

КАРТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

Введение. Современная картография в качестве источника данных для изображения земной поверхности использует цифровые модели рельефа (ЦМР). Автоматизация способов изображения рельефа на картах реализуется сочетанием методов визуализации и генерализации ЦМР. В традиционной картографии эти процессы неотделимы друг от друга: картографическая форма представления является одновременно и своеобразной моделью поверхности Земли, хранилищем информации о ее рельефе. Генерализация этой модели осуществляется фактически на стадии составления изображения. Развитие цифрового моделирования рельефа с 60-х годов XX в. привело к отчетливой дивергенции этих процессов. На основе одной и той же цифровой модели рельефа оказалось возможно получать изображения, выполненные разными способами, а генерализация ЦМР превратилась в отдельную задачу, решаемую на предварительном этапе. Помимо этого, ЦМР нашли обширное применение в задачах, не относящихся к визуализации, таких, как вычисление производных морфометрических параметров в геоморфологии и при обработке ЦМР в географических исследованиях в целом.

Методы генерализации ЦМР до начала 2000-х годов развивались достаточно абстрактно – мотивация большинства работ заключалась в некотором упрощении поверхности, которое сохранило бы основные формы рельефа и при этом удалило бы формы второстепенные [1]. Далее предлагалось полученные ЦМР использовать для визуализации или морфометрического анализа. Необходимость генерализации данных для этих задач не ставилась под сомнение. Это позволяло зачастую рассматривать генерализацию как конечную цель исследования, достойную самостоятельного рассмотрения без глубокого погружения в контекст дальнейшего использования полученной ЦМР.

Одновременно с этим велась активная разработка методов и алгоритмов автоматизации способов изображения рельефа. К появлению персональной компьютерной техники в начале 1980-х годов в том или ином виде уже были автоматизированы наиболее традиционные способы, такие, как светотеневая отмывка, горизонта-

ли, послойная окраска, освещенные и наклонные горизонталы [1]. Неудовлетворенность экспертов качеством полученных изображений стимулировала дальнейшее совершенствование алгоритмов. Ориентиром при этом служили лучшие образцы рукописных карт.

К началу 2000-х годов сформировалось отчетливое понимание того, что даже тщательной проработки алгоритмов визуализации ЦМР и применения новейших достижений вычислительной техники недостаточно для формирования изображений рельефа, близких по своим качествам – ясности, точности и географическому правдоподобию – к рукописным оригиналам. Оказалось, что необходима специальная подготовка самой ЦМР, которая заключается в ее генерализации, ориентированной на выбранный способ изображения и масштаб картографирования.

В немалой степени этому способствовало появление и распространение доступных ЦМР континентального охвата, которые позволили экспериментировать с изображением различных типов рельефа в разных масштабах. Опыт использования таких моделей для изображения рельефа позволил выявить наиболее проблемные точки генерализации ЦМР [2]. Модели среднего и низкого пространственного разрешения GMTED2010, GTOPO30, ETOPO-1/2/5 и GEBCO оказались мало пригодны для получения изображений рельефа картографического качества. Перечисленные модели обладают неудачным соотношением детализации и пространственного разрешения, что связано с технологией их получения: они создавались главным образом по разнородным средне- и мелкомасштабным топографическим и батиметрическим картам, а также путем передискретизации моделей более высокого пространственного разрешения (см. обзор методов получения ЦМР в работе [1]). Такие модели содержат множество форм рельефа, имеющих охват, сопоставимый с размером элементарной ячейки ЦМР. Полученные на их основе изображения пестрят случайными деталями и обладают низкой наглядностью.

За прошедшее с начала 2000-х годов время произошел качественный скачок в понимании и реализации принципов создания географически правдоподобных и

наглядных изображений рельефа на основе цифровых моделей. Благодаря этому появились новые методы генерализации ЦМР, были усовершенствованы техники картографирования на их основе, автоматизированы способы формирования сложных перспективных и графических изображений. Обзору этих достижений и посвящена настоящая статья.

Поскольку конечной целью рассматриваемых нами методов (в том числе и генерализации ЦМР) является автоматизация изображения рельефа на картах, удобно систематизировать их с точки зрения метода визуализации. Анализ публикаций за период с 2000 по 2015 годы позволяет выделить 5 основных направлений разработок:

1. Светотеневое изображение рельефа.
2. Непрерывная цветовая окраска рельефа.
3. Гипсометрическая окраска рельефа.
4. Перспективное изображение рельефа.
5. Нефотореалистичное изображение рельефа.

Каждому из этих направлений посвящен соответствующий раздел настоящего обзора. Мы также сочли необходимым добавить раздел, посвященный доступным в сети Интернет программным средствам для генерализации и визуализации ЦМР.

Светотеневое изображение рельефа. Аналитическая отмывка относится к традиционным методам светотеневого изображения рельефа. В последнее десятилетие были предложены различные методы модификации отмывки, связанные с применением интерактивного изменения ее параметров [3], использованием нескольких источников освещения [4], применением различных моделей освещения [5, 6], локальной адаптации освещения [7–9], использованием кривизны [10], топографической открытости и показателя видимости неба [11–14], генерализацией ЦМР [15].

Алгоритм генерализации ЦМР, разработанный для создания мелкомасштабной отмывки в [15], основан на выделении положительных и отрицательных форм рельефа по значению профильной кривизны поверхности. Линии хребтов и тальвегов акцентируются путем применения соответствующего фильтра (нижней и верхней квантили) и сложения полученных поверхностей с использованием поверхности углов наклона в качестве весовой функции. Отмывка, полученная по такой модели обладает броским и контрастным характером (рис. 1), отвечает требованиям к мелкомасштабному изображению рельефа.

В то же время важным аспектом светотеневого изображения рельефа в средних и крупных масштабах является его многоплановость. Так, например, элементы форм макрорельефа (макросклоны) оттеняются дополнительно, что позволяет внести эффект мультимасштаб-

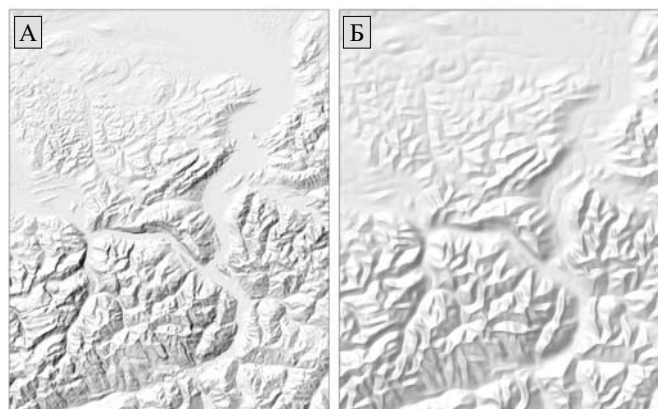


Рис. 1. Автоматическая генерализация мелкомасштабной отмывки рельефа [15]

А – исходная ЦМР, Б – результат обработки новым алгоритмом

ности в изображение, сделать его более пластичным и информативным. Направление орографических линий может значительно меняться в пределах территории, и в этом случае даже несколькими источниками освещения не удастся подчеркнуть все важные формы рельефа. Преимущество вручную выполняемой отмывки заключается в возможности варьировать глубину тени локально для того, чтобы выделить формы рельефа, которые при использовании глобальных правил останутся незаметными. Б. Йенни [3] разработал методику и программное обеспечение интерактивной аналитической отмывки, позволившие реализовать подобные возможности в компьютерной среде.

Для автоматизированного решения этой задачи предложен алгоритм, основанный на выделении линий хребтов и тальвегов и построении диффузионных кривых (diffusion curves) [7]. Полученное светотеневое изображение совмещается с отмывкой, построенной стандартным способом. В результирующем изображении освещенность форм рельефа второго плана зависит не только от их абсолютной экспозиции, но и от положения на том или ином элементе макрорельефа (рис. 2).

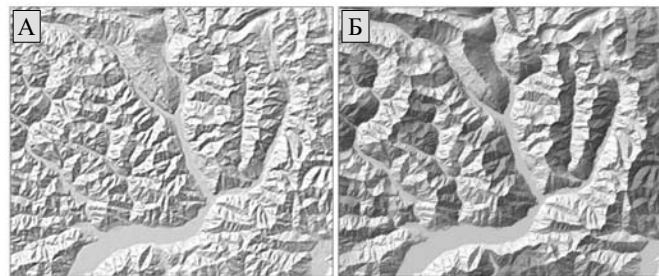


Рис. 2. Двуплановое изображение рельефа методом аналитической отмывки [7]

А – отмывка, полученная стандартной методикой, Б – отмывка с дополнительным оттенением макроформ рельефа

Другим элементом многоплановости является высотная дифференциация светотени, которая выражается в более контрастном выделении высокогорных участков и более светлом изображении долин. В работе [9] предложен алгоритм, изменяющий угол падения света в зависимости от высоты или крутизны склона (методика коррекции зенита). Результирующие изображения обладают подчеркнутым характером линий хребтов, а также светлым изображением днищ долин, в которых избыточное затенение макросклона мешало бы восприятию формы русла водотока.

К альтернативным светотеневым способам картографического изображения можно отнести использование топографической открытости [11, 12] или индекса видимости небосвода SVF – Sky View Factor [13]. Топографическая открытость точки земной поверхности представляет собой угловую меру блокировки небосвода географическими препятствиями. Вогнутые поверхности имеют положительную открытость, выпуклые – отрицательные. Топографическая открытость явным образом связана с индексом видимости небосвода SVF, который отражает долю небесной полусферы, видимой в данной точке. Изображения, получаемые путем расчета данных характеристик по ЦМР, напоминают отмывку, выполненную при вертикальном положении источника освещения, однако отличаются существенно более высокой детализацией.

Еще одной оригинальной разработкой является способ «красного изображения» рельефа, или RRIM – Red Relief Image Map, предложенный японскими учеными [12]. Изображение комбинирует показатель топографической открытости и уклона поверхности (рис. 3, цв. вкл.). Открытость оформляется в монохромной градиентной шкале возрастающей яркости от черного к белому цвету. Уклон – в шкале возрастающей насыщенности от серого к красному. Затем изображения совмещаются. Преимуществом данного способа является независимость от направления источников освещения, наглядное выделение как мелких, так и крупных форм рельефа, дифференциация положительных и отрицательных форм.

К условным недостаткам метода можно отнести его графическую резкость, он избыточно контрастен для использования на общегеографических картах, более оптимально применять его как тематический способ изображения рельефа. С. Кошель и О. Михалёв применили обе техники для визуализации рельефа морского дна [14]. Полученные результаты продемонстрировали высокую схожесть изображений, при этом топографическая открытость дает более детальное представление поверхности.

Следует также отметить и нетрадиционные области применения светотеневого изображения рельефа. Так, например, предложено использовать отмывку для создания так называемых освещенных картограмм, в которых административно-территориальное деление (АТД) трактуется как ступенчатый рельеф, а в качестве отметки высоты в каждой единице выступает значение показателя [16]. Длина тени, отбрасываемой территориальной единицей, пропорциональна этому значению. Данный прием позволяет сделать изображение социально-экономических показателей по сетке АТД более наглядным и пластичным.

Непрерывная цветовая окраска рельефа. Под непрерывной цветовой окраской рельефа понимается его изображение полутоновыми градиентами, в которых цвета плавно переходят из одного в другой, без разделения на слои, присущего гипсометрическому способу. При этом цвет может зависеть не только от высоты, но также и от экспозиции, освещенности и других локальных характеристик.

К методам цветовой окраски рельефа можно отнести автоматизированный подход, разработанный швейцарской картографической школой [17]. В основе данного метода лежит построение двумерной цветовой шкалы, в которой ось X отвечает за освещенность, ось Y – за высоту. Данная цветовая шкала восстанавливается путем интерполяции по контрольным точкам, указанным пользователем на карте. Для каждой из точек пользователь выбирает цвет. Полученное изображение традиционно оформляется в желто-зеленых тонах с одновременным градиентным переходом цвета от освещенных склонов к затененным и от долин к вершинам положительных форм рельефа. Аналогичен ему более формальный подход [18].

Другая методика, которая может быть отнесена к данной категории, – это так называемые смешанные гипсометрические шкалы (Cross-Blended Hypsometric Scales), изначально предложенные американским картографом Т. Паттерсоном [19–21]. В данной методике цветовой ряд в шкале зависит от природно-климатической зоны. Предложено использовать 4 цветовых шкалы, которые соответствуют следующим типам климата: теплый гумидный, холодный гумидный, аридный и полярный (рис. 4, цв. вкл.). Выделены зоны, соответствующие данным типам климата, внутри каждой зоны используется свой тип шкалы, а вблизи границы зон происходит плавное смешение цветов. Полученные карты наглядны, особенно в обучающих целях, поскольку не создают ложного впечатления наличия зеленой растительности в аридных и полярных областях, присущего традиционным шкалам.

Также к методам непрерывной цветовой окраски можно отнести способ цветной аналитической отмыв-

ки, предложенный и реализованный С.М. Кошелем [4]. В данном методе используется три источника освещения – красный, синий и зеленый, в соответствии с моделью RGB. Каждый источник освещения в общем случае имеет свой азимут и высоту, а полученная интенсивность освещения подается в свой цветовой канал. Результирующее изображение получается путем синтеза трех цветовых каналов и создает художественный эффект закатного освещения.

Гипсометрическая окраска рельефа. Гипсометрический способ относится к классическим методам изображения рельефа на картах. Наибольшие трудности при использовании гипсометрического метода в настоящий момент связаны с автоматизированной генерализацией ЦМР, автоматическим выбором оптимальной классификации высот, а также разработкой шкал для мультимасштабных гипсометрических карт.

Поскольку гипсометрический способ представляет собой по сути способ горизонталей (изолиний) с сплошной окраской, существует два подхода к генерализации гипсометрических изображений – на основе горизонталей или исходной ЦМР [2, 22]. Первый подход наследует традиционные принципы генерализации [23, 24]. Компьютерная обработка горизонталей, однако, влечет за собой целый ряд сложностей, которые связаны с необходимостью контроля топологических отношений между линиями, алгоритмической трудностью выделения структурных линий, а также крайним неудобством изменения сечения рельефа. Более эффективными показали себя методы построения гипсометрических изображений, основанные на генерализации ЦМР, в которых горизонталы участвуют лишь на стадии визуализации.

В работах последнего десятилетия было уделено большое внимание объектно-ориентированной генерализации ЦМР, которая лежит в основе мелкомасштабного гипсометрического метода [25–28]. В каждом из предложенных алгоритмов генерализации используется идея о генетической связи между отрицательными формами рельефа и сетью тальвегов, которая может быть выделена по ЦМР автоматически. Каждый тальвег однозначно ассоциируется с отрицательной формой рельефа, которая может быть удалена, сохранена или преувеличена в процессе генерализации. В работах [25, 27] используется иерархическая классификация тальвегов по методу Стралера, далее тальвеги низкого порядка удаляются, а соответствующие им отрицательные формы рельефа «заполняются» путем триангуляции по водораздельным линиям. К недостаткам данных методов можно отнести значительную условность отбора тальвегов по порядку (без учета их длины и значимости), а также недостаточное внимание к генерализации

сохраняемых элементов земной поверхности – крупных положительных и отрицательных форм рельефа, которые требуют преувеличения и одновременно сохранения поперечного профиля.

Данные недостатки удалось частично преодолеть в алгоритме, где исходная ЦМР подвергалась параллельной обработке методом скользящего окна двумя фильтрами: нижней и верхней квантили, – которые преувеличивают в размере соответственно отрицательные и положительные формы рельефа и формируют две производные ЦМР [26]. Результирующая модель получается путем вычисления взвешенного среднего данных моделей, в котором модель нижней квантили имеет больший вес вблизи тальвегов, а верхней квантили – вблизи водоразделов. Для выделения генерализованной сети тальвегов авторами был разработан простой и элегантный алгоритм, который основан не на фильтрации ячеек ЦМР по значению площади водосбора, а на трассировке тальвегов вверх по течению, что позволило добавить критерий длины водотока. Алгоритм позволяет сохранять положение верховьев тальвегов, отсекая при этом тальвеги, короткие по длине. Полученные путем применения данной методики ЦМР имеют удовлетворительный вид, в целом пригодный для мелкомасштабного гипсометрического картографирования. К недостаткам данного алгоритма можно отнести плохое согласование горизонталей на участках, где применяется фильтр верхней квантили. Удаление отрицательных форм рельефа в силу применения фильтрации происходит не полностью, что приводит к несколько хаотичной извилистости горизонталей.

Недостаток согласования горизонталей был исправлен автором данной статьи [1, 28]. Была предложена комплексная методика мультимасштабного гипсометрического картографирования рельефа, включающая как метод генерализации ЦМР, так и метод проектирования мультимасштабных гипсометрических шкал. Методика генерализации ЦМР основана на восстановлении генерализованной поверхности по основным структурным линиям, которые включают генерализованную сеть тальвегов и водоразделов, а также водоразделы второго-третьего порядка, которые соответствуют удаляемым формам рельефа. Генерализация сети тальвегов реализована алгоритмом Леонович – Йенни [26], а расширение долин и междуречий, необходимое для мелкомасштабного изображения рельефа, выполнено путем обработки результирующей ЦМР фильтрами максимума и минимума с последующей взвешенной комбинацией полученных растров. Полученные данным методом ЦМР (рис. 5, цв. вкл.) отличаются выделением основных форм рельефа и согласованностью горизонталей, что отвечает принципам мелкомасштабного изображе-

ния рельефа. Предложенная методика проектирования цветовысотных шкал для мультимасштабных гипсометрических карт в дальнейшем получила развитие: данные шкалы представляют собой двумерную дискретную цветовую матрицу, в которой по горизонтальной оси идет масштаб, а по вертикальной оси – гипсометрический уровень [2, 29]. Цветовая шкала детализируется к более крупным масштабам и содержит 8 масштабных уровней – от 1:200000 до 1:5000000 [2].

Перспективное изображение рельефа. К перспективным методам можно отнести псевдоперспективное или наклонно-плановое (*plan oblique*) изображение и собственно перспективное, в частности, панорамное изображение рельефа. Оба подхода основаны на применении особых проекций ЦМР на плоскость изображения.

Методика наклонно-планового изображения изначально была предложена Т. Паттерсоном [30] и далее автоматизирована и опробована в работах [31–33]. Интерактивная веб-система построения подобных изображений доступна на сайте [34]. В данном методе вершины форм рельефа смещаются по горизонтали в направлении от наблюдателя (к верхнему краю изображения), в результате чего формы рельефа визуально вытягиваются по высоте, перекрывая находящееся за ними пространство, что создает ощущение перспективы (рис. 6, цв. вкл.). Вытягивание реализуется путем проектирования поверхности параллельными лучами, наклонными по отношению к плоскости изображения. Чем сильнее наклон, тем ярче выражен эффект перспективы. Дальнейшим развитием данного метода стала разработка интерактивного исследовательского картографического интерфейса, в котором пользователь может управлять эффектом перспективы, непосредственно смещая выбранную точку земной поверхности с помощью компьютерной мыши или на тактильном экране, в том числе во время панорамирования карты [35].

Помимо псевдоперспективных изображений рельефа, в последнее десятилетие получила активное развитие автоматизация классического панорамного изображения [36, 37], а также панорама нового типа – мультиперспективных [38, 39], в которых базовая плоскость модели трансформируется в криволинейную и удаленные территории приподнимаются в верхней части экрана, в то время как ближние территории занимают нижнюю часть панорамы. Это позволяет рационально расходовать видимое пространство и наблюдать как ближние, так и удаленные территории.

Работа над перспективными изображениями в том числе стала мотивацией для разработки алгоритма генерализации ЦМР [40]. Данный алгоритм основан на вейвлет-преобразовании исходной ЦМР и дальнейшей

фильтрации частот. В отличие от предыдущих работ, связанных с частотной фильтрацией ЦМР, новый подход позволил использовать кривизну поверхности в качестве ограничивающего условия. Это позволяет в значительной степени сохранять выраженность и характер структурных линий на поверхности (рис. 7). Однако, данный метод эффективно справляется с генерализацией детальных ЦМР в крупных масштабах картографирования, но не пригоден для генерализации мелкомасштабных изображений.

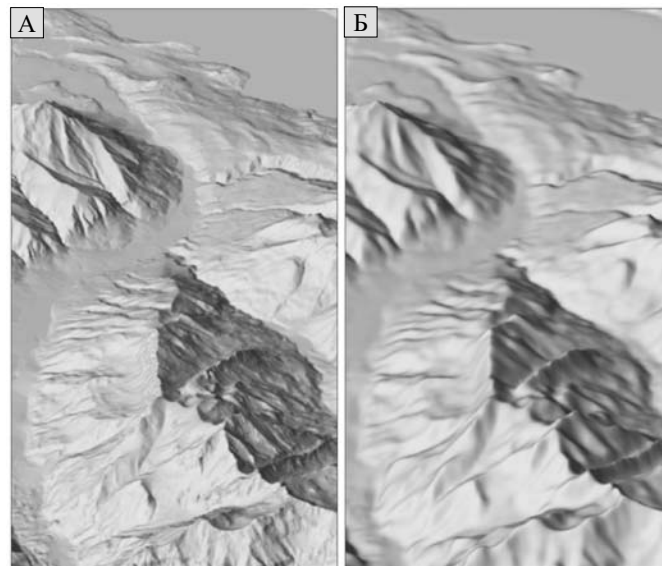


Рис. 7. Генерализация ЦМР для крупно- и среднемасштабного картографирования и построения панорамных (перспективных) изображений с использованием вейвлет-преобразования [40]
А – исходная ЦМР, Б – ЦМР по результатам генерализации с учетом кривизны поверхности

Нефотореалистичное изображение рельефа. Нефотореалистичный рендеринг (НФР) – относительно молодое направление компьютерной графики, в область интересов которого входит имитация техники рукописной иллюстрации: штрихового рисунка, гравюры, акварели и т.д. [41]. В области картографического изображения рельефа НФР применяется для решения множества задач [42], в том числе для автоматизации способа освещенных горизонталей [43, 44], наклонных горизонталей [44], штрихов крутизны [45–48], штриховки рельефа [49–52], силуэтно-профильного изображения [53–58], имитации штрихового изображения скал [59–62] и осыпей [63]. Данные способы изображения рельефа являются наиболее сложными для автоматизации, поскольку содержат большое количество графических элементов, часто не имеющих регулярной расстановки. Тем не менее за последние 15 лет достигнут значительный прогресс в данной области.

Так, например, на основе построения линий тока впервые полностью автоматизирован классический способ штрихов (рис. 8), который активно использовался при изображении рельефа на топографических картах в первой половине XIX в. [47, 48]. Помимо этого, предложена морфометрическая модификация данного метода, основанная на изменении цвета штрихов в зависимости от экспозиции склона (рис. 9, цв. вкл.). Полученные «карты штрихов крутизны и экспозиции» совмещают в себе свойства карт линий тока, углов наклона и экспозиций склона, позволяют производить комплексную визуальную оценку рельефа по данным характеристикам. Кроме того, оценка крутизны склонов на основе длины штрихов предпочтительна для людей с нарушениями цветового зрения.

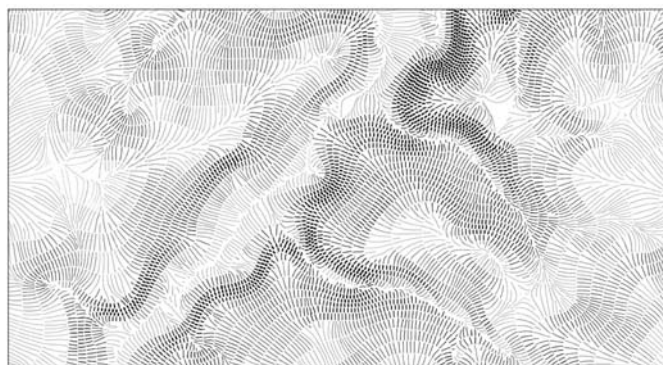


Рис. 8. Штрихи крутизны, полученные автоматически по ЦМР [48]

Американский геолог и картограф Патрик Кеннелли предложил использовать ориентированные полутоновые текстуры для создания отмывки на основе заданных шаблонов [50]. При этом ориентация шаблона соответствует экспозиции склона (параллельно или перпендикулярно), а плотность его текстуры зависит от освещенности поверхности. Спустя десятилетие данная идея получила развитие при автоматизации изображений с использованием перекрестной штриховки [51]. В данной методике изображение формируется двумя сериями параллельных линий, толщина которых зависит от освещенности (рис. 10). Линии отсекаются на ярко освещенных участках по пороговому значению яркости. Подобные изображения, не обладая высокой точностью, выглядят достаточно эффектно и могут быть использованы в иллюстративных целях.

Работы Исследовательской группы картографических информационных систем (CISRG) из Университета г. Халл (Великобритания) позволили воссоздать на основе ЦМР перспективный штриховой образ рельефа средствами НФР (рис. 11). Эксперименты также показали, что извлечение штриховых элементов в зависимо-

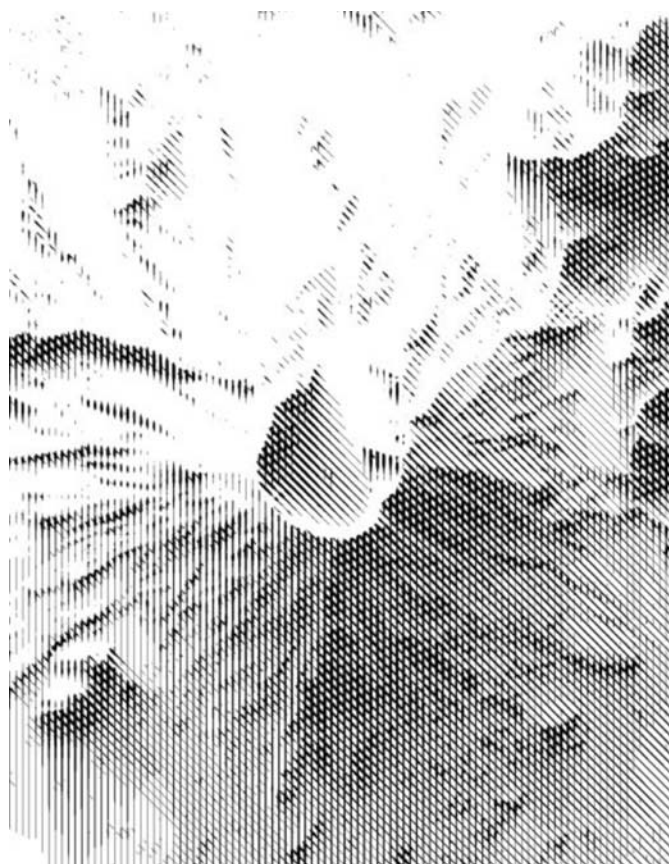


Рис. 10. Изображение рельефа методом перекрестной штриховки [51]

ти от подробности ЦМР позволяет вычленять линейные элементы форм рельефа разного порядка, с различной степенью генерализации, что может быть использовано в геоморфологических исследованиях.

Рендеринг силуэтно-профильного эскиза может быть осуществлен с использованием одного из двух подходов, основанных на интерпретации изображения (image-based) или непосредственно самой модели (model-based) [53]. Методы первой группы подходят для создания картографических анимаций [54]. Вторая группа методов оказалась эффективной при рендеринге статических сцен [55]. Более поздние примеры использования силуэтно-профильных методов можно найти в работах [56–58], в которых акцент сделан на интерактивности и анимации.

Отдельное направление представляет собой автоматизация изображения скал и осыпей на топографических картах. Основываясь на принципах швейцарской школы рисовки скал [61], был предложен оригинальный алгоритм отрисовки скал в автоматическом режиме [62]. Важным достижением метода является практически полная автоматизация изображения путем

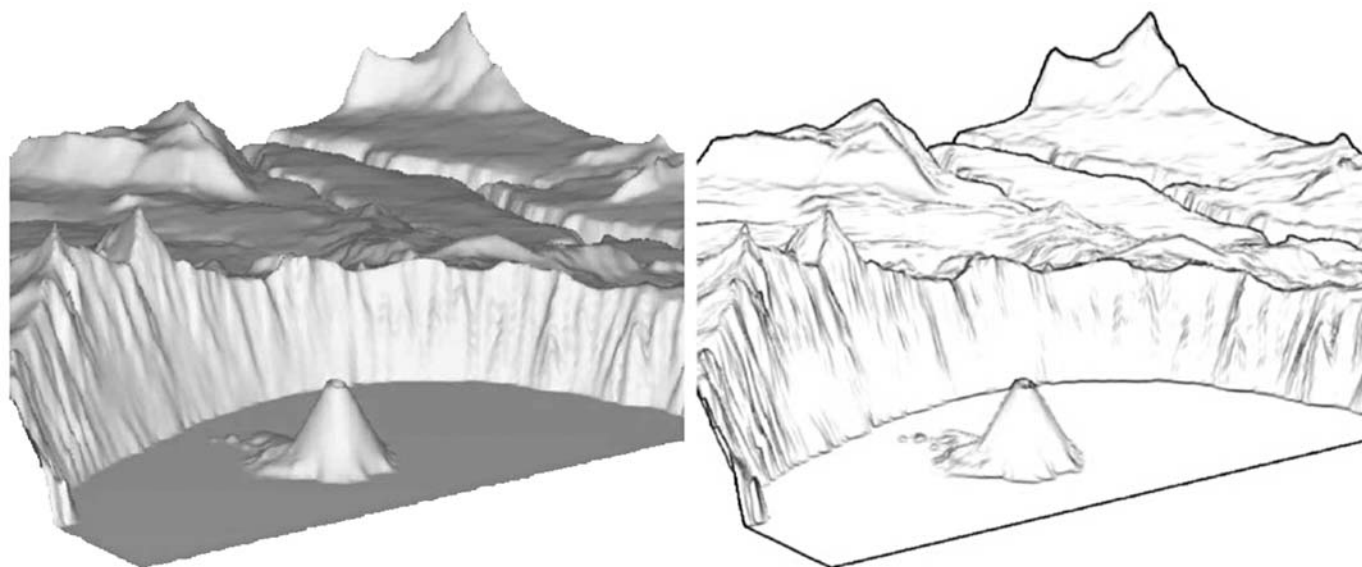


Рис. 11. Силуэтно-профильный эскиз местности, полученный автоматически по ЦМР [54]

трассировки изолиний с плотным сечением в пределах области, обозначающей скальный рельеф. Прерывание изолиний осуществляется вблизи структурных линий, обозначающих перегибы склона. Для выделения структурных линий и построения изолиний используется ЦМР, обработанная фильтром векторной генерализации, который производит осреднение значений высот вдоль линий тока (а не в пределах плавающего окна, как это принято в стандартном подходе к обработке ЦМР). Структурные линии выделяются с помощью детектора границ по светотеневому изображению ЦМР, совмещенному с изображением кривизны поверхности.

Картографирование осыпей может быть также реализовано на основе светотеневого изображения рельефа [63]. В этом случае область построения изображения осыпи покрывается гранулами случайной формы, расставленными методом размытия Флойда – Штейнберга [41]. Плотность расстановки гранул зависит от освещенности поверхности – чем темнее, тем плотнее расстановка. Размер гранул, в свою очередь, зависит от высотного положения: чем ниже, тем крупнее гранулы, что соответствует физическому распределению материала осыпей по высоте (крупные и тяжелые валуны скатываются ниже). Получаемое таким образом изображение (рис. 12, цв. вкл.) не уступает по качеству рукописной работе и уже используется для создания топографических карт Швейцарии.

Программное обеспечение для автоматизации способов изображения и генерализации рельефа на картах. Средства изображения рельефа в настоящий момент входят в состав стандартной комплектации наиболее популярных пакетов для работы с простран-

ственными данными, таких, как Esri ArcGIS [64], Pitney Bowes MapInfo [65] (модуль Vertical Mapper), QGIS [66] (модуль «Морфометрический анализ»), SAGA [67], Golden Software Surfer [68]. Имеются необходимые библиотеки для сред разработки Matlab [69] и R [70]. Стандартные возможности данных пакетов достаточно тривиальны: вычисление аналитической отмывки, построение изолиний с послойной окраской, плоская и трехмерная визуализация, вычисление базовых морфометрических коэффициентов. В то же время данные программные средства обладают широкими возможностями пользовательской автоматизации – написания дополнительных модулей и расширений. В частности, следует отметить бесплатные модули ArcGIS – Terrain Tools [71, 72] и DEM Generalization Toolbox [73] для построения изображений и генерализации ЦМР соответственно. Модуль Terrain Tools реализует целый ряд способов изображения, рассмотренных в настоящей статье, включая отмывку при разных моделях освещения, различные варианты штриховок, освещенные горизонталы и т. д. В свою очередь, модуль DEM Generalization Toolbox предназначен для генерализации цифровых моделей рельефа в целях мелкомасштабного картографирования и автоматизирует рабочие процессы, изложенные в работе [28].

Существует также ряд специализированных средств для работы с цифровыми моделями рельефа. Особо следует выделить вклад в данную область Бернхарда Йенни и рабочих групп под его руководством в нескольких университетах (ETH Zurich; Oregon State University; RMIT University, Melbourne, Australia). Разработанные программы доступны на сайте TerrainCartography.com

[74] и включают *Terrain Sculptor* (генерализация мелко-масштабной отмывки), *Terrain Bender* (проецирование ЦМР для создания панорам), *Scree Painter* (автоматизированная отрисовка осыпей), *Terrain Equalizer* (генерализация детальных ЦМР), *Pyramid Shader* (визуализация и генерализация ЦМР). Все данные программы доступны для использования и модификации, распространяются по лицензии с открытым исходным кодом.

Заключение. За последние полтора десятилетия автоматизация способов изображения рельефа на картах достигла значительных успехов. Впервые получены высокохудожественные образцы перспективного и нефотореалистичного изображения рельефа, достигнут значительный прогресс в области светотеневого, цветового и гипсометрического изображения. Развитие средств автоматизации вскрыло недостатки существующих моделей рельефа глобального охвата, а также методов генерализации ЦМР. В ряде исследований была детально проработана и формализована в виде алгоритмов специфика генерализации рельефа для каждого способа изображения и масштабного диапазона картографирования. Это, в частности, позволило впервые получить светотеневые и гипсометрические изображения рельефа в мелких масштабах, сопоставимые по морфологическому правдоподобию и наглядности с рукописными образцами. Впервые разработаны принципы мультимасштабного картографирования рельефа и специализированные цветовысотные шкалы.

Особо следует отметить появление интерактивных программных средств для исследования рельефа. Автоматизация способов картографического изображения рельефа тесным образом соприкасается с компьютерной графикой, впитывает и применяет ее новейшие достижения, которые облегчают работу со сложными и тяжеловесными массивами высотных данных ЦМР. Разработка исследовательских картографических интерфейсов, в которых пользователь мог бы интерактивным образом менять параметры изображения, изучать морфометрические параметры рельефа путем различных манипуляций в интерфейсе, в том числе посредством тактильных жестов, – одно из наиболее востребованных направлений развития цифрового моделирования рельефа.

Перспективы развития картографических приложений ЦМР также связаны с разработкой средств генерализации ЦМР, обеспечивающих высокое морфологическое правдоподобие изображений в режиме реального времени. В настоящий момент подобные алгоритмы, основанные на структурных линиях рельефа, отличаются довольно низким быстродействием и требуют предварительной обработки модели.

Современное развитие средств визуализации ЦМР позволяет использовать их более интенсивно в учебном

процессе как высшей, так и средней школах: при знакомстве с рельефом, его характеристиками и функциями в географической оболочке.

Благодарность. Исследование выполнено по гранту Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук МК-4829.2016.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самсонов Т. Мультимасштабное картографирование рельефа: общегеографические и гипсометрические карты. LAP Lambert Academic Publishing Saarbrücken. 2011. С. 208.
2. Samsonov T. and Jenny B. Small-scale and multi-scale relief mapping // *Mountain Cartography: 16 Years ICA Commission on Mountain Cartography*. Vol. 21 of Wiener Schriften zur Geographie und Kartographie. University of Vienna. Vienna, Austria, 2015. P. 77–86.
3. Jenny B. An interactive approach to analytical relief shading // *Cartographica*. 2001. Vol. 38. No. 1–2. P. 67–75. doi: 10.3138/F722-0825-3142-HW05.
4. Кошель С.М. Теоретическое обоснование структуры и функций блока моделирования рельефа в ГИС: Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2004. 119 с.
5. Kennelly P. and Stewart A. A uniform sky illumination model to enhance shading of terrain and urban areas // *Cartography and Geographic Information Science*. 2006. Vol. 33. No. 1. P. 21–36. doi: 10.1559/152304006777323118.
6. Kennelly P. and Stewart J. General Sky Models for Illuminating Terrains // *International Journal of Geographical Information Science*. 2013. Vol. 28. No. 2. P. 383–406.
7. Marston B.E. and Jenny B. Improving the representation of major landforms in analytical relief shading // *International Journal of Geographical Information Science*. 2015. Vol. 29. No. 7. P. 1144–1165. DOI: 10.1080/13658816.2015.1009911.
8. Veronesi F. and Hurni L. Changing the Light Azimuth in Shaded Relief Representation by Clustering Aspect // *The Cartographic Journal*. 2014. Vol. 51. No. 4. P. 291–300. doi: 10.1179/1743277414Y.0000000100.
9. Veronesi F. and Hurni L. A GIS tool to increase the visual quality of relief shading by automatically changing the light direction // *Computers & Geosciences*. Vol. 74. January 2015. P. 121–127. ISSN 0098-3004. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2014.10.015>.
10. Kennelly P.J. Terrain maps displaying hill-shading with curvature // *Geomorphology*. 2008. Vol. 102. P. 567–577. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.05.046.
11. Yokoyama R., Shirasawa M., and Pike R.J. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2002. Vol. 68. No. 3. P. 257–265.

12. Chiba T., Kaneta S., and Suzuki Y. Red Relief Image Map: New Visualization Method For Three Dimensional Data // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing. 2008. Vol. XXXVII. Part B2. P. 1071–1076.
13. Zakšek K., Oštir K., and Kokalj Ž. Sky-view factor as a relief visualization technique // Remote Sensing. 2011. Vol. 3. No. 2. P. 398–415.
14. Koshel S. and Mikhalyov O. New approaches in cartographic relief representation with morphometric variables // In Proceedings of 26th International Cartographic Conference, August 25–30, 2013. Dresden, Germany. P. 743–744.
15. Leonowicz A.M., Jenny B. and Hurni L. Automated reduction of visual complexity in small-scale relief shading // Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization. 2010. Vol. 45. P. 64–74. DOI: 10.3138/carto.45.1.64.
16. Stewart J. and Kennelly P. Illuminated Choropleth Maps // Annals of the Association of American Geographers. 2010. Vol. 100. No. 3. P. 513–534.
17. Jenny B. and Hurni L. Swiss-style colour relief shading modulated by elevation and by exposure to illumination // The Cartographic Journal. 2006. Vol. 43. No. 3. P. 198–207. doi: 10.1179/000870406X158164.
18. Kennelly P. and Kimerling A.J. Hillshading of terrain using layer tints with aspect-variant luminosity // Cartography and Geographic Information Science. 2004. Vol. 31. No. 2. P. 67–77.
19. Patterson T. Using cross-blended hypsometric tints for generalized environmental mapping. 2004. URL: <http://www.shadedrelief.com/hypso/hypso.html> (дата обращения: 06.11.2015).
20. Patterson T. and Jenny B. The development and rationale of cross-blended hypsometric tints // Cartographic Perspectives. 2011. Vol. 69. P. 31–46. doi: 10.14714/CP69.20.
21. Patterson T. and Jenny B. Evaluating cross-blended hypsometric tints: a user study in the United States, Switzerland, and Germany // Cartographic Perspectives. 2014. Vol. 75. P. 5–15. doi: 10.14714/CP75.578.
22. Guilbert E., Gaffuri J., and Jenny B. Terrain generalization // Abstracting Geographic Information in a Data Rich World. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin; Heidelberg; New-York: Springer. P. 227–258.
23. Zhang C., Pan M., Wu H., and Xu H. Study on simplification of contour lines preserving topological coherence // Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis. 2007. Vol. 43. No. 2. P. 216–222.
24. Ai T. The drainage network extraction from contour lines for contour line generalization // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. 2007. Vol. 62. P. 93–103.
25. Jordan G. Adaptive smoothing of valleys in DEMs using TIN interpolation from ridge elevations: an application to morphotectonic aspect analysis // Computers & Geosciences. 2007. Vol. 33. P. 573–585.
26. Leonowicz A.M., Jenny B., and Hurni L. Automatic generation of hypsometric layers for small-scale maps // Computers and Geosciences. 2009. Vol. 35. P. 2074–2083. doi: 10.1016/j.cageo.2008.12.012.
27. Ai T. and Li J. A DEM generalization by minor valley branch detection and grid filling // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2010. Vol. 65. No. 2. P.198–207.
28. Samsonov T. Multiscale hypsometric mapping // Advances in Cartography and GIScience. Vol. 1. Springer Berlin Heidelberg. Berlin; Heidelberg. 2011. P. 497–520. doi: 10.1007/978-3-642-19143-5_28.
29. Халиуллина А., Самсонов Т. Мультимасштабная гипсометрическая карта России // Геоморфология и картография // Мат-лы XXXIII пленума Геоморфологической комиссии РАН. Саратов: Изд-во СГУ, 2013. С. 106–110.
30. Patterson T. Creating 3D relief on 2D planimetric maps. 2004. URL: <http://www.shadedrelief.com/planimetric/plan.html> (дата обращения: 06.11.2015).
31. Jenny B. and Patterson T. Introducing plan oblique relief // Cartographic Perspectives. 2007. Vol. 57. P. 21–40. doi: 10.14714/CP57.279.
32. Patterson T. Mountains unseen: developing a relief map of the Hawaiian seafloor // Cartographic Perspectives. 2013. Vol. 76. P. 5–18. doi: 10.14714/CP76.859.
33. Jenny B., Buddeberg J., Hoarau C., and Liem J. Plan oblique relief for web maps // Cartography and Geographic Information Science. 2015. Vol. 42. No. 5. P. 410–418. doi: 10.1080/15230406.2015.1015169.
34. Buddeberg J., Jenny B., and Liem J. Plan Oblique Europe. 2014. URL: <http://cartography.oregonstate.edu/tiles/PlanObliqueEurope/> (дата обращения: 05.11.2015).
35. Willett W., Jenny B., Isenberg T., and Dragicevic P. Lightweight Relief Shearing for Enhanced Terrain Perception on Interactive Maps // Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI, 15). ACM. New York, NY, USA. 2015. P. 3563–3572. doi: 10.1145/2702123.2702172.
36. Jenny H., Jenny B., Cartwright W.E., and Hurni L. Interactive local terrain deformation inspired by hand-painted panoramas // The Cartographic Journal. 2011. Vol. 48. No. 1. P. 11–20.
37. Jenny H. Interactive local and global landscape deformation for panoramic map creation // gis. SCIENCE – Journal for Geoinformatics. Wichmann. Cover Feature. 2013. Vol. 2. P. 63–69.
38. Pasewaldt S., Trapp M., and Düllner J. Multiscale Visualization of 3D Geovirtual Environments Using View-Dependent Multi-Perspective Views. Edited by Václav Skala // Journal of WSCG 19 (3). UNION Agency – Science Press, 2011. P. 111–18.
39. Pasewaldt S., Semmo A., Trapp M., and Düllner J. Multi-Perspective 3D Panoramas // International Journal of Geographical Information Science. 2014. Vol. 28. No. 10. P. 2030–2051. doi:10.1080/13658816.2014.922686.

40. Jenny B., Jenny H., and Hurni L. Terrain generalization with multi-scale pyramids constrained by curvature // *Cartography and Geographic Information Science*. 2011. Vol. 38. No. 1. P. 110–116. doi:10.1559/15230406382110.
41. Строзомт Т., Шлехтвег Ш. Нефотореалистичная компьютерная графика: моделирование, рендеринг, анимация: Пер. с англ. М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2005. 416 с.
42. Kennelly P.J. and Kimerling A.J. Non-photorealistic rendering and terrain representation // *Cartographic Perspectives*. 2006. Vol. 54. P. 35–54.
43. Kennelly P.J. and Kimerling A.J. Modifications of Tanaka's Illuminated Contour Method // *Cartography and Geographic Information Science*. 2001. Vol. 28. No. 2. P. 111–123.
44. Самсонов Т. Передовые технологии и методика изображения рельефа для туристических карт // *Картография – туризму* / Мат-лы науч.-практ. конференции. (Санкт-Петербург, 22–24 сентября 2008 г.). СПб.: ЗАО «Карта», 2008. С. 98–106.
45. Regnauld N., McKaness W., and Hart G. Automated Relief Representation for Visualisation of Archaeological Monuments and Anthropogenic Forms // *Computers, Environment and Urban Systems*. 2002. Vol. 26. No. 2–3. P. 219–239.
46. Buchin K., Costa Sousa M., Düllner J., Samavati F., and Walther M. Illustrating terrains using direction of slope and lighting // *Proc. 4th ICA Mountain Cartography Workshop*. 2004. P. 259–269.
47. Самсонов Т. Алгоритм автоматизированного изображения рельефа способом штрихов крутизны // *Вестн. МГУ. Сер. 5. География*. 2008. № 3. С. 49–54.
48. Samsonov T. Morphometric mapping of topography by flowline hachures // *Cartographic Journal*. 2014. Vol. 51. No. 1. P. 63–74. doi: 10.1179/1743277413Y.0000000036.
49. Kennelly P.J. and Kimerling A.J. Desktop hachure maps from digital elevation models // *Cartographic Perspectives*. 2000. P. 78–81.
50. Kennelly P.J. Hillshading with oriented halftones // *Cartographic Perspectives*. 2002. Vol. 43. P. 25–42.
51. Kennelly P. Cross-hatched Shadow Line Maps // *The Cartographic Journal*. 2012. Vol. 49. No. 2. P. 135–142. doi: 10.1179/1743277412Y.0000000005.
52. Field K. and Kennelly P. Terrain mapping beyond the defaults // *Proceedings of XXVII International Cartographic Conference*. Rio de Janeiro, Brazil, 23–28 August 2015. 1 p.
53. Che Mat R. and Visvalingam M. Effectiveness of Silhouette Rendering Algorithms in Terrain Visualization // *Proceeding National Conference on Computer Graphics and Multimedia (CoGRAMM)*. Melaka, Malaysia, October 2002.
54. Lesage P.-L. and Visvalingam M. Towards sketch-based exploration of terrain // *Computers & Graphics*. 2002. Vol. 26. P. 309–328.
55. Whelan J.C. and Visvalingam M. Formulated Silhouettes for Sketching Terrain // *Proceedings of Theory and Practice of Computer Graphics*, 2003. Birmingham, UK, 3–5 June 2003. P. 90–97.
56. Mower J.E. Automating Landscape Illustration with Pen and Ink Style Rendering // *Cartography and Geographic Information Science*. 2009. Vol. 36. No. 1. P. 117–128.
57. Mower J.E. Concurrent Drainage Network Rendering for Automated Pen and Ink Style Landscape Illustration // *Transactions in GIS*. 2015. doi: 10.1111/tgis.12141.
58. Mower J.E. Fast Image-Space Silhouette Extraction for Non-Photorealistic Landscape Rendering // *Transactions in GIS*. 2015. Vol. 19. Iss. 5. P. 678–693. doi: 10.1111/tgis.12118.
59. Hurni L., Dahinden T., and Hutzler T. Digital Cliff Drawing for Topographic Maps: Traditional Representations by Means of New Technologies // *Cartographica*. Summer. 2001. P. 55–65.
60. Dahinden T. and Hurni L. Development and quality assessment of analytical rock drawings // *Proceedings of ICA*. 2007. 15 p.
61. Jenny B., Gilgen J., Geisthuvel R., Marston B., and Hurni L. Design principles for Swiss-style rock drawing // *The Cartographic Journal*. 2014. Vol. 51. No. 4. P. 360–371.
62. Geisthuvel R. and Hurni L. Automatic rock depiction via relief shading // *Proceedings of XXVII International Cartographic Conference*. Rio de Janeiro, Brazil, 23–28 August. 2015. 8 p.
63. Jenny B., Hutzler E., and Hurni L. Scree representation on topographic maps // *The Cartographic Journal*. 2010. Vol. 47. No. 2. P. 141–149. doi:10.1179/000870409X12525737905006.
64. ArcGIS for Desktop. URL: <http://www.esri.com/software/arcgis/arcgis-for-desktop/> (дата обращения: 04.11.2015).
65. MapInfo Vertical Mapper. URL: <http://www.mapinfo.com/product/mapinfo-vertical-mapper/> (дата обращения: 04.11.2015).
66. QGIS. URL: <http://qgis.org/> (дата обращения: 04.11.2015).
67. SAGA GIS. URL: <http://www.saga-gis.org/> (дата обращения: 04.11.2015).
68. Golden Software Surfer. URL: <http://www.goldensoftware.com/products/surfer/> (дата обращения: 04.11.2015).
69. Matlab Mapping Toolbox. URL: <http://www.mathworks.com/products/mapping/> (дата обращения: 04.11.2015).
70. The R Project for Statistical Computing. URL: <http://www.r-project.org/> (дата обращения: 04.11.2015).
71. Field K. (2015). Take your terrain mapping to new heights // *Esri ArcGIS blog*: [URL: <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2015/05/21/take-your-terrain-mapping-to-new-heights/>].
72. Terrain Tools Sample Beta 1.0. URL: <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=4b2ea7c5f87d476a8849c804b81667aa> (дата обращения: 04.11.2015).
73. DEM Generalization Toolbox 1.0. URL: <http://github.com/tsamsonov/Small-Scale-Terrain-Generalization/> (дата обращения: 04.11.2015).
74. Terrain Cartography. URL: <http://terraincartography.com/> (дата обращения: 04.11.2015).