

ЦИФРОВАЯ МОДЕЛЬ РЕЛЬЕФА УКРАИНЫ МАСШТАБА 1 : 200 000, МЕТОДИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ

Межведомственным центром электронного картографирования МЧС и ГУГКиК Украины по материалам цифровых карт в полном соответствии с идеологией геоинформационных систем создана электронная карта Украины масштаба 1 : 200 000, как картографическая основа для создания геоинформационных систем государственного и ведомственного уровней.

Для решения задач моделирования экологически опасных явления и процессов, прогнозирования чрезвычайных ситуаций и их последствий на основе ГИС-технологий представление рельефа в классическом варианте - в виде горизонталей, создает значительные технологические ограничения, что определило необходимость создания цифровой модели рельефа Украины, как обязательного приложения к электронной карте.

На этапе постановки задачи необходимо решить ряд концептуальных вопросов и в первую очередь определиться с базовыми понятиями «цифровая модель рельефа» и собственно «рельеф».

На топографических картах рельеф изображается дискретными элементами: горизонталями, бергштрихами, точками с цифрами, указывающими высоты характерных точек местности, отмывкой и условными знаками отдельных элементов и форм рельефа, хотя земная поверхность представляет непрерывное явление, а не некоторую совокупность дискретных объектов. Таким образом, классическая топографическая карта, в условиях физических ограничений картографического представления описывает рельеф, как некоторую поверхность.

Рельеф, как объект исследований, является предметом геоморфологии. Классическое определение рельефа, как совокупности неровностей земной поверхности, содержит в себе скрытое противоречие, которое нашло выражение в появлении двух конкурирующих геоморфологических концепций – концепции «овеществления» рельефа и концепции «геометризации» рельефа [1]. В первом случае рельеф – это массы горных пород занимающих объемы форм земной поверхности. Такое толкование связано с тем, что геоморфологов в первую очередь интересует генетические аспекты развития рельефа, включая рельефообразующие процессы, этапы формирования и возраст рельефа. Концепция «геометризации» рассматривает рельеф как структуру поверхности раздела сред – атмосферы, поверхностной гидросферы и литосферы. Как всякая поверхность она материальна, но не вещественна. Не вдаваясь в обсуждение недостатков и преимуществ обеих геоморфологических концепций, отметим, что понятие рельефа, как структуры

поверхности раздела сред, более конструктивно. На основе этой концепции может быть сформировано достаточно строгое описание рельефа. Основными элементами такого описания рельефа являются его структурные элементы. Структурные элементы рельефа – характерные точки, структурные линии (килевые, гребневые, линии перегибов), элементарные поверхности. Их полная систематика дана в работах А. Н. Ласточкина [2], которые по праву могут быть названы классическими. Моделирование рельефа на основе системы структурных элементов позволяет сформировать достаточно точное описание, как пространственного положения земной поверхности (поверхности раздела сред) с учетом ее непрерывности, так и структуры этой поверхности. Такое описание может быть произведено на основе формальных процедур, что позволяет получать однозначные и воспроизводимые результаты.

Как известно, модель некоторого объекта должна достаточно адекватно отражать его наиболее существенные характеристики и свойства. Модель рельефа, как структура поверхности раздела сред, должна адекватно отражать пространственное положение земной поверхности с учетом ее непрерывности и ее структуру. Таким образом, точность создаваемых моделей рельефа должна оцениваться по двум критериям. С одной стороны, это погрешность между модельными и реальными значениями высот рельефа (точность пространственного положения земной поверхности), а с другой – соответствие между реальными и модельными структурными элементами рельефа – топологическая корректность модели. Следует отметить, что соотношение между структурными элементами рельефа и высотой земной поверхности представляет собой яркий пример неустойчивости – незначительные изменения высотных отметок могут приводить к принципиальным изменениям структуры земной поверхности.

Следовательно, модель рельефа – это, прежде всего, описание пространственного положения и структуры земной поверхности как непрерывного явления, которое должно отвечать требованиям однозначности и воспроизводимости такого описания, быть независимым от профессиональных установок исследователя, обеспечивать возможность изучения внутренних закономерностей, свойств и связей, на основе которых могут быть созданы динамические, генетические, ретроспективные интерпретации. Следует особо отметить, что модель рельефа должна отражать такое фундаментальное свойство рельефа, как непрерывность земной поверхности. Если рельеф описывается некоторой совокупностью дискретных элементов, то шаг такого описания должен позволять на основании простых процедур, например, линейной интерполяции, определять характеристики в любой промежуточной точке. Это требование предполагает, что шаг дискретного описания много меньше размеров минимальной грани рельефа первого порядка описываемого данной моделью.

На основании вышеизложенного можно сформулировать три основных требования (критерия) описания (моделирования) рельефа, которое с определенной точностью должно отражать:

- пространственное положение (высоту) земной поверхности;
- структуру земной поверхности;
- непрерывность земной поверхности.

Исходя из сформулированных выше требований, определим понятие ЦМР: цифровая модель рельефа – это цифровое представление земной поверхности, с заданной точностью описывающее пространственное положение (высоту) и структуру земной поверхности, как непрерывного явления.

В англоязычной литературе используется специальный термин digital elevation model (DEM), который дословно переводится как цифровая модель относительных высот земной поверхности, что достаточно точно определяет суть используемого способа представления моделируемого объекта. В отечественной практике последнего времени понятие DEM полностью отождествляется с понятием *цифровая модель рельефа*, под которым обычно понимается регулярная сеть данных высотных отметок, однако правомерность такого отождествления вызывает ряд существенных замечаний.

Исходя из нашей трактовки понятия «цифровая модель рельефа», регулярную сеть данных высотных значений земной поверхности, сформированную только по критерию определенной точности высот, следует определять как *цифровую модель земной поверхности*, которая полностью соответствует понятию DEM. В этом смысле любая цифровая модель рельефа является цифровой моделью земной поверхности, но не всякая цифровая модель земной поверхности, или DEM, может быть названа цифровой моделью рельефа, так как в таком случае цифровая модель может неадекватно отражать структуру земной поверхности или собственно рельеф. Причем это не просто терминологические нюансы, на практике это приводит к тому, что цифровые представления земной поверхности, созданные только по критерию точности высотных отметок, не позволяют моделировать флювиальные свойства рельефа (систему поверхностного стока, иерархию водосборных бассейнов, эрозионную сеть и др.). А это существенным образом ограничивает возможности таких моделей для решения практических задач, в которых присутствует фактор рельефа. Следует добавить, что в англоязычной литературе, если DEM отражает флювиальные свойства рельефа, то в этом случае часто применяются специальные термины – Surface Hydrology (гидрологическая поверхность), hydrologically correct DEM (гидрологически корректный DEM).

В настоящее время в геоинформационных системах используется три способа цифрового представления (описания) рельефа. Первый способ, унаследованный от классической топографии, – представление горизонталей рельефа в виде векторных линий, второй – в виде регулярной матрицы высот земной поверхности и третий – в виде нерегулярной тиновской модели (TIN), включающей некоторую совокупность

точек высотных отметок, по которым проведена триангуляция с учетом линий разрыва непрерывности. Иногда любое из этих представлений рассматривается как цифровая модель рельефа, что получило отражение в Толковом мини-словаре основных терминов по геоинформатике Кошкарева А.В.[3] , где отмечено, что цифровая модель рельефа, ЦМР – (digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM) – средство цифрового представления 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в векторном и растровом форматах в виде совокупности высотных отметок (отметок глубин) и иными значениями аппликат (координаты Z) в узлах регулярной сети, нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний (contours), служит для обработки и получения производных данных, включая вычисление углов наклона и экспозиций склонов, анализа (выделения зон).

Традиционное представление рельефа в «формате» топографической карты в виде горизонталей, высотных точек, отдельных элементов рельефа и, отчасти, речной сети, как некоторой совокупности дискретных элементами, в силу известных ограничений топографического формата не отражает такое фундаментального свойства земной поверхности как непрерывность, хотя и подразумевает его. Отсутствие корректных процедур восстановления непрерывной поверхности земли исключает топографический «формат» из способов представления цифровых моделей рельефа. Таким образом, при создании цифровых моделей рельефа могут быть использованы только цифровые представления рельефа в виде нерегулярных тиновских моделей, либо в виде регулярных массивов данных (GRID), традиционно используемых в геоинформатике.

Цифровые модели рельефа могут содержать описание структурных элементов рельефа в явном или неявном виде, в первом случае они относятся к классу структурных или структурно-цифровых [4]. Этот подход строится на представлении об особых точках и структурных линиях рельефа, положение которых детерминировано структурой рельефа, и возможности игнорировать все другие точки как малоинформативные. Таким образом, в соответствии с этим подходом для правильного воспроизведения характера и облика рельефа необходимо и достаточно правильно описать его каркас с помощью структурных элементов. Создание структурных моделей рельефа требует определенного знания о структуре рельефа. На наш взгляд, именно структурные модели наиболее перспективны и за ними будущее. Однако, если технологии преобразования исходных данных по высотным отметкам рельефа в регулярные матрицы высот в определенной мере отработаны, то задача выделения структурных элементов рельефа является не тривиальной задачей. До настоящего времени она решается либо на основе «ручных» технологий, либо в автоматизированном режиме на основе топологически корректных регулярных цифровых моделей рельефа. Таким образом, на первом этапе целесообразно строить технологию создания цифровых моделей рельефа на основе регулярных матриц (сеток) высотных отметок.

Постановка задачи по созданию цифровой модели рельефа осуществлялась в соответствии с принятым определением цифровой модели рельефа, как цифрового представление земной поверхности, с заданной точностью описывающее пространственное положение (высоту) и структуру земной поверхности как непрерывного явления.

- цифровая модель рельефа создается на основе данных электронной карты;
- цифровая модель рельефа должна быть создана в виде регулярной матрицы высотных отметок в формате GRID ARC/INFO;
- критерием точности ЦМР является точность карты соответствующего масштаба;
- погрешность планового положения горизонталей, сгенерированных по цифровой модели рельефа относительно исходных, не должна превышать размер ячейки регулярной сетки (грида);
- эрозионная сеть (сеть тальвегов долин), сгенерированная по ЦМР, должна топологически соответствовать эрозионно-гидрографической сети исходной карты;
- разрешающая способность грида (размер ячейки) должна соответствовать двойной точности картографического материала (0,2 мм на карте масштаба 1: 200 000 – 40 м);
- цифровая модель рельефа должна представлять собой единый непрерывный массив данных в стандартной географической проекции.

Исходные данные для создания цифровых моделей рельефа на территорию Украины на основе слоев электронной карты масштаба 1 : 200 000, созданной Межведомственным центром электронного картографирования (МЦЭК), при этом использованы:

- слой горизонталей,
- слой высотных отметок,
- слой речной сети,
- слой высотных урезов воды,
- слой водоемов.

Информационная структура электронных картографических слоев сформирована в соответствии с Нормативами по созданию ЭКМ масштаба 1 : 1 000 000, 1 : 500 000, 1 : 200 000, принятым Министерством Украины по вопросам чрезвычайных ситуаций и Главным управлением геодезии, картографии и кадастра при Кабинете Министров Украины в 1998 г.

Инструментальными средствами для создания цифровых моделей рельефа являются стандартные средства ArcInfo, где имеется специальный модуль для создания гидрологически корректных моделей – TOPOGRID. Однако, как показал опыт работы, результаты, полученные при использовании этого модуля на основе исходных данных электронных карт масштаба 1 : 500 000 – 1 : 50 000, не удовлетворяют критериям принятым при постановке задачи. Наиболее сложная проблема, возникающая при расчете цифровых моделей рельефа с применением

стандартных методов интерполяции – появление многочисленных “паразитных” локальных понижений (синков). Их количество достигает нескольких тысяч на один лист стандартной карты. Естественно, что ни о какой топологической корректности в этом случае речь идти не может. Использование стандартных приемов “борьбы” с синками в виде их заливки до минимальной высоты в ограничивающем синк водоразделе приводит к возникновению большого количества плоских участков значительной площади, что зачастую превращает речную долину в каскад плоских ступеней.

Следует отметить принципиальную ограниченность подхода, предлагаемого ArcInfo, для решения подобных задач, который заключается в методологически неверной установке – создать “плохой” DEM, а затем, при помощи некоторых процедур сделать его “хорошим”. Хотя нам и пришлось следовать в рамках такого подхода, этот недостаток, в определенной мере, компенсировался возможностями, предлагаемыми средой ArcInfo, где была разработана и реализована на языке AML технология создания корректных цифровых моделей рельефа.

Основные технологические этапы создания цифровых моделей рельефа включают:

Выделение расчетных участков. Для расчета цифровой модели рельефа было проведено районирование территории Украины с целью выделения водосборных и субводосборных бассейнов по площади приблизительно соответствующей площади 1–3 топографическим листам двухсоттысячного масштаба для определения расчетных участков. Бассейновое районирование проводилось по Цифровой модели рельефа Украины масштаба 1 : 500 000 созданной нами ранее. Бассейновый подход использовался с целью оптимизации процедуры последующей “сшивки” отдельных расчетных участков в единый проект и устранения “скачков” высотных отметок на их границах и в тальвегах речных долин. Затем из электронной карты в пределах расчетных полигонов “вырезались” горизонталы, точки высотных отметок, речная сеть, полигоны водоемов.

Редактирование речной сети. Технология, разработанная для создания цифровых моделей рельефа, предъявляет достаточно жесткие требования к топологической корректности исходных данных. При создании электронной карты и цифровой модели рельефа, данные по слоям горизонталей и гидрографической сети, полученные на основе ранней оцифровки, на основе дигитайзерной технологии, хотя по точности соответствовали требованиям к цифровым материалам, потребовали существенного редактирования и взаимного согласования.

Для этого были подготовлены специальные инструменты, которые в автоматическом режиме проверяли топологическую корректность рельефа и гидрографической сети, выявляя элементы гидрографической сети, которые пересекают горизонталь более одного раза, касаются горизонталей или

расположены на склоне долины. В местах возможных ошибок ставились метки, по которым операторами проводилась проверка и при необходимости редактирование и исправление ошибок.

Для проведения этой операции проводился расчет промежуточной цифровой модели рельефа без учета гидрографической сети. Для этого была разработана технология расчета высотных отметок рельефа методом обратных расстояний. Первоначально по слою горизонталей определялись зоны, ограниченные горизонталями, в том числе, дополнительными, не образующими полигональную топологию, определялся тип зоны (склон, минимум, максимум, локальный максимум в минимуме или локальный минимум в максимуме), максимальные и минимальные высоты в зонах. Эти данные в дальнейшем использовались в качестве граничных условий (максимально и минимально возможных) по значениям высот. По промежуточным цифровым моделям рельефа автоматически строилась сеть килевых линий (талвегов долин). На основании этих данных выделялись зоны возможного (топологически корректного) положения элементов гидрографической сети относительно, которые использовались при проверке топологической непротиворечивости гидрографической сети и рельефа.

Построение эрозионной сети. На следующем этапе строилась эрозионная сеть на территорию расчетного участка. Следует отметить, что электронная карта содержит отдельные линейные или площадные элементы гидрографии, для построения единой эрозионной сети объединялись линейные гидрографические элементы, скелетные линии площадных элементов (проточных водоемов и рек), тальвеги сухих долин. Эта задача решалась автоматически с использованием промежуточной цифровой модели рельефа, после построения эрозионной сети в автоматическом режиме проводилось ориентирование ее векторных элементов по направлению стока.

Расчет значений высот вдоль структурных линий. После построения эрозионной сети проводился расчет значений высот вдоль структурных линий по тальвегам долин, для последующего использования полученных результатов как входных данных в расчетах ЦМР. Следует отметить, что данный прием значительно повышает корректность получаемых результатов, поскольку точки, лежащие на структурной линии, весьма значимы, а количество данных, характеризующих зрелую речную долину на топографической карте, крайне мало.

Расчет регулярной матрицы высот. Расчет регулярной матрицы высот проводился с использованием модуля TOPOGRID. В качестве входной информации использовались горизонталы, высотные отметки, эрозионная сеть, высотные отметки вдоль линии эрозионной сети, высотные отметки смежных расчетных участков, по которым уже был проведен расчет цифровых моделей. После расчета проводилась корректировка полученной цифровой модели по граничным условиям возможных значений высот и «заливка» оставшихся синков.

Контроль результатов. Контроль полученных результатов проводился на основе сравнения исходных горизонталей электронной карты и горизонталей, сгенерированных по цифровой модели рельефа, а также контроля корректности эрозионной сети построенной по рассчитанной модели рельефа. В случае получения неудовлетворительных результатов проводилось несколько итераций расчета цифровой модели с использованием в качестве входных данных корректных результатов полученных в предыдущей итерации.

Расчет цифровых моделей рельефа осуществлялся в проекции Гаусса-Крюгера системы координат СК42. Первоначально расчетные участки объединялись в матрицы высот, соответствующие листам топографической карты миллионного масштаба. Объединение цифровой модели рельефа в единый проект, функционирующей на основе технологии ArcSDE, потребовало достаточно серьезной подготовки полученного материала. Для этого полученные матрицы высот «нарезались» на условные листы по площади соответствующие квадратному градусу и перепроектировались в географическую проекцию. При этом каждая матрица условного листа, преобразованная в географическую проекцию, должна была иметь одинаковый размер ячейки и содержать строго одинаковое количество целых ячеек в каждом листе.

Первая версия цифровой модели рельефа Украины масштаба 1 : 200 000 в полной мере соответствует сформулированным выше критериям. Цифровая модель представляет собой единую регулярную матрицу высот в формате ArcInfo Grid, сформированную на основе технологии ArcSDE, с размером ячейки 0,0005 градуса (1,8") в географической проекции. Высоты представлены значениями в метрах. Территория, охваченная цифровой моделью заключена в пределах от 54° до 42° северной широты и от 21° до 40° восточной долготы; всего 156 листа топографической карты двухсоттысячного масштаба. Общий объем модели порядка 6 Гбайт. Цифровая модель рельефа соответствует точности топографической карты масштаба 1 : 200 000 и топологически корректна с точки зрения флювиальных (гидрологических) свойств рельефа, что обеспечивает возможность использования ЦМР-200 для решения широкого круга практических задач.

Список литературы

1. Антощенко-Оленев И.В. Деструктивный рельеф как источник информации о геологическом пространстве. М.: Недра, 1989.
2. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ рельефа. Л.: Недра, 1986.
3. Кошкарёв А. В. Толковый мини-словарь основных терминов по геоинформатике. // ГИС-обозрение, 1994. № 1. С. 59 – 62.
4. Поздняков А. В., Черванев И. Г. Самоорганизация в развитии форм рельефа. М.: Наука, 1990.