig I.E. The epiphytic lichen *Hypogymnia physodes* as a biomonitor of atmospheric nitrogen and sulphur deposition in Norway // Environmental Monitoring and Assessment. 1993. № 26. P. 27–47.

23. Слонов Т.Л. Лишеноиндикация загрязненности окружающей среды // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2010. № 2. С. 111–115.

24. Сафранкова Е.А. Комплексная лишеноиндикация общего состояния атмосферы урбоэкосистем: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Брянск, 2014. 23 с.

25. Лыгин С.А., Ваниева А.С. Оценка загрязнения воздуха методом лишеноиндикации // Естественные и математические науки в современном мире. 2014. № 18. С. 187–191.
26. Анищенко Л.Н., Сковородникова Н.А., Борздыко Е.В. Химическая лишеноиндикация как основа биомониторинга воздуха в антропогенных экосистемах // Фундаментальные исследования. 2015. № 2–10. С. 2144–2148.
27. Jovan S., McCune B. Air-quality bioindication in the greater Central Valley of California, with epiphytic macrolichen communities // Ecological Applications. 2005. № 15. P. 1712–1726.
28. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы. М.: Ижевский институт компьютерных исследований, 2002. 856 с.
29. Weibel E.R. Design of biological organisms and fractal geometry // Fractal in biology and medicine. Basel: Birkhäuser, 1994. P. 68–85.
30. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 134 с.
31. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 260 с.
32. Гелашвили Д.Б., Иудин Д.И., Розенберг Г.С., Якимов В.Н., Солнцев Л.А. Фракталы и мультифракталы в биоэкологии. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. госун-та, 2013. 370 с.
33. Гелашвили Д.Б., Иудин Д.И., Якимов В.Н., Солнцев Л.А., Снегирева М.С., Варичев А.Н., Розенберг Г.С. Фрактальные аспекты популяционной экологии // Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2009. № 6–1. С. 15–22.
34. Молчатский С.Л. Фрактальная организация и самоорганизация нейронных структур мозга: монография. Самара: ПГСГА, 2015. 133 с.
35. Weibel E.R. Fractal geometry – a design principle for living organisms // Amer. J. Physiol. 1991. V. 261. № 6. P. 361–369.
36. Nonnenmacher F., Losa G.A., Weibel E.R. Fractals in biology and medicine: Basel: Birkhäuser Verlag, 1994. 421 p.
37. Исаева В.В., Каретин Ю.А., Чернышев А.В., Шкуратов Д.Ю. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе: монография. Владивосток: ИБМ ДВО РАН, 2004. 128 с.
38. Захаров В.М. Здоровье среды: методика оценки. М.: Центр экол. политики России, 2000. 68 с.
- Статья публикуется при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-44-630414 p_a.*

APPLICATION OF FRACTAL ANALYSIS FOR BIOINDICATION EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL ASSESSMENT

© 2016

S.L. Molchatsky, candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor of Chemistry, Geography and Methods of Teaching Department
I.V. Kazantsev, candidate of biological sciences, dean of Faculty of Natural Sciences and Geography,
associate professor of Chemistry, Geography and Methods of Teaching Department
T.B. Matveeva, candidate of biological sciences,
associate professor of Biology, Ecology and Methods of Teaching Department
Samara State University of Social Sciences and Education, Samara (Russia)

Abstract. The paper analyzes the currently existing methods of bioindication studies of the environment pollution as well as studies their characteristics and applications. Particular attention from this group of methods is given to lichen indication and assessing the degree of fluctuating asymmetry of the leaf and its irregularity, because they are based on a study of the geometric characteristics of biological samples by means of mathematical processing using special software. It proves the possibility and prospects of application of the measuring method of fractal dimension for the qualitative and quantitative assessment of environmental pollution. Presented data show that the inclusion of the fractal nature of biological systems allows discovering and exploring a completely new range of phenomena in biology. The co-incident of this method is provided with the goals and objectives by the appropriate mathematical apparatus. Within the framework of this approach it is possible to design and use new advanced monitoring techniques. In the final part of the paper a new concept of bioindication, which is based on a synthesis of both classical and innovative approaches to the study and assessment of environmental quality in the conditions of technogenic pollution, is proposed.

Keywords: anthropogenic pollution; bioindication; biological indicators; fluctuating asymmetry; leaf; woody plants; lichen indication; lichen; anthropogenic impact; pollutants; pollutants; fractal dimension; fractal analysis; fractal clusters.

УДК 58.02

СУКЦЕССИЯ И ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНЫХ АССОЦИАЦИЙ В ПОЛОСЕ ОТВОДА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

© 2016

Н.А. Никитин, аспирант кафедры биологии, экологии и методики обучения
В.В. Соловьева, доктор биологических наук, профессор кафедры биологии, экологии и методики обучения
Самарский государственный социально-педагогический университет, Самара (Россия)

Аннотация. Полоса отвода представляет собой специфический антропогенный ландшафт, в котором протекающие процессы изменяются в своей направленности и интенсивности. Эрозионные процессы, в частности водная эрозия почв, приводят не только к изменениям почвенного покрова, но и растительного, посредством изменения плодородия почв, насыщенности питательными веществами, а также путем изменения влагообмена,