

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ РЕЛЬЕФА СПОСОБОМ ШТРИХОВ КРУТИЗНЫ¹

Т.Е. Самсонов (МГУ им. М.В. Ломоносова, Лаборатория экспериментальных географических исследований «Меркатор» Института географии РАН)

В 2007 г. окончил географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова по специальности «картография». С 2006 г. работает ведущим инженером в Лаборатории экспериментальных географических исследований «Меркатор» Института географии РАН. Аспирант географического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

В истории картографии целая эпоха принадлежит картам, на которых рельеф изображен способом штрихов. Эффектность и выразительность рисунка, выполненного этим способом, особенно поражает в век компьютерных технологий. Изображение рельефа в штрихах является украшением топографических карт XIX века, многие из которых можно смело причислить к произведениям искусства. Тем интереснее представляется задача автоматизации этого способа, обладающего рядом карто- и морфометрических достоинств и неповторимым своеобразием пластического эффекта.

▼ История и методология способа

Техника штрихового рисунка на картах стала развиваться, начиная с XV века, благодаря появлению гравюр на медных листах. Склоны местности воспроизводились с использованием штриховых элементов, направленных вниз по склону и расположенных с равным интервалом. Выше и ниже по склону штрихи ограничивались вспомогательными «линиями формы», которые представляли собой приближение горизонталей, очерчивая форму рельефа в плане на некотором уровне. После проведения штрихов ли-

нии формы стирались. Со временем изображение стало уже математически строгим, а в качестве вспомогательных линий проводились горизонталы [1] (рис. 1). Широкое распространение способа штрихов было обусловлено его содержательностью и наглядностью. Картографы привнесли дополнительную информацию в изображение вариацией толщины штрихов в зависимости от углов наклона. Тем самым достигался хороший пластический эффект и появлялась возможность ви-

зуального морфометрического анализа рельефа, что было особенно важно для решения военно-тактических задач.

Впервые штрихи крутизны были применены немецким картографом Иоганном Леманом. В 1799 г. он разработал шкалу, которая состояла из 9 ступеней (см. таблицу). Впоследствии применялись и другие шкалы, соотношения в которых были адаптированы к степени расчлененности территории, углам наклона на местности. В частности, шкала Генерального штаба

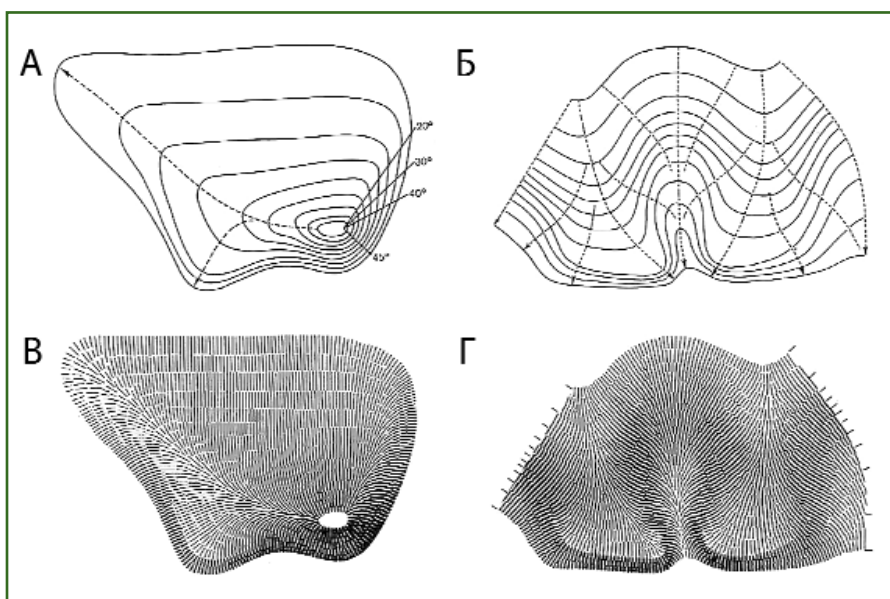


Рис. 1

Рукописное оформление рельефа в штрихах крутизны: А, Б — вспомогательные горизонталы; В, Г — штрихи крутизны

¹ Исследование выполнено по Программе поддержки ведущих научных школ России (НШ-8306.2006.5).

Шкала И. Лемана для штрихов крутизны

Угол наклона, °	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Соотношение толщины штриха и пробела	0:9	1:8	2:7	3:6	4:5	5:4	6:3	7:2	8:1	9:0

и шкала А.П. Болотова, разработанные для российских топографических карт, отличались более детальной проработкой ступеней для малых углов наклона: увеличением числа градаций, изменением толщины штрихов и ширины промежутков между ними [2]. Способ штрихов нашел широкое применение на отечественных топографических картах середины и конца XIX века.

Помимо штрихов крутизны использовались также и теневые штрихи, построенные по принципу бокового освещения. Оба типа штрихов применялись на картах крупных и средних масштабов. При этом на мелко-масштабных картах использовались только теневые штрихи либо штрихи общего вида, сочетающие в себе свойства как первого, так и второго типа, но фактически уже не привязанные к горизонталям.

Швейцарский картограф Эдуард Имгоф в конце XX века систематизировал сведения о способе штрихов. Он сформулировал основные правила их построения [3].

1. Штрихи представляют собой фрагменты линий тока.

2. Штрихи организованы в горизонтальные ряды. Тем самым обеспечивается равномерная плотность их размещения на всем пространстве карты.

3. Длина штрихов соответствует заложению горизонталей. При этом сечение выбирается таким образом, чтобы длина штрихов была, по крайней мере, 0,2 мм на наиболее крутых участках.

4. Принцип «чем круче, тем темнее». Степень эффекта достигается вариацией соотноше-

ния толщины штрихов и расстояний между ними.

5. Штрихи должны располагаться с равным интервалом, адаптированным к характеру рельефа. При этом с уменьшением масштаба штриховой рисунок становится более тонким и изящным. Лучшие образцы картографической гравюры содержали до 30 и более штрихов на 1 см длины горизонтали. Примерами могут служить «Топографическая карта Пруссии» масштаба 1:100 000, содержащая 34 штриха на 1 см, и «Карта Германской империи» Фогеля масштаба 1:500 000, в которой на 1 см приходилось 40 штрихов.

Среди неотмеченных Э. Имгофом правил важным условием правильного изображения является смещение штрихов последующего ряда относительно штрихов предыдущего во избежание образования «коридоров» — длинных белых просветов между штрихами.

Основным достоинством способа является его самостоятельность с точки зрения соотношения пластического эффекта и информативности, которая не свойственна отмывке. Штриховой рисунок дает более абстрактный пластический эффект, нежели отмывка, и более выразителен. Тончайший рисунок, искусно имитированная игра света и тени создают потрясающее, неповторимое впечатление картографического шедевра.

В XIX веке картографические произведения находили все большее распространение, необходимость их использования возникла во многих областях человеческой деятельности, спрос на карты быстро рос, что

потребовало значительной оптимизации процесса составления карт. На смену штрихам пришел способ изолиний. Прогресс отразился и на стадии картопечатания. Быстрый способ литографии был слишком грубым для отображения тонкого штрихового рисунка с вариацией толщины линий порядка 0,05 мм. Все это привело к постепенному угасанию эпохи штриховых карт и, в конечном счете, полному прекращению их издания.

▼ Исследования по автоматизации способа штрихов

Интерес к штрихам вновь появился во второй половине XX века, но уже с позиций автоматизации. Израильский картограф П. Йозли разработал алгоритм автоматизированного построения изображения рельефа в штрихах [4]. Алгоритм основывался на каркасе из изолиний, построенных по цифровой модели. Штрихи представляли собой отрезки, перпендикулярные изолиниям и расположенные между ними. На рис. 2 можно увидеть пример изображения местности рядом с городом Хайфа (Израиль), построенного с использованием разработанной методики. На нем штрихи совмещены с опорными изолиниями. П. Йозли отметил, что штрихи могут быть успешно использованы при структурном анализе ландшафтов посредством картографирования углов наклона.

Оригинальные исследования проводятся учеными в рамках нефотореалистичного рендеринга (НФР)² — области машинной графики, ставящей перед собой задачу имитации техники рукописной иллюстрации,

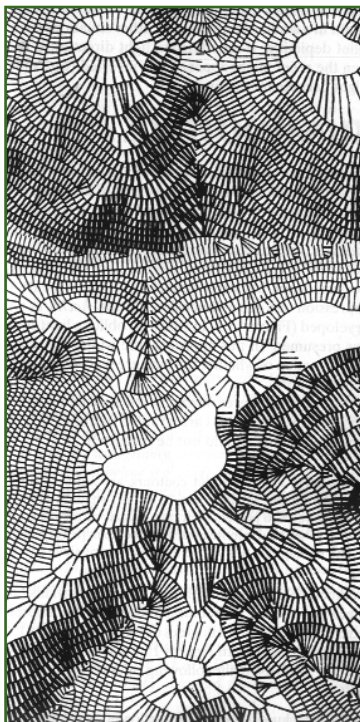


Рис. 2

Автоматизированно построенное изображение рельефа в штрихах крутизны по П. Йозли

в том числе и штрихового рисунка. Авторами статьи [5] разработаны алгоритмы, позволяющие создавать изображение рельефа, выполненное в более свободной манере, чем при использовании рассматриваемого нами картографического способа. Оно представляет собой штриховой рисунок очертаний склонов, который может быть выполнен художником-картографом для использования, например, в задачах ландшафтной архитектуры (рис. 3). В качестве штриховых элементов используются «свободные линии» (loose lines), которые, в отличие от штрихов крутизны, не выстроены вдоль горизонталей, а расположены в свободном, непривязанном порядке. Возможность отрисовки линий с применением отсканированных рукописных образцов де-

лает изображение более естественным. Как альтернативный вариант, в алгоритме отрисовки может быть использована функция, вносящая элемент случайности в характер линии (дрожь руки, степень нажатия на перо или карандаш влияют на ее толщину, цвет и положение). Строго говоря, автоматизированное изображение рельефа способом классических штрихов крутизны также относится к нефотореалистичному рендерингу.

Не так давно начали появляться работы, в которых предпринимаются попытки создать особый тип штрихового изображения в целях мелкомасштабного картографирования. Способ «ориентированных полутонов», предложенный П. Кенелли [6], напоминает отвергнутый в свое время точечный метод Эккерта, в котором светотень имитируется множеством точек разного размера². Только в данном случае точки расположены не в случайном порядке, а сгруппированы во фрагменты растровой штриховки, которые ориентированы соответственно экспозиции склона.

П. Кенелли и А. Кимерлинг [7] предложили использовать стрелки белого и черного цве-

тов для создания штрихового изображения рельефа на картах мелких масштабов. При этом длина и толщина стрелок остается неизменной по всему полю карты, их цвет меняется в зависимости от экспозиции склона, а густота расположения — от углов наклона. Схожая методика была ранее использована С.Н. Сербенюком для картографирования градиентных полей [8]. Ее отличие состоит в том, что стрелки располагаются по регулярной сетке, ориентированы вниз по склону, а их толщина пропорциональна углам наклона местности. Информативность и наглядность изображения может быть увеличена путем раскраски стрелок соответственно экспозиции склонов или углов наклона [9]. При этом как для толщины стрелок, так и для их направления может быть выбрана дискретная либо непрерывная шкала.

▼ Авторский алгоритм построения штрихов крутизны

В отечественной картографии исследованиям на данную тему практически не уделялось внимание. Полученные П. Йозли 20 лет назад результаты представляют интерес в науч-

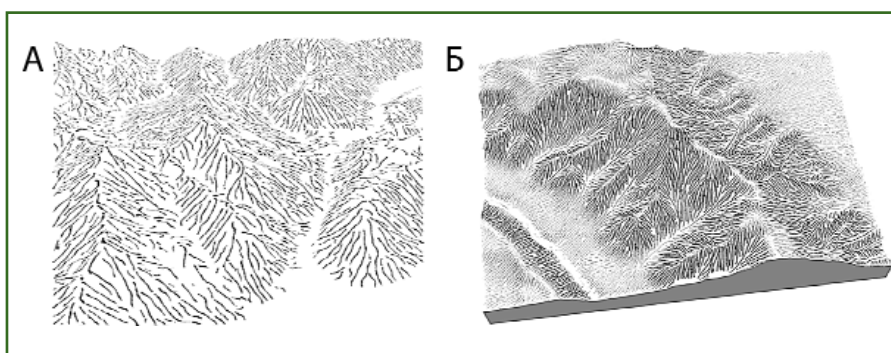


Рис. 3

Изображение рельефа способом свободной штриховки:

А — равномерное покрытие штрихами без вариации толщины линий;
Б — имитация штрихов крутизны

² NPR — Non-photorealistic Rendering. Иногда используют аббревиатуру NPAR (Non-photorealistic Animation and Rendering), подразумевая, что в область исследования входит также и анимация изображений.

³ Тогда специалисты с сомнением отнеслись к этой идее и достаточно критично заметили, что подобное разбиение светотеневого изображения должно выполняться на этапе растривания полутонового оригинала, а не быть задачей картографа.

ном плане, но требуют серьезной доработки. Автором данной статьи было проведено исследование по разработке интеллектуального алгоритма построения штрихов крутизны. Для решения этой задачи было подготовлено соответствующее программное обеспечение, позволившее реализовать алгоритмы на практике. Рассмотрим суть предлагаемой методики.

В качестве исходных данных используется цифровая модель рельефа (ЦМР) на регулярной сетке. На первом этапе алгоритм использует ее для построения опорных изолиний, между которыми проводятся штрихи, которые таким образом организованы в ряды. Каждый штрих представляет собой сегмент линии тока, имеющий начало на изолинии — такое представление обеспечивает плавный рисунок, естественно очерчивающий формы рельефа, что в меньшей степени возможно при использовании прямолинейных отрезков, как это реализовано в алгоритме П. Йоэли.

Линия тока $(x(t), y(t))$, выходящая из начальной точки (x_0, y_0) вниз по склону, является решением задачи Коши для системы дифференциальных уравнений первого порядка:

$$\begin{cases} x'(t) = -f_x(x, y) \\ y'(t) = -f_y(x, y) \end{cases}$$

$$x(0) = x_0, y(0) = y_0,$$

для значений параметра $t > 0$, где через $f(x, y)$, f_x , f_y обозначены модельная функция, описывающая рельеф, и ее частные производные, являющиеся компонентами градиента. При движении вверх по склону знаки в правой части уравнения изменяются на противоположные.

Для вычисления градиента в произвольной точке высотное поле внутри каждой ячейки i, j ЦМР аппроксимируется билинейной функцией, имеющей следующий вид:

$$f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy.$$

Функция однозначно определена по четырем точкам и вырождается в линейную на ребрах ячейки. Для нахождения коэффициентов a_{mn} используются значения высот в узлах Z_{ij} , $Z_{i+1,j}$, $Z_{i,j+1}$, $Z_{i+1,j+1}$. Производные билинейной функции

$$\frac{\partial f}{\partial x} = a_{10} + a_{11}y,$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = a_{01} + a_{11}x$$

в точке p для ячейки i, j , в пределах которой она расположена, в численном виде находятся следующим образом:

$$\begin{cases} f_x = A_x + dyA_{xy} \\ f_y = A_y + dxA_{xy} \end{cases}$$

$$dx = (x_p - x_i) / (x_{i+1} - x_i),$$

$$dy = (y_p - y_i) / (y_{i+1} - y_i),$$

$$A_x = Z_{i+1,j} - Z_{ij}, A_y = Z_{i,j+1} - Z_{ij},$$

$$A_{xy} = Z_{ij} + Z_{i+1,j+1} - Z_{i+1,j} - Z_{i,j+1}.$$

Пошагово сдвигаясь в направлении, противоположном градиенту, получаем искомую линию тока. Конечные точки штрихов располагаются либо на высоте нижерасположенного уровня изолиний, либо в областях локальных минимумов и малых углов наклона. Отдельно обрабатываются области локальных максимумов, в окрестностях которых штрихи отслеживаются вверх по склону.

В зависимости от знака поперечной кривизны поверхности линии тока могут иметь конвер-

гентное или дивергентное поведение. В первом случае необходимо предотвратить слияние, а во втором — выполнить вставку дополнительных штрихов. Тем самым обеспечивается равномерная плотность расположения штрихов. Эти задачи успешно решаются разработанным алгоритмом. Установка значения межуровневого зазора также предусмотрена.

Расчет толщины штрихов основывается на анализе углов наклона. Для каждого штриха подсчитывается средний угол наклона на его протяжении. На основе осредненного угла вычисляется толщина штриха одним из двух возможных способов. Простой линейной интерполяцией может быть получено значение из непрерывной шкалы, в которой толщина плавно изменяется от минимальных до максимальных углов наклона, соответствующих данной территории. В качестве альтернативного варианта возможно проведение классификации углов наклона различными методами (равных интервалов, естественных интервалов и т. д.) с заданием соответствующей каждому выделенному классу толщины штрихов. Второй способ предоставляет широкие возможности, например, имитацию классических шкал.

Пользовательский интерфейс программы предоставляет необходимые параметры для контроля работы алгоритма, включая удобный выбор высотных ступеней шкалы, а также специфичные для алгоритма величины, характеризующие количество (глубину) дополнительных штрихов, коэффициент утолщения штрихов в случае непрерывной шкалы, масштабный коэффициент по высоте для увеличения контраста изображения и т. д. В отдельном модуле предоставлена возможность классификации штрихов.

С использованием алгоритма удалось достичь неплохих ре-

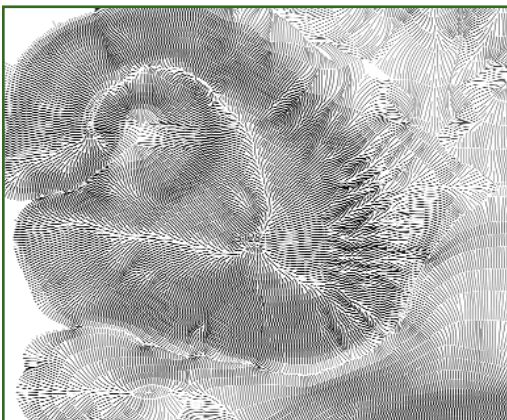


Рис. 4

Изображение вулканического рельефа, полученное с использованием авторского алгоритма

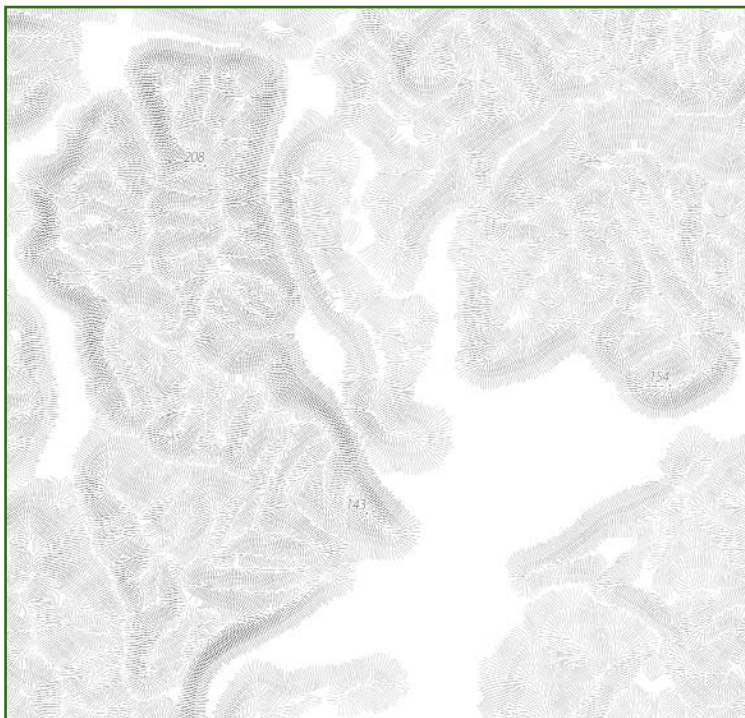


Рис. 5

Изображение холмисто-эрозионного рельефа, полученное с использованием авторского алгоритма

зультатов (рис. 4, 5). Широкий набор параметров методом проб и ошибок позволяет подобрать оптимальные величины для конкретной территории. Некоторые из них, такие как масштабный коэффициент по высоте и минимальный значимый угол наклона, предлагаются программой автоматически. Склоны с углами наклона ниже минимального штрихами не покрываются. Достаточно важно обозначить разницу в толщине штрихов для пологих и крутых склонов — это способствует лучшей читаемости рельефа.

Для сильно расчлененных территорий имеет смысл использовать малое сечение горизонталей и малый шаг штрихов, чтобы четко обрисовать частые изгибы поверхности. Но при этом, поскольку штриховое изображение характеризуется высокой графической нагрузкой, излишняя подробность недопустима. Поэтому, как правило, для построения штрихов имеет смысл использовать более сглаженную (генерализованную) модель рельефа по

сравнению с той, которая может быть использована для отмывки территории или ее гипсометрии в том же масштабе. Это также говорит о том, что способ штрихов лучше подходит для картографирования территорий с небольшой расчлененностью и плавными формами рельефа или для картографирования в крупных масштабах.

Дальнейшее исследование способа должно охватить следующие направления:

1. Разносторонняя оценка свойств изображений в штрихах крутизны, их зависимости от характера рельефа, анализ возможных направлений использования способа в современной картографии.

2. Модернизация способа штрихов в зависимости от области его применения, в частности, для картографирования различных геофизических полей.

3. Оценка разработанных алгоритмов с точки зрения скорости выполнения и их оптимизация.

Автор выражает благодарность старшему научному со-

труднику Лаборатории автоматизации кафедры картографии и геоинформатики МГУ им. М.В. Ломоносова С.М. Кошелю, а также заведующему кафедрой профессору А.М. Берлянту за помощь в работе и ценные замечания.

▼ Список литературы

1. Атабеков Н.А. Словарь-справочник иллюстратора научно-технической книги. — М.: Книга, 1974. — 284 с.

2. Берлянт А.М. Картография: Учебник для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2002. — 336 с.

3. Imhof E. Cartographic Relief Presentation. Berlin and New York: Walter de Gruyter, 1982.

4. Yoeli P. Topographic relief depiction by hachures with computer and plotter. // Cartographic Journal 22, 1985, pp. 111–124.

5. Buchin K., Costa Sousa M., Dollner J., Samavati F., Walther M. Illustrating terrains using direction of slope and lighting // In Proc. 4th ICA Mountain Cartography Workshop, 2004, pp. 259–269.

6. Kennelly P.J. Hillshading with oriented halftones. // Cartographic perspectives. Fall 2002, pp. 25–42.

7. Kennelly P.J., Kimerling A.J. Desktop hachure maps from digital elevation models // Cartographic perspectives. Fall 2000, pp. 78–81.

8. Сербенюк С.Н. Картография и геоинформатика — их взаимодействие. — М.: Изд-во МГУ, 1990.

9. Кошель С.М. Теоретическое обоснование структуры и функций блока моделирования рельефа в ГИС: Дис. канд. геогр. наук: 25.00.35 / МГУ им. М.В. Ломоносова. — М., 2004. — 119 с.

RESUME

An original technique is introduced to automatically represent relief using slope hachuring technique. Research results on this subject obtained by several cartographers have been summarized. The author describes in detail the algorithm developed as well as its features and advantages in contrast to analogous. The technique proposed is based on both the classical principles and contemporary technologies and trends in cartography.