

А. Н. НАСОНОВ¹, В. В. КУЛЬНЕВ², И. В. ЦВЕТКОВ³,
Г. В. ШИБАЛОВА¹, С. Н. НАСОНОВ¹

БИОТЕСТИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ФРАКТАЛЬНЫМИ МЕТОДАМИ

¹ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет –
Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева»,
г. Москва, Россия,
adn22@yandex.ru

²Центрально-Черноземное межрегиональное управление
Федеральной службы по надзору в сфере природопользования,
г. Воронеж, Россия,
kulnev@rpn36.ru

³ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»,
г. Тверь, Россия
mancu@mail.ru

Интенсивное техногенное воздействие на компоненты биосферы объясняет необходимость детального анализа взаимодействия человека и природы. При изучении степени загрязнения окружающей среды важна реакция биологических объектов на поллютанты. Одним из перспективных методов определения загрязнения почвы является биотестирование, при котором *in vitro* оценивается динамика параметров структуры тест-объекта во времени (длина проростка, развитость корневой системы). В этом аспекте фракталы являются удобным математическим инструментом описания динамики развития природного объекта в изменяющихся условиях среды, в которых природный объект сохраняет свое самоподобие, т.е. ведет себя как одно целое. Эта особенность является формальной основой оценки влияния техногенного загрязнения почв на динамику метаболизма используемого растения.

Ключевые слова: биотестирование, качество почвы, мультифрактальная динамика, поллютанты, техногенное воздействие

Одним из методов, позволяющим оценивать размер природного объекта или развитость его структуры в изменяющихся условиях среды существования является фрактальная геометрия [11,12]. Такой подход широко применяется при оценке воздействия на биологические объекты, поскольку они обладают фрактальными свойствами, или самоподобием [1]. В основе предлагаемого метода лежит оценка фрактальной размерности – меры изменения сложности природного объекта в динамике. Математически это величина описывает статистическую меру сложности используемого шаблона фрактала при его масштабировании [7].

Динамика роста тест-объекта на почвах с различным содержанием поллютантов будет различаться значениями фрактальной размерности $D \in (1;2)$, которые для удобства можно нормировать к показателю Херста $H=2-D$, отражающему динамику системного метаболизма [5, 8, 10]. При этом развитость структуры тест-объекта, последовательно оцениваемых в ходе эксперимента, связана с фрактальной размерностью степенной зависимостью:

$$M(\delta) = \mu \delta^{1-D}, \quad (1)$$

где $M(\delta)$ – размер проростков; δ – масштабы измерения; D – фрактальная размерность.

Чрезмерное содержание поллютантов в экосистеме может приводить к нарушениям системного метаболизма, математически описываемого фракталом, как статистическое нарушение самоподобия обменных процессов.

Это означает, что природный объект не способен к своему воспроизводству как единого целого со средой существования – среда и объект существуют, как отдельные системные целостности, не связанные друг с другом [9].

В этом смысле фрактальность, как свойство сложноорганизованного природного объекта, обеспечивающая системно достаточную развитость структуры при изменении параметров внешней среды, объясняет биотическую компенсацию привносимых в него техногенных субстанций вещества и энергии за счет самоорганизации [3]. В условиях техногенеза только сложноорганизованные природные объекты способны к самоорганизации за счет масштабно-инвариантной перестройки структуры [13].

В соответствии с принципом толерантности нарушение самоорганизации природного объекта происходит в случае, когда значения системных показателей достигают лимитирующих значений, а именно:

- дефицита факторов, при котором объекту не хватает ресурсов для выживания в среде (показатель предельно низкого метаболизма, равносильного отсутствию обратной связи экосистемы с внешней средой)

- избыточности факторов, когда объект не успевает адаптироваться к частым изменениям внешней среды (показатель предельно высокого метаболизма с внешней средой, приводящего к нарушению функциональной целостности экосистемы) [10].

Расчет фрактальной размерности тест-объекта осуществляется по его изображениям через свободно распространяемую программу «Gwyddion» и построить графики динамики их метаболизма в шкале постоянной Херста (рисунок 1).

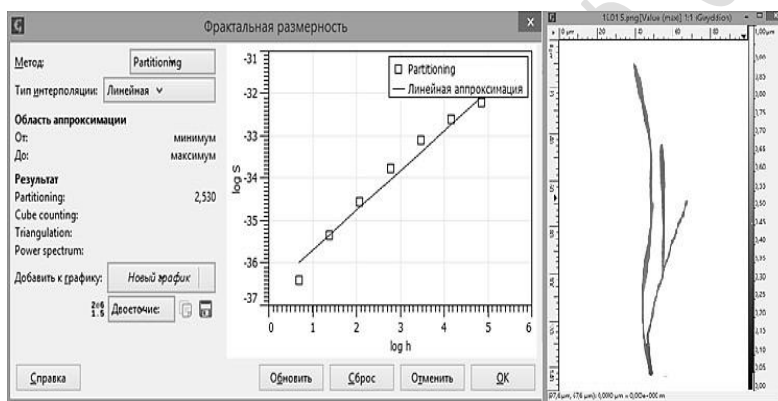


Рисунок 1 – Интерфейс программы «Gwyddion»

В основе программы расчёта лежит клеточный метод: квадратная решетка с постоянной (δ) накладывается на поверхность изображения. Изначально (δ) задаётся равной $X/2$ (где X это длина края поверхности). Тогда $N(\delta)$ – число всех квадратов, содержащих хотя бы один пиксель изображения. Постоянная решетки (δ) на каждом шаге уменьшается в два раза, и процесс повторяется до тех пор, пока (δ) не станет равной расстоянию между двумя соседними пикселями. Наклон аппроксимирующей прямой, выделяющий область скейлинга (область масштабов, в которых объект сохраняет самоподобие) позволяет определить фрактальную размерность D [4]. Применительно к изображению тест-объекта этот метод основан на подсчёте квадратов, покрывающих его изображение:

$$\text{Log } N(\delta) = - D \text{Log}(\delta) , \quad (2)$$

где D – фрактальная размерность; $N(\delta)$ – число квадратов, покрывающих изображение тест-объекта; (δ) – варьируемый масштаб решетки покрытия.

Уравнение самоорганизации объекта биотестирования, определяемое корреляцией действующих факторов, задается временным трендом:

$$H(t) = \alpha t - \beta, \quad (3)$$

где α ; β – весовые коэффициенты действующих факторов (техногенных и биотических).

На основе расчётных значений фрактальной размерности объекта биотестирования для различных проб почв, мы можем построить сравнительные графики динамики его метаболизма в шкале постоянной Херста ([рисунок 2](#)).

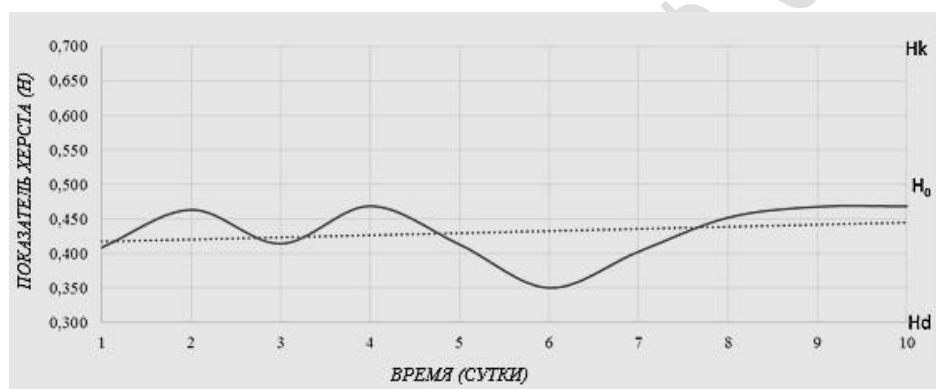


Рисунок 2 – Динамика самоорганизации тест-объекта для отдельной пробы почвы

Описанный метод может также эффективно использоваться при мониторинге загрязнения почв [14], а при дополнении – в уточнении границ санитарно-защитных зон через распределения плотности поверхностных загрязнений почв от источников загрязнений [6].

Таким образом, мы получаем возможность оценки влияния и классификации загрязнений почв урбанизированных территорий по характеру самоорганизации объекта биотестирования. Это становится возможным благодаря определению структурных параметров биологических объектов в динамике, которые дают основу для разработки новых малозатратных и более информативных методов биотестирования.

Список литературы

1 Гелашвили, Д.Б. Фрактальные аспекты структурной устойчивости биотических сообществ / Д.Б. Гелашвили, Д.И. Иудин, Г.С. Розенберг,

В.Н. Якимов, Л.А. Солнцев // Биосфера. Санкт-Петербург. – 2013. – Т. 5. – № 2. – С. 143-159.

2 Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: ГОСТ 17.4.4.02-84. – М.: Стандартиформ, 2008. – 9 с.

3 Жукова, Л.А. Экологические шкалы и методы анализа экологического разнообразия растений / Л.А. Жукова. – Йошкар-Ола: изд-во МарГУ, 2010. – 368 с.

4 Иудин, Д.И. Фракталы: от простого к сложному / Д.И. Иудин, Е.В. Копосов. – Н. Новгород: ННГАСУ, 2012. – 200 с.

5 Кульнев, В.В. Об эколого-гигиеническом нормировании / В.В. Кульнев, А.Н. Насонов, И.В. Цветков // Актуальные проблемы гидрогеологических, инженерно-геологических и геоэкологических исследований: матер. Всерос. науч.-пр. конф., Воронеж, 2020 / Каф. гидрогеол., инженерной геологии и геоэкологии Воронеж. гос. ун-та. – Воронеж, 2020. – С. 67-71.

6 Манжуров, И.Л. Фрактальная модель распределения плотности поверхностных загрязнений : автореф. дисс...канд. физ-мат. наук. / И.Л. Манжуров. – Екатеринбург, 2002. – 24 с.

7 Молчатский, С.Л. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды / С.Л. Молчатский, И.В. Казанцев, Т.Б. Матвеева // Самарский научный вестник. – 2016. – № 4 (17). – С. 28-31.

8 Насонов, А.Н. Фрактальные модели нормирования техногенной нагрузки по показателям устойчивости экосистем / А.Н. Насонов, В.В. Кульнев, И.В. Цветков // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2019: материалы двенадцатой международной конференции, Москва, 1-3 окт. 2019 г., / Ин-т проблем упр. им. В.А. Трапезникова Рос. акад. наук; под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. – Москва, 2019. – С. 1058-1059.

9 Насонов, А.Н. Применение фрактального анализа при лишеноиндикации техногенного воздействия от линейного источника загрязнения атмосферы / А.Н. Насонов [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. – 2019. – Т. 19. – № 4. – С. 233-240.

10 Насонов, А.Н. Применение фрактального анализа в лишеноиндикации загрязнения атмосферного воздуха техногенно нагруженных территорий / А.Н. Насонов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 3. – С. 34-38.

11 Насонов, А.Н. Фракталы в науках о Земле: учебное пособие / А.Н. Насонов [и др.]. – Воронеж: Ковчег, 2018. – 82 с.

12 Насонов, А.Н. Фрактальный анализ биологической реабилитации водных объектов методом коррекции альгоценоза / А.Н. Насонов [и др.] // Проблемы управления водными и земельными ресурсами: Матер. междунар. науч. форума, Москва, 30 сентября 2015 / ФГБОУ ВО РГАУ МСХА им. К.А. Тимирязева; под ред. Д.В. Козлова. – Москва, 2015. – С. 165-180.

13 Подлазов, А.В. Будущее прикладной математики / А.В. Подлазов // Лекции для молодых исследователей / А.В. Подлазов. – Москва:

«Эдиториал УРСС», 2005 – С. 404-426.

14 Репина, Е.М. Анализ влияния крупного металлургического предприятия на экологическое состояние приповерхностных отложений / Е.М. Репина, В.В. Кульнев, И.И. Косинова // Геологи XXI века: Материалы VI Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов, Саратов, 5-7 апреля 2005 г. / Ответственные редакторы: Е. М. Первушов, М. В. Пименов. – Саратов, 2005. – С. 129-130.