УДК 711.116

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕСТОВЫЕ РАБОТЫ ПО МОРФОМЕТРИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ РЕЛЬЕФА

Махмудов Максуд Шералиевич
Бухарский государственный технический университет
старший преподаватель
Республика Узбекистан shm.maxmudov@mail.ru

Аннотация: *В статье проведены опытно-экспериментальные работы по оптимизации процесса маршрутизации на основе морфометрических показателей рельефа - высоты, уклона, экспозиции, степени сложности и других геоморфологических параметров. Используя данные цифровой модели рельефа (ЦМР), были определены и рассчитаны высота, средний уклон, экспозиция, коэффициент расчленения. Эти показатели были интегрированы в алгоритмы автоматического выбора маршрута и проведено экспериментальное моделирование для определения наиболее оптимальных направлений в различных рельефных условиях.*

Ключевые слова: *рельеф, морфометрические показатели ЦМР, средний уклон, экспозиция, морфометрический анализ, маршрутизация, ГИС, оптимизация.*

Abstract: *This article presents the results of an experimental study to optimize route planning based on terrain morphometric parameters – elevation, local slope, aspect, complexity's degree of the terrain. Using digital elevation model (DEM) data, elevation, average slope, aspect, spreading coefficient, and other geomorphometric parameters were calculated. These*

parameters were integrated into automatic route selection algorithms, and experimental modeling was conducted to determine the most optimal routes under various terrain conditions.

Keywords: *terrain, DEM morphometric parameters, slope, aspect, morphometric analysis, routing, GIS, optimization.*

Введение. Определение морфометрических показателей рельефа и их применение на практике в настоящее время играет важную роль в геодезии, картографии, проектировании инженерной инфраструктуры, а также в развитии навигационных систем. Высотно-низменная структура местности напрямую влияет на процесс выбора маршрута: увеличение уклона увеличивает энергозатраты, а при строительстве дорог снижает безопасность. Поэтому построение оптимального маршрута на основе морфометрических показателей является одной из актуальных научно-практических задач. Совершенствование цифровых моделей рельефа, повышение качества дронов и технологий дистанционного зондирования позволяют более эффективно использовать параметры рельефа в алгоритмах маршрутизации. В данной статье представлены результаты экспериментов, основанных именно на таком подходе.

Методология. В исследовании использовались следующие источники данных, рассчитывались следующие показатели с помощью ГИС и геоморфометрические моделей. Эти показатели используются в качестве важного весового коэффициента в алгоритмах маршрутизации [1]. Анализ исследований по алгоритму Дейкстры.

Задача нахождения кратчайшего пути на графах занимает важное место в алгоритмической географии, транспортной логистике и геоинформационных системах. Первое эффективное решение этой

проблемы было предложено Edsger W. Dijkstra в 1959 году. Алгоритм Дейкстры позволяет найти кратчайшее расстояние от единственного источника до всех узлов в графах с неотрицательным весом. В предварительных исследованиях были проанализированы теоретические основы алгоритма и сложность вычислений. Сложность при реализации с помощью простого массива $O(n^2)$ составляет. Сложность при применении приоритетной очереди в дальнейшем O((n+m)log n) погруженный в [2.3.4].

В последующих исследованиях были разработаны различные модификации алгоритма. В частности, эффективность алгоритма была повышена благодаря структуре данных Fibonacci heap, предложенной Robert Tarjan. Также созданы версии, адаптированные для динамического обновления дорог, работы с много источниками графами и большими объемами данных. В геоинформационных системах алгоритм Дейкстры широко используется для оптимальной маршрутизации на основе цифровых моделей рельефа (DTM/DEM). В этом случае узлы определяются точками земной поверхности, а ребра - расстоянием между ними или энергетическими затратами. Уклон рельефа и разность высот могут быть введены в качестве весовых коэффициентов. В целом, в литературе алгоритм Дейкстры признан фундаментальным алгоритмом в области теории графов, транспортных систем и геомоделирования.

Морфометрические показатели рельефа служат для количественной оценки форм земной поверхности. Научные исследования в этом направлении начались в начале XX века. Одним из основателей морфометрического анализа является Уолтер Пенк. Он проанализировал эволюцию рельефа и динамику геоморфологических процессов.

Современный морфометрический анализ проводится на основе цифровых высотных моделей (DEM). При этом основными показателями являются:

абсолютная и относительная высота уклон (склона) экспозиция уклон профиля и плана рельефа кривизна гипсометрия

Через геоинформационные системы эти показатели рассчитываются автоматически и используются при проектировании инженерно-коммуникационных систем. В частности, уклон рельефа является одним из основных факторов при определении транспортного маршрута [5.6.7].

Интегрируя морфометрические показатели с графовыми моделями, можно определить энергетическое сопротивление, функцию затрат и оптимальные траектории рельефа. Это позволяет связать алгоритм Дейкстры с параметрами рельефа. Анализ литературы показывает, что алгоритм Дейкстры является теоретически и практически обоснованным методом нахождения кратчайшего пути на графах. Морфометрические показатели рельефа имеют важное значение при количественной оценке форм земной поверхности и инженерных расчетах. Интеграция двух направлений - то есть включение морфометрических параметров рельефа в веса графов - составляет научную основу оптимальной маршрутизации в современных геоинформационных системах [12.13].

Результаты и обсуждения. Экспериментальные работы проводились на основе следующего:

Для каждого из морфометрических показателей рельефа, т.е. коэффициентов локальной сложности поверхности рельефа или значения локального среднего уклона, применяя алгоритм Дейкстры, проводим

тестовые испытания для определения кратчайшего и наиболее оптимальной трассы.

Формируем исходные данные для тестовых испытаний.

Предположим, что исходные данные (произвольные) о рельефе представлены в виде прямоугольной сети данных:

$$Z(i,j) = \begin{bmatrix} -0{,}03 & 0{,}31 & -0{,}93 & 0{,}43 & -0{,}15 & -0{,}94 \\ 0{,}87 & -0{,}01 & 0{,}09 & 0{,}38 & -0{,}10 & 0{,}05 \\ -0{,}19 & 0{,}48 & -0{,}15 & 0{,}36 & -0{,}22 & 0{,}68 \\ 0{,}00 & -0{,}46 & -0{,}19 & -0{,}92 & -0{,}53 & 0{,}29 \\ 0{,}18 & 0{,}55 & -0{,}09 & 0{,}55 & 0{,}85 & -0{,}11 \end{bmatrix}; \quad \begin{matrix} \mathrm{m} = 5 \\ \mathrm{n} = 6 \\ \Delta X = 20 \\ \Delta Y = 20 \\ \Delta H = 0{,}1 \end{matrix} \quad (1)$$

Здесь: m - количество строк; n - количество столбцов; ΔX - расстояния между столбцами (метры); ΔY - расстояния между рядами (метры), ΔH - расстояния между горизонтальными плоскостями (метры).

Определим количество кварталов:

$$\mathrm{k} = (m-2)\cdot(n-2) = 3\cdot 4 = 12. \quad (2)$$

Тест №1. Формирование алгоритма Дейкстры на основе коэффициентов сложности рельефа.

Одна локальная территория образует один квартал матрицы 3×3. Были определены коэффициенты сложности кварталов на основе матрицы (1):

Таблица-1.

Коэффициенты сложности кварталов на основе матрицы (1)

Кварталы (*Kv*)	**1**	**2**	**3**	**4**
1	0,4390 ξ	0,3446 ξ	0,3680 ξ	0,2038 ξ

2	0,3352 ξ	0,2911 ξ	0,3082 ξ	0,3049 ξ
3	0,3132 ξ	0,5085 ξ	0,5004 ξ	0,5083 ξ
Общий=4,4252 ξ; Средний=0,3688ξ; Min=0,2038ξ; Max=0,5085ξ;				

Необходимо выбрать начальный и конечный узлы трассы.

Например: Начальный узел — $Kv_s = Kv_{31} = 0{,}3132\xi$;

Конечный узел — $Kv_t = Kv_{14} = 0{,}2038\xi$.

Тогда кварталы с наименьшим весом коэффициента сложности на основе алгоритма Дейкстры будут выглядеть следующим образом (рис.1) [2.3]:

$$\begin{cases} W = min\sum W(i,j) = 0 + 0{,}3352 + 0{,}2911 + 0{,}3082 + 0{,}3049 + 0{,}2038 = 0{,}4432\xi; \\ P(s,t) = [Kv_{31}; Kv_{21}; Kv_{22}; Kv_{23}; Kv_{24}; Kv_{14}] \end{cases} \quad (3)$$

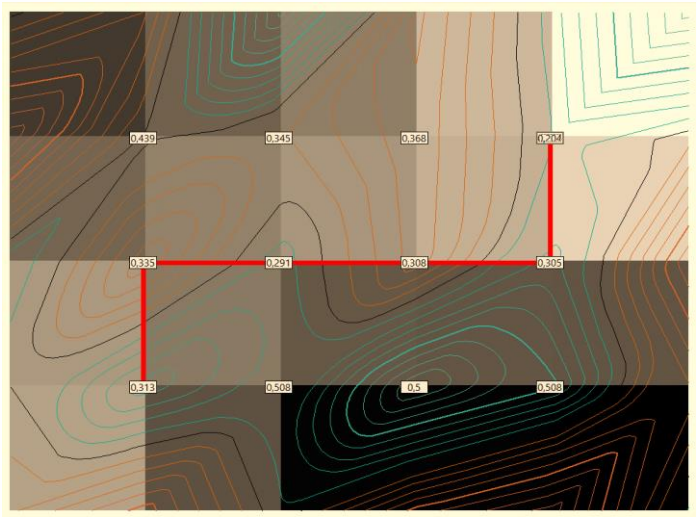


Рисунок 1. Алгоритм Дейкстры по коэффициентам сложности рельефа.

Тест №2. Формирование алгоритма Дейкстры на основе локальных средних уклонов рельефа.

Выводится средний уклон одного локального участка – квартала, состоящего из матрицы 3×3, и формируется таблица-2.

Таблица-2

Коэффициенты сложности рельефа по кварталам на основе матрицы 2

Кварталы (КВ)	**1**	**2**	**3**	**4**
1	0,0152	0,0080	0,0069	0,0169
2	0,0154	0,0170	0,0175	0,0159
3	0,0054	0,0055	0,0119	0,0082
O‘rtacha=0,0120 tanα; Min=0,0054 tanα; Max=0,5085ξ;				

Необходимо выбрать начальный и конечный узлы трассы;

Начальный узел: $Kv_s = Kv_{31} = 0{,}0054\ \tan\alpha$

Конечный узел: $Kv_t = Kv_{14} = 0{,}0169\ \tan\alpha$

Согласно алгоритму Дейкстры, квартилы с наименьшим средним весом наклона выглядят следующим образом (рисунок 2):

$$\begin{cases} W = min\sum W(i,j) = 0 + 0{,}3352 + 0{,}2911 + 0{,}3082 + 0{,}3049 + 0{,}2038 = 0{,}4432\xi; \\ P(s,t) = [Kv_{31}; Kv_{21}; Kv_{22}; Kv_{23}; Kv_{24}; Kv_{14}] \end{cases} \quad (4)$$

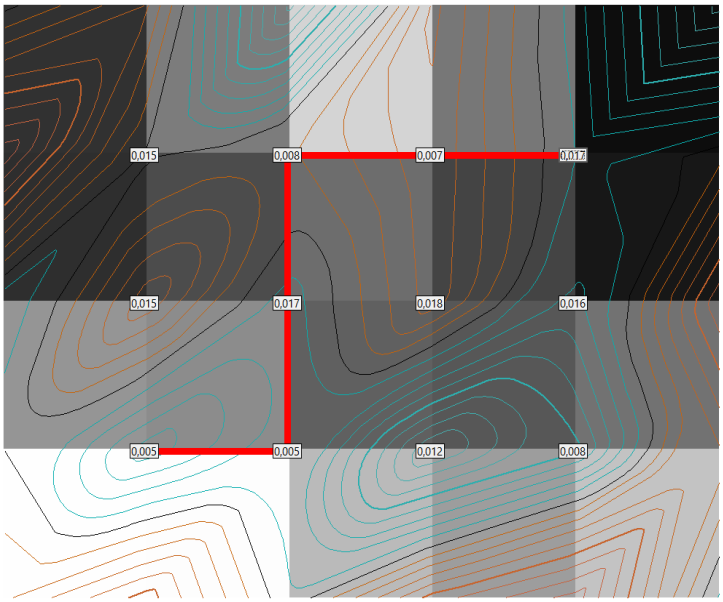


Рисунок 2. Алгоритм Дейкстры на основе средних уклонов рельефа.

Заключение. Проведенные экспериментальные результаты подтверждают актуальность применения морфометрических данных, таких как – средний уклон и экспозиция локального участка, степень сложности рельефа в практике инженерного проектирования в режиме реального времени. Они способствует научно обоснованному и оптимальному выбору варианта инженерной мысли. Модифицированный алгоритм Дейкстры применим во всех локальных морфометрических показателях рельефа, кроме глобальных и способствует оперативному принятия научно обоснованного решения инженерных задач связанных с рельефом земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Khaitov B.U. Makhmudov M.Sh. Rotation of objects in a geographical coordinate system. Science Shine: International scientific journal. – Uzbekistan: Fergana. 2024. ISSN: 3030-377X. Iss-15, Vol-1. – pp. 213-217. https://scienceshine.uz/index.php/ilmnuri/article/view/454 (murojaat sanasi: 15.01.2025)

2. Хаитов Б.У., Махмудов М.Ш. Алгоритм вращения объектов в географической системе координат // Research and development-2024: Сборник статей межд. научно-прак. конф. 20 мая 2024 г. – Петрозаводск. МЦНП «НОВАЯ НАУКА», 2024. – С. 11-15.

3. Канатников А.Н., Крищенко А.П. Аналитическая геометрия. 2-е изд. / Под ред. В.С. Зарубина. – М. Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2000. – 388 с.

4. Dijkstra’s algorithm. https://en.wikipedia.org/wiki/Dijkstra%27s_algorithm (murojaat sanasi: 02.10.2025)

5. Заколдаев Д.А. Методы и алгоритмы проектирования маршрутов электронных реляционных документов в приборостроении. Автореф. … канд. тех. наук. 05.13.12. – Санкт-Петербург. 2012. – 19 с.

6. Никоноров В.М. Оптимизация логистических показателей мелкопартионных перевозок на автомобильном транспорте. Автореф. … канд. эконом. наук. 08.00.13. – Санкт-Петербург. 2013. – 19 с.

7. Солдатенко А.А. Разработка алгоритмов комбинаторной оптимизации для анализа графовых и гиперграфовых сетей. Автореф. … канд. физ-мат. наук. 05.13.17. – Красноярск. 2012. – 19 с.

8. Лукичев М.М. Методика формирования потоковой структуры технологической сети связи ОАО «РЖД». Автореф. … канд. тех. наук. 05.12.13. – Санкт-Петербург. 2021. – 24 с.

9. Иванчикова М.А. Методы и алгоритмы реконфигурирования параметров и структур мультипровайдерных сетей распределенных центров обработки данных. Автореф. … канд. тех. наук. 05.13.15. – Рязань. 2019. – 27 с.

10. Чжо Мьо Хан. Планирование расписания и управление движением пассажирского транспорта с использованием моделирующей среды. Автореф. … канд. тех. наук. 05.13.01. – Москва. 2010. – 20 с.

11. Ньи Ньи Хтун. Разработка и исследование рецепторных геометрических моделей телесной трассировки. Автореф. … канд. тех. наук. 05.01.01. – Москва. 2014. – 27 с.

12. Аль-Саиди Аднан Адаб К. Методы и алгоритмы планирования маршрутов движения автономного карьерного транспорта с использованием параллельных вычислительных процедур. Автореф. … канд. тех. наук. 2.3.1 (05.01.02). – Москва. 2024. – 36 с.

13. Хаитов Б.U. Совершенствование теоретических основ геометрического моделирования рельефа Земли по инженерным вопросам. Доктор технических наук. diss. Автореф. 05.014.Хаитов Б.Uс.