
КОРОТКІ ПОВІДОМЛЕННЯ

УДК 631.42

А. К. Балалаев

О ВЫЧИСЛЕНИИ МЕТРИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ВИДИМЫХ ПОР ПО ЦИФРОВЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ ПРОЗРАЧНЫХ ПОЧВЕННЫХ МИКРОШЛИФОВ

О. К. Балалаев

Дніпропетровський національний університет

ПРО ОБЧИСЛЕННЯ МЕТРИЧНИХ АТРИБУТИВ ВИДИМИХ ПОР ЗА ЦИФРОВИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ ПРОЗОРИХ ГРУНТОВИХ МІКРОШЛІФІВ

Запропоновано поліпшену методику автоматичного виміру метричних характеристик та підвищення їх точності. Описано програмний алгоритм одержання й аналізу кістяка зображень ґрунтових пор. Створено і застосовано на практиці комп'ютерну програму, яка реалізує цей алгоритм.

Ключові слова: програмний алгоритм, метричні характеристики, аналіз зображень, поровий простір, мікроморфометрія ґрунту, прозорий шліф.

О. К. Balalayev

Dnipropetrovsk National University

ABOUT CALCULUS OF METRIC TAGS OF VISIBLE PORES UNDER THE DIGITAL IMAGES OF TRANSPARENT EDAPHIC MICROSPLICES

The procedure of automatic calculus of the metric performances of the digital maps of transparent edaphic microsections is proposed.

Key words: computer model, geometrical characteristics, image analysis, pore space, soil microstructure, ecological interpretation.

Конфигурация порового пространства определяет важнейшие функции и свойства эдафотопы. Значение поровой структуры в процессах влагопереноса и воздухообмена, обеспечения жизнедеятельности корней, микроорганизмов, педофауны в настоящее время общепризнанно. Микроморфологи давно рассматривают поровое пространство как полноправный структурный компонент почвы. Качественному и количественному изучению организации порового пространства эдафотопы в почвенных шлифах посвящено большое количество работ (Польский, 1952; Качинский, 1965; Ismail, 1975; Handbook ..., 1985; Турзина и др., 1985; Prots и др., 1987; Медведев, 1988; Скворцова, 1994; Белова, Травлеев, 1999) с точки зрения как микроморфологии, так и физики почв.

Согласно современным представлениям (Воронин, 1984; Структурно-функциональная ..., 2003) почвенная структура обладает сложной многоуровневой иерархической организацией. Для порового пространства это означает, что каждая группа пор, обладая соответствующим диапазоном размеров на своем масштабном уровне взаимодействия, характеризуется определенными физико-химическими свойствами, влияющими на почвенную биоту, рост и развитие растений, а также находится в тесном функциональном взаимодействии с порами, принадлежащими соседним уровням масштабной иерархии. В связи с этим необходим более широкий подход к характеристике структуры порового пространства, нежели применявшийся ранее. Он включает не только анализ свойств отдельно взятых пор, но и учет геометрических особенностей взаимного расположения и ориентации ансамбля

© Балалаев А. К., 2004

соседних поровых структур. Задача точного пространственного описания организации пор как единой структурно-функциональной системы еще далека до своего окончательного решения.

Для автоматических измерений геометрических размеров, формы и ориентации пор на ЭВМ в современных количественных микроморфометрических исследованиях широко применяются достижения цифрового анализа изображений (Претт, 1982; Jain, 1990), математической морфологии (Sega, Ley, 1988; Pitas, Venetsanopoulos, 1989) и компьютерной геометрии (Препарата, Шеймос, 1989; Роджерс, Адамс, 2001).

Однако, несмотря на хорошую методическую базу поровой микроморфометрии, в этой области существует ряд до конца не решенных проблем, связанных, в частности, с точным вычислением метрических характеристик пор сложной формы для последующей адекватной интерпретации и учетом взаимного расположения и тесноты связи соседних пор. Указанные задачи особенно актуальны при изучении поровой структуры черноземов, которая имеет особо сложную, фрактальную организацию и во многом определяет высокое плодородие этих типов почв. Наш опыт, приобретенный при создании и использовании компьютерной программы для расчета геометрических характеристик водопрочных почвенных микроагрегатов (Балалаев, 2002), показал, что для успешного применения существующих методов вычисления метрических признаков поровых объектов необходима их существенная модернизация. Это объясняется значительно более сложной и многообразной формой контура почвенных пор по сравнению с промытыми и просеянными агрегатами, обладающими преимущественно гладкими контурами и округлыми контурами.

Необходимо отметить, что далее в статье речь пойдет исключительно об автоматическом вычислении с помощью компьютера ряда метрических признаков, без какого либо вмешательства пользователя, так как изложенные проблемы в принципе не возникают при использовании устаревших ручных неточных и малоэффективных методов измерения.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Длина, ширина, периметр и площадь – основные метрические характеристики любого измеряемого геометрического объекта на плоскости, в том числе поры или агрегата в почвенном шлифе. Существует также большое количество широко применяемых производных показателей – коэффициентов (факторов) формы (Фридланд, 1972), предназначенных для описания сложности контура объекта и вычисляемых с использованием четырех основных метрических признаков. Применение интегральных характеристик имеет большое значение для решения многих задач, хорошо зарекомендовало себя в практике микроморфометрических исследований. При многочисленных преимуществах все они имеют один общий недостаток. Объект сложной сильноразветвленной формы трудно описать с высокой точностью одним или несколькими интегральными коэффициентами, каким бы сложными не были алгоритмы их вычисления. В этом случае неизбежна частичная потеря информации за счет усреднения данных о пиксельной структуре оцифрованного объекта.

Если вычисление площади и периметра корректно выделенной поры на остальном фоне особых разночтений не возникает, то расчеты длины и ширины поры требуют уточнения. Применяются по крайней мере два близких по сути стандартных алгоритма вычисления длины, ширины и ориентации объектов (Претт, 1982; Nagalick, Shapiro 1992). Первый – заимствован из механики твердого тела и основывается на определении главных осей эллипсоида инерции, лежащих в плоскости объекта. Второй чаще применяется в оптико-электронных анализаторах (Ismail, 1975). В нем длина объекта определяется как расстояние между двумя точками на контуре поры, максимально удаленными друг от друга, угол наклона этой линии к горизонтالي принимается за ориентацию. Ширина – максимальная проекция объекта по нормали к ее длине. Как правило, условная линия максимальной длины проходит через центр масс (тяжести). Здесь необходимо отметить, что понятие центра масс для пустотелых

поровых объектов является математической абстракцией и реального физического смысла не имеет. Поэтому при расчетах по второму способу мы отказались от привязки к центру тяжести.

Длина и ширина, определенные вышеуказанными методами, хорошо отображают действительность только для пор правильной формы. При вычислении значений длины и ширины в обоих подходах возникает ошибка, значение которой тем больше, чем сложнее форма поры. Для пор очень сложной извилистой формы величина этих признаков часто не поддается обоснованию.

С целью уменьшения возникающих ошибок нами применен более гибкий модернизированный подход, основанный на понятии скелета, остова или средней линии объекта, длина которого принимается за длину поры сложной формы. Модель скелета во многих случаях позволяет лучше описывать геометрические особенности объектов на изображении и удобна при последующей обработке. После изобретения метод утоньшения (*thinning*) изображений сразу был востребован в решении прикладных задач, на эту тему опубликованы десятки работ. Наиболее популярная сфера применения – распознавание печатных и рукописных символов по их скелетным образам (Lam, Suen, 1995).

Построение скелета, представляющего собой связную линию толщиной в один пиксель с минимальным количеством разветвлений, основано на утоньшении объекта путем последовательного применения операции эрозии с учетом трех основных условий для сохранения 8-связности контура (Lam и др., 1992; Gonzalez, Woods, 1992; Sanniti di Baja, 1994):

- 1) связность объектов изображения и фона сохраняется;
- 2) концы остова располагаются как можно ближе к их истинному положению;
- 3) центральные линии объектов выделяются достаточно точно.

В данной работе применен наиболее распространенный итеративный алгоритм удаления внешних слоев объекта до тех пор, пока на изображении останутся только точки, принадлежащие скелету. В процессе вычисления программный алгоритм использует маску (*sliding window*) с матрицей перекодировки размером 3×3 , которая, последовательно перемещаясь по всему изображению, на каждом шаге сопоставляется с соответствующим участком для определения нового значения центрального пикселя. Операция применяется не рекурсивно. В результате обработки всего изображения за один этап работы алгоритма удаляется один внешний слой объекта толщиной в 1 пиксель. Число таких этапов зависит от максимальной ширины объекта.

В результате описанных преобразований несложно определить общую длину получившегося скелета, количество и координаты особых точек (концы и узлы) и расстояния между ними. Оценка ширины вдоль остова можно осуществить двумя путями. Самый простой способ вычислить среднюю ширину как отношение площади поры к длине скелета. Этот способ должен давать лучшую оценку ширины для пор сложной формы по сравнению с вышеизложенными методами. Для пор простой и идеально правильной формы скелет сходится в точку или короткий отрезок прямой, что вносит существенные искажения в оценку длины и ширины поры методом скелетизации. Как правило, площадь таких пор мала и вероятность выделения таких пор в реальных прозрачных почвенных шлифах – достаточно низкая. При обработке изображений этих объектов целесообразнее применение традиционных методов. Поэтому для уменьшения ошибки в программу включена возможность предварительной сортировки пор по фактору формы на простые и сложные.

Другой более сложный и информативный способ оценки ширины поры состоит в вычислении ширины объекта в каждой точке скелета и представлении результата в виде гистограммы распределения ширины вдоль остова поры. Для этого каждой точке скелета присваивается ширина линии как дополнительный атрибут. Значение ширины равно количеству итераций утоньшения и индивидуально для каждого пикселя скелета.

Нахождение остова позволяет на следующем шаге расчетов определить коэффициент извилистости поры. Учитывая графоподобную структуру порового скелета, можно предложить два варианта вычисления этого параметра. В первом случае, за коэффициент извилистости примем отношение длины скелета к максимальной длине поры и определим его как глобальный. С другой стороны, любой скелет можно разложить на участки (ребра), лежащие между особыми точками и использовать кусочно-линейную аппроксимацию. Поэтому, во втором случае вычислим локальный коэффициент извилистости как среднюю величину отношения реальной длины каждого ребра к кратчайшему расстоянию между его конечными точками. Эти два параметра отображают особенности поровых изгибов.

Кроме вычисления размеров отдельно взятых пор, в программе реализован алгоритм определения минимального расстояния между текущей и ближайшей соседней порой, работающий на сходных принципах наращивания и эрозии объектов. Это расстояние характеризует степень взаимосвязи между двумя порами и может рассматриваться как один из пространственных показателей для оценки более высокого уровня организации поровой системы.

В целом программный алгоритм работает по известной схеме, в которой последовательность действий уже стало стандартом при решении подобного рода задач. Для полноты описания коротко перечислим основные этапы работы компьютерной программы.

1. Загрузка графического файла цифрового изображения почвенного шлифа.
2. Предварительная обработка полутонового изображения (фильтрация шума, обрезание краев, масштабирование, поворот и т. д.).
3. Бинаризация на основе локального порогового разделения.
4. Поиск не связанных друг с другом пор.
5. Определение минимальных расстояний между порами.
6. Вычисление метрических характеристик и различных коэффициентов формы найденных пор.
7. Скелетизация, определение метрических и топологических характеристик на основе скелета поры.
8. Сохранение полученных данных в табличный файл для последующей статистической обработки.







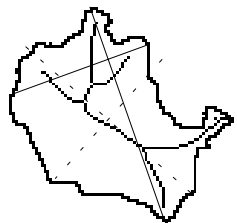
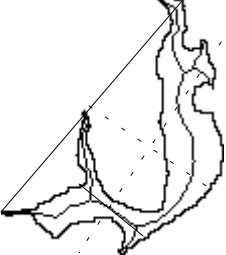


ПРИМЕРЫ РЕАЛИЗАЦИИ

Примеры пор для тестирования программного алгоритма взяты из изображения реального почвенного шлифа с сохранением пропорций и наклона, но с измененным масштабом. Приведенные результаты вычисления метрических характеристик разными методами (*таблица*) наглядно показывают преимущества применения усовершенствованного алгоритма. Особенно эффективно его применение для микроморфометрического анализа пор сложной сильноразветвленной и извилистой формы. Значения глобального коэффициента извилистости во всех вариантах, кроме первого, приблизительно равно двум и более. Особая ситуация с первым вариантом является предсказуемой. В этом случае значение глобального коэффициента извилистости меньше единицы и может быть признаком геометрической простоты формы контура поры. В то же время усредненный локальный коэффициент извилистости во всех представленных вариантах меняется не существенно и близок к единице. Это говорит о слабом изменении направлении пор в пределах ребер остова.

Такой параметр, как средняя ширина поры, слабо связан со сложностью формы контура во всех представленных вариантах кроме третьего и принимает значение чуть более 0,2. Низкое значение в третьем случае (0,12), судя по всему, связано с явно выраженной подковообразной формой поры. Вообще, у пор подобной формы центр тяжести часто находится за пределами площади объекта. При кажущейся гладкой форме контура поры ошибки в определении метрических размеров велики. Здесь вычисления на основе скелета особенно эффективны.

Для углов ориентации оба метода дают близкие и приемлемые результаты. Исключение составляет 2-й вариант поры. При определении угла наклона этой поры

Примеры изображений почвенных пор разной формы, размера, ориентации и значения вычисленных метрических характеристик

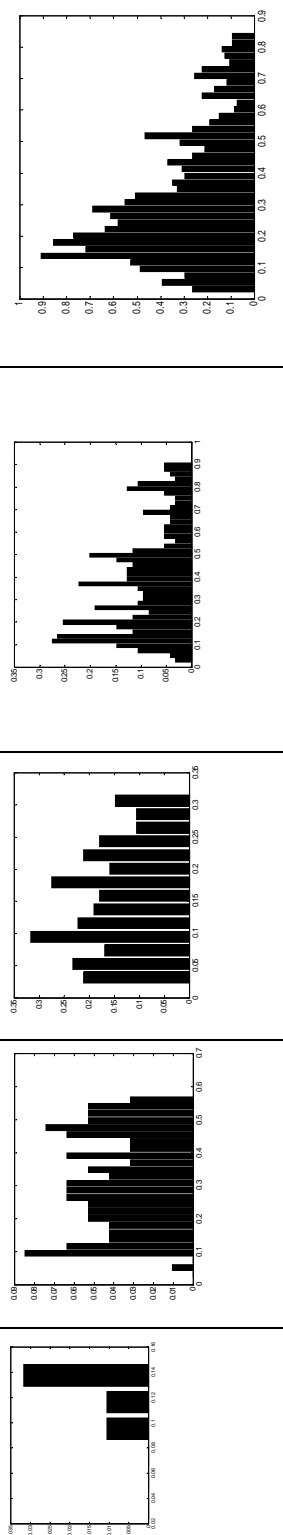
Вариант поры				
1	2	3	4	5
Исходное негативное изображение поры				
				
Контур и остов поры с нанесенными максимальной длиной и шириной (сплошная линия) и осями эллипсоида инерции (пунктир)				
				
100	66	Масштаб представления исходного изображения поры, %		33
		66	66	

Продолжение табл.

1	2	3	4	5
		Площадь поры, мм ²		
0,02	0,34	0,41	1,3	3,65
		Длина периметра, мм		
0,61	2,98	6,34	8,81	27,87
		Длина эллипсоида, мм		
0,19	0,82	1,5	2,24	7,67
		Максимальная длина, мм		
0,19	0,83	1,47	2,26	6,97
		Ширина эллипсоида, мм		
0,15	0,57	0,82	1,15	1,58
		Максимальная ширина, мм		
0,15	0,53	0,44	1,04	0,97
		Ориентация эллипсоида, град.		
-21,77	-40,56	55,99	58,02	-42,74
		Максимальная ориентация, град.		
-30,69	-70,64	49,67	65,95	-43,34
		Длина остова, мм		
0,09	1,61	3,41	5,27	17,14
		Средняя ширина поры, мм		
0,23	0,21	0,12	0,25	0,21
		Глобальный коэффициент извилистости		
0,49	1,94	2,31	2,33	2,46
		Локальный коэффициент извилистости		
1,06	1,07	1,14	1,1	1,11

Примечание. Оси эллипсоида инерции могут выходить за пределы рисунка. Центр масс находится на их пересечении.

Распределение ширины вдоль остова (ось абсцисс – ширина, мм и ось ординат – соответствующая часть длины остова, мм)



наблюдается искажение за счет выделяющегося отростка на общем фоне гладкого контура. Тоже относится и к полученным величинам длины поры. Оба значения мало отличаются друг от друга, что делает равноправными применявшиеся методы.

Вычисление ширины поры приводит к крайне противоположенной ситуации. Только для пор относительно простой формы 1 и 2-го варианта (таблица) получаются близкие результаты. С возрастанием сложности формы поры, измеренные значения сильно отличаются в зависимости от выбранного метода. Эта двойственность не позволяет удовлетворительно охарактеризовать ширину каким-либо одним значением, полученным любым из представленных здесь способов.

Распределение ширины вдоль скелета полнее отображает закономерности изменения линейных размеров пор сложной конфигурации. При этом, чем разветвленнее и извилистее структура поры и больше ее площадь, тем больше диапазон изменения ее ширины и сложнее форма гистограммы. Это особенно наглядно видно на 3–5 вариантах формы пор. Важное свойство полученной гистограммы состоит в том, что результаты, вычисленные для каждой поры, можно суммировать и получать распределение ширины пор для всего почвенного шлифа.

ВЫВОДЫ

Предложенная вычислительная процедура отлажена и реализована в программном коде. Она позволяет в полностью автоматическом режиме независимо от субъективных оценок эксперта с повышенной точностью определять ряд важных метрических признаков почвенных пор. Кроме того, возможно также вычисление топологических признаков объектов. Сравнительный анализ показал преимущества развиваемой методики для пор сложной, извилистой и разветвленной формы.

Эффективность применения описанной модернизированной методики заключается не только в уменьшении ошибок и повышении информативности микроморфометрических характеристик, но и в существенном сокращении времени исследования почвенного образца по сравнению с ручными методами, если принять во внимание тот факт, что в одном почвенном шлифе может находиться

до 500 видимых пор с широким диапазоном метрических размеров самой разнообразной формы и ориентации.

Данная методика не лишена недостатков. К ним можно отнести заниженное значение вычисленной длины скелета по сравнению с длиной реальной поры, определенные погрешности в оценке ширины поры вдоль ее остова и, наконец, сложность процедуры вычисления, которая приводит к увеличению времени расчетов. Ведется дальнейшая работа над совершенствованием программного алгоритма для решения указанных недостатков методами компьютерной геометрии и достижения компромисса в известной компьютерной проблеме «память–время».

В перспективе развитие подобных вычислительных подходов приближает нас к осуществлению достоверной количественной оценке в первую очередь водно-воздушных, а также других свойств почвы только на основе микроморфометрического анализа прозрачных почвенных шлифов. Сочетание вычислительных приемов в микроморфологии с другими методами анализа почв позволяет глубже понять процессы, происходящие в эдафотопе.

Рассмотренные в статье методы определения метрических характеристик практически без изменения можно применить для анализа изображений любых макрообъектов сложной формы выделенных на аэрокосмических снимках.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Балалаев А. К. Опыт применения компьютерных технологий в морфометрических исследованиях почвенных микрошлифов // *Грунтознание*. – 2002. – Т. 2, № 1-2. – С. 88-69.

Белова Н. А., Травлеев А. П. Естественные леса и степные почвы. – Д.: Изд-во ДГУ, 1999. – 348 с.

Воронин А. Д. Структурно-функциональная гидрофизика почв. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 204 с.

Качинский Н. А. Физика почв. – М.: Высш. шк., 1965. – Ч. 1. – 323 с.

Медведев В. В. Оптимизация агрофизических свойств черноземов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 160 с.

Польский М. Н. Об изучении порозности почвенных агрегатов в полированных шлифах // *Почвоведение*. – 1952. – № 4. – С. 351-356.

Препарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. – М.: Мир, 1989. – 478 с.

Претт У. Цифровая обработка изображений. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2. – 480 с.

Роджерс Д., Адамс Дж. Математические основы машинной графики. – М.: Мир, 2001. – 604 с.

Скворцова Е. Б. Морфометрия порового пространства почвы и диагностика почвенной структуры // *Почвоведение*. – 1994. – № 11. – С. 42-49.

Структурно-функциональная роль почв и почвенной биоты в биосфере / Отв. ред. Г. В. Добровольский. – М.: Наука, 2003. – 364 с.

Турсина Т. В., Скворцова Е. Б., Кулинская Е. В., Грачева М. Н. Микроморфометрический анализ пористости почв // *Почвоведение*. – 1985. – № 4. – С. 60-69.

Фридланд В. М. Структура почвенного покрова. – М.: Мысль, 1972. – 422 с.

Gonzalez R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. – Addison-Wesley, 1992. – 518 p.

Handbook for Soil Thin Section Description / P. Bullock, N. Fedoroff, A. Jongerius et al. – Wolverhampton: Waine Research, 1985. – 152 p.

Haralick R. M., Shapiro L. G. *Computer and Robot Vision*. – Addison-Wesley, 1992. – Vol. 1. – P. 158-205.

Ismail S. N. A. Micromorphometric Soil Analysis by Mean of Electrooptical Image Analysis (Quantimet-720) // *Soil Survey Papers*. – 1975. – № 9. – 104 p.

Jain A. *Fundamentals of digital image processing*. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1989. – P. 439.

Lam L., Lee S. W., Suen C. Y. Thinning methodologies – a comprehensive survey // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – Vol. 14, № 9. – P. 869-884.

Lam L., Suen C.Y. An evaluation of parallel thinning algorithms for character recognition // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1995. – Vol. 17, № 9. – P. 914-919.

Pitas I., Venetsanopoulos A. Morphological shape decomposition // IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – PAMI-12, № 1. – 1990. – P. 38-45.

Prots R., Shipitalo M. J., Mermut A. R., Fox C. A. Image analysis of soils-present and future // Geoderma. – 1987. – Vol. 40. – P. 115-125.

Sanniti di Baja G. Well-shaped stable and reversible skeletons from the (3, 4)-distance transform // Journal of Visual Communication and Image Representation. – 1994. – Vol. 5. – P. 107-115.

Serra J., Ley B. Algorithm in mathematical morphology. – Academic Press, 1988.

Надійшла до редколегії 25.09.04