



УДК 504.064:58.05:51-76

© 2010

М. В. Артюшенко, Л. В. Подгородецкая,
член-корреспондент НАН України **А. Д. Федоровский**

Фрактальный анализ спектрограм растительного покрова в задачах природопользования

Проведено теоретичне обґрунтування і розглянуто методи фрактального аналізу спектрограм рослинного покриву. Представлено результати застосування методу фрактальної спектрометричної фітоіндикації при визначенні впливів техногенних забруднень на екологію рослин, обговорюються дані верифікації методу. Наведено приклади побудови полів фрактальних розмірностей рослинного покриву тестового полігону, що містить поклади вуглеводнів; визначено можливі межі покладу.

Большинство исследователей в области физиологии растений и смежных научных направлений отмечают сложную организацию листа высших растений как оптической системы. Отмечается специфическая, тонко организованная и динамическая структура с возможностью направленного изменения в содержании пигментов в листьях, со способностями к эффективной утилизации энергии солнечного излучения для фотосинтеза и приспособлению к действию этого излучения в самых разнообразных экологических ситуациях [1, 2]. Ответы на многие вопросы, касающиеся более полного понимания оптических свойств листьев, предстоит еще получить. В настоящее время широко применяется метод фитоиндикации как способ практического использования различных признаков и свойств растений, растительного покрова для получения интегрированной оценки и качественной характеристики среды обитания. Во многих случаях качественные методы фитоиндикации способны заменить многочисленные и дорогостоящие количественные анализы проб окружающей среды с целью обобщения характеристики экологического благополучия регионов. Фитоиндикация, как раздел экологии растений, изучает связь ботанических объектов с факторами среды, а также позволяет проводить индикацию условий среды с помощью растений (видов, их комплексов, сочетаний). Современная техника позволяет регистрировать спектры отражения растений на значительном расстоянии, включая наблюдения из космоса. Это, в частности, значительно расширяет возможности методов фитоиндикации, позволяет осуществлять мониторинг состояния растительности в процессе развития под влиянием различных, в том числе и неблагоприятных, внешних факторов. Изменения растений в ходе онтогенеза, а также при действии на них неблагоприятных и повреждающих факторов среды (токсические вещества, загрязнители атмосферы, заболевания и т. п.)

сопровождаются изменениями содержания и соотношения пигментов, определяющих цвет листьев. Значительный интерес представляет возможность объективной оценки состояния растительности, в том числе и в глобальных масштабах, с помощью неdestructивных дистанционных оптических методов, используя спектроскопию отражения для определения наличия повышенного содержания пигментов, а также более детальной диагностики воздействия неблагоприятных факторов внешней среды при отсутствии явных, видимых, признаков дополнительной пигментации в листьях.

Изучение оптических свойств листьев проводилось по спектрам отражения электромагнитного излучения листьев и листового покрова в видимой области спектра (400–750 нм). Особенности формирования структуры оптической системы листьев обнаруживаются в существовании скрытых симметрий (закономерностей) в спектрограммах отраженного излучения. Анализ спектрограмм отражения выявляет масштабную инвариантность (scaling) в распределении значений коэффициента отражения по спектральным диапазонам. Именно это, выявленное нами, свойство спектрограмм положено в основу фрактального анализа спектра отражения растительного покрова. Адаптация и применение методов фрактального анализа к спектрограммам для решения экологических и природоресурсных задач значительно расширяют возможности метода фитоиндикации, что позволяет перейти от качественной оценки экологического состояния природной среды, по видимым признакам индукции синтеза дополнительных пигментов в ответ на действия стрессовых нагрузок, к количественным оценкам воздействия неблагоприятных факторов. Рассмотренный в работе метод фрактальной спектрометрической фитоиндикации позволяет выявить и количественно оценить степень даже незначительных воздействий на растения неблагоприятных и повреждающих факторов среды при отсутствии явных признаков дополнительной пигментации в листьях. Это свойство рассматриваемого метода делает его эффективным не только для оценки экологического состояния окружающей среды, но также демонстрирует хорошие результаты при решении ряда природоресурсных задач.

Разработка прикладных методов исследования природных объектов на основе математического аппарата теории фракталов возможна только в том случае, если объекты исследования обладают определенными свойствами. Следует также учитывать, что многие аспекты математического аппарата фракталов носят эвристический характер. Это сделало необходимым провести обоснование и заложить теоретическую основу применения методов теории фракталов при анализе спектрограмм растительности. Для этого был проанализирован материал полевых исследований спектров отражения высших растений с тестовых участков наземных полигонов. Измерения спектров отражения проводились контактным методом спектрофотометром СФ-18 в 2004 г. и цифровым спектро радиометром ASD FieldSpec®3 в 2009 г. Анализу подлежали спектрограммы листьев березы, ясеня, липы в видимой области спектра.

Фракталы листового покрова. Рассмотрим листовый покров как набор спектрограмм: $M = \{M_j\}$, $j = \overline{1, m}$, где m — общее количество листьев в наборе. Все спектрограммы M_j заданы нормированными относительно белого фона значениями коэффициентов отражения: k_{ij} , $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, где n — количество диапазонов длин волн в спектрограммах. Результаты измерений сведены в матрицу I размером $n \times m$, где n — число строк; m — число столбцов матрицы. Следовательно, на ограниченной гладкой и открытой области $\Omega \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ на решетке матрицы I задана числовая функция $k(x) \rightarrow \mathbb{R}$, $x \in \Omega$.

Естественным графическим представлением набора табличных данных и $k(x)$ является объемная гистограмма, построенная на решетке матрицы I с высотой столбцов гисто-

граммы, пропорциональной значениям k , и началом отсчета от минимального значения k . Построенную таким образом гистограмму рассматриваем как точечное множество A , вложенное в евклидово пространство \mathbb{E}^3 . Для измерений величины множества A точек в пространстве \mathbb{E}^3 введем d -меру множества A , которую будем называть спектрометрической, обозначать — $\nu(d, A)$ и которая удовлетворяет стандартным требованиям [3], предъявляемым к аддитивной мере множества. Для этого по аналогии с мерами в евклидовом пространстве конечного числа измерений положим

$$\nu(d, A) = \gamma(d)r^d. \quad (1)$$

Аппроксимируем множество A пробными функциями с учетом аддитивности меры

$$\nu(d, A) = \sum^{N(r)} \gamma(d)r^d = \gamma(d)N(r)r^d, \quad (2)$$

где d — размерность выбранной меры; $\gamma(d)$ — геометрический коэффициент, зависящий от вида пробной функции $\gamma(d)r^d$, т. е. геометрического вида фигур (тел) которыми осуществляется минимальное покрытие (заполнение) точечного множества A ; $N(r)$ — наименьшее количество фигур, необходимых для покрытия; r — характерный размер (длина), выбранной для покрытия множества A тестовой фигуры. Если, например, для минимального покрытия (заполнения) множества A в качестве пробных функций выбрать круг или шар, то значениями геометрического коэффициента будут $\gamma = \pi/4$ и $\gamma = \pi/6$ соответственно, а характерным размером r выступит диаметр. При покрытии квадратами или кубами $\gamma(d) = 1$, r — длина стороны или ребра [4]. Для вычислений спектрометрической меры $\nu(d, A)$ покрытие осуществляем равновеликими кубами с размером ребра r .

Для дальнейшего определения спектрометрической меры обратимся к экспериментальным данным, содержащимся в матрице I , и установим вид функциональной зависимости $N(r)$ в выражении (2) по следующему алгоритму. Область евклидова пространства \mathbb{E}^3 , в которой содержится множество A , заполняем кубическими клетками со стороной ребра r . Затем считаем количество кубов $N(r)$, необходимых для заполнения A . Процедуру повторяем для различных значений r .

В процессе обработки экспериментальных данных матрица I произвольно разбивалась на квадратные, связанные блоки I_i размером 16×16 , и для каждого соответствующего подмножества $A_i \subset A$, по рассмотренному выше алгоритму, определялся вид функции $N(r)$. Было установлено, что для всех A_i с погрешностью $\varepsilon < 3\%$ выполняется степенная зависимость:

$$N(r) = C_i r^{-d}, \quad N(r) \sim \frac{1}{r^d}, \quad (3)$$

где i — номер тестируемого блока спектрометрической матрицы I , $C_i \in \mathbb{R}$. На рис. 1 приведены графики зависимостей $N(r)$ листового покрова березы для некоторых непересекающихся подмножеств $A_i \subset A$ блоков матрицы I_i размером 16×16 при изменении значений размера кубических клеток покрытия $r = [1/8, 1]$. Степенная зависимость наблюдается для листового покрова всех тестируемых высших растений по данным со спектрофотометра СФ-18 и спектрорадиометра ASD FieldSpec®3, для различных тестовых полигонов и в различные годы.

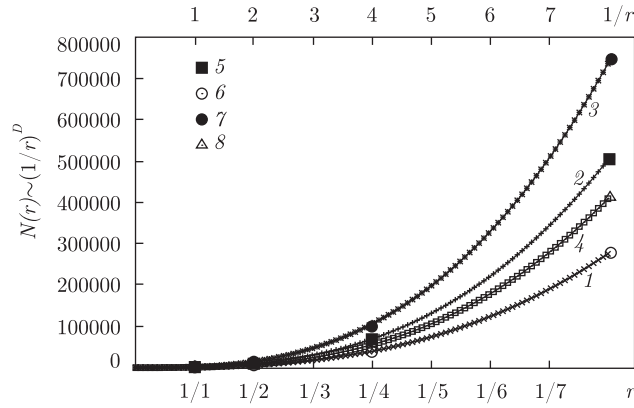


Рис. 1. Пример построения графиков зависимостей $N(r)$ по экспериментальным данным для блоков спектрметрической матрицы: 1 — $D = 2,86$, № 244; 2 — $D = 2,79$, № 278; 3 — $D = 2,80$, № 161; 4 — $D = 2,88$, № 1; 5 — № 244; 6 — № 278; 7 — № 161; 8 — № 1

Введенная выражением (2) спектрметрическая мера с пробной функцией r^d будет “подходящей” и может быть применена для оценки множества A и его подмножеств A_i при выполнении условия сходимости меры:

$$\nu(d, A_i) = \lim_{r \rightarrow 0} N(r)r^d = c, \quad (4)$$

где $c \in \mathbb{R}$, $c \neq 0$. Покажем, что для листовного покрова условие (3) выполняется при $d = D_i$. Для этого экспериментально найденные функциональные значения $N(r)$ для i -го блока матрицы I_i из выражения (3) подставляем в выражение (4), положив $d = D_i$, определяем:

$$\nu(d, A_i) = \lim_{r \rightarrow 0} C_i r^{-D_i} r^d = \lim_{r \rightarrow 0} C_i r^0 = c.$$

Величина D_i называется фрактальной размерностью множества, в рассматриваемом приложении — подмножества A_i . При $D_i > d$, $\nu(d, A_i) \rightarrow 0$, а при $D_i < d$, $\nu(d, A_i) \rightarrow \infty$, таким образом размерность D_i есть критическое значение размерности, при котором спектрметрическая мера изменяет свое значение с 0 на ∞ . Для i -го блока спектрограммы при $c = C_i$ и малых значениях r из выражения (4) находим:

$$\begin{aligned} \log(N(r)) &= \log(C_i) - d \log(r), \\ d &= \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{-\log(N(r))}{\log(r)} + \frac{\log(C_i)}{\log(r)} \right], \\ \dim(A_i) = d &= - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log(N(r))}{\log(r)}. \end{aligned} \quad (5)$$

В общем случае, если предел выражения (5) существует, то этот предел определяет размерность Минковского [3] ограниченного множества в метрическом пространстве при покрытии его множествами диаметром r минимальным числом N . Как было показано выше, для спектрметрической меры листовного покрова такой предел существует и может быть найден численно по данным спектрметрических измерений.

На основании результатов проведенных исследований и их анализа было установлено, что различные блоки A_i данных спектрометрии в матрице I (для всех исследованных спектрограмм листьев) обнаруживают фрактальные свойства в пределах каждого блока. Величина фрактальной размерности D инвариантна относительно размеров блока и является

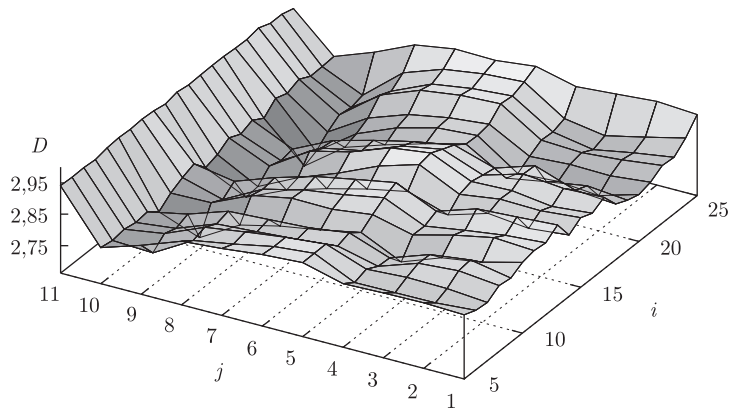


Рис. 2. Фрагмент поля распределения фрактальной размерности D листового покрова для $i = \overline{5, 25}$ участков тестового полигона

индивидуальной характеристикой растения и среды обитания, изменяется при загрязнении участков исследованной территории. Перечисленные свойства спектрограмм позволяют строить поля распределений фрактальных размерностей листового покрова территорий и, используя метод спектрометрической фитоиндикации, решать ряд задач экологии и поиска природных ресурсов.

Основы фрактального метода спектрометрической фитоиндикации. Для обнаружения участков местности с повышенным уровнем антропогенной нагрузки проводится сбор данных в виде упорядоченного по маршруту обследования набора спектрограмм $M = \{M_i\}$, $i = \overline{1, n}$, где n — количество контролируемых точек на маршруте. Каждый конкретный набор M_i , полученный в окрестности i -й контрольной точки, содержит $p = \text{const}$ спектрограмм. Все спектрограммы M_i заданы квантованными значениями коэффициентов отражения k_{jl} , $j = \overline{1, m}$, $l = \overline{1, n \cdot p}$, где m — количество диапазонов длин волн спектрограммы; l — порядковый номер спектрограммы в наборе M . Результаты измерений сведены в матрицу I размером $m \times n \cdot p$, где m — число строк; $n \cdot p$ — число столбцов матрицы. Номер точки (участка) на маршруте вычисляется с помощью целочисленной функции $i = \lceil l/p \rceil$. На этапе обработки данных используется техника “сканирующего окна”, в результате которой по матрице I вычисляются значения фрактальных размерностей спектрограмм вдоль маршрута для всех диапазонов длин волн. В процессе компьютерной обработки результатов спектрометрии строится поле распределений фрактальных размерностей D обследуемой территории (рис. 2).

Эксперимент проводился на тестовом полигоне, содержащем залежи углеводорода, сканирующее окно выбиралось размером 16×16 . Сканирование матрицы I осуществлялось, начиная с первого столбца, и далее последовательно производилось смещение окна на $p + 1$ позицию по столбцам, до достижения последнего столбца матрицы с номером $n \cdot p$. После чего выполнялось смещение окна на $p + 1$ по строкам матрицы и процесс, вышеупомянутый, повторялся. Для каждой позиции сканирующего окна по коэффициентам отражения k_{jl} вычислялось значение фрактальной размерности D . Фрагмент поля распределения фрактальной размерности D листового покрова для $i = \overline{5, 25}$ участков тестового полигона по $j = \overline{1, 11}$ спектральным диапазонам длин волн $L = 400\text{--}750$ нм иллюстрирует рис. 2. Для графического представления поля применена кусочно-линейная аппроксимация.

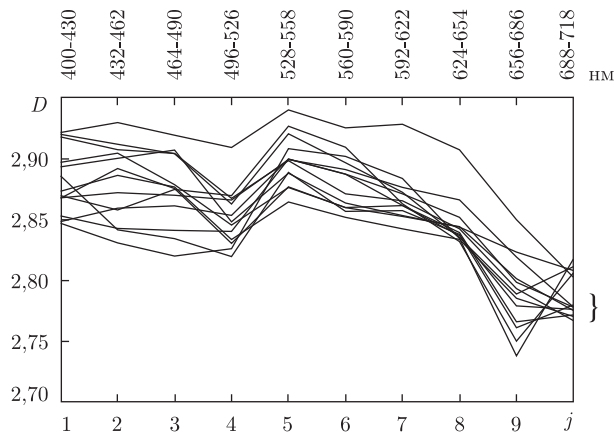


Рис. 3. Графики сечений поля распределения фрактальной размерности D плоскостями, проходящими через контрольные точки i местности

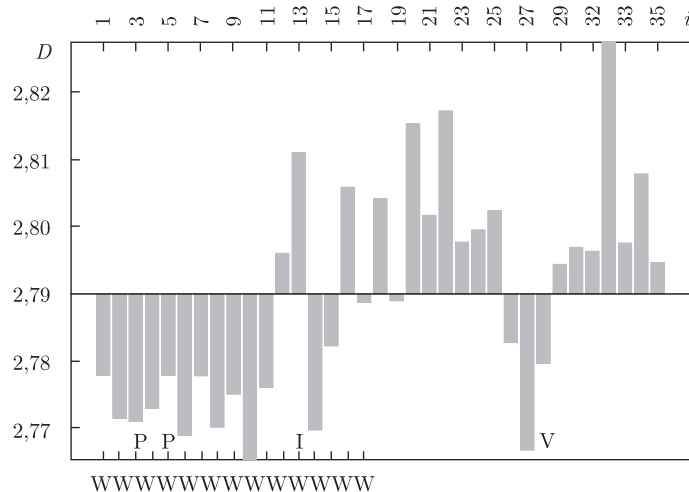


Рис. 4. Графическое представление результатов обработки данных методом фрактальной спектрометрической фитоиндикации и его верификации методами геологической разведки, по данным А. И. Архипова

Графики сечений плоскостями трехмерного представления поля распределения фрактальной размерности D показаны на рис. 3. Плоскости проходят через контрольные точки i местности (см. рис. 2), применена кусочно-линейная интерполяция, j — диапазоны длин волн приведены в отсчетах и нанометрах. На графиках показан информационный признак определения экологически неблагоприятных нагрузок на растения — разделение значений фрактальных размерностей в десятом диапазоне. В диапазоне длин волн $j = 688-718$ нм значения фрактальных размерностей графиков загрязненных участков, выделенные фигурной скобкой, значительно отличаются от других участков, что и позволяет определить точки маршрута (обозначение i) с повышенным содержанием загрязняющих углеводородных компонент.

График дискретного распределения по точкам $i = \overline{1, 35}$ маршрута значений фрактальной размерности D спектрограмм в диапазоне длин волн $L = 688-718$ нм и результаты геологической разведки показаны на рис. 4. Приняты обозначения: W — участок месторождения; V — локальный источник техногенного загрязнения; P — действующая скважина;

I — геологический разлом. Спектрометрическая фитоиндикация при значениях $D < 2,79$ указывает на участки местности с негативным воздействием на растительность. Для построения распределений фрактальных размерностей листового покрова по маршруту выполнен разрез поля (см. рис. 2) по $j = 10$ диапазону. Расстояние между точками на маршруте около 50 м. Метод фрактальной спектрометрической фитоиндикации хорошо идентифицирует распределения залежей углеводородов вдоль выбранного маршрута.

1. Рейвн П., Эверт Р., Айкхорн С. Современная ботаника. – Москва: Мир, 1990. – Т. 1. – 348 с.; Т. 2. – 344 с.
2. Мерзляк М. Н., Гительсон А. А., Погосян С. И. и др. Спектры отражения листьев и плодов при нормальном развитии, старении и стрессе // Физиология растений. – 1997. – 44, № 5. – С. 707–716.
3. Александров П. С., Пасынков Б. А. Введение в теорию размерности. – Москва: Наука, 1973. – 576 с.
4. Федер Е. Фракталы. – Москва: Мир, 1991. – 254 с.

*Научный центр аэрокосмических исследований Земли
Института геологических наук НАН Украины, Киев
Институт космических исследований
НАН и НКА Украины, Киев*

Поступило в редакцию 24.12.2009

M. V. Artiushenko, L. V. Pidgorodetska,
Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. D. Fedorovsky**

Fractal analysis of plant cover spectrograms in the tasks of nature management

The methods of fractal analysis of plant cover spectrograms are considered, and the theoretical background is given. The results of the fractal phytoindication method of determination of pollution influences on the plant ecology are presented; the results of a verification of the method are discussed. The examples of the fractal dimension field construction of the plant cover on a testing area which contains a hydrocarbon deposit are given. The possible boundaries of this deposit are determined.