
УДК 528.9:681.3

ББК 26.17

В 18

Т.П. Варшанина, О.А. Плисенко,

С.Ф. Пикин, И.В. Стародуб

Объектно-ориентированная цифровая модель рельефа

(Рецензирована)

Аннотация:

Предлагается физико-математическая цифровая модель, описывающая реальную земную поверхность, обеспечивающая дискретное и континуальное представление и анализ рельефа и динамическое моделирование в трехмерном геоинформационном пространстве. Физико-математическая модель рельефа создается в результате интеграции двух моделей: векторного дискретно-континуального представления поверхности рельефа на основе метода «сферической квадроангуляции» и растровой физической модели гравитационного переноса.

Ключевые слова:

Цифровая модель рельефа, метод «сферической квадроангуляции», модель гравитационного переноса, цифровая модель местности

Эффективность аналитической обработки данных в географических информационных системах в значительной степени зависит от возможностей, обеспечиваемых цифровой моделью рельефа. На данный момент в современных ГИС пакетах используются несколько типов ЦМР в зависимости от формы представления данных: с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных и гексагональных сетках; с нерегулярным представлением точек; с изолинейным (уровненным) заданием точек, расположенных равномерно на изолиниях, либо с учетом их кривизны. Для построения трехмерных моделей рельефа используются такие методы как интерполяция на основе триангуляции Делоне, кригинг, минимальной кривизны, ближайшего окружения, регрессии, сферических сплайнов, Шепарда и т.д.

Наиболее распространенным векторным методом интерполяции рельефа является триангуляция Делоне, при применении которой к реальным данным часто возникают различные виды артефактов. Вычисление геоморфологических характеристик поверхности, представленной триангуляцией Делоне, затруднено из-за невозможности получения производных различных порядков. Триангуляция Делоне не обеспечивает также выделение конкретных форм земной поверхности характеризующихся

комплексом геоморфологических параметров. Другие перечисленные методы не обладают недостатками триангуляции Делоне, однако представляют только континуальные свойства рельефа.

Кроме этого, при восстановлении поля высот в современных ГИС пакетах, используются формальные математические методы, не учитывающие физическую природу рельефообразующих процессов. Большинство исследований по визуализации рельефа направлено на решение этой проблемы, а также на увеличение скорости пространственной обработки данных. Современные исследования в данной области развиваются с использованием перечисленных распространенных моделей ЦМР (John P. Wilson, H. Mitasova, D. J. Wright, 2000; M. Garland, P.S. Heckbert, 1995; H. Mitasova, J. Hofierka, 1993; M. McAllister, 1999; А.В. Поздняков, И.Г. Черванев, 1990; Б.А. Новаковский, С.В. Прасолов, А.И. Прасолова, 2003 и многие др.).

Следует подчеркнуть, что все перечисленные методы обладают одним и тем же главным недостатком – они не выделяют естественные объекты земной поверхности. Выделение форм земной поверхности различного типа и уровня иерархии на основе комплекса показателей на таких моделях также невозможно.

Мощной цифровой основой для комплексирования и интегрирования тематической ин-

формации территории, разработки математических моделей процессов в географическом пространстве служит создаваемая в ГИС-центре Адыгейского госуниверситета физико-математическая модель, описывающая реальную земную поверхность, обеспечивающая дискретное и континуальное представление и анализ рельефа и динамическое моделирование в трехмерном геоинформационном пространстве.

Создаваемая на этой базе цифровая модель местности выступает в качестве универсальной информационно-математической основы, предоставляющей новые возможности структурирования, совмещенного анализа различных данных и моделирования процессов в географическом пространстве.

Физико-математическая модель рельефа создается в результате интеграции двух инновационных моделей, разрабатываемых впервые: 1) векторного дискретно-континуального представления поверхности рельефа на основе метода «сферической квадрангуляции» (Плисенко, 2004, 2005); 2) растровой физической модели гравитационного переноса (Пикин, 2005).

Метод «сферической квадрангуляции» позволяет создавать математическое описание рельефа наиболее приближенное к реальной действительности и идентифицировать известные типы поверхностей и структурных линий. Базовой единицей описания является математическая модель элементарной поверхности, выделяемая по геоморфологическим параметрам, являющимся непосредственными геометрическими характеристиками криволинейных объектов. В пределах элементарных поверхностей в заданных интервалах неизменны крутизна, экспозиция, протяженность, форма склонов, – морфологические характеристики, обуславливающие процессы перемещения литогенного вещества, водных, воздушных масс и перераспределение климатических величин. Для выделения элементарных поверхностей используются четыре основных геоморфологических параметра: абсолютная высота (глубина) ЗП, рассматриваемая в виде непрерывной функции плановых координат: $H=H(x,y)$; первая производная от данной функции $H'(x,y)$, по экстремальным значениям модуля которой трассируются линии максимальных и минимальных уклонов; нормальная кривизна земной поверхности, т.е. $H''(x,y)$; горизонтальная кривизна зем-

ной поверхности [10]. Перечисленные параметры применяются для описания математической модели рельефа и создания элементарного геометрического объекта, используемого при построении модели земной поверхности в трехмерном пространстве. Границы элементарных поверхностей определяют структурные кривые, соответствующие структурным линиям рельефа. Характеристики структурных линий используются для классификации поверхности рельефа по профилю. Элементарные поверхности генерируют иерархию поверхностей более высоких уровней, из которых конструируется трехмерная модель рельефа. Построенная таким образом поверхность представляет собой нерегулярную сетку, узлы которой соответствуют характеристическим точкам, определяющим границы элементарных поверхностей, соответствующих структурным линиям рельефа. Для построения трехмерного изображения рельефа используется локальная интерполяция NURBS кривыми, обеспечивающая возможности: 1) построения и редактирования поверхности на локальном уровне; 2) применения рекурсивного алгоритма построения, не требующего больших вычислительных ресурсов; 3) управляемой интерполяции.

Для трехмерных кривых выбрана модель NURBS кривых (неоднородный рациональный фундаментальный сплайн). Рациональная параметрическая кривая на основе B-сплайнов $N_{i,m}(t)$, построенная по вершинам $p_i (i=1,2,\dots, n, n \geq m)$ с весами w_i , может быть описана в каждой своей точке единственным образом с помощью радиус – вектора

$$r(t) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,m}(t)w_i p_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,m}(t)w_i}, \text{ где } t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$$

NURBS – кривые обладают рядом особенностей, которые позволяют широко использовать их в компьютерном моделировании трехмерных кривых. NURBS – кривая обладает достаточной гибкостью. Ее можно легко редактировать путем изменения положения вершин. Совокупность B-сплайнов порядка m представляет собой базу, на основе которой можно построить интерполяционные кривые. Кроме того, NURBS кривая второго порядка совпадает со своей характеристической линией, т.е. первоначальным представлением кривой (рис.1).

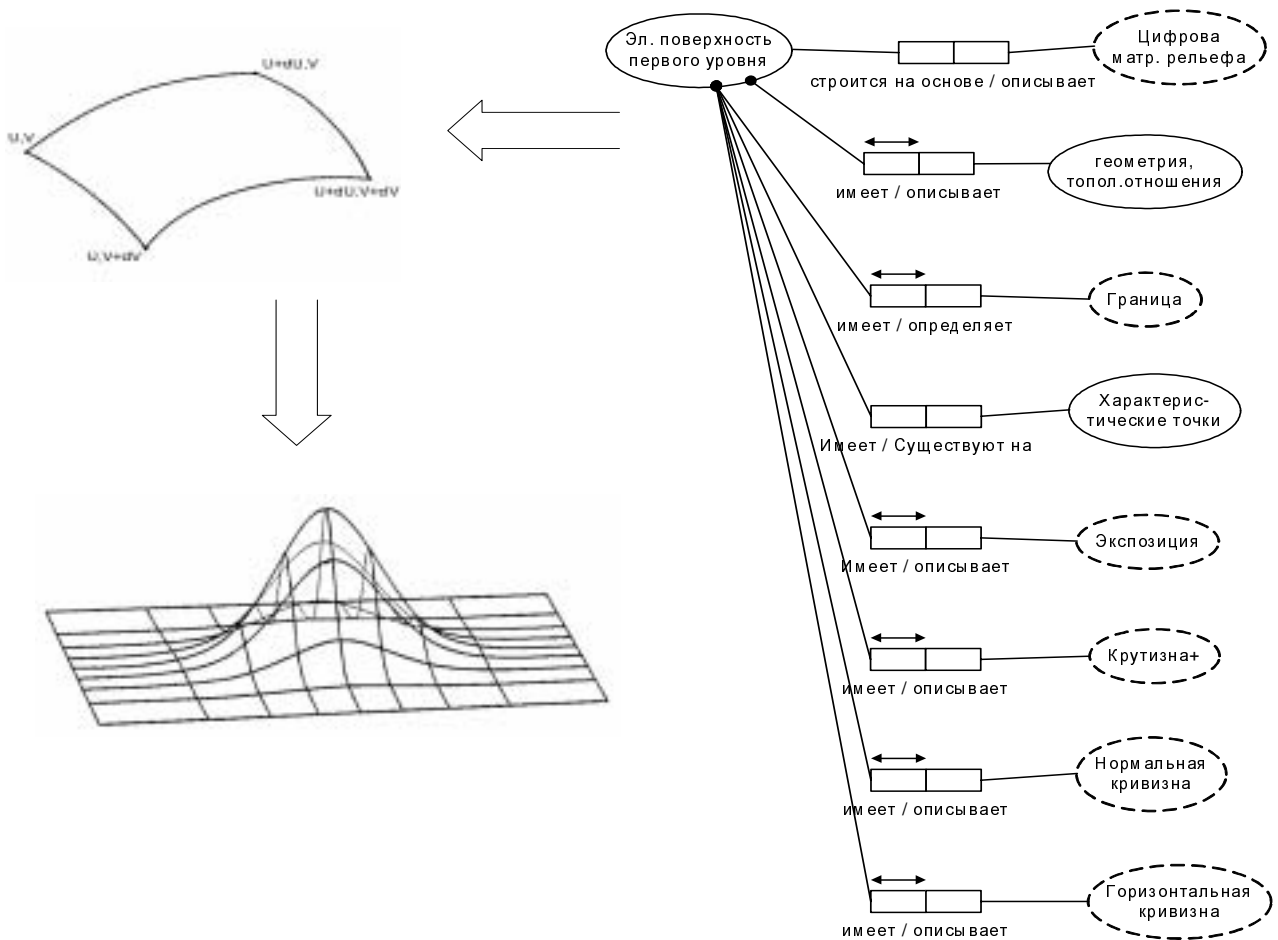


Рис. 1. Объект «элементарная топографическая поверхность»

Свойства линейных элементов / структурных линий и их взаимодействие с другими элементами рельефа определяются свойствами прилегающих элементарных поверхностей. Необходимые морфометрические характеристики вычисляются с помощью первой и второй квадратичных форм поверхности, что не требует большого количества вычислений при использовании рекуррентных соотношений для радиус-вектора поверхности.

При проектировании класса элементарной поверхности определяются свойства и методы взаимодействия данного объекта с другими объектами системы. На этом уровне геометрическая и геоморфологическая концепции элементарной поверхности дополняются концепцией интеллектуального объекта. В рамках этой концепции для реализации механизма наследования планируется применение математической модели динамического нейрона, которая позволяет реализовать сразу несколько математических операций для решения различных картографических и геоинформационных

задач в рамках этой модели. Такая модель позволяет динамически определять свойства объектов-наследников в зависимости от различных форм поверхностей рельефа. На основе нейронов строится нейронная сеть с различными свойствами, обеспечивающая построение экспертного классификатора иерархии объектов поверхности рельефа.

Разрабатываемая ЦМР не только представляет иерархию естественных объектов поверхности рельефа, но и позволяет получать производные морфометрические или иные данные, включая вычисление углов наклона и экспозиции склонов; анализ видимости/невидимости; построение трехмерных изображений; профилей поперечного сечения; оценку формы склонов через кривизну их поперечного и продольного сечения, измеряемую радиусом кривизны главного нормального сечения или ее знаком, т.е. выпуклостью/вогнутостью; вычисление положительных и отрицательных объемов; генерацию линий сети тальвегов и водоразделов, образующих каркасную сеть рельефа, его

структурных линий, и иных особых точек и линий рельефа: локальных минимумов, или впадин и локальных максимумов, или вершин, седловин, бровок, линий обрывов и иных нарушений «гладкости» поверхности, плоских поверхностей с нулевой крутизной; интерполяцию высот; автоматизацию аналитической отмывки рельефа путем расчета относительных освещенностей склонов при вертикальном, боковом или комбинированном освещении от одного или более источника.

Предлагаемая объектная модель векторно-дискретно-континуального представления рельефа обеспечивает соответствие с одной стороны между элементами и формами, выделяемыми морфологически, с другой стороны между структурно-содержательной организацией, генезисом, возрастом рельефа, характером динамики современных рельефообразующих процессов, дает возможность построения моделей развития рельефа.

Структурная килевая линия водосборного бассейна совпадает с положением естественно-водотока, так что элементарный класс гидрологической сети – естественный водоток связан с классом элементарный бассейн. Эта связь представляет зависимость «один-к-одному», иллюстрирующую соответствие каждому естественному водотоку элементарного бассейна.

Класс представляющий объект «речная сеть» содержит коллекцию объектов «река». Объект «речная сеть» имеет разветвленную древовидную структуру, характеризующуюся множеством узлов, происходящих от начального узла. При формировании иерархии объектов речной сети высокого порядка применяется рекурсивный принцип организации структуры данных. К преимуществам рекурсивной структуры данных относятся:

- способность изменять размер, в связи с чем, появляется возможность вводить потенциально бесконечные и циклические структуры данных, указывать принадлежность некоторой подструктуры нескольким разным структурам;
- наличие эффективных алгоритмов обработки, называемых алгоритмами прохождения.

Так как, каждый объект «естественный водоток» связан с элементарным бассейном (имеет ссылку на объект «элементарный бассейн»), то на базе объекта «река» строится класс «бассейн реки», который также представляет древо-

видную структуру с узлами, соответствующими бассейнам притоков. Такая модель данных позволяет определять модели взаимосвязей между водотоками и физико-географическими характеристиками их бассейнов и хранить / вычислять морфометрические параметры речной сети и ее бассейна.

В структуре классов, описывающей гидрологическую сеть, определяется класс объектов «гидрологический пост». Эти объекты содержат сведения по данным гидрологического наблюдения и поскольку эти объекты привязаны к объекту «естественный водоток», то, используя древовидную модель реки и алгоритмы обхода, можно выполнить перерасчет гидрологических параметров для любой точки гидрологической сети.

Так как базовым свойством модели является органичное единство моделей рельефа и гидрографической сети, то обеспечивается высокий уровень детальности и точности ландшафтно-гидрологического анализа и перерасчета параметров стока. Классификация поверхностей рельефа и его структурных линий по природно-экологическим свойствам (Ласточкин, 2003) позволяет выполнить детальное районирование территории по экологическим особенностям рельефа, строить адекватные математические модели перераспределения в рельефе природных и антропогенных вещественно-энергетических потоков.

Метод сферической квадратоангуляции позволяет:

- автоматизировано типизировать структурные линии рельефа;
- разработать математическую модель поверхности каждого конкретного элементарного объекта рельефа по комплексу показателей;
- определять параметрические характеристики взаимосвязей элементарных объектов поверхности;
- определять параметрические характеристики взаимосвязей иерархии элементарных поверхностей и гидрологической сети, геоконпонентов, ландшафтов;
- обеспечить детальный морфодинамический анализ;
- поддерживать дискретное и континуальное представление рельефа.

Классы линейных и точечных элементов, полученные методом «сферической квадратоан-

гуляции», представляют собой структурный каркас рельефа и являются базой для построения гравитационно-динамической модели рельефа – растровой физической модели гравитационного переноса (Пикин, 2005). При построении модели каркас рельефа воспроизводится точно, что гарантирует совпадение модели с гидрографической сетью и контрольными отметками высот.

С физической точки зрения процесс гравитационного переноса, наряду с теплопроводностью и диффузией, может быть отнесен к процессам градиентного переноса, которые подчиняются уравнению:

$$\frac{\partial \Psi}{\partial t} = \sum_n \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D \frac{\partial \Psi}{\partial x_i} \right),$$

где Ψ – переносимая величина,

$D = D(x_1, \dots, x_n)$ – коэффициент переноса

Ψ в данной точке пространства.

Для модели гравитационного переноса в поверхностном слое земной коры Ψ имеет смысл плотности потенциальной энергии, а D – характеристика, описывающая подвижность в слое гипергенеза. В частности, на скалистых участках коэффициент переноса – существенно меньше, чем на песчаных осыпях, а в лесу меньше чем на безлесных участках. В применении к построению гравитационно-динамической модели по данным топографических карт, элементы, прямо или косвенно содержащие информацию о высотах местности могут быть интерпретированы как источники потенциальной энергии. Элементы же, содержащие информацию о свойствах рельефа определяют значение коэффициента переноса.

Для численного моделирования процесса гравитационного переноса используется GRID модель с регулярной структурой, в которой размер ячейки настолько мал, что все параметры рельефа внутри неё можно считать постоянными. На практике размер ячейки выбирается порядка величины погрешности исходных материалов, так как большая точность не имеет смысла, а увеличение размера ячеек приводит к потере информации.

Гравитационно-динамическая цифровая модель рельефа позволяет учесть не только геометрическую составляющую данных о рельефе, но и его свойства в каждой точке про-

странства. Более того, её применение дает возможность проследить изменение поверхности рельефа с течением времени.

Разработанная физическая модель адекватно описывает процесс формирования рельефа земной поверхности в гравитационном поле Земли, что позволяет вывести модель рельефа на качественно новый уровень устойчивой динамической системы. Модель гравитационного переноса вещества в поверхностном слое земной коры позволяет учесть степень текучести геологического субстрата в каждой точке пространства. Предлагаемая модель может использоваться как для получения статической модели земной поверхности, так и для моделирования различных экзогенных процессов. Модель корректно отображает линии разрывов - знаки обрывов, осыпей, знаки насыпей и выемок искусственного происхождения, которые передаются изменениями в текучести геологического субстрата (рис. 2).

Модуль гравитационно-динамического представления рельефа предназначен для моделирования переноса вещества и энергии не только в геодинамическом слое земной коры, но и в гидросфере и атмосфере. На его основе корректно строятся речные долины и ареалы затопления в период паводков, обеспечиваются возможности моделирования оползневых, селевых процессов и т.д.

Для построения интегрированной физико-математической модели рельефа в качестве исходных данных используются электронные топографические карты.

Выбор именно этих источников данных определяется тем, что:

- 1) топографические карты являются наиболее доступными с точки зрения цены;
- 2) в составлении топографических карт принимает участие эксперт, который проводит первичную генерализацию – выделяет основные черты рельефа в масштабе карты, делая их более характерными для данного типа рельефа;
- 3) накоплен достаточно большой фонд топографических карт созданных на длительном временном периоде, что позволяет создавать исторический рельеф, а также отслеживать динамику развития форм и типов рельефа.



Рис. 2. Пример визуализации рельефа средствами гравитационно-динамической ЦМР с натянутой топографической картой. Масштаб 1:25000

Описанная ЦМР является базовой основой для построения цифровой модели местности обладающей свойствами накопления информации и возможности использования накопленной информации для изменения своих возможностей и адаптации к изменениям, т.е. ресурсностью и интеллектуальностью.

Оригинальная интегрированная физико-математическая модель построения и обработки ЦМР позволяет воссоздать цифровую модель местности нового поколения, обеспечивающую наряду со стандартными возможностями ГИС-анализа:

- автоматизированное выделение комплекса объектов поверхностей и структурных линий рельефа с принадлежащим им параметрическим описанием, например, формирующих выпуклые, вогнутые и замкнутые контуры, перегибы контура и пр., определяющих особенности массо-энергопереноса.

- Построение детальных параметрических моделей природно-антропогенных процессов и природно-экологического фона в трехмерном геопространстве.

- Геоинформационное моделирование опасных процессов: оползней, лавин, селей, паводков.

- Адекватное решение инженерных расчетных задач на местности средствами геоинформатики.

- Создание геоинформационных моделей реальных береговых, гидро-, морфодинамических процессов и т.д. для лабораторных исследований.

- Локальную актуализацию цифровых моделей рельефа и гидросети по данным ДЦЗ.

- новый уровень ландшафтно-гидрологического анализа;

- автоматизированный анализ морфологии ландшафтов;

- автоматизированный параметрический анализ взаимосвязи и взаимодействия иерархии пространственных единиц геокомпонентов и геокомплексов и т.д.

Цифровая модель местности, созданная на основе объектно-ориентированной физико-математической ЦМР, с точки зрения ее физической структуры является рациональной, т.к.

один раз рассчитанная она хранится в виде объектов базы данных и без выполнения больших вычислительных запросов может предоставлять большой объем аналитической информации. Модель отрабатывается на платформе Oracle, включающей специальный модуль для работы с геометрическими объектами Spatial.