

МЕЖДИСЦИПЛИНАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 504.064+51-76+581.45(470.331)

DOI: 10.26456/vtbio245

АНАЛИЗ ФРАКТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИСТЬЕВ СНЫТИ ОБЫКНОВЕННОЙ (*AEGOPODIUM PODAGRARIA*) В РЕКРЕАЦИОННЫХ ЗОНАХ ГОРОДА ТВЕРИ МЕТОДАМИ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

А.Ф. Мейсунова, В.П. Цветков, И.В. Цветков, А.А. Нотов

Тверской государственной университет, Тверь

Фрактальный анализ листьев сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.) в рекреационных зонах г. Твери с разным уровнем антропогенной трансформации показал высокую степень сходства структуры поверхности листьев с фракталами. Степень уклонения δ в интервале 0,011–0,024. Проанализированы параметры мультифрактальной термодинамики A и γ . Значения γ индексов фрактальных уравнений состояния листьев коррелируют с уровнем антропогенной трансформации биотопов и загрязнением почв тяжелыми металлами и металлоидами. Индекс γ возрастает при увеличении степени преобразования биотопа и степени загрязнения почв. Минимальные значения γ выявлены в зонах с крупными фрагментами лесных фитоценозов, а минимальные – в посадках деревьев в центре города. Полученные результаты представляют интерес для выяснения перспектив использования данного подхода в биомониторинге.

Ключевые слова: сныть обыкновенная, *Aegopodium podagraria*, фрактальный анализ, Тверь, загрязнение, рекреационные зоны, биомониторинг, окружающая среда, индекс ФУСа, мультифрактальная термодинамика.

Введение. Модульная организация растений определяет значительный интерес к моделированию их строения и развития на основе теории фракталов (Tatsumi et al., 1989; Campbell, 1996; Нотов, 2008; Collin et al., 2011; Notov, 2011; Du et al., 2013; Gazda, 2013; Oncevay-Marcos et al., 2015; Галицкий, 2016; Brym, Ernest, 2018; Tao et al., 2021). Пластичность структуры обуславливает также широкое использование фрактального анализа формы их органов для оценки состояния среды и функционирования экосистем (McAbendroth et al., 2005; Bialowicz et al., 2010; Ferreira et al., 2013; Cojocaru et al., 2016; Li et al., 2019, 2022; Кульнев и др., 2020; Arseniou, MacFarlane, 2021).

Фрактальная геометрия живого объекта позволяет оценивать его размерность или развитость структуры в изменяющихся условиях внешней и внутренней среды, определяя актуальность применения подхода в биоиндикации (Исаева и др., 2004; Насонов, Цветков, 2018; Розенберг, 2018; Кульнев и др., 2019, 2020). Например, фрактальность смешанных насаждений водных макрофитов изучали при оценке влияния сложности их структуры на сообщества свободноживущих беспозвоночных (McAbendroth et al., 2005; Ferreiro et al., 2013). Были установлены биологически значимые показатели структурной сложности макрофитов, которые не выявляются традиционными морфометрическими методами. Фрактальные параметры формы листьев и жилкования изучали у разных видов растений (Campbell, 1996; De Oliveira et al., 2005; Du et al., 2013; Gao et al., 2015; Oncevay-Marcos et al., 2015). На основе фрактальных характеристик проводили биотестирование почв (Кульнев и др., 2020). Фрактальные параметры позволили судить о степени развитости растений и о том, насколько благоприятны условия внешней среды для их роста. Загрязнение атмосферного воздуха исследовали с помощью анализа фрактальной размерности, структуры и морфометрических показателей различных древесных растений (Молчатский и др., 2016). Методы фрактальной геометрии применяли в лишеноиндикации техногенного загрязнения (Кульнев и др., 2019; Насонов и др., 2019).

Морфологическая изменчивость листьев облегчает адаптацию в условиях антропогенного стресса и косвенно свидетельствует о трансформации процесса развития растения вследствие воздействия различных факторов, в том числе и антропогенных. Это определило особый интерес к анализу морфометрических показателей в экологическом мониторинге (Биологический..., 2007; Груздев, 2008; Выходцев, Рыхлова, 2015). Фрактальный анализ – перспективный способ изучения морфологической пластичности (Молчатский и др., 2016).

Фрактальный анализ изменчивости листьев особенно актуален на территории с модельными биотопами с различным уровнем антропогенной трансформации и загрязнения. В этом отношении интересен административный центр Тверской области – Тверь. Город имеет развитую промышленную инфраструктуру и широкий спектр рекреационных зон (РЗ). Он включает крупные лесопарки с большими фрагментами лесных фитоценозов, которые являются памятниками природы регионального значения, а также парки и скверы разных размеров с посадками деревьев вдоль автострад и около предприятий. РЗ в различной степени удалены от источников загрязнения.

Цель работы: анализ фрактальных параметров листьев сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria* L.) в разных типах РЗ и

выяснение связи полученных показателей с уровнем антропогенной трансформации биотопов.

Методика. Листья сныты обыкновенной собраны в г. Твери, в рекреационных зонах (РЗ) с разной антропогенной нагрузкой и уровнем техногенного загрязнения (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика мест сбора листьев сныты обыкновенной в г. Твери
(по: Мейсурова, Нотов, 2020; Савинов и др., 2021)

ПО	Модельные РЗ	Тип РЗ	Координаты	Потенциальные источники загрязнения	Zс, отн. ед.
1	Первомайская роща (Пролетарский р-н)	е ПП	56°50'38" с.ш. 35°49'40" в.д.	<i>энергетика:</i> Тверская ТЭЦ-1; <i>машиностроение:</i> ООО «Тверьстроймаш», ОАО «Тверской завод электроаппаратуры — ЭЛТОР»; <i>производство стройматериалов:</i> ООО «ЖБИ-1», ООО «Комбинат ЖБИ-2», ООО «ЖБИ Стройкомплект»; <i>химическая промышленность:</i> ОАО «Тверской полиграфический комбинат», несколько воинских частей; <i>автотранспорт:</i> выезд на Старицкое шоссе	1.90
2	Комсомольская роща (Заволжский р-н)	е ПП	56°52'18" с.ш. 35°49'10" в.д.	<i>машиностроение:</i> ОАО «Тверской вагоностроительный завод», ОАО Центросвармаш ОАО «Ритм»; <i>производство стройматериалов:</i> ОАО «Тверской домостроительный комбинат»; <i>автотранспорт:</i> выезд на федеральную автомобильную трассу М10	3.33
3	Бобачевская роща (Московский р-н)	е/и ПП	56°49'48" с.ш. 35°59'14" в.д.	<i>машиностроение:</i> ОАО «Тверской экскаваторный завод», ЗАО «Тверской экспериментально-механический завод», ООО «Калининский энергомеханический завод»; ЗАО ПФК «Тверьдизельагрегат»; <i>химическая промышленность:</i> ОАО «Тверьхимволокно – Полиэфир», ОАО «Тверьхимволокно – Вискоза», ОАО «Сибур–ПЭТФ», ООО «Гематек»; <i>энергетика:</i> Тверская ТЭЦ-4; <i>автотранспорт</i>	4.50
4	Березовая роща (Московский р-н)	е/и ПП	56°48'18" с.ш. 36°01'39" в.д.	<i>химическая промышленность:</i> ООО «ПОЛИПЛАСТ»; <i>автотранспорт:</i> выезд на федеральную автомобильную дорогу М10	5.99
5	Парк Победы (Центральный р-н)	и	56°50'55" с.ш. 35°54'50" в.д.	<i>легкая промышленность:</i> швейная фабрика; <i>автотранспорт:</i> магистрали с интенсивным движением транспорта	14.62

Примечание. РЗ – рекреационная зона; е – с сохранившимися фрагментами лесных фитоценозов; и – посадки деревьев; ПП – памятник природы регионального значения; Zc – величина суммарного загрязнения почв.

В почвах модельных биотопов 1–5 с помощью АЭС-ИСП-спектрометра iCAP 6300 Duo (Thermo Scientific, США) по стандартной методике выявлено содержание 17 элементов, которые представляют группу тяжелых металлов и металлоидов (ТМ) (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, W, Zn) (ПНДФ ..., 2005; Мейсурова, Нотов, 2020; Савинов и др., 2021). На основании этих данных с учетом фоновых концентраций металлов для почв ЦФО (Загрязнение..., 2021) определено суммарное загрязнение почв (Zc, отн. ед.) в биотопах 1–5: 1.90, 3.33, 4.50, 5.99 и 14.62. Все полученные показатели не превышают допустимый уровень загрязнения почвенного покрова (табл. 1). В специальной работе была проанализирована фенотипическая изменчивость в ценопопуляциях сныти (Савинов и др., 2021).

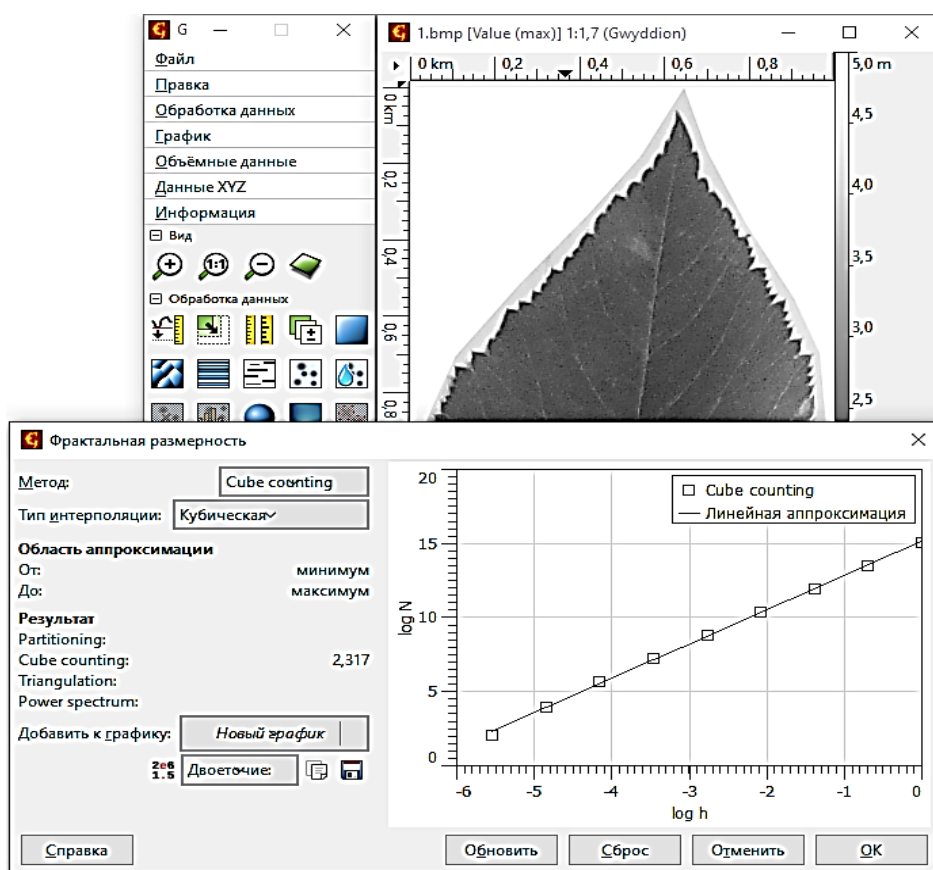


Рис. 1. Интерфейс программы «Gwyddion» с загруженным изображением листа сныти обыкновенной и окном для расчета фрактальной размерности

В каждом модельном биотопе у случайно выбранных генеративных растений сняты собрано по 50–60 листьев. Каждый образец листа фотографировали для получения цифровых изображений, которые стали объектами фрактального анализа. Для этого лист размещали на белой бумаге верхней (адаксиальной) стороной кверху и нижней (абаксиальной) стороной книзу. В общей сложности исследовано около 300 изображений листьев. Фрактальную размерность поверхности листьев определяли с помощью модульной программы визуализации и анализа данных «Gwyddion» (рис. 1) (Кульнев и др., 2019; Насонов и др., 2019). При определении фрактальной размерности листьев учтены форма края сегментов листовых пластинок и особенности их васкулярной системы (характер ветвления жилок).

Существуют два соотношения, отражающих основные свойства фракталов:

$$N(h) = \Gamma \cdot h^{-D} \quad (1),$$

или

$$\log N(h) = \log \Gamma - D \log h \quad (2),$$

где D – фрактальная размерность фрактального множества, Γ – его D -мерный (фрактальный) объем.

Соотношения (1) можно представить в виде: $\Gamma = N(h) \cdot h^D$.

Для исследования свойств фрактальных множеств была использована авторская концепция фрактальной термодинамики (Mikheev et al., 2021; Paramonova et al., 2021). Ее основными параметрами являются:

- фрактальная энтропия $S_f = \ln \Gamma$,
- фрактальная температура $T_f = a \cdot ((3 - D)^{-1} - 1/3)$.

Связь параметров S_f и T_f определена фрактальными уравнениями состояния (ФУС), которые имеют вид степенной функции:

$$S_f = A \cdot T_f^\gamma.$$

Величина показателя степени γ называется индексом ФУСа.

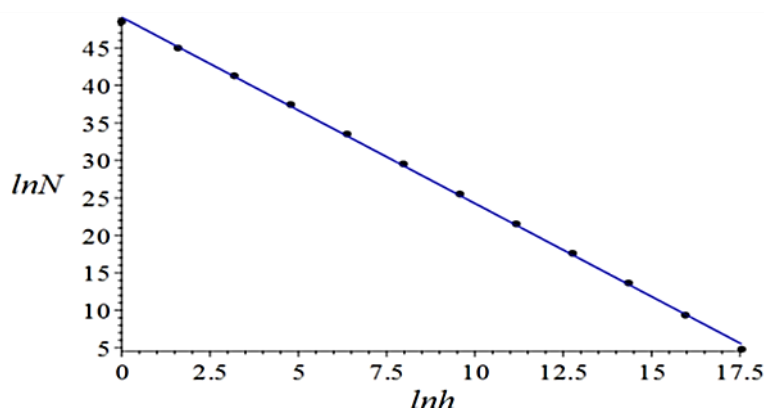


Рис. 2. Функция $N(h)$ в дважды логарифмических координатах для снимка одного из листьев сныти обыкновенной

Для расчёта степени относительного уклонения δ были построены графики зависимости функции $\ln N(h)$ от $\ln h$ (рис. 2). Уклонения дискретного множества точек от прямой определяет величину δ , то есть степень близости поверхности листа сныти обыкновенной к фрактальной поверхности.

Степень относительного уклонения δ от фракталов всех исследованных образцов листьев сныти обыкновенной составила величину не более $2,5 \cdot 10^{-2}$, что дает основания для применимости фрактальных подходов к изучению данных структур.

Результаты и обсуждение. Расчёт степени относительного уклонения структуры поверхности серии листьев сныти обыкновенной от фрактала показал, что все значения δ исследуемых образцов меняются в интервале 0,011–0,024 (рис. 3). Узкий интервал значений δ свидетельствует о высокой степени близости структуры поверхности листьев к фракталам, что подтверждает применимость фрактальных подходов к изучению структуры поверхностей листьев сныти обыкновенной.

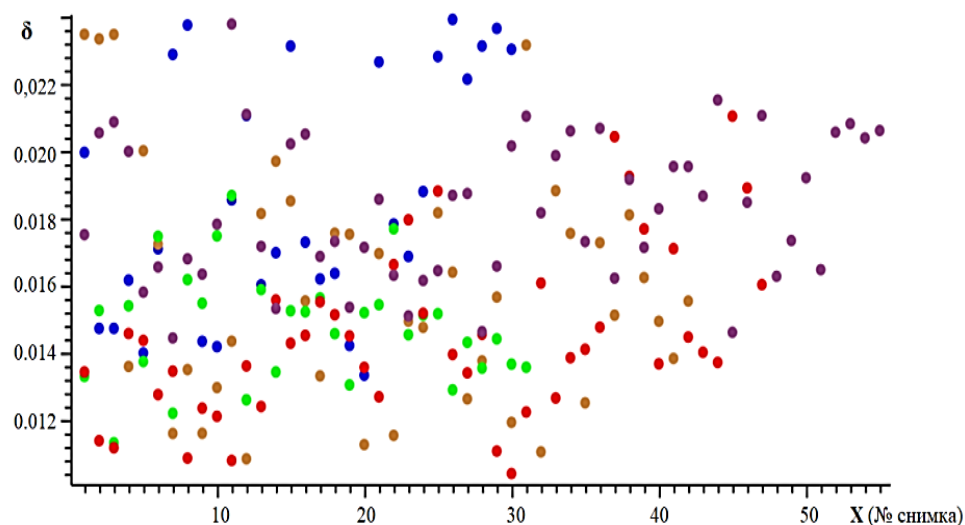


Рис. 3. График зависимости $\delta(X)$ образцов листьев сныти обыкновенной в модельных РЗ г. Твери:

- – Первомайская роща; • – Комсомольская роща; • – Бобачевская роща;
- – Березовая роща; • – парк Победы

Значения D_f свидетельствуют о сложности и разнообразии пространственной структуры поверхности листьев сныти обыкновенной, а также о заметном ее отклонении от гладкой поверхности в зависимости от места сбора (рис. 4). Расчет фрактальной размерности фрактального множества листьев (D_f) показал большое многообразие факторов, влияющих на условия роста сныти из Бобачевской рощи по сравнению с другими РЗ. Установлено, что фрактальная размерность поверхностей листьев из большинства РЗ имеет узкий диапазон значений на $D_f X$ -диаграмме (рис. 4). Для листьев из Бобачевской рощи ширина диапазона равна $0,09-2,44 \leq D_f \leq 2,53$, а из других РЗ меньше в три раза – $0,03-2,46 \leq D_f \leq 2,49$.

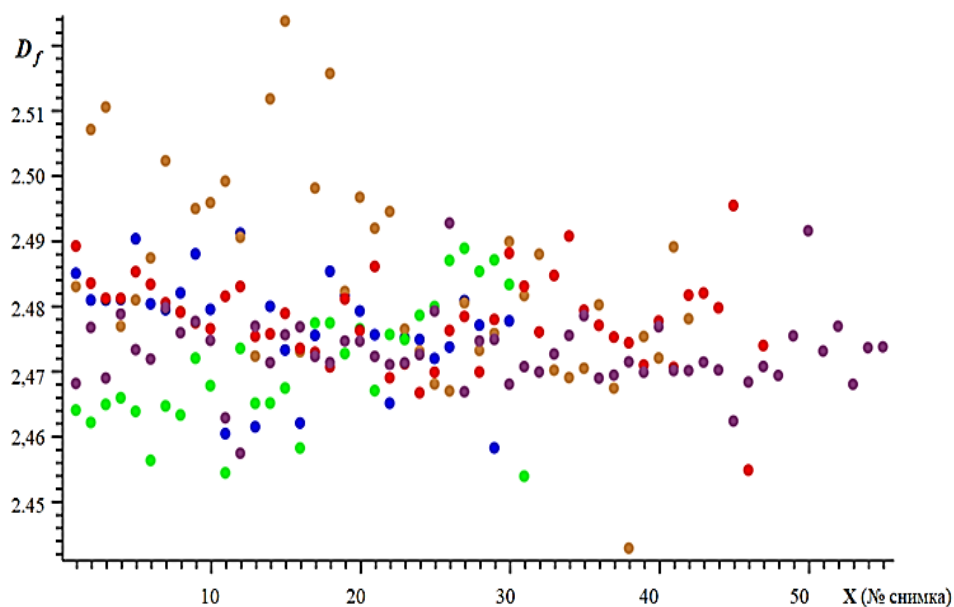


Рис. 4. Значения фрактальной размерности листьев сныти обыкновенной в РЗ г. Твери (D_f -диаграмма): обозначения как на рис. 3

С использованием подходов фрактальной термодинамики нами построены цветные диаграммы 3D $S_f T_f X$ (рис. 5), $E_f T_f X$ (рис. 9) и 2D $S_f T_f$, $S_f X$, $T_f X$ (рис. 6–8), $E_f T_f$, $E_f X$ (рис. 10–11), отображающие состояния поверхностей листьев в модельных РЗ. Данные диаграммы отражают функциональные связи параметров фрактальной энтропии S_f , фрактальной температуры T_f и места сбора (номера снимков X).

2D диаграммы представляют собой проекции 3D диаграмм на соответствующие координатные плоскости и дают более детальное представление о характере 3D диаграмм в трех различных направлениях.

Рассчитаны значения параметров фрактальной термодинамики A и γ , отражающие фрактальное уравнение состояния (ФУС) листьев в модельных РЗ (рис. 6, табл. 2). Установлено, что величины γ индексов ФУСов варьируют в диапазоне от 0,0744 (Первомайская роща) до 0,1460 (Парк Победы).

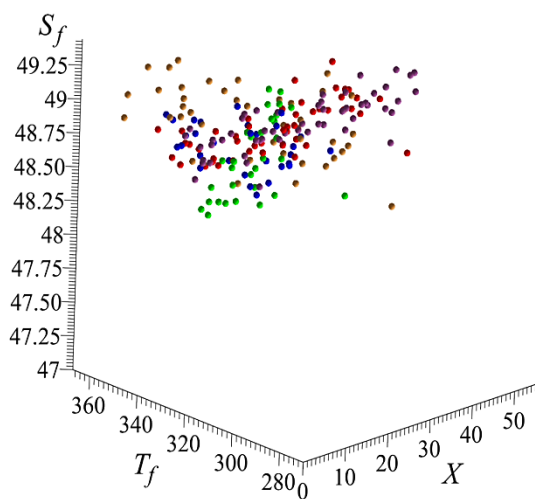


Рис. 5. $S_f T_f X$ -диаграмма

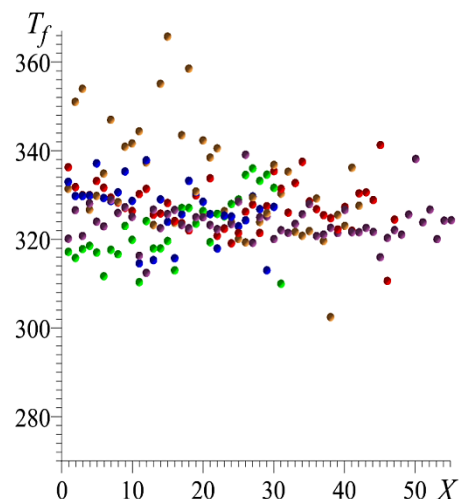


Рис. 7. $T_f X$ -диаграмма

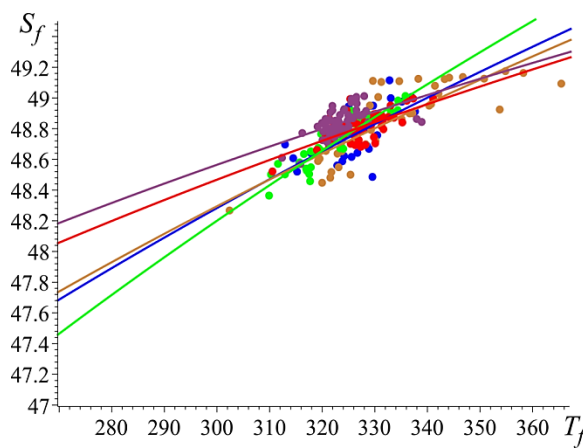


Рис. 6. $S_f T_f$ -диаграмма

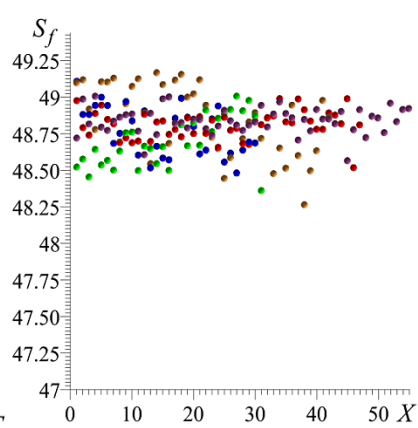


Рис. 8. $S_f X$ -диаграмма

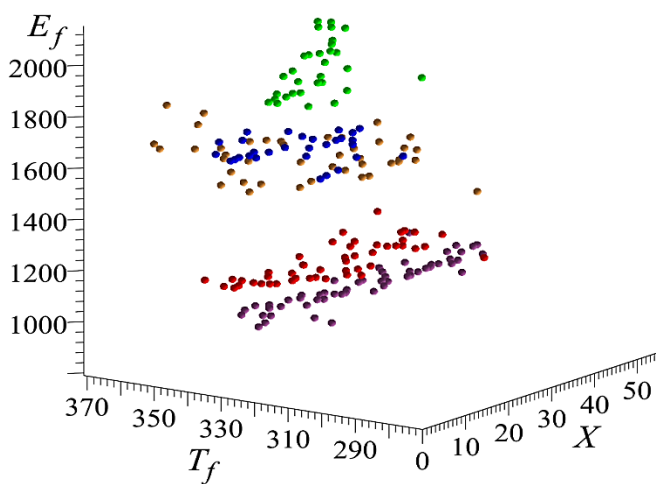


Рис. 9. $E_f T_f X$ -диаграмма

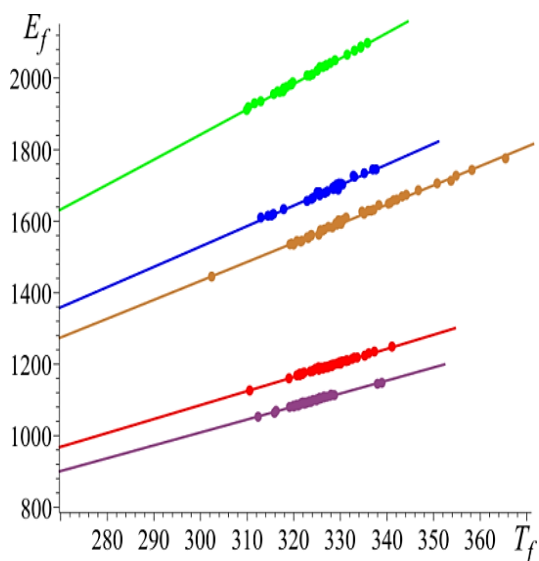


Рис. 10. $E_f T_f$ -диаграмма

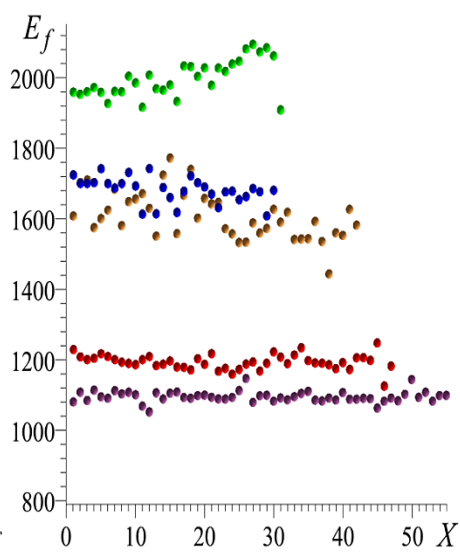


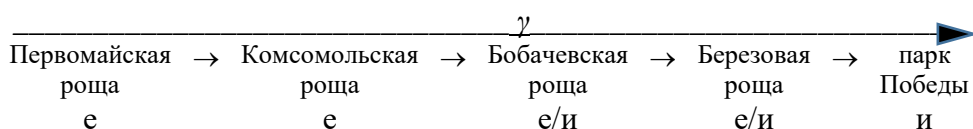
Рис. 11. $E_f X$ -диаграмма

Таблица 2

Параметры фрактальных уравнений состояния (ФУС) листьев сныти обыкновенной в РЗ г. Твери

РЗ	A	γ
Первомайская роща	31,7689	0,0744
Комсомольская роща	30,5910	0,0807
Бобачевская роща	25,8241	0,1098
Березовая роща	24,6278	0,1180
Парк Победы	20,9580	0,1460

Сопоставление значений индекса ФУСа листьев из разных РЗ позволило выявить определенную зависимость этого параметра от степени антропогенной трансформации биотопа. Чем выше уровень антропогенного преобразования экосистемы, тем большее значение приобретает индекс γ . Наиболее низкие значения выявлены в РЗ с сохранившимися крупными фрагментами лесных фитоценозов, а максимально высокие – в РЗ, представляющих посадки деревьев в центральной части города. Модельные РЗ можно расположить по градиенту сохранения компонентов естественной растительности, вдоль которого происходит увеличение индекса γ .



В пределах этого ряда РЗ отмечено также и увеличение степени загрязнения почв ТМ. В почвенных пробах из парка Победы для большинства отмеченных ТМ (As, Cr, Cu, Fe, Mo, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, W, Zn) обнаружены максимальные значения концентраций. Суммарный индекс загрязнения почв (Z_c) почв для парка Победы самый высокий среди всех изученных РЗ ($Z_c=14.62$).

Заключение. Таким образом, в экотопах с разной степенью антропогенной трансформации был проведен фрактальный анализ листьев сныти обыкновенной (*Aegorodium podagraria*). Отмечено высокое сходство структуры поверхности всех образцов листьев с фракталами. Низкие значения величины δ (в интервале 0,011–0,024) свидетельствуют о применимости фрактального анализа к изучению листьев этого вида растений. Построены 3D $S_f T_f X$, $E_f T_f X$, 2D $S_f T_f$, $S_f X$, $T_f X$, $E_f T_f$, $E_f X$ цветные диаграммы, отображающие особенности структуры поверхностей листьев во всех РЗ.

Результаты анализа параметров фрактальной термодинамики A и γ могут представлять интерес для биомониторинга. Дифференциация фрактальных параметров по значению γ индексов ФУСов коррелирует со степенью антропогенной трансформации биотопов и уровнем загрязнения почв ТМ. При увеличении уровня антропогенного преобразования экосистем и степени загрязнения почв ТМ увеличивается значение индекса γ . Наиболее низкие значения γ выявлены в РЗ с сохранившимися крупными фрагментами лесных фитоценозов.

Целесообразно продолжение исследований для выяснения возможности использования анализ фрактальных параметров листьев в комплексном экологическом мониторинге. Актуально сопоставление результатов, полученных разными подходами и методами.

Авторы выражают глубокую благодарность доктору физико-математических наук, профессору кафедры математического моделирования ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» Алексею Никифоровичу Кудинову и кандидату физико-математических наук, доценту кафедры общей математики и математической физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет» Сергею Александровичу Михееву за участие в разработке подхода с использованием методов мультифрактальной динамики.

Список литературы

- Биологический контроль окружающей среды, биоиндикация и биотестирование 2007 / под ред. О.П. Мелеховой и Е.И. Егоровой. М.: Академия. 288 с.
- Выходцева И.С., Рыхлова Т.А. 2015. Биоиндикация как метод оценки

- окружающей среды: актуальность и перспективы исследования // Вестник ландшафтной архитектуры. № 6. С. 44-47.
- Галицкий В.В.* 2016. Траектории эволюции в пространстве параметров секционной модели кроны ели. Появление «проторастения» // Журн. общ. биологии. Т. 77. № 6. С. 409-422.
- Груздев В.С.* 2008. Биоиндикация состояния окружающей среды. М.: Изд-во ГУЗ. 142 с.
- Загрязнение почв российской федерации токсикантами промышленного происхождения в 2020 году.* 2021. Обнинск: Тайфун. 128 с.
- Исаева В.В., Каретин Ю.А., Чернышев А.В., Шкуратов Д.Ю.* 2004. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе: монография. Владивосток: ИБМ ДВО РАН. 128 с.
- Кульнев В. В., Насонов А. Н., Цветков И. В., Король Т. С., Шаховская К.А.* 2020. Биотестирование почв на основе фрактальных характеристик растений // Принципы экологии. № 4. С. 40-53.
- Кульнев В.В., Насонов А.Н., Цветков И.В., Межова Л.А., Ларионов А.Н.* 2019. Фрактальный подход к оценке управляемости экологическими рисками // Известия Дагестанского гос. пед. ун-та. Естественные и точные науки. Т. 13. № 4. С. 101-111.
- Мейсурова А.Ф., Нотов А.А.* 2020. Оценка индикаторной способности некоторых лишайников при экологическом мониторинге металлов с использованием атомно-эмиссионного спектрального анализа // Журнал прикладной спектроскопии. Т. 87. № 1. С. 97-107.
- Мейсурова А.Ф., Савинов А.Б., Янсон А.Н.* 2021. Комплексный анализ фенотипических изменений и элементного состава снети обыкновенной в городских условиях // Проблемы трансформации естественных ландшафтов в результате антропогенной деятельности и пути их решения: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. Краснодар: КубГАУ. С. 670-673.
- Молчатский С.Л., Казанцев И.В., Матвеева Т.Б.* 2016. Применение метода фрактального анализа для биоиндикационной оценки состояния окружающей среды // Самарский научный вестник. № 4 (17). С. 28-31.
- Насонов А.Н., Кульнев В.В., Цветков И.В., Шибалова Г.В., Кизеев А.Н., Насонов С.Н.* 2019. Применение фрактального анализа при лишеноиндикации техногенного воздействия от линейного источника загрязнения атмосферы // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. Т. 19. Вып. 4. С. 233-240.
- Насонов А.Н., Цветков И.В.* 2018. Особенности управления развитием техно-природных процессов на основе мультифрактальной динамики // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2018: Труды 11-й Международной конференции: В 3 т. / под общ. ред. С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркуна. М.: Изд. ИПУ РАН им. В.А. Трапезникова. С. 83-88.
- Нотов А.А.* 2008. Модульная организация как модельный объект в биологических исследованиях // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. № 9. С. 162-176.

- ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98. 2005. Количественный химический анализ почв. Методика выполнения измерений содержания металлов в твердых объектах методом спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой. М.: Гос. комитет РФ по охране окружающей среды. 30 с.*
- Розенберг Г.С. 2018. Фрактальные методы анализа структуры сообществ // Принципы экологии. 2018. № 4. С. 4-43.*
- Савинов А.Б., Мейсурова А.Ф., Нотов А.А., Новожилов Д.А. 2021. Фенетическая фитоиндикация и биотестирование почв в рекреационных зонах г. Твери // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. № 3 (63). С. 114-126.*
- Arseniou G., MacFarlane D.W. 2021. Fractal dimension of tree crowns explains species functional-trait responses to urban environments at different scales // Ecological Applications. V. 31. № 4. Art. e02297.*
- Bialowiec A., Randerson P.F., Kopik M. 2010. Using fractal geometry to determine phytotoxicity of landfill leachate on willow // Chemosphere. V. 79. № 5. P. 534-540.*
- Brym, Z.T., Ernest, S.K.M. 2018. Process-based allometry describes the influence of management on orchard tree aboveground architecture // PeerJ. V. 2018. № 6. Art. e4949.*
- Campbell R.D. 1996. Describing the shapes of fern leaves: a fractal geometrical approach // Acta Biotheoretica. V. 44. P. 119-142.*
- Cojocaru P., Gusiatin Z.M., Cretescu I. 2016. Phytoextraction of Cd and Zn as single or mixed pollutants from soil by rape (*Brassica napus*) // Environ. Sci. Pollut. Res. V. 23. № 11. P. 10693-10701.*
- Collin A., Lamorlette A., Bernardin D., Séro-Guillaume O. 2011. Modelling of tree crowns with realistic morphological features: New reconstruction methodology based on Iterated Function System tool // Ecological Modelling. V. 222. № 3. P. 503-513.*
- De Oliveira Plotze R., Falvo M., Pádua J.G., Bernacci L.C., Vieira M.L.C., Oliveira G.C.X., Bruno O.M. 2005. Leaf shape analysis using the multiscale Minkowski fractal dimension, a new morphometric method: A study with *Passiflora* (Passifloraceae) // Can. J. Bot. V. 83. № 3. P. 287-301.*
- Du J.-X., Zhai C.-M., Wang Q.-P. 2013. Recognition of plant leaf image based on fractal dimension features // Neurocomputing. V. 116. P. 150-156.*
- Ferreiro N., Giorgi A., Feijó C. 2013. Effects of macrophyte architecture and leaf shape complexity on structural parameters of the epiphytic algal community in a Pampean stream // Aquat Ecol. V. 47. P. 389-401.*
- Gao H., Liu Q., Song C., Wu B., Zhou W., Wei S. 2015. Exploration on leaf morphological diversity of species in *Acer* Linn. and its systematic significance based on fractal method // J. Plant Resour. Environ. V. 24. № 2. P. 1674-7895.*
- Gazda A. 2013. Fractal analysis of leaves: Are all leaves self-similar along the cane? // Ekologia Bratislava. V. 32. № 1. P. 104-110.*
- Li Q., Zhao C.-Z., Wen J., Kang M., Li X. 2022. Fractal analysis of root architecture responses of *Saussurea salsa* to a gradient of flooding intensity and salinity // Plant and Soil. V. 471. P. 669-683.*

- Li T., Rajagoplan U.M., Kadono H.* 2019. Fractal based complexity analysis of wheat root system under different heavy metals // *Plant Biotechnology*. V. 36. № 2. P. 77-84.
- McAbendroth L., Ramsay P.M., Foggo A., Rundle S.D., Bilton D.T.* 2005. Does macrophyte fractal complexity drive invertebrate diversity, biomass and body size distributions? // *Oikos*. V. 111. P. 279-290.
- Mikheev S.A., Paramonova E.K., Tsvetkov V.P., Tsvetkov I.V.* 2021. Fractal thermodynamics of the states of instantaneous heart rhythm // *Rus. J. Mathem. Physics*. V. 28. № 2. P. 251-256.
- Paramonova, E., Kudinov, A., Mikheev, S., Tsvetkov, V., Tsvetkov, I.* 2021. Fractal thermodynamics, Big data and its 3D visualization // *CEUR Workshop Proceedings* this link is disabled. 3041. P. 38-42
- Notov A.A.* 2011. Modular organization – a model for biological research // *Wulfenia*. V. 18. P. 113-131.
- Oncevay-Marcos A., Juarez-Chambi R., Khlebnikov-Núñez S., Beltrán-Castañón C.* 2015. Leaf-based plant identification through morphological characterization in digital images // *Computer Analysis of Images and Patterns – CAIP 2015 / eds. G. Azzopardi, N. Petkov: Proceedings. Part II*. P. 326-335. (Lecture Notes in Computer Science; V. 9257).
- Tao L., Chen A.-Q., Deng, Z.-Z., Han C.-L., Wang Y.-H., Wang P.* 2021. Plant morphological modeling using fractal geometry and chaos theory // *Acta Electronica Sinica*. V. 49. № 9. P. 1776-1782.
- Tatsumi J., Yamauchi A., Kono Y.* 1989. Fractal analysis of plant root systems // *Annals Bot.* V. 64. № 5. P. 499-503.

**ANALYSIS OF THE FRACTAL PARAMETERS
OF THE LEAVES OF *AEGOPIDIUM PODAGRARIA*
IN THE RECREATIONAL ZONES OF THE CITY OF TVER
BY THE METHODS OF MULTIFRACTAL THERMODYNAMICS**

A.F. Meysurova, V.P. Tsvetkov, I.V. Tsvetkov, A.A. Notov
Tver State University, Tver

Fractal analysis of *Aegopodium podagraria* L. leaves in the recreational zones of Tver with different levels of anthropogenic transformation showed a high degree of similarity of the leaf surface structure with fractals. The degree of deviation δ was in the range 0.011–0.024. The parameters of multifractal thermodynamics A and γ are analyzed. The values of γ indices of fractal equations of leaf condition correlate with the level of anthropogenic transformation of biotopes and soil pollution by heavy metals and metalloids. The γ index increases with increasing degree of biotope transformation and degree of soil contamination. The minimum values of γ were found in areas with large fragments of forest phytocenoses, and the minimum values were recorded for tree plantings in the downtown. The obtained results are of interest for biomonitoring.

Keywords: *goutweed, Aegopodium podagraria, fractal analysis, Tver, pollution, recreational areas, biomonitoring, environment, FUS index, multifractal thermodynamics.*

Об авторах:

МЕЙСУРОВА Александра Федоровна – доктор биологических наук, декан биологического факультета, заведующая кафедрой ботаники, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: alexandrauraz@mail.ru.

ЦВЕТКОВ Виктор Павлович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой общей математики и математической физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: tsvetkov.vp@tversu.ru.

ЦВЕТКОВ Илья Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры экономики предприятия и менеджмента, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: tsvetkov.iv@tversu.ru.

НОТОВ Александр Александрович – доктор биологических наук, профессор кафедры ботаники, ФГБОУ ВО «Тверской государственной университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: anotov@mail.ru.

Мейсурова А.Ф. Анализ фрактальных параметров листьев сныти обыкновенной (*Aegopodium podagraria*) в рекреационных зонах города Твери методами мультифрактальной термодинамики / А.Ф. Мейсурова, В.П. Цветков, И.В. Цветков, А.А. Нотов // Вестн. ТвГУ. Сер. Биология и экология. 2022. № 1 (65). С. 180-193.