

УДК 004.94

А.Г.Сулова

Донецкий национальный технический университет
кафедра автоматизированных систем управления
E-mail: anyasurova@mail.ru

ПРИМЕНЕНИЕ TIN-МОДЕЛЕЙ В ЗАДАЧЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Аннотация

Сулова А.Г. Применение TIN-моделей в задаче исследования физических параметров породных отвалов. Рассмотрены источники данных и общая методика построения TIN-моделей породных отвалов. Предложена модификация метода построения TIN-моделей, учитывающая особенности породных отвалов. Описана методика вычисления физических параметров отвалов по TIN-модели.

Ключевые слова: TIN-модели, породные отвалы, критерий Делоне, триангуляция.

Общая постановка проблемы. Породные отвалы характеризуются множеством параметров, которые можно разделить на несколько групп: физические, химические, тепловые и экономические. В данной работе будет идти речь о современных методиках исследования физических параметров отвалов.

К таким параметрам относятся:

- площадь (общая площадь, а также площади основания и боковой поверхности отвала)
- угол бокового откоса
- высота
- объем
- форма
- физическая стабильность
- наличие гребней/уступов/террасирования
- оценка растительного покрова (типы растительности и пропорции озеленения)

Вычисление физических параметров отвалов применяется в следующих специфических задачах:

1. При оценке объемов работ по перепрофилированию отвала из конической формы в плоскую.
2. При оценке степени озеленения отвалов и планировании мероприятий по рекультивации.
3. При точной оценке площадей земной поверхности, реально занимаемых под отвальные массивы в задачах землеустройства и кадастра

(особенно в случаях самовольного занятия земель под отвалы), а также исследования влияния отвалов на близлежащие земли для определения их экологического состояния и, как следствие, экономической ценности.

4. При расчете устойчивости отвала и прогнозе возможных деформаций.

5. В задачах эффективного использования отвальной породы в промышленных целях и т.д.

В настоящее время значения физических параметров отвалов определяют на основании анализа их паспортных данных, а также по данным визуального и геотехнического наблюдений. Процесс вычисления параметров отвалов трудоемок и требует значительных затрат времени и денег. Автоматизация процесса исследования физических параметров отвалов позволит существенно снизить эти затраты.

В работе [1] указано, что перспективным направлением в задачах исследования параметров рельефа, частным случаем которого являются породные отвалы, является использования цифровых моделей. Применение таких моделей обладает множеством достоинств: позволяет хранить информацию о физических параметрах отвалов в наиболее полном и целостном виде, эффективно анализировать эту информацию при использовании современных возможностей ЭВМ, при необходимости легко визуализировать ее. В настоящее время существует довольно большое количество мощных ГИС-пакетов, которые хотя и реализуют широкую функциональность по моделированию земных поверхностей, однако не приспособлены для работы с породными отвалами и расчета их параметров. Наиболее популярными среди программных пакетов такого рода являются ArcGIS, MapInfo, модуль AutodeskMap 3D системы AutoCAD и другие.

В данных пакетах построение цифровых моделей производится по регулярной (GRID) либо нерегулярной (TIN) сетке высот. TIN-модели по сравнению с GRID требуют при своем построении и использовании больших вычислительных ресурсов, однако при этом они обладают большей точностью и гибкостью в представлении данных. Это обуславливает применение именно TIN-моделей для исследования породных отвалов.

Целью данной работы является анализ возможностей построения и применения TIN-моделей в задаче исследования физических параметров породных отвалов.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Рассмотреть возможные источники данных для построения TIN-моделей отвалов.

2. Проанализировать методику построения TIN-моделей рельефа.

3. Модифицировать алгоритм построения TIN-моделей с учетом особенностей, которыми обладают породные отвалы.

4. Описать методику исследования физических параметров отвалов по имеющейся TIN-модели.

Исходные данные для построения TIN-моделей отвалов. В качестве исходных данных для построения TIN-моделей отвалов выступает массив точек в пространстве. Источниками таких точек могут выступать результаты полевых измерений и данные дистанционного зондирования (ДДЗ). В последнее время отмечается повышение актуальности использования дистанционно полученных данных за счет роста пространственного разрешения систем сканерной съемки вплоть до десятков сантиметров, а также распространение доступных по цене цифровых фотограмметрических станций, в том числе на платформе персональных компьютеров. [1]

Методика построения TIN-моделей рельефа. При построении TIN-моделей для моделирования рельефа в узлах треугольной сети находятся точки пространства из множества исходных данных. Данные точки соединяются непересекающимися отрезками, образуя треугольники. Совокупность треугольников в триангуляции приближает поверхность моделируемого объекта рельефа без потери точности в исходных точках.

Наиболее распространенным в использовании методом построения TIN является триангуляция Делоне, которая по сравнению с другими методами обладает рядом достоинств, в частности – близостью к равноугольной триангуляции, максимизацией минимального угла (свойство наибольшей невырожденности треугольников) и минимальностью площади образуемой многогранной поверхности [1,2].

Построение триангуляции Делоне базируется на том условии, что окружность, описанная вокруг каждого треугольника из триангуляции, не будет содержать внутри себя других точек. В работе [2] описано несколько вариаций алгоритма триангуляции Делоне, отличающихся сложностью (от $O(N^2)$ до $O(N \log N)$ в худшем случае и от $O(N^2)$ до $O(N)$ в среднем случае).

В общем виде итеративный алгоритм триангуляции на плоскости состоит из следующих этапов:

1. Выбирается начальная структура для триангуляции. Это может быть треугольник на трех точках из исходного множества, специально добавленный внешний треугольник либо суперструктура, содержащая внутри себя все исходные точки. В случае применения внешнего треугольника или суперструктуры добавленные точки и связи с ними удаляются после окончания работы алгоритма триангуляции.

2. В цикле по оставшимся точкам:

2.1. Среди уже сформированных треугольников находится тот, внутрь которого попадает текущая точка. Вмещающий треугольник делится на три новых путем соединения его вершин с текущей точкой.

2.2. Если треугольник не найден, то ищется треугольник на границе триангуляции, ближайший к текущей точке

2.3. Если точка совпадает с уже сохраненным узлом триангуляции, то точка отбрасывается. Иначе – сохраняется в массиве узлов триангуляции.

2.4. Если точка попала на существующее ребро триангуляции, то это ребро разбивается на два новых, а смежные по этому ребру треугольники также образуют по два новых.

2.5. Все новые треугольники и соседние с ними проверяются на соответствие критерию Делоне. Если критерий не выполняется, то предпринимается попытка реберного флипа и повторная проверка. Если флип не помог – треугольник изымается из триангуляции.

В трехмерном случае окружности заменяются на сферы, а треугольники – на тетраэдры. В таком случае проверка критерия Делоне сводится к вычислению попадания точек в трехмерном пространстве внутрь описанной вокруг тетраэдра сферы через формулы (1) и (2).

Пусть $A(xa, ya, za), B(xb, yb, zb), C(xc, yc, zc), D(xd, yd, zd)$ – вершины тетраэдра, а $O(xo, yo, zo)$ – центр описанной вокруг тетраэдра ABCD сферы радиуса R.

Нахождение радиуса описанной сферы:

$$R = \sqrt{(xo - xd)^2 + (yo - yd)^2 + (zo - zd)^2} \quad (1)$$

Нахождение координат центра описанной сферы:

$$xo = \frac{\begin{vmatrix} xd^2 - xa^2 + yd^2 - ya^2 + zd^2 - za^2 & yd - ya & zd - za \\ xd^2 - xb^2 + yd^2 - yb^2 + zd^2 - zb^2 & yd - yb & zd - zb \\ xd^2 - xc^2 + yd^2 - yc^2 + zd^2 - zc^2 & yd - yc & zd - zc \end{vmatrix}}{2 * \begin{vmatrix} xd - xa & yd - ya & zd - za \\ xd - xb & yd - yb & zd - zb \\ xd - xc & yd - yc & zd - zc \end{vmatrix}} \quad (2)$$

$$yo = \frac{\begin{vmatrix} xd - xa & xd^2 - xa^2 + yd^2 - ya^2 + zd^2 - za^2 & zd - za \\ xd - xb & xd^2 - xb^2 + yd^2 - yb^2 + zd^2 - zb^2 & zd - zb \\ xd - xc & xd^2 - xc^2 + yd^2 - yc^2 + zd^2 - zc^2 & zd - zc \end{vmatrix}}{2 * \begin{vmatrix} xd - xa & yd - ya & zd - za \\ xd - xb & yd - yb & zd - zb \\ xd - xc & yd - yc & zd - zc \end{vmatrix}}$$

$$z_0 = \frac{\begin{vmatrix} xd - xa & yd - ya & xd^2 - xa^2 + yd^2 - ya^2 + zd^2 - za^2 \\ xd - xb & yd - yb & xd^2 - xb^2 + yd^2 - yb^2 + zd^2 - zb^2 \\ xd - xc & yd - yc & xd^2 - xc^2 + yd^2 - yc^2 + zd^2 - zc^2 \end{vmatrix}}{2 * \begin{vmatrix} xd - xa & yd - ya & zd - za \\ xd - xb & yd - yb & zd - zb \\ xd - xc & yd - yc & zd - zc \end{vmatrix}}$$

Использование особенностей породных отвалов при построении TIN-моделей. Общая методика построения TIN-модели объекта может быть улучшена за счет учета особенностей породного отвала. Например, может быть применено знание о том, что породный отвал представляет собой выпуклый объект, высота которого растет при мере приближения к центру, что следует из особенностей угла естественной отсыпки породы в отвал. Отсюда очевидно, что точки исходных данных могут быть отсортированы по мере расстояния до границы отвала и в таком порядке внесены в триангуляцию. Данная модификация позволит уменьшить объем вычислений в алгоритме Делоне за счет более эффективного поиска треугольников на 30-40%, а, следовательно, повысить качество построения моделей по критериям времени выполнения и затраченных вычислительных ресурсов.

Методика исследования физических параметров отвалов по TIN-модели.

Форма отвала и наличие гребней/уступов/террасирования указаны в паспорте отвала, потому не требуют вычисления. Прочие физические параметры меняются в течение периода существования отвала, потому ежегодно уточняются и их изменения заново вносятся в паспорт отвала.

Вычисление площади, высоты и объемов по TIN-модели являются довольно тривиальными задачами, решаемыми большинством современных ГИС-пакетов. При вычислении параметров по триангуляционным моделям общая площадь отвала определяется как сумма треугольников площадей внешней поверхности модели, для вычисления площади основания используются только треугольники внешней поверхности, лежащие в высотном диапазоне прилегающей поверхности, а треугольники внешней поверхности вне этого диапазона – для вычисления площади боковой поверхности. Объем отвала вычисляется как сумма объемов тетраэдров триангуляции. Высота отвала определяется как длина перпендикуляра, опущенного из наивысшей по высоте точки модели на ее основание.

Угол бокового откоса поверхности отвала в точке интереса легко вычисляется по углу между плоскостью треугольника на поверхности отвала и плоскостью, параллельной плоскости его основания.

Физическая стабильность отвала и состояние его растительного покрова не могут быть оценены стандартными пакетами, потому требуют более детального рассмотрения.

Для оценки пропорции растительного покрова требуется выполнить наложение текстуры на поверхность модели отвала. В качестве источников текстурных изображений могут выступать данные аэро- и космосъемки.

При наложении текстуры на поверхность TIN-модели растровые текстурные образцы заполняют треугольники на поверхности триангуляционной модели. При этом преобразование координат точек поверхности из (x, y) в (x_T, y_T) представляет собой привязку текстуры к треугольнику по трем опорным точкам:

$$\begin{aligned}x_{Ti} &= Ax_i + By_i + C \\y_{Ti} &= Dx_i + Ey_i + F\end{aligned}\quad (3)$$

где i изменяется от 1 до 3, а коэффициенты A, B, C, D, E, F – константы при пересчете координат всех пикселей для отдельной текстурированной грани модели, вычисляемые на основе решения системы уравнений (3).

После того, как выполнено наложение текстуры на поверхность модели отвала, становится возможным вычисление пропорции озеленения. Для этого производится обработка каждого из текстурированных треугольников модели поверхности отвала и подсчет пикселей, соответствующих по цветовой составляющей диапазону растительности.

Для исследования физической стабильности отвала используется применение метода круглоцилиндрических поверхностей для вычисления коэффициента запаса устойчивости [3].

По описанной методике исследования физических параметров отвалов в среде VisualStudio на языке программирования C# создано программное приложение, являющееся удобным инструментом при решении специфических задач промышленности, экологии, геодезии, землеустройства и кадастра, связанных с породными отвалами.

Выводы. Проведено исследование возможных источников данных для построения TIN-моделей породных отвалов, описана общая методика построения моделей рельефа и ее модификация с учетом особенностей, которыми обладают породные отвалы. Рассмотренная в работе методика исследования физических параметров отвалов по имеющейся TIN-модели реализована в соответствующем программном приложении.

Список литературы:

1. Хромых В.В., Хромых О.В. Цифровые модели рельефа. Учебное пособие. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.
2. Скворцов А.В. Триангуляция Делоне и её применение. – Томск: Изд-во Том.ун-та, 2002. – 128 с.
3. Оценка устойчивости бортов карьеров (разрезов) и отвалов: метод. указания / сост. А.А. Григорьев, Е.В. Горбунова, А.Н. Девяткина. – Владивосток: Изд-во ДВГУ, 2009. – 37 с.