

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА**

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**КОШЕЛЬ Сергей Михайлович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И ФУНКЦИЙ  
БЛОКА МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА В ГИС**

**25.00.35. - геоинформатика**

**Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата географических наук**

**Научный руководитель:  
доктор географических наук  
И. К. Лурье**

**Москва - 2004 г.**

## Оглавление

Введение.....	2
Глава 1. Современное состояние и задачи создания и использования ЦМР в ГИС и геоинформационном картографировании.....	6
1.1. Роль ЦМР в решении географических задач на базе ГИС. Способы представления рельефа земной поверхности в цифровой форме. ....	8
1.2. Методы моделирования рельефа по данным в точках. ....	11
1.2.1. Средневзвешенная интерполяция и метод Шепарда.....	14
1.2.2. Интерполяция и аппроксимация с помощью радиальных базисных функций, кригинг.....	16
1.2.3. Интерполяция на основе триангуляции.....	22
1.2.4. Интерполяция и аппроксимация на основе иерархических В-сплайнов.....	24
1.3. Методы моделирования рельефа по изолиниям. ....	25
1.4. Визуализация цифровых моделей рельефа, использование в научных исследованиях и автоматизированной картографии. ....	32
1.5. Программные средства моделирования и анализа рельефа.....	35
Глава 2. Новые алгоритмы и методики создания и использования цифровых моделей рельефа .....	38
2.1. Алгоритм создания ЦМР по горизонталям, оцифрованным с топографических карт.....	38
2.2. Вычисление координат изолиний по сеточной ЦМР .....	45
2.3. Автоматизированное создание карт градиентного поля.....	59
2.4. Автоматизированное создание карт линий тока.....	65
Глава 3. Функции и структура блока моделирования, отображения и анализа рельефа в ГИС, его использование в географических исследованиях и автоматизированной картографии.....	71
3.1. Функции и структура программного комплекса моделирования и анализа рельефа в ГИС .....	71
3.2. Методика и компьютерная технология создания карт с использованием светотеневой пластики.....	76
3.3. Программная реализация, использование в практических и учебных целях.....	86
Заключение .....	91
Список литературы. ....	93
Приложения .....	105

## ВВЕДЕНИЕ

Успехи внедрения ГИС и геоинформационных методов в практику географических исследований связаны с развитием геоинформатики как науки, бурным развитием автоматизации в картографии и математико-картографического моделирования геосистем. Одна из составляющих этого научного направления - моделирование рельефа, его картографическая визуализация и анализ на основе созданных моделей.

**Актуальность** темы диссертационной работы обусловлена потребностью географических исследований в использовании данных о рельефе в цифровой форме в связи с возрастающей ролью геоинформационных технологий при решении различных задач, необходимостью повышения качества и эффективности методов создания и использования цифровых моделей рельефа (ЦМР), обеспечения достоверности создаваемых моделей.

**Цель** диссертации состоит в разработке и теоретическом обосновании структуры и функций блока ГИС, предназначенного для моделирования, отображения и анализа рельефа, а также его практического использования для обеспечения функций пространственного моделирования и анализа в ГИС.

Для достижения этой цели потребовалось решить следующие задачи:

- выполнить сравнительный анализ и систематизировать методы создания, отображения и анализа цифровых моделей рельефа, применяемые в ГИС при решении географических задач;
- теоретически обосновать оптимальный выбор методов, разработать новые алгоритмы и практические способы их реализации в ГИС для:
  - создания цифровых моделей рельефа по горизонталям, оцифрованным с топографических карт;
  - эффективного вычисления координат изолиний по ЦМР на регулярной сетке;
  - повышения достоверности определения по ЦМР производных морфометрических показателей (углы наклона, кривизна и др.) и качества автоматизированного картографирования линий тока и градиентного поля;
- разработать и апробировать учебное и научно-исследовательское про-

граммное обеспечение блока моделирования и анализа рельефа в ГИС.

Научная **новизна** работы заключается в следующем:

- выполнены теоретическое обобщение и систематизация методов создания и использования цифровых моделей рельефа, разработана структура и определены функции соответствующего блока ГИС;
- разработан новый алгоритм создания ЦМР по горизонталям, оцифрованным с топографических карт, обладающий высоким быстродействием, эффективностью, возможностью учитывать дополнительную информацию в виде объектов гидрографии и уникальной возможностью получать достоверные по высотам модели для любого типа рельефа, в том числе и практически плоского;
- разработана серия новых алгоритмов и методик их применения для:
  - вычисления координат изолиний по сеточным ЦМР;
  - вычисления производных показателей по ЦМР с заданной площадью осреднения;
  - автоматизированного картографирования градиентного поля и линий тока;
- разработан и создан оригинальный ГИС-пакет моделирования, отображения и анализа рельефа для использования как в научно-исследовательских, так и в учебных целях.

**Практическая значимость** результатов работы состоит в том, что они существенно повышают достоверность пространственного моделирования в ГИС, уровень автоматизации и эффективность географических исследований, требующих использования данных о рельефе, а также способствует обеспечению подготовки специалистов-географов, владеющих методами создания и использования цифровых моделей рельефа. Предложенные методические рекомендации облегчают практическое использование программного обеспечения, предназначенного для работы с цифровыми моделями рельефа.

**Внедрение** результатов работы. Выполненные исследования послужили основой для разработки методик и программного обеспечения для создания, отображения и анализа цифровых моделей рельефа, реализованных в работах лаборатории автоматизации кафедры картографии и геоинформатики Географического факультета МГУ по темам "Геоинформационное картографирование" и "Картографирование геосистем на основе

интеграции геоинформатики, телекоммуникации и аэрокосмического зондирования" (№ гос. регистрации 01.2.00.108036), программе «Университеты России», грантам НШ-1217.2003.5, РФФИ N02-05-64037. Разработанное программное обеспечение и методики активно используются на географическом факультете МГУ и в других университетах России (Саратовском, Казанском и др.), а также в ряде институтов и организаций (Институт Геоэкологии РАН, Зарубежводстрой, ФГУП "НИИ ВОДГЕО", СГУ и др.) при выполнении научных и практических работ, а также при подготовке кандидатских и докторских диссертаций.

Методики и программное обеспечение внедрены при создании ГИС "Черное море" в рамках международной программы по спасению Черного моря (BSEP – Black Sea Environmental Programme).

Выполненные исследования внедрены в учебный процесс – на их основе подготовлен раздел учебника "Оформление карт. Компьютерный дизайн" и организован соответствующий практикум. Теоретические основы моделирования, включая новые алгоритмы, представленные в диссертационной работе, и методические рекомендации по созданию цифровых моделей рельефа используются в курсах "Высшая математика с основами программирования" и "Геоинформационное картографирование".

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались: на региональной конференции Географического союза стран Тихоокеанского региона, Китай, 1990; на международном симпозиуме "Environmental Change and GIS" (INSEG'91), Япония, 1991; на международной конференции "Europe in Transition", Чехия, 1994; на международной конференции "GIS Frontiers in Business and Science", Чехия, 1996; на Всероссийской научно-практической конференции "Геоэкологическое картографирование", Москва, 1998; на международной конференции Inercarto-5 "ГИС для устойчивого развития территорий", Якутск, 1999.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 20 научных работ.

**Объем и структура работы.** Структура диссертационной работы определяется сформулированными выше задачами. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованной литературы, приложений. Материал работы изложен на **104** страницах машинописного текста, содержит **1** таблицу, **30** рисунков в тексте и **15** цветных рисунков в

приложении. Список литературы насчитывает **155** наименований, из них **104** на иностранных языках.

Работа выполнена в лаборатории автоматизации кафедры картографии и геоинформатики Географического факультета МГУ. Автор искренне благодарит научного руководителя, профессора кафедры картографии и геоинформатики И.К. Лурье, заведующего кафедрой, профессора А.М. Берлянта, профессора кафедры Б.А. Новаковского, профессора кафедры геоморфологии и палеогеографии Ю.Г. Симонова, всех сотрудников лаборатории и кафедры за содействие и помощь в работе.

## ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ЗАДАЧИ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦМР В ГИС И ГЕОИНФОРМАЦИОННОМ КАРТОГРАФИРОВАНИИ

В истории развития методов моделирования и анализа рельефа на основе компьютерных технологий можно выделить два основных этапа. На первом из них (конец 50-х - начало 70-х) развитие методов шло по экстенсивному пути, в сторону количественного охвата. Основной целью было автоматизировать как можно больше картографических и исследовательских видов работ, выполнявшихся ранее вручную. Попытки уделить внимание качественной стороне разрабатываемых методов упирались в слабую материально-техническую базу (небольшие объемы памяти и низкое быстродействие компьютеров, несовершенные устройства ввода-вывода графической информации и др.). Например, в получившей широкую известность статье Шепарда [130] результаты работы предложенного им алгоритма иллюстрировались (см. **Рис. 1**) с помощью программы SYMAP [135], разработанной специально для создания графических изображений на алфавитно-цифровом печатающем устройстве. Несмотря на многие недостатки, теоретические и практические основы большинства современных методов были заложены именно на этом первом этапе.

Начало второго этапа можно условно отнести к концу 70-х годов, когда оснащение компьютерами приобрело массовый характер и стали появляться относительно недорогие персональные компьютеры и рабочие станции. В это время довольно быстро произошла смена ориентации в разработках с количественной на качественную, интенсивную. Особенно бурное развитие в этом направлении происходило в 90-е годы. Это стало возможным благодаря техническому прорыву, приведшему к созданию недорогих и мощных компьютеров, а также высококачественных графических устройств.

Тенденция к качественному совершенствованию сохраняется и сейчас. Что-то принципиально новое появляется, в основном, в области анализа ЦМР. Такое смещение акцентов происходит благодаря широкому внедрению геоинформационных технологий в географические исследования. Развитие остальных двух аспектов, моделирования и визуализации, стиму-

лируется, как правило, появлением новых методов анализа и повышением качества цифровых картографических данных.

Так, например, появление и широкое внедрение методов гидрологического анализа (выделение водотоков и бассейнов, расчет индекса аккумуляции и т.д.) поставило перед исследователями задачу разработки мето-

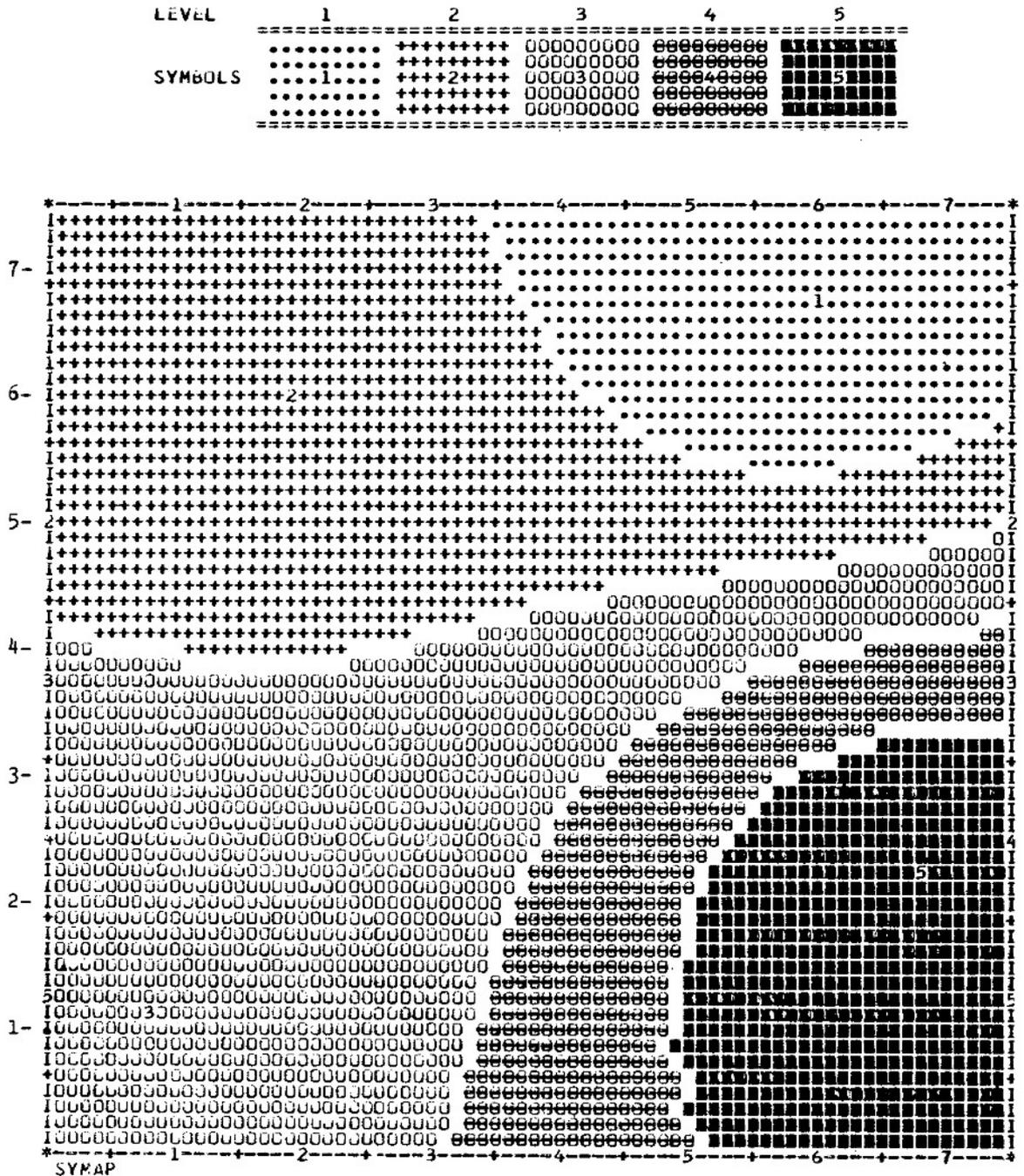


Рис. 1. Изображение, созданное на алфавитно-цифровом печатающем устройстве программой SYMAP [135] (пример взят из статьи Шепарда [130]).

дов создания гидрологически корректных ЦМР, поскольку существовавшие на тот момент методы не позволяли получать модели необходимого для их анализа качества. Эта задача остается актуальной и в настоящее время, универсального метода, пригодного для любого типа рельефа, не создано до сих пор.

Важность ЦМР для современных геоинформационных методов исследований подчеркивает и тот факт, что во многих странах, наряду с цифровыми географическими данными, создаются национальные банки данных цифровых моделей рельефа, поддерживаемые на государственном уровне. Существуют и глобальные цифровые модели, покрывающие всю территорию Земли, например, модель SRTM, созданная в результате обработки данных радиолокационной съемки комплексом SRTM с корабля-челнока "Индевор" в полете STS-99 (февраль 2000 г.) [155]. Такие модели хранятся в сеточной форме, легко доступны, в частности, через интернет, и имеют невысокую стоимость либо бесплатны.

Анализ литературных источников, в том числе отчетов университетов и крупных научно-производственных лабораторий и фирм, позволяет сделать еще один вывод. Появляющиеся новые методы моделирования или постобработки моделей с целью улучшения их качества в первую очередь используются производителями ЦМР, государственными и частными, и в коммерческие ГИС, за некоторыми исключениями (программа ANUDEM [151], на основе которой создан модуль TOPOGRID ГИС Arc/Info; методы постобработки ЦМР с целью повышения гидрологической корректности [79, 119], использованные для улучшения качества ЦМР национального банка данных США), включаются с большим запозданием или не включаются вовсе.

### **1.1. Роль ЦМР в решении географических задач на базе ГИС. Способы представления рельефа земной поверхности в цифровой форме.**

Рельеф земной поверхности играет важнейшую роль при решении широкого круга географических задач (картографическая визуализация [41], картометрический и морфометрический анализ [6, 25, 29, 41, 42, 43, 26], гидрологический анализ [114], моделирование климата [20], геоэкологические исследования [18, 44] и т.д.). Широкое внедрение ГИС и геоинформационных технологий в географические исследования предполагает

использование данных о рельефе в цифровой форме – в виде цифровых моделей рельефа.

Одно из наиболее общих определений цифровой модели рельефа дано С.Н. Сербенюком в работе [30]. "Под ЦМР любого поля будем понимать определенную форму представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющего вычислять (восстанавливать) значения поля в заданной области путем интерполирования". Речь в этом определении идет о любых так называемых "географических полях", как реальных, так и абстрактных, "для которых независимыми переменными являются пространственные координаты, а в качестве зависимых переменных служат исследуемые количественные показатели". Рельеф земной поверхности является частным случаем такого географического поля, где зависимой переменной выступает высота. В этой же работе приводится разбиение ЦМР геополей на группы в зависимости от формы представления исходных данных: "1) с регулярным расположением точек на прямоугольных, треугольных или гексагональных сетках; 2) с нерегулярным представлением точек по структурным линиям, профилям, центрам площадей, локальным точкам, случайным сеткам и т.д.; 3) с изолинейным (уровневым) заданием точек, расположенных равномерно на изолиниях или же с учетом сложности их рисунка".

Хотя процитированное определение является довольно общим, охватывает, в том числе, многомерные поля как скалярного, так и векторного типа, оно требует некоторого расширения понятия *географического поля*, поскольку такое определение не включает в себя большое множество полей, на анализе которых основываются весьма широкий класс задач в географических исследованиях. Речь идет о случаях, когда в качестве независимых переменных выступают не только пространственные координаты, но и другие количественные показатели, в том числе и время [11, 12, 99].

Для визуализации и анализа геополей на основе цифровых моделей зачастую необходимо быстро, в режиме реального времени, находить значение показателя в произвольной точке области определения. Однако не всякая форма представления исходных данных и способ их структурного описания, о которых идет речь в определении, позволяют восстанавливать значения быстро. Поэтому на практике используются такие формы хранения исходных данных, дискретных по своей природе, которые позволяют

путем простых интерполяционных процедур восстанавливать значения непрерывного поля в произвольной точке в режиме реального времени.

Этот факт находит отражение в более современных определениях. Так, например, в толковом словаре основных терминов геоинформатики под ред. Берлянта А.М. и Кошкарева А.В. [14], цифровая модель рельефа определяется как "средство цифрового представления 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в виде трехмерных данных как совокупности высотных отметок или отметок глубин и иных значений аппликат в узлах регулярной сети с образованием матрицы высот, нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей (изогипс, изобат) или иных изолиний". В зарубежных источниках общепринято несколько более широкое определение ЦМР как совокупности ячеек, покрывающих область определения, и способа восстановления значений в этих ячейках. В такое определение вписываются и триангуляционное, и сеточное, и изолинейное представления.

Для анализа на основе численных методов наиболее удобны две формы представления: в виде значений в узлах регулярной сетки (*сеточные* модели) и в виде значений в узлах нерегулярной треугольной сети (*триангуляционные* модели). Изолинейную форму представления использовать напрямую для визуализации (за исключением способа изолиний, причем только с уже имеющимся шагом сечений) и анализа затруднительно. Область определения в первых двух случаях разбивается на множество прямоугольных или треугольных ячеек, что позволяет легко восстанавливать значения высот в произвольной точке путем интерполяции, а также находить производные показатели и выполнять численный анализ. Наиболее простым и употребительным способом интерполяции для треугольных ячеек является линейная функция двух переменных  $f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y$ , коэффициенты которой однозначно определяются по значениям высот в вершинах треугольника. Для прямоугольных ячеек аналогичным свойством обладает билинейная функция  $f(x, y) = a_{00} + a_{10}x + a_{01}y + a_{11}xy$ . Для редких сеток с большими расстояниями между узлами для восстановления значений показателя иногда употребляют и более сложные функции, для построения которых привлекаются значения в соседних ячейках [52, 53, 69]. Однако чаще всего такие

способы используются для сгущения сетки с последующим использованием более простых способов. Каждая из указанных выше форм имеет свои достоинства и недостатки, однако триангуляционные модели применяются в основном для крупных масштабов, поскольку позволяют встраивать в свою структуру границы естественных и искусственных объектов, в то время как сеточные, несмотря на некоторую избыточность данных по сравнению с триангуляционными моделями, для любых.

## 1.2. Методы моделирования рельефа по данным в точках.

Анализируемые в данном разделе методы используются для моделирования рельефа в том случае, когда значения высот известны только в некоторых точках (в дальнейшем – опорные точки), расположенных, в общем случае, нерегулярно. Обычно такого рода исходные данные получаются после проведения полевых съемок (нивелирование, тахеометрическая съемка, съемка с использованием приемников спутникового позиционирования и т.д.), либо фотограмметрическим способом по стереоснимкам [31]. В отличие от рельефа земной поверхности, для большинства других географических полей исходные данные в такой форме встречаются чаще всего (точки опробования в экологических исследованиях, точки привязки показателя при построении абстрактных полей и т.д.).

В дальнейшем будем использовать следующие обозначения:  $n$  - количество опорных точек;  $x_i, y_i$  - плановые прямоугольные координаты опорных точек;  $z_i$  - значения высот в опорных точках;  $\mathbf{p}_i = (x_i, y_i)$  - опорные точки как геометрические объекты (векторы) на плоскости, индекс  $i$  пробегает все целые значения от 1 до  $n$ ;  $\mathbf{p} = (x, y)$  - произвольная точка области определения ЦМР;  $f(\mathbf{p}) = f(x, y)$  - модельная функция. Задача моделирования сводится к описанию конструктивного способа восстановления значения показателя (высоты)  $f(x, y)$  в произвольной точке  $(x, y)$  области моделирования, основанного на данных в опорных точках, либо в аналитическом виде, либо в виде некоторого алгоритма, задающего последовательность операций для вычисления значения показателя.

В математике известно довольно большое количество методов моделирования по данным в точках, многие из них рассматриваются в обзорах [24, 39, 54, 73, 114, 139]. Подробно остановимся только на тех из них, ко-

торые чаще всего встречаются в программных пакетах по моделированию, либо являются наиболее подходящими для моделирования именно рельефа. Для каждого метода приводится не только его формальное математическое описание, но и выводы о его достоинствах и недостатках при моделировании рельефа, основанные как на теоретических свойствах модельной функции, так и на численных экспериментах.

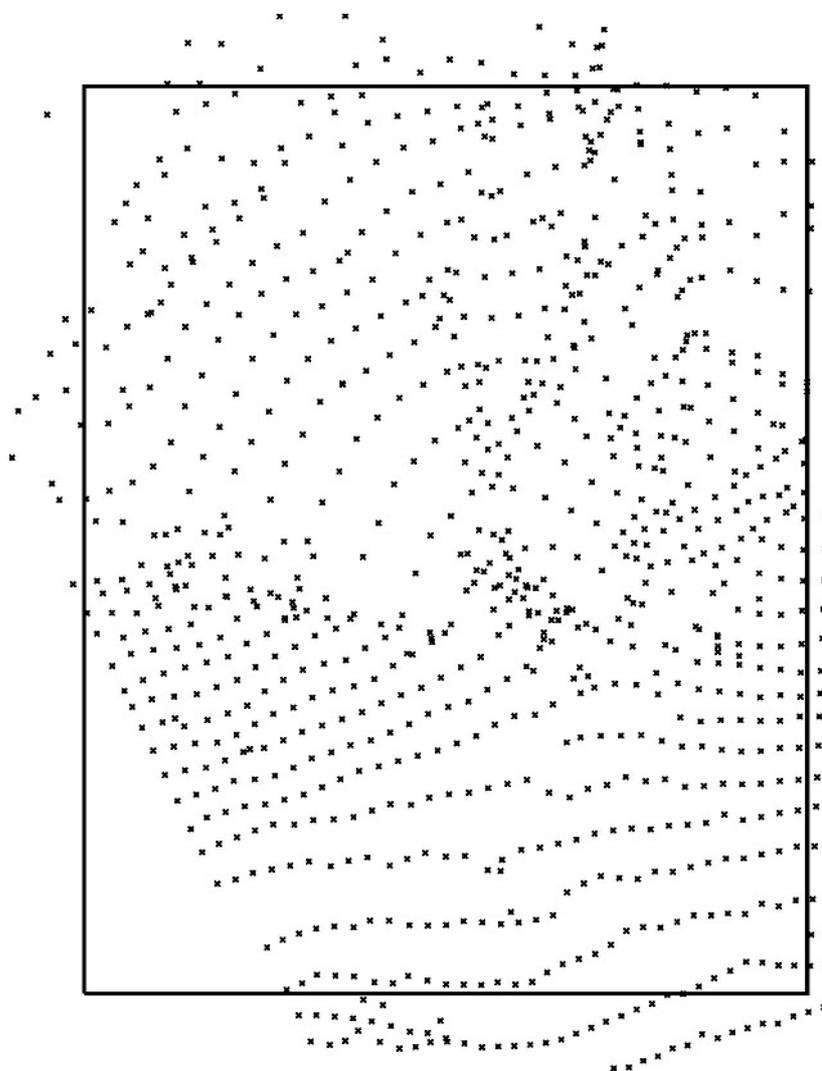
Для большей наглядности работа анализируемых алгоритмов будет проиллюстрирована на данных, полученных фотограмметрическим способом, для тестового участка, представляющего собой часть склона горы Айкуайвенчорр (Хибины). На **Рис. 2** показан вид на тестовый участок со стороны учебной базы Географического факультета в Хибинах.

Стереопара снимков, полученных с помощью наземной фототеодолитной съемки, оцифрована по регулярной прямоугольной сетке точек с использованием системы "Стерео", созданной на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета МГУ [31, 32].



*Рис. 2. Тестовый участок. Вид со стороны учебной базы Географического факультета МГУ в Хибинах.*

Плановое положение опорных точек и граница прямоугольного участка, который является областью определения цифровой модели, показаны на **Рис. 3**. Значения высот в опорных точках варьируются от 355 до 909 метров; участок моделирования имеет размеры 950 на 1200 метров. Следует отметить, что несмотря на строго регулярное расположение точек цифрового моделирования на снимке, опорные точки расположены нерегулярно, отклонения от регулярной сетки зависят от угла съемки и геометрической формы поверхности. Кроме того, существуют целые области, невидимые из точки съемки, где опорные точки вообще отсутствуют. Такая ситуация является характерной для наземной фотосъемки и оправдывает применение этих данных в качестве тестовых для иллюстрации работы методов моделиро-



*Рис. 3. Тестовый участок. Плановое положение опорных точек и границы участка моделирования.*

вания. Ситуация с данными полевой съемки будет рассмотрена отдельно, при анализе метода моделирования на основе триангуляции.

### 1.2.1. Средневзвешенная интерполяция и метод Шепарда.

Метод средневзвешенной интерполяции восходит к Гауссу и является одним из самых простых математически. Значение модельной функции в точке вычисляется как взвешенная сумма значений в опорных точках:

$$f(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{p}) \cdot z_i}{\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{p})}, \quad w_i(\mathbf{p}) = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_i|^{-k}, \quad (1)$$

$k > 1$  – степень весовой функции. Веса каждой точки положительны и меньше или равны единице, а их сумма тождественно равна единице. Наиболее употребителен случай  $k=2$ , в зарубежной литературе его принято называть методом обратных взвешенных расстояний (IDW - Inverse Distance Weighted). Благодаря своей простоте, метод реализован практически во всех блоках ГИС и специализированных программах по моделированию. Недостатками метода в форме (1) являются его глобальность (функция за-

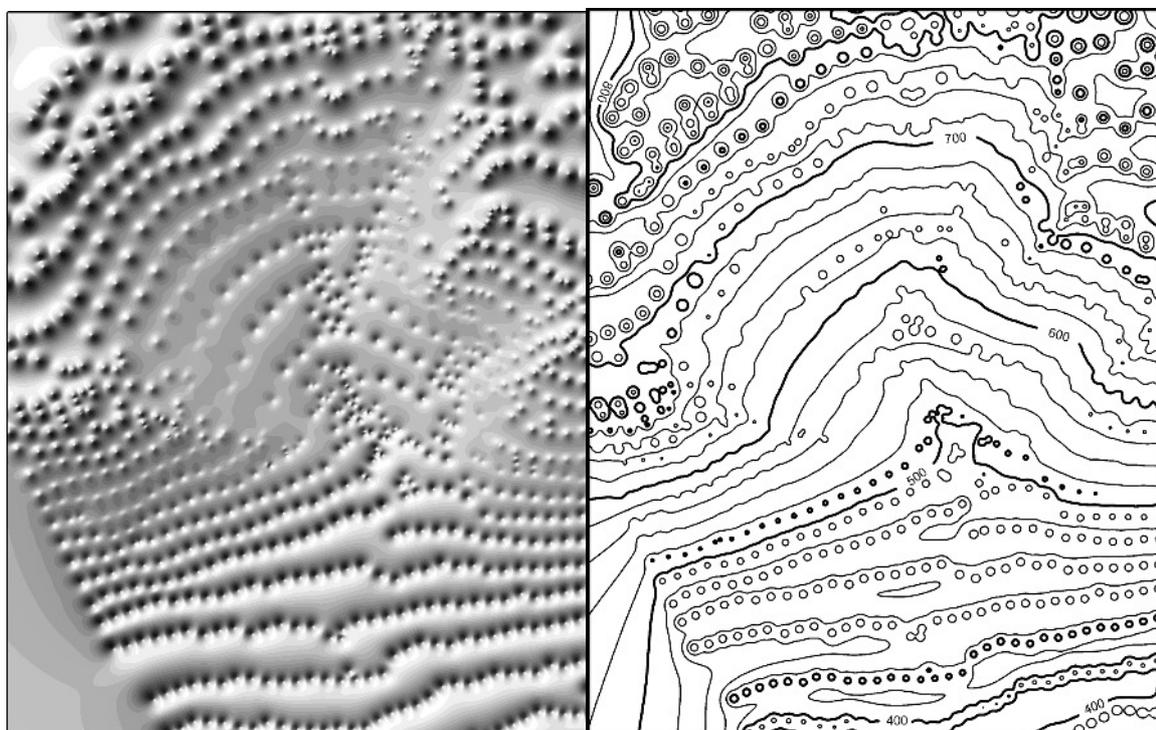


Рис. 4. Тестовый участок. Поверхность, построенная методом средневзвешенной интерполяции.

висит от значений во всех опорных точках) и равенство нулю частных производных модельной функции в опорных точках (в этих точках функция имеет локальные максимумы и минимумы, см. **Рис. 4**). Это означает, с одной стороны, низкую вычислительную эффективность, а с другой стороны, неспособность метода к адекватному отражению производных характеристик моделируемой поверхности, в частности, градиента. К достоинствам метода можно отнести то, что значения модельной функции не выходят за пределы значений в опорных точках. Для некоторых геополей такое свойство может быть решающим при выборе метода моделирования, в частности, при создании карт уровня радиационного загрязнения территорий по точечным замерам. Метод также легко может быть обобщен на случай многих переменных. Из-за свойственных методу недостатков он совершенно не годится для моделирования рельефа, за исключением случая, когда при большом количестве опорных точек построенная ЦМР используется для вычисления интегральных показателей, например, при оценке объемов выработки в открытых карьерах. Дифференциальные же характеристики модельной поверхности неудовлетворительны.

Шепардом [130] были предложены способы устранения этих недостатков. Для локализации метода предлагалось использовать весовые функции с компактным носителем, а для интерполяции производных использовать в формуле (1) не значения в опорных точках, а линейные функции, локализованные в этих точках, принимающие те же значения и аппроксимирующие градиент. Там же был предложен и способ вычисления коэффициентов таких функций, и способ организации данных для быстрого поиска ближайших точек. Такая модификация средневзвешенной интерполяции получила в дальнейшем название метода Шепарда, вышло довольно много работ, в частности [56, 80], посвященных дальнейшему усовершенствованию этого подхода, среди которых можно выделить вклад Ренки [121, 122, 123]. Обобщая все предложенные варианты, модельную функцию в методе Шепарда можно представить в виде

$$f(\mathbf{p}) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{p}) \cdot Q_i(\mathbf{p})}{\sum_{i=1}^n w_i(\mathbf{p})}, \quad (2)$$

где  $Q_i(\mathbf{p})$  - функции, локализованные в  $i$ -й опорной точке (это могут быть алгебраические полиномы степени от 1 до 3, тригонометрические полиномы первой или второй степени, или некоторые другие функции). Весовые функции с компактным носителем могут иметь вид, например, следующий:

$$w_i(\mathbf{p}) = \left[ \frac{(R_i - r_i)_+}{R_i r_i} \right]^2, \quad r_i = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_i|, \quad (R_i - r_i)_+ = \begin{cases} R_i - r_i & \text{если } r_i < R_i \\ 0 & \text{если } r_i \geq R_i \end{cases} \quad (3)$$

где  $R_i$  - радиус влияния  $i$ -й опорной точки.

Во многих программах локализация метода Shepard выполняется не с помощью весовых функций специального вида (3), а просто путем отбора для формулы (2) точек, попавших в круг заданного радиуса, или заданного количества, ближайших к искомой точке. Это приводит к формально разрывной модельной функции (набор точек и значений, участвующих в суммировании, может меняться при переходе к соседнему узлу сетки) и может приводить к заметным скачкам значений построенной модели.

Описанные выше усовершенствования позволяют существенно улучшить качество моделирования. Несмотря на это, метод Shepard, как правило, проигрывает методу радиальной интерполяции и кригингу.

### 1.2.2. Интерполяция и аппроксимация с помощью радиальных базисных функций, кригинг.

Метод радиальных функций объединяет целую группу методов, которые изначально развивались самостоятельно и позднее были объединены под одним названием, когда было замечено, что решение многих задач приводит к их математической формулировке в одной и той же форме. Модельная функция ищется в виде:

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R(r_i) + P_k(\mathbf{p}); \quad r_i = |\mathbf{p} - \mathbf{p}_i|, \quad (4)$$

где  $R(r)$  - функция одной переменной, называемая радиальной, а  $P_k(\mathbf{p})$  - полином степени  $k$ . Из формулы (4) видно, что значение в искомой точке зависит только от расстояний до опорных точек, но не от направления, в котором они находятся.

Условия интерполяции  $f(x_i, y_i) = z_i$  и дополнительное требование точности интерполяционной схемы на полиномах степени  $k$ , приводят к

системе линейных уравнений для определения коэффициентов  $\lambda_i$  и коэффициентов полинома  $P_k(x, y)$ . Для того, чтобы система имела решение, радиальные функции должны удовлетворять определенным свойствам.

Для многих частных случаев метод имеет собственные названия, отметим самые важные из них (радиальные функции приводятся для случая двух переменных).

1) *Мультиквадрики*

$$R(r) = (r^2 + h^2)^{1/2}, h > 0, k = 0$$

и *обратные мультиквадрики*

$$R(r) = (r^2 + h^2)^{-1/2}, h > 0, k = 0$$

предложены Харди в работах [83, 84]. Метод является сглаживающим, за степень сглаживания отвечает параметр  $h$ .

2) *Сплайны минимальной кривизны*

$$R(r) = r^2 \ln(r^2), k = 1$$

являются решением задачи минимизации функционала

$$J_2(f) = \int (f_{xx}^2 + 2f_{xy}^2 + f_{yy}^2) dx dy$$

среди всех достаточно гладких функций, интерполирующих значения в опорных точках. Подинтегральное выражение может служить аналогом кривизны поверхности при малых значениях градиента, отсюда и название таких сплайнов. Функционал  $J_2(f)$  может рассматриваться также как величина "энергии" гибкой пластины, закрепленной в опорных точках, поэтому иногда их называют сплайнами гибкой пластины (thin plate spline). Еще одно часто используемое название - сплайны Дюшона, поскольку были впервые им рассмотрены для случая двух переменных [70]. В дальнейшем сплайны минимальной кривизны исследовались в работах [10, 19, 60, 74, 139] и др.

3) *Сплайны с натяжением*

$$R(r) = \frac{1}{2\pi t} \left[ \ln\left(\frac{rt}{2}\right) + C_E + K_0(rt) \right],$$

где  $C_E \approx 0.577215$  - константа Эйлера,  $K_0(x)$  - функция Бесселя [46], также являются решением задачи минимизации функционала

$$J(f) = tJ_1(f) + J_2(f);$$

где  $J_1(f) = \int (f_x^2 + f_y^2) dx dy$ , а параметр натяжения  $t$  контролирует вес первых производных в сумме. Сплайны с натяжением рассматриваются, в частности, в работе [75].

#### 4) Регуляризованные сплайны

$$R(r) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \frac{r^2}{4} \left[ \ln\left(\frac{r}{2\tau}\right) + C_E - 1 \right] + \tau^2 \left[ K_0\left(\frac{r}{\tau}\right) + C_E + \ln\left(\frac{r}{2\tau}\right) \right] \right\}$$

минимизируют функционал с суммой квадратов вторых и третьих производных, параметр регуляризации  $\tau$  отвечает за вес третьих производных в этой сумме. Регуляризованные сплайны рассматриваются в работе [111] и реализованы в модуле Spatial Analyst ГИС ArcView.

#### 5) Регуляризованные сплайны с натяжением

$$R(r) = - \left\{ \ln \left[ \left( \frac{\varphi r}{2} \right)^2 \right] + E_1 \left[ \left( \frac{\varphi r}{2} \right)^2 \right] + C_E \right\}, \quad E_1(x) = \int_x^\infty \frac{e^{-t}}{t} dt,$$

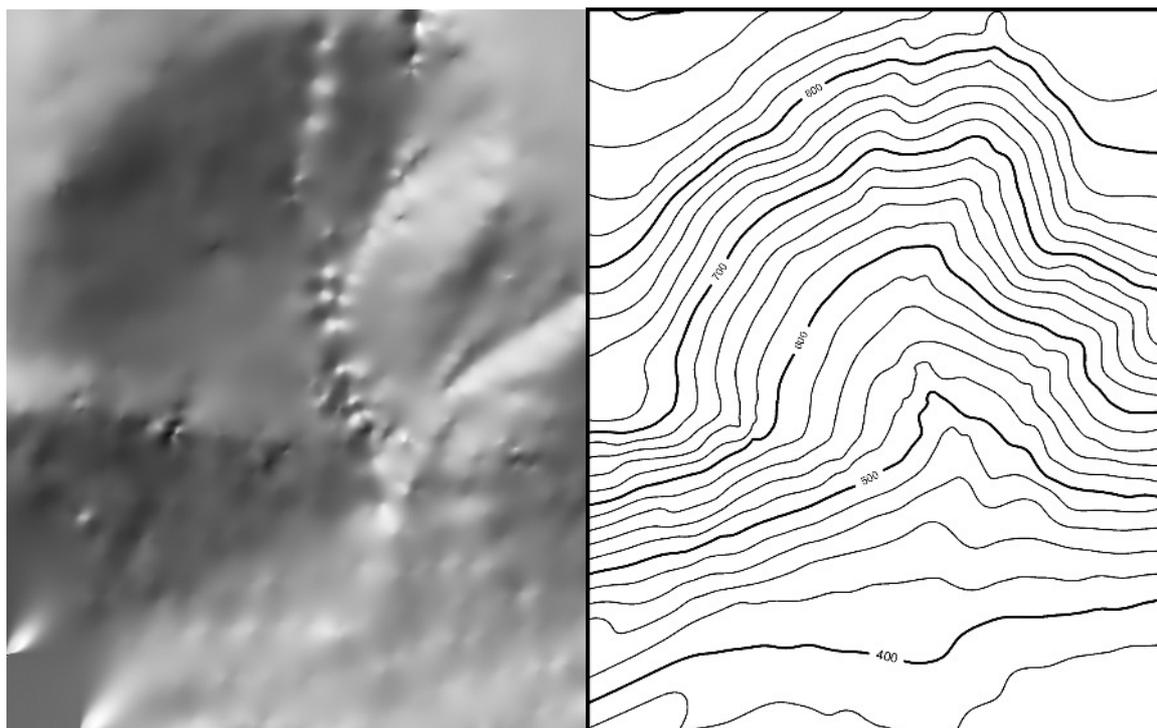
минимизируют функционал с суммой квадратов производных всех порядков с некоторыми коэффициентами, зависящими от одного параметра регуляризации  $\varphi$ , предложены в работе [111] и реализованы в ГИС GRASS.

Все сплайны обладают интерполяционными свойствами, однако могут использоваться и в сглаживающем варианте. Теоретически параметр сглаживания может быть задан индивидуально для каждой опорной точки, однако на практике такая возможность реализована только в ГИС GRASS для регуляризованных сплайнов с натяжением.

Большой выбор различных радиальных функций и возможность дополнительной настройки с помощью параметров делают данный метод наиболее мощным. Практические эксперименты показывают, что для данных, полученных фотограмметрическим путем с близким к равномерному распределению опорных точек, наилучшие результаты при соответствующей настройке параметров дают сплайны с натяжением и регуляризованные сплайны (см. **Рис. 5**). Хорошие результаты получаются и при небольшом количестве опорных точек. Если в значениях показателя присутствует заметная погрешность, то лучше использовать сглаживающие варианты сплайнов или мультиквадрики, соответствующим образом подбирая параметр сглаживания. Единственным недостатком метода радиальных функций является его глобальность, то есть, изменение показателя в одной

точке приводит к изменению функции на всей области определения. Поскольку матрица системы уравнений для определения коэффициентов не является разреженной, это приводит к вычислительным трудностям при решении системы для большого количества опорных точек ( $>500$ ).

В работах [30, 74, 113] предлагаются некоторые подходы к решению этой проблемы – локализации метода. Основная идея состоит в разбиении области определения на перекрывающиеся участки, содержащие не слиш-



*Рис. 5. Тестовый участок. Поверхность, построенная с помощью сплайнов с натяжением.*

ком большое количество точек, и вычислении сплайна на каждом отдельном участке. Формально такой подход приводит к разрывной функции, однако на практике в большинстве случаев непрерывность обеспечивается за счет общих точек в областях перекрытия. Исключение составляют ситуации с большой неравномерностью в распределении опорных точек, в этих случаях возможны скачки значений при переходе от одного участка к другому. В работе [39] предложен способ устранения и этого недостатка. Сплайны на участках склеиваются с нужной степенью гладкости с помощью набора функций так называемого разбиения единицы, связанного с покрытием области определения перекрывающимися прямоугольниками.

В методе кригинга, названном по фамилии южноафриканского геолога D.G. Krige, используется статистический подход к построению модельной функции. Его теоретические основы подробно изложены в литературе по геостатистике [17, 22, 37, 93, 109, 124]. Предполагается, что модельная функция  $f(\mathbf{p})$  является случайным процессом со стационарными приращениями и заданной вариограммой  $\gamma(\mathbf{h})$  (или ковариационной функцией  $c(\mathbf{h})$ ), а значения в опорных точках являются некоторой реализацией этого случайного процесса. Вариограмма (а также ковариационная или автокорреляционная функции) является важнейшей характеристикой случайного процесса со стационарными приращениями и задает распределение квадратов разностей значений (или корреляцию) в парах точек в зависимости от их взаимного расположения, но не от их абсолютного положения. Процедура интерполяции называется оцениванием, а полученное в результате интерполяции значение  $z_0 = f(\mathbf{p}_0)$  называется оценкой в точке  $\mathbf{p}_0$ . Модельная функция представляется в виде:

$$f(\mathbf{p}) = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{p}) \cdot z_i,$$

где веса  $a_i$  вычисляются из условия несмещенности оценки и минимизации ее дисперсии. В случае стационарности случайного процесса это приводит к системе линейных уравнений ординарного кригинга:

$$\sum_{j=1}^n a_j \gamma_{ij} + \mu = \gamma_i, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{j=1}^n a_j = 1,$$

где  $\gamma_{ij} = \gamma(\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)$ ,  $\gamma_i = \gamma(\mathbf{p}_i - \mathbf{p})$ . Если в данных присутствует значимый тренд, его можно учесть в процедуре универсального кригинга.

Самым важным в кригинге является подбор модельной вариограммы, наиболее соответствующей данным в опорных точках. Приведем формулы для некоторых наиболее популярных модельных функций вариограмм (здесь везде  $t = h/a$ ,  $\gamma(0) = 0$ , для пп.1) - 5)  $\gamma(h) = c_0 + c_1$  при  $h > a$ ):

- 1) линейная  $\gamma(h) = c_0 + c_1 t$ ;
- 2) сферическая  $\gamma(h) = c_0 + c_1 \left( \frac{3}{2} t - \frac{1}{2} t^3 \right)$ ;

- 3) логарифмическая  $\gamma(h) = c_0 + c_1 t^2 (1 - \ln t^2)$ ;
- 4) квадратичная  $\gamma(h) = c_0 + c_1 (2t - t^2)$ ;
- 5) круговая  $\gamma(h) = c_0 + c_1 \frac{2}{\pi} (t\sqrt{1-t^2} + \arcsin t)$ ;
- 6) экспоненциальная  $\gamma(h) = c_0 + c_1 (1 - e^{-3t})$ ;
- 7) гауссова  $\gamma(h) = c_0 + c_1 (1 - e^{-3t^2})$ .

Параметрами вариограмм являются:  $a$  – радиус влияния или лаг,  $c_0$  – эффект самородка,  $c = c_0 + c_1$  – порог,  $c_0/c$  – относительный эффект са-

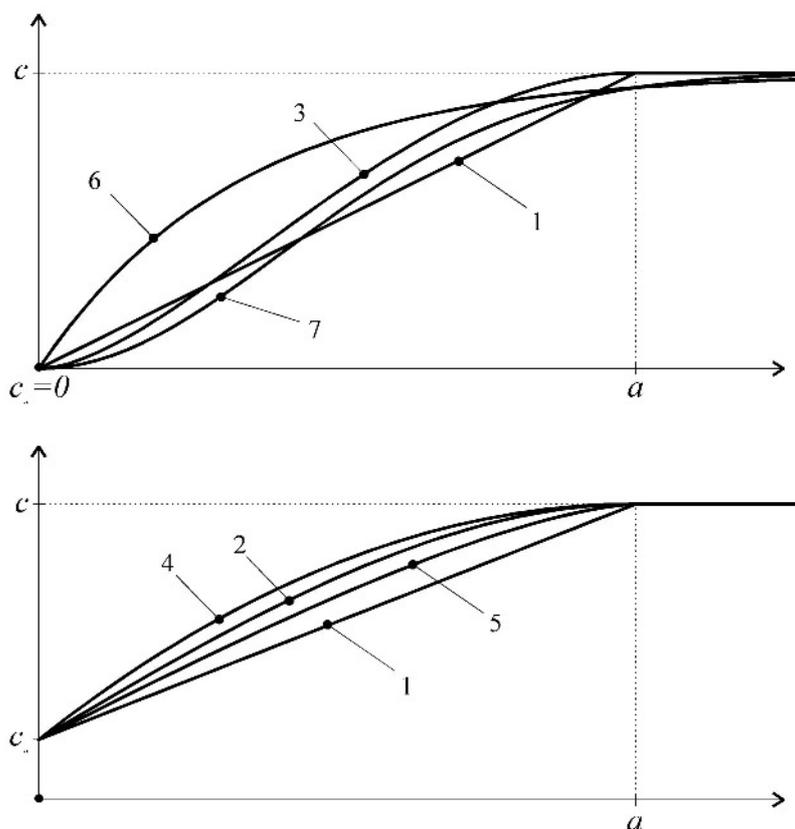


Рис. 6. Графики модельных функций вариограмм.

морodka). На **Рис. 6** показаны графики перечисленных модельных функций.

Несмотря на отличие теоретических подходов и формул, методы кригинга и радиальной интерполяции приводят к одной и той же модельной функции (при условии использования одинаковой вариограммы и радиальной функции). Этот факт может быть строго доказан математически и одно из таких доказательств приведено в работе основателя геостатистики Матерона [110]. Преимуществом кригинга является возможность объективно подобрать наиболее подходящую вариограмму путем сопоставле-

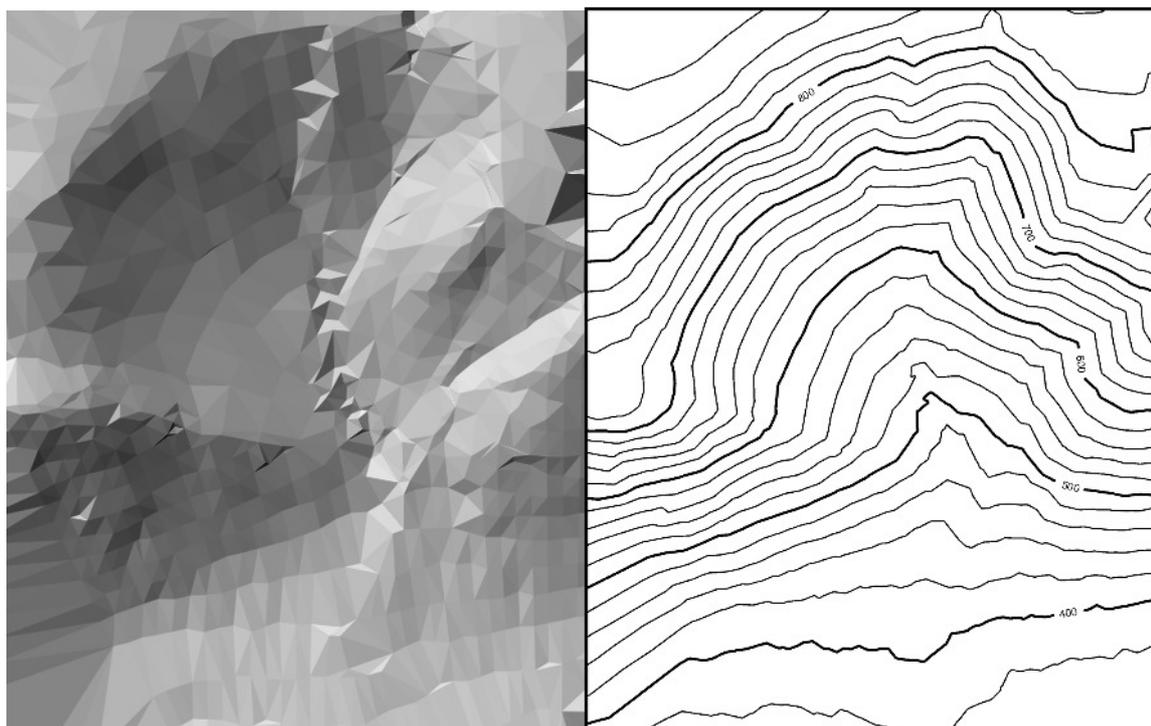
ния выборочной вариограммы, построенной по значениям в опорных точках с модельными.

### *1.2.3. Интерполяция на основе триангуляции.*

Данная группа методов базируется на построении по опорным точкам структуры триангуляции (как правило, триангуляции Делоне) [45], и дальнейшей интерполяции на основе этой структуры. В самом простейшем варианте (фактически это ЦМР в триангуляционной форме) интерполяция выполняется с помощью линейной функции на каждом треугольнике. К недостаткам метода можно отнести то, что вычисление значений показателя возможно только в пределах выпуклой оболочки множества опорных точек, в граничных треугольниках наблюдаются значительные искажения, модельная функция не является гладкой. К достоинствам метода можно отнести возможность встраивать в структуру триангуляции дополнительные объекты природного и искусственного характера (тальвеги, границы оврагов, обрывы, дороги и т.д.). Это возможно при использовании триангуляции с ограничениями и в таком виде делает метод наиболее подходящим для моделирования рельефа по данным крупномасштабных полевых съемок, поскольку при проведении изолиний вручную используется аналогичный подход. Несмотря на угловатость изолиний, построенных по такой модели, они могут служить своеобразным "каркасом" для дальнейшего проведения изолиний вручную, значительно облегчая труд картографа.

На основе триангуляции возможно построение не только кусочно-линейных функций, но и гладких с заданной степенью гладкости. Некоторые варианты таких функций предлагаются в работах [52, 53, 78]. В методе Акимы [53] функция на каждом треугольнике представляет собой полином пятой степени от двух переменных, коэффициенты полиномов определяются из условий их гладкой склейки на ребрах треугольников. В двух других способах значение функции в каждом треугольнике определяется, аналогично методу Шепарда, как взвешенная сумма трех функций, локализованных в вершинах треугольника. Однако веса вычисляются другим способом, на основе барицентрических координат в треугольнике, а не расстояний до вершин. Это позволяет избежать недостатков средне-взвешенной интерполяции и при определенном подборе весов получать модельную функцию заданной степени гладкости.

Недостаток метода, связанный с граничными треугольниками, может быть устранен путем добавления дополнительных точек на границе выпуклой оболочки, что позволяет избежать остроугольных треугольников с длинной стороной и нивелировать граничный эффект. Экстраполяция за пределы выпуклой оболочки достигается путем добавления дополнительных точек в вершины прямоугольной области моделирования. Такой прием использован в ГИС IDRISI. На **Рис. 7** приведен результат моделирова-



*Рис. 7. Тестовый участок. Поверхность, построенная с помощью кусочно-линейной функции на основе триангуляции.*

ния для тестового участка с использованием кусочно-линейной интерполяции и экстраполяции за пределы выпуклой оболочки исходного множества опорных точек.

С перечисленными добавлениями и усовершенствованиями метод реализован в программном комплексе "МАГ", о котором речь пойдет в третьей главе. С такими дополнениями метод вполне пригоден для моделирования рельефа. Несомненным достоинством метода является его локальность и высокая вычислительная эффективность (при грамотной с алгоритмической точки зрения реализации метод работает быстрее всех других, описанных в данном разделе).

#### 1.2.4. Интерполяция и аппроксимация на основе иерархических В-сплайнов.

В данном методе поверхность представляется как сумма кусочно-полиномиальных функций, определяемых на основе двумерных базисных сплайнов (тензорное произведение одномерных В-сплайнов) с коэффициентами, заданными на регулярной прямоугольной сетке, причем на каждом последующем уровне иерархии сетка сгущается [72,102,149]. Для каждого конкретного уровня иерархии модельная функция представляется в виде:

$$f(x, y) = \sum_{k=0}^3 \sum_{l=0}^3 B_k(s) B_l(t) c_{(i+k)(j+l)},$$

где  $i = [x/h] - 1$ ,  $j = [y/h] - 1$ ,  $s = x/h - [x/h]$ ,  $t = y/h - [y/h]$ ,  $h$  - шаг сетки, на которой заданы коэффициенты сплайна  $c_{ij}$ ,  $i = -1, 0, \dots, m+1$ ,  $j = -1, 0, \dots, n+1$ .  $B_k$  и  $B_l$  - кубические В-сплайны, определенные на отрезке  $0 \leq t < 1$  как

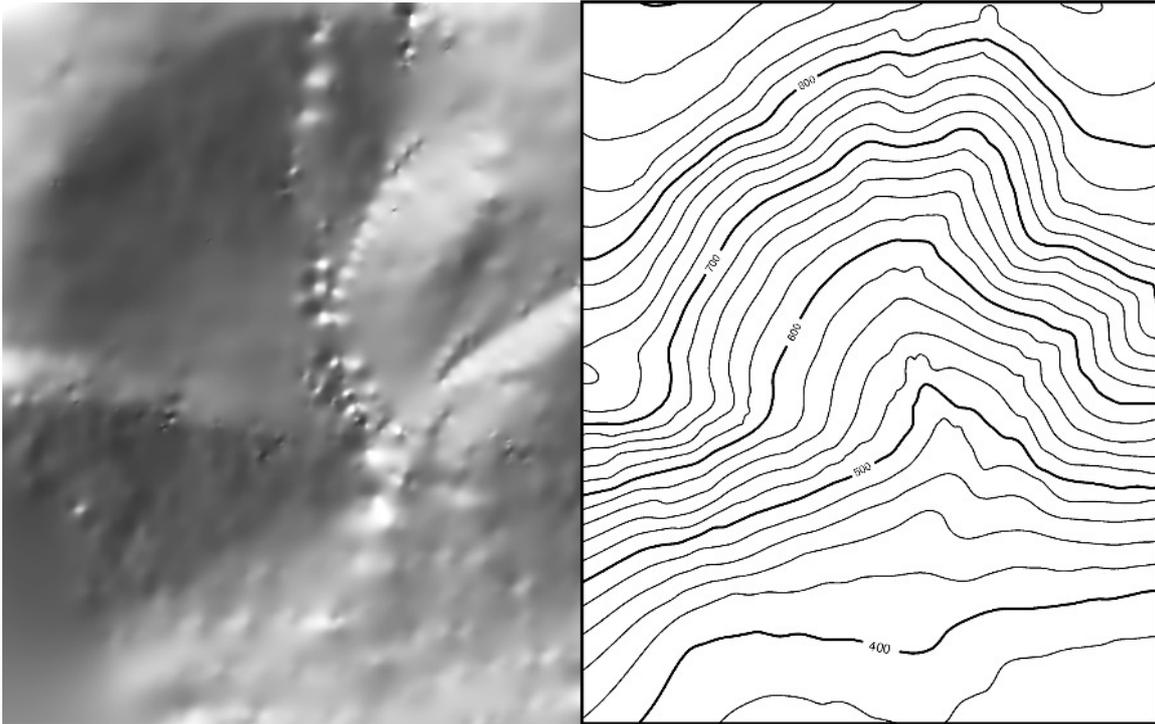
$$B_0(t) = (1-t)^3 / 6,$$

$$B_1(t) = (3t^3 - 6t^2 + 4) / 6,$$

$$B_2(t) = (-3t^3 + 3t^2 + 3t + 1) / 6,$$

$$B_3(t) = t^3 / 6.$$

Коэффициенты  $c_{ij}$  определяются методом наименьших квадратов по значениям в исходных опорных точках. При достаточно мелкой сетке коэффициентов метод получается интерполяционным. Результирующая поверхность получается как сумма функций для каждого уровня иерархии, для вычисления коэффициентов каждого последующего уровня в качестве значений в опорных точках используются остатки - разность исходных значений и суммы значений функций предыдущих уровней. При построении функции могут быть использованы и не только полиномиальные базисные сплайны, но и другие, например, сплайны с натяжением, рациональные сплайны и т.д. На **Рис. 8** приведен результат моделирования для тестового участка с начальными значениями размерности сетки коэффициентов  $m = 1, n = 1$ .



*Рис. 8. Тестовый участок. Поверхность, построенная с помощью иерархических В-сплайнов.*

Метод активно используется при конструировании поверхностей в системах автоматизированного проектирования, для сжатия изображений, морфинга и т.д. К сожалению, несмотря на значительное количество работ на эту тему, появившихся в последнее время, ни в один из ГИС-пакетов он до сих пор не включен. Несомненным достоинством метода, отличающим его от, например, метода радиальных функций, является то, что он одинаково хорошо работает как для равномерного, так и неравномерного пространственного распределения опорных точек (например, со сгущением вдоль линий профилей). Также как и метод, основанный на триангуляции, он обладает высоким быстродействием.

### **1.3. Методы моделирования рельефа по изолиниям.**

Для многих российских пользователей наиболее доступным источником получения ЦМР являются топографические карты. Кроме того, карты являются единственным источником получения информации об "историческом" рельефе, не существующем в настоящий момент, при анализе изменений, происходящих во времени (например, после извержения вулканов). Таким образом, большое значение приобретают методы создания

ЦМР по изолиниям, оцифрованным с топографических карт. Можно представить изолинии как набор точек с высотами и использовать методы моделирования по точкам. Многими пользователями ввиду отсутствия в большинстве ГИС-пакетов специализированных методов практикуется именно такой подход. Чаще всего для этих целей используется радиальная интерполяция, например, регуляризованные сплайны с натяжением [63], реализованные в ГИС GRASS [117], или сплайны минимальной кривизны [82]. Однако при таком подходе теряется большое количество информации, заложенной в самой структуре горизонталей как геометрических объектов. Для таких данных должны разрабатываться собственные методы, в полной мере учитывающие их специфику. Прежде чем приступать к анализу разработанных на настоящий момент методов моделирования по изолиниям, необходимо сформулировать требования, диктуемые свойствами исходных данных, по которым должно оцениваться их качество.

В первую очередь, построенная модель должна быть *достоверной по высотам*. Указывая точку на топографической карте, всегда можно определить, в каком диапазоне лежит значение высоты в данной точке, поскольку этот диапазон определяется сечением горизонталей. Кроме того, можно сказать, к какой границе диапазона будет ближе это значение, привлекая в расчеты близость той или иной горизонтали и проводя в уме линейную интерполяцию. Наиболее опытные специалисты могут учитывать также заложения и рисунок соседних горизонталей, выполняя, таким образом, нелинейную интерполяцию с учетом характера склонов. Требование достоверности по высотам означает, что построенная данным методом модель в изложенном выше смысле полностью адекватна топографической карте. Говоря на более формальном языке, построенные по цифровой модели рельефа изолинии не должны отклоняться от исходных, оцифрованных с карты, более чем на шаг сетки ЦМР, при любом методе вычисления изолиний.

Вторым требованием является *структурная (топологическая) достоверность* – должно соблюдаться соответствие между реальными и модельными структурными элементами рельефа. Оно труднее поддается формализации, соответствие этому требованию проверяется визуально по картам производных показателей, линий тока, структурных линий и элементов, аналитической отмывке и др. На построенной модели не должны

наблюдаться эффекты «террасности», не должно быть ложных локальных максимумов и минимумов или других аномалий. Структурная достоверность подразумевает и гидрологическую корректность модели (модель должна адекватно отражать флювиальные формы и свойства рельефа). Как правило, создание структурно достоверных моделей невозможно без привлечения дополнительной информации в виде объектов гидрографии и отметок урезов воды.

Как и в случае моделирования по данным в точках, задача моделирования по изолиниям сводится к описанию конструктивного способа восстановления значения показателя (высоты) в произвольной точке области моделирования, основанного на исходных данных. Разработанные на настоящий момент методы можно разделить на следующие группы по используемым в них подходам:

- 1) вычисление среднего значения по четырем профилям;
- 2) интерполяция на основе триангуляции с ограничениями;
- 3) интерполяция с использованием расстояний до двух ближайших изолиний разного уровня;
- 4) численный подход с использованием сплайнов с натяжением.

Начало разработкам методов *первой группы* положено работой Дугласа [67], в которой предложено вычислять значения высоты в каждом узле сетки ЦМР следующим образом. Через узел проводятся четыре прямые (две параллельно линиям сетки ЦМР и две параллельно диагоналям) и вычисляются точки их пересечения с изолиниями (**Рис. 9**). Для каждого профиля по полученным точкам (абсцисса – расстояние от узла до точки пересечения, ордината – значение уровня соответствующей изолинии) с

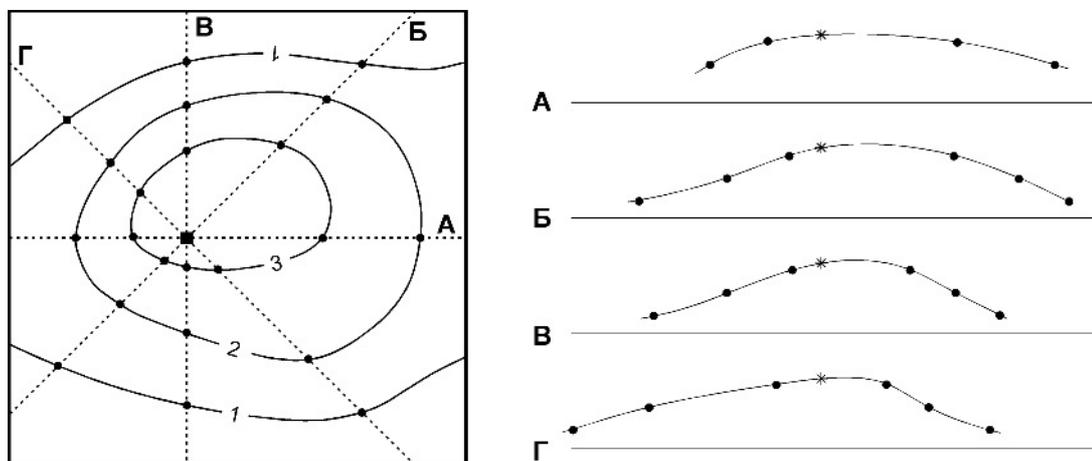


Рис. 9. Моделирование по изолиниям: метод Дугласа.

помощью методов одномерной интерполяции строится функция и вычисляется ее значение в нуле, который соответствует текущему узлу сетки. Окончательное значение высоты в узле сетки вычисляется как среднее полученных четырех значения на профилях. Задача двумерного моделирования поверхности сводится, таким образом, к задаче одномерного моделирования кривой. Дальнейшие усовершенствования метода Дугласа изложены в работах [68, 144, 147] и др. Все усовершенствования и модификации касаются, в основном, способа построения одномерной кривой вдоль полученных четырех профилей и способа вычисления окончательного значения высоты по построенным профилям, а также способа быстрого поиска пересечений прямых с изолиниями. Один из вариантов метода реализован в ГИС IDRISI [153].

Для некоторых типов рельефа, в основном горных, с большой плотностью изолиний, метод может давать неплохие результаты и, благодаря высокому быстродействию, вполне может и должен входить в блок моделирования ГИС, причем с различными вариантами интерполяции профилей. С другой стороны, метод имеет довольно много недостатков, и применять его следует с осторожностью, внимательно анализируя результаты моделирования. Во-первых, результаты расчетов существенно зависят от выбора направления координатных осей, то есть метод не инвариантен относительно вращений. Во-вторых, метод Дугласа не обладает непрерывностью. При переходе к соседнему узлу может появиться пересечение с новой изолинией с другим значением уровня, что приводит к значительному скачку в значениях высоты и появлению на модельной поверхности различного рода аномалий. В третьих, топологическая структура изолиний в методе не учитывается, в результате чего значения высоты в некоторых точках могут выходить за пределы, определяемые сечением изолиний.

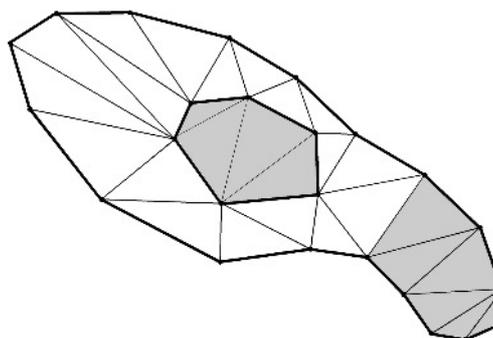
Перечисленные недостатки приводят к тому, что созданная методом Дугласа ЦМР зачастую не является ни достоверной по высотам, ни структурно достоверной. Причем метод не имеет потенциала для дальнейшего развития и совершенствования в этом направлении, в том числе и потому, что принципиально не способен учитывать дополнительные данные в виде высотных отметок и объектов гидрографии.

Методы *второй группы* основаны на построении по исходным данным структуры так называемой триангуляции Делоне с *ограничениями*

[45], в которой некоторые ребра триангуляции заранее фиксируются (в данном случае это ребра, образуемые соседними точками на изолиниях), и последующего восстановления поверхности путем линейной интерполяции на треугольниках. В простейшем базовом варианте метод реализован в модуле 3D-Analyst ГИС ArcView.

Исторически метод разрабатывался для систем автоматизированного проектирования и сейчас активно используется как в области промышленного проектирования, так и других отраслях науки и производства, где требуется восстанавливать поверхность трехмерного тела по набору сечений параллельными плоскостями, например в компьютерной томографии, зубном протезировании и т.д. Применительно к моделированию рельефа методы, основанные на триангуляции, используются в работах [45, 58, 61, 64, 66, 76, 77, 85, 97, 104, 136, 137] и многих других.

По своей конструкции такой подход позволяет учитывать топологическую структуру изолиний, а также дополнительные исходные данные для моделирования в виде структурных линий, объектов гидрографии, высотных отметок. Основной недостаток метода в его базовом варианте



*Рис. 10. Моделирование по изолиниям: триангуляция с ограничениями. Выделены треугольники, все три вершины которых лежат на изолиниях одного уровня.*

состоит в том, что в построенной триангуляции могут встретиться треугольники, все вершины которых лежат на изолиниях одного уровня, что приводит к появлению на модели горизонтальных участков (**Рис. 10**). Перечисленные выше работы посвящены устранению этих недостатков. Горизонтальные треугольники могут устраняться как путем добавления вручную к исходным изолиниям отдельных точек с высотами и структурных линий с интерполированными заранее значениями высот вдоль них, так и автоматическим созданием таких объектов по геометрической форме и топологической структуре изолиний. Предлагаемые варианты неплохо работают на тестовых примерах, однако не обладают универсальностью, то есть, пригодны не для всех типов рельефа. Кроме того, полученная та-

ким способом поверхность не является гладкой, выглядит как многогранник, особенно при больших расстояниях между изолиниями. Из-за трудностей в программной реализации и отсутствия универсального, или хотя бы близкого к нему алгоритма методы с таким подходом в своем расширенном варианте до сих пор не включены в блоки моделирования коммерческих ГИС. Несмотря на это, подход к моделированию на основе триангуляции обладает несомненным потенциалом для дальнейшего развития и совершенствования с целью создания достоверных моделей.

В основе *третьего подхода* лежит тот же принцип, по которому человек определяет высоту в произвольной точке на топографической карте, то есть, определяются расстояния до двух ближайших изолиний разного уровня и на основе полученных расстояний и значений уровня изолиний выполняется линейная интерполяция. Учет топологической структуры изолиний происходит благодаря тому, что под ближайшим расстоянием подразумевается не обычное евклидово расстояние, а его аналог, учитывающий топологию изолиний. Если обычное евклидово расстояние между двумя точками можно определить как минимум среди длин всех непрерывных кривых, соединяющих эти точки, то в данном случае минимум ищется только среди кривых, не пересекающих изолинии. Таким образом, в областях, ограниченных изолиниями двух различных уровней, вычисленная цифровая модель будет корректной по высотам. Методы, использующие для моделирования указанные принципы, предлагаются и обсуждаются в работах [81, 105, 133, 117] и реализованы в ГИС GRASS и ILWIS. Несмотря на различия в способах вычисления расстояний, все они базируются на растровом подходе, при котором исходные изолинии сначала rasterизуются на сетку, а затем к полученному растру применяются различные методы обработки изображений. Для сохранения топологической структуры изолиний размерность сетки при этом должна выбираться так, чтобы при rasterизации изолинии разного уровня не попадали в один пиксел раstra. При таком подходе теряется информация о соседстве изолиний, что не позволяет автоматически моделировать локальные вершины и впадины, ограниченные изолинией одного уровня. В результате в областях, ограниченных изолиниями только одного уровня, все алгоритмы строят горизонтальную поверхность. Чтобы избежать этого, приходится вручную добавлять к исходным данным дополнительные высотные отметки, кото-

рые трактуются как изолинии, состоящие из одной точки, что довольно трудоемко. Автором разработан алгоритм, базирующийся на такой же идее, однако использующий векторный подход при моделировании, что позволяет избежать недостатков, свойственных растровому подходу. Подробно алгоритм изложен в разделе 2.1.

В *четвертом подходе* используются сплайны с натяжением, однако не в явном виде радиальной интерполяции, а как численное решение дифференциального уравнения в частных производных четвертого порядка (см. раздел 1.2). Для сплайнов минимальной кривизны это бигармоническое уравнение  $\nabla^2(\nabla^2 f) = \delta(x - x_i, y - y_i)$ . В отличие от радиальной интерполяции такой подход мало чувствителен к нерегулярности расположения точек, что позволяет использовать его для изолинейных исходных данных. Формально метод сводится к моделированию по данным в точках, и в таком виде изложен в работах [60, 131]. Применительно к изолиниям этот подход активно разрабатывался Хатчинсоном [86, 87, 88], на основе его разработок создана программа ANUDEM [151], которая была использована для создания цифровой модели рельефа на всю территорию Австралии [89], а позднее вошла в модуль TOPOGRID ArcGIS. Основываясь на численных экспериментах, Хатчинсон предложил оптимальное значение параметра натяжения, а также способ включения в процесс моделирования объектов гидрографии и способ устранения локальных впадин на уже построенной модели с целью создания гидрологически корректных ЦМР. Другие способы постобработки уже готовых моделей предложены в работах [79, 119], и были использованы для коррекции моделей DEM и NED национального банка данных США. Предложенный Хатчинсоном метод является наиболее популярным в настоящее время, хотя и не лишен некоторых недостатков. Прежде всего, в методе не учитывается топологическая структура изолиний, что может приводить к недостоверным по высотам моделям. Во-вторых, несмотря на применение мультисеточных алгоритмов для численного интегрирования дифференциальных уравнений, время счета может быть довольно большим (см. раздел 2.1). Причем опыт применения алгоритма (см., например, [4], где модуль TOPOGRID был использован для построения глобальной ЦМР на территорию Украины по картам масштаба 1:200000) показывает, что предлагаемый Хатчинсоном способ уст-

ранения локальных впадин работает корректно далеко не всегда.

#### **1.4. Визуализация цифровых моделей рельефа, использование в научных исследованиях и автоматизированной картографии.**

Средства визуализации (отображения) цифровых моделей рельефа являются неотъемлемой частью любых программных систем, работающих с ЦМР (соответствующих блоков ГИС или специализированных программ), осуществляя представление цифровых данных в графической форме, удобной и понятной человеку. Кроме того, визуализация тесно связана и с интерпретацией – само изображение может служить основой для принятия решений без привлечения количественного анализа.

В зависимости от целей визуализация ЦМР разделяется на два типа:

- *интерактивная* визуализация, при которой не теряется непосредственная связь с исходной ЦМР, помогающая пользователю изучать модель непосредственно на экране дисплея и выдвигать, проверять и уточнять гипотезы в режиме реального времени;
- *статическая* визуализация, используемая для представления результатов на бумажных или электронных носителях в виде карт, отчетов, иллюстраций, видеофильмов и т.д.

Каждый из типов опирается в своей основе на одни и те же способы отображения рельефа, отличаясь в деталях реализации алгоритмов, способов картографического оформления изображения, компоновки и некоторых функциональных элементах. Во время интерактивной визуализации исследователь находится в постоянном взаимодействии с программой, имея возможность в режиме реального времени изменять параметры способов отображения, комбинировать эти способы в различных сочетаниях, пользоваться специальными возможностями программы в виде всплывающих подсказок и др. При статической визуализации все внимание сосредотачивается на подготовке определенного варианта изображения, соответствующим образом скомпонованного и оформленного. Гораздо большее внимание здесь уделяется качеству создаваемого изображения, что требует использования более совершенных и разнообразных по своим возможностям алгоритмов. При статической визуализации непосредственная связь с цифровыми данными, по которым было получено изображение, утрачивается, хотя некоторая опосредованная связь сохраняется в объеме,

определяемом данным конкретным способом отображения. В этом смысле готовый видеофильм, содержанием которого является "облет" поверхности, относится к статическому типу визуализации (хотя сам *способ* визуализации является динамическим), поскольку мы не можем изменить траекторию полета, раскраску поверхности и другие параметры этого способа отображения, имея в распоряжении только сам видеофильм.

Зачастую возможностей программного обеспечения для работы с ЦМР оказывается недостаточно для создания изображения необходимого качества, как с точки зрения содержания, так и оформления. Автоматически созданное изображение может потребовать дополнительного редактирования вручную, в программе могут отсутствовать необходимые средства оформления в виде специальных картографических знаков или способов компоновки. Для окончательного оформления изображения в таких случаях приходится прибегать к использованию специализированных графических или видео редакторов.

В традиционной картографии для отображения рельефа используются следующие способы [5, 6, 7, 13]:

- профили;
- горизонтали
- послойная окраска;
- способ штрихов;
- освещенные горизонтали;
- светотеневая пластика;
- блок-диаграммы;
- перспективные изображения.

Все эти способы получили свое воплощение в цифровой форме в виде различных алгоритмов, основанных на использовании в качестве исходных данных цифровой модели рельефа. Исключением являются, пожалуй, только перспективные изображения, поскольку в их создании присутствует слишком большой элемент художественности. Заменой этого способа можно считать реалистические геоизображения (см. Приложение \*\*\*).

Построение профилей вдоль любых кривых не представляет трудностей, если известен способ восстановления значений высот в произвольной точке области определения ЦМР.

Методы вычисления координат изолиний предлагаются в работах

[41, 55, 57, 92, 97, 106, 138, 141]. Большое внимание в них уделяется построению гладких линий по моделям с редкой сеткой с целью улучшения качества изображения. Для этого выполняется дополнительная триангуляция ячеек сетки, используются более сложные, чем билинейные, функции восстановления поверхности. Такой подход был оправдан при жестких требованиях к машинной памяти, когда хранение ЦМР с большими сетками было непозволительной роскошью. При современных технических средствах, когда ЦМР размером в десятки и сотни мегабайт становятся обычным делом, все это приводит к увеличению количества точек, представляющих изолинии и, соответственно, увеличению времени счета и рисовки, неоправданных с точки зрения качества изолиний, особенно при интерактивной визуализации. В разделе 2.2 вопрос вычисления координат изолиний рассмотрен более подробно, и предложен алгоритм, позволяющий как минимум на треть сократить время вычисления и рисовки по сравнению с другими методами.

При отображении рельефа методом послойной окраски возможны два подхода: растровый и векторный. При растровом подходе каждый узел цифровой модели изображается в виде прямоугольника соответствующего размеру ячейки сетки и окрашивается соответственно выбранной шкале в зависимости от значения высоты в данном узле. Получаемые таким способом изображения имеют низкое качество, особенно при небольшом количестве узлов. Скорость рисовки практически не зависит от количества интервалов шкалы.

При векторном подходе вычисляются координаты границы области для данного интервала шкалы сечений, и полученная область закрашивается соответствующим цветом. Здесь используются те же алгоритмы, что и при вычислении координат изолиний, только с некоторыми дополнениями, поскольку в границу таких областей могут входить не только изолинии, но и участки границы области моделирования. Получаемое изображение имеет гораздо более высокое качество, хотя такой подход может потребовать намного большего времени на рисовку, поскольку это время непосредственно зависит от количества интервалов шкалы сечений.

Способы автоматизации метода штрихов рассматриваются в работах [95, 146]. В первой из них предлагается технология и методика создания таких изображений в рамках GIS ArcView с использованием приведенной

здесь же программы на встроенном языке программирования Avenu.

Алгоритмы, основанные на методе освещенных горизонталей, предложенном Танакой [132], излагаются в работах [96, 145].

Большое количество работ посвящено автоматизации наиболее выразительного приема светотеневого изображения рельефа – отмывке. Подробное изложение этой темы вынесено в раздел 3.2, где рассматриваются алгоритмы аналитической отмывки и предлагаются методики и технологии их использования в комплексе "МАГ".

Основная трудность при построении блок-диаграмм связана с удалением невидимых из точки наблюдения участков поверхности. Алгоритмы, решающие эту задачу при отображении поверхности с помощью системы сечений параллельными плоскостями, получили название алгоритмов удаления невидимых линий и подробно рассматриваются в работах по машинной графике [35, 36, 50].

### **1.5. Программные средства моделирования и анализа рельефа.**

В настоящее время блоки (или программные модули) для моделирования, отображения и анализа рельефа стали неотъемлемой частью большинства геоинформационных систем (ГИС). Кроме того, существует и специализированное программное обеспечение, используемое как самостоятельно, так и совместно с ГИС, которое ориентировано только на работу с цифровыми моделями географических полей (в том числе и рельефа), или даже только на один из аспектов этой работы, например, создание виртуальных геоизображений, «облет» территории (см. Приложение **XIV**, где приведены примеры виртуальных геоизображений, созданных модулем Terrain программы Scanex Image Processor).

Исследование современного состояния в области развития методов создания и использования ЦМР проводилось по наиболее популярным ГИС-пакетам, имеющим в своем составе такие модули (ArcGIS, GRASS, ILWIS, IDRISI, GeoMedia), специализированным программам (SURFER) и по научным публикациям на эту тему. Результаты исследования отражены в Таблице 1. В области анализа ЦМР приведены только базовые методы карто- и морфометрии, как наиболее часто используемые в большинстве исследований и составляющие основу многих других методов анализа.

Внимательное изучение возможностей перечисленных программных

средств позволяет сделать следующие выводы.

- 1) Практически все без исключения блоки ГИС включают в свой состав большое количество методов тематического и статистического анализа ЦМР, в частности, гидрологического анализа. Многие методы анализа берут свое происхождение из методов обработки изображений, использующихся для снимков.
- 2) Методы визуализации основаны на растровом подходе, что существенно снижает картографическое качество изображений, кроме того, таких методов недостаточно (исключение – пакет SURFER).
- 3) Большинство блоков ГИС недостаточно оснащены методами моделирования (лидером здесь является ArcGIS), особенно по изолинейным исходным данным. Возможно, это связано с тем, что разработчики ГИС (как правило, это американские фирмы) ориентируются на использование готовых ЦМР. Во всех модулях предусмотрена загрузка моделей в форматах национальных банков данных ЦМР, в основном USGS DEM и DTED и многих пользователей, особенно в США, такой подход устраивает. Однако для российских пользователей это является существенным недостатком, поскольку на территорию России такие модели отсутствуют. Пользователям приходится создавать их самим, причем основным и общедоступным источником данных о рельефе являются топографические карты.

Таблица 1. Методы моделирования, отображения и анализа рельефа (на основе анализа публикаций и программных средств)	GeoMedia	SURFER	ArcGIS	GRASS	ILWIS	IDRISI	MAP
<b>Моделирование по данным в точках</b>							
Средневзвешенная интерполяция и аппроксимация	●	●	●	●	●	●	★
Метод Шепарда		●					●
Скользкие средние (в т.ч. линейные и квадратичные)		●			●		●
Кригинг		●	●		●	●	●
Радиальные функции, в том числе:		●					★
✓ сплайны минимальной кривизны	●	●	●				●
✓ сплайны с натяжением		●	●				●
✓ регуляризованные сплайны			●				●
✓ регуляризованные сплайны с натяжением				●			●
Сплайны с натяжением (численный подход)		●					●
Иерархические B-сплайны							●
Интерполяция на основе триангуляции, в том числе:		●	●		●	●	★
✓ линейная интерполяция		●	●		●	●	●
✓ гладкая интерполяция							★
✓ устранение граничных эффектов							★
✓ экстраполяция за пределы выпуклой оболочки						●	★
Многомерное моделирование				●			●
<b>Моделирование по изолиниям</b>							
Триангуляция с ограничениями			●			●	
Сплайны с натяжением (численный подход) с учетом объектов гидрографии			●				●
Интерполяция по двум ближайшим горизонталям разного уровня (растровый подход)				●	●		
Интерполяция по профилям в восьми направлениях						●	●
Авторский метод							★
<b>Отображение</b>							
Способ изолиний, в том числе:	●	●	●	●			★
✓ автоматическая расстановка подписей	●	●					●
✓ сглаживание изолиний		●					★
Послойная окраска	●	●	●	●	●		★
Освещенные горизонтالي							★
Аналитическая отмывка	●	●	●	●	●	●	★
Градиентное поле	●	●					●
Линии тока				●			●
Блок-диаграмма или трехмерный вид	●	●	●	●	●	●	●
<b>Карто- и морфометрия</b>							
Углы наклона	●	●	●	●	●	●	★
Экспозиция склонов	●	●	●	●	●	●	★
Кривизны (продольная и поперечная)		●	●	●	●	●	●
Вертикальная расчлененность	●	●	●	●	●	●	★
Вычисление площади поверхности		●					●
Вычисление объема		●	●				●
Метод: ● - реализован в полном объеме; ○ - реализован частично; ★ - усовершенствован или разработан автором.							

## ГЛАВА 2. НОВЫЕ АЛГОРИТМЫ И МЕТОДИКИ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА

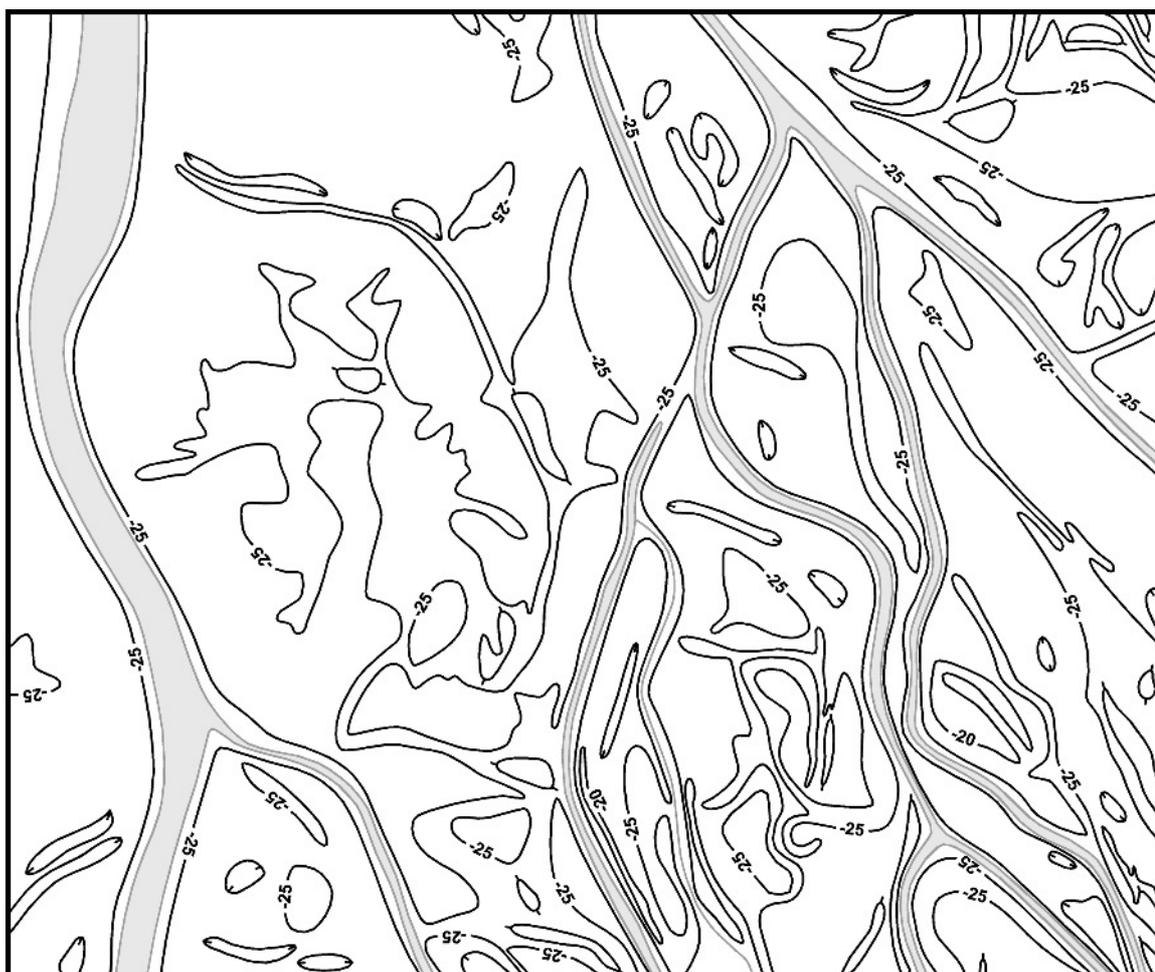
Проведенный в первой главе анализ возможностей существующего программного обеспечения показал его недостаточную оснащенность алгоритмами и методами для эффективного решения многих научно-исследовательских и практических задач. В связи с этим для создаваемого блока ГИС разработаны новые алгоритмы и методы в области моделирования, визуализации и анализа рельефа, модифицированы и усовершенствованы многие уже существующие алгоритмы, а также предложены методики их применения, выработанные на основе большого числа практических экспериментов.

### 2.1. Алгоритм создания ЦМР по горизонталям, оцифрованным с топографических карт

На настоящий момент методов моделирования по изолиниям разработано не очень много (см. раздел 1.3 и таблицу 1), причем для некоторых типов рельефа (как правило, равнинных, с небольшим перепадом высот), ни один из них не позволяет построить модель, достоверную по высотам. Типичный пример такого рельефа приведен на **Рис. 11** (участок дельты Волги в районе пос. Гандурино, Камызякский район Астраханской области). Сложность для моделирования состоит в том, что здесь все изолинии, за исключением двух, имеют один и тот же уровень. Ни один из известных методов не позволяет правильно моделировать области с высотами выше и ниже отметки  $-25$ . Без помощи подписей и бергштрихов это трудно сделать даже при визуальном анализе.

Предлагаемый алгоритм [98], позволяет создавать достоверные (в смысле, предложенном в разделе 1.3) по высотам ЦМР для любого типа рельефа, в том числе и представленного на **Рис. 11**. В своей базовой части, как и в пакетах GRASS [117] и ILWIS [152], он основан на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изолиний разного уровня (расстояния измеряются вдоль линий, не пересекающих горизонтали), и последующей линейной интерполяции. Главной особенностью алгоритма является интерпретация изолиний как векторных объектов, что позволяет корректно определять высоты на участках, ограниченных только изолинией

одного уровня, исходя из значений на смежных участках. Поэтому для рельефа на **Рис. 11** вполне достаточно двух горизонталей уровня –20, чтобы корректно определить высоты на участках, ограниченных только горизонталями уровня –25. Поскольку алгоритм опирается на топологическую структуру горизонталей, для его качественной работы необходимо правильно подготовить исходные данные. Оцифрованные изолинии не должны иметь разрывов, должны быть либо замкнутыми, либо начинаться и заканчиваться вне области моделирования.



*Рис. 11. Район дельты Волги вблизи пос. Гандурино, Камызякский р-н Астраханской обл. Горизонталы оцифрованы с топографической карты масштаба 1:50000.*

Работа алгоритма состоит из двух этапов. На первом из них (**Рис. 12**) определяются пересечения изолиний со всеми ребрами сетки, включая диагональные. Такие ребра помечаются, а соответствующим узлам сетки приписывается расстояние до точки пересечения с изолинией и значение уровня этой изолинии. При этом возможны следующие случаи:

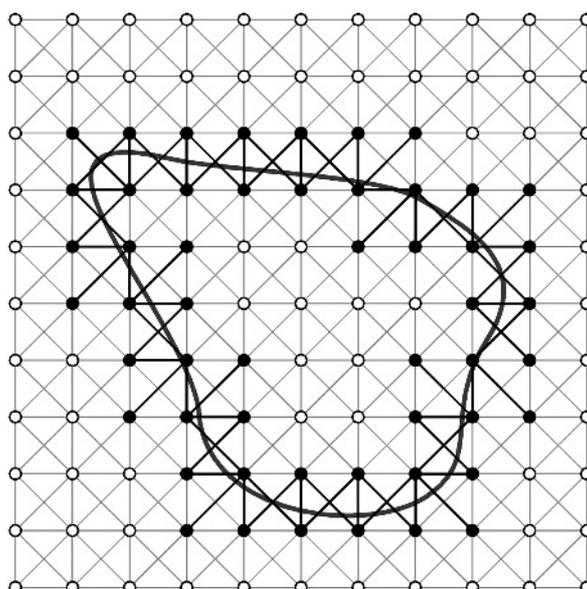
- узлу уже приписано некоторое расстояние до изолинии этого же уровня, в этом случае выбирается меньшее из расстояний;
- узлу приписано только одно расстояние, причем до изолинии другого уровня, в этом случае запоминаются оба расстояния и соответствующие уровни изолиний;
- узлу приписаны два расстояния до изолиний разного уровня, причем новое расстояние вычислено до изолинии третьего уровня, в этом случае запоминаются только два значения с меньшими расстояниями.

Таким образом, для каждого узла сетки запоминается не более двух расстояний до изолиний с разными значениями уровней.

По окончании работы первого этапа алгоритма некоторые ребра сетки становятся помеченными, а соответствующим узлам приписаны расстояния до не более чем двух изолиний разного уровня (на **Рис. 12** эти узлы обозначены черными кружками).

На втором этапе определяются расстояния до двух ближайших изолиний от тех узлов сетки, которым не были приписаны значения на первом этапе (на **Рис. 12** они обозначены белыми кружками). Вычисление выполняется с помощью волнового итерационного алгоритма, причем вычисляются сеточные расстояния, т.е. расстояния вдоль ломаных, вершины кото-

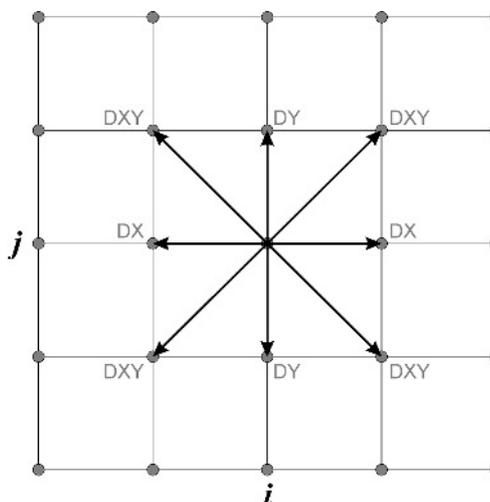
рых находятся в узлах сетки. Ошибка по сравнению с обычным евклидовым расстоянием не превышает 8%, что вполне приемлемо для последующих вычислений высот. Во время выполнения каждой итерации последовательно перебираются узлы сетки, и из тех из них, которым уже приписаны расстояния, выпускается "волна" в восьми направлениях (**Рис. 13**) вдоль ребер сетки. Если



*Рис. 12. Первый этап работы алгоритма моделирования рельефа по изолиниям. Выделены ребра сетки, пересекающие изолинию и узлы, которым приписываются расстояния до изолинии и значения соответствующих уровней.*

ребро помечено, то движение в этом направлении запрещается. Таким образом, расстояния вычисляются только вдоль линий, не пересекающих исходные изолинии, за счет чего достигается топологическая корректность и, соответственно, достоверность модели по высотам.

К расстояниям, которые приписаны к текущему узлу с индексами  $(i, j)$ , прибавляется длина ребра сетки (на **Рис. 13** эти длины обозначены через  $DX$ ,  $DY$ ,  $DXY$ ), вдоль которого выполняется движение. Полученные новые расстояния и соответствующие им уровни изолинии сравниваются с теми, которые приписаны узлу, в который мы попали. Замена значений расстояний в новом



*Рис. 13. Второй этап работы алгоритма моделирования рельефа по изолиниям. Из каждого узла сетки выпускается "волна" по восьми направлениям с соответствующими приращениями расстояний.*

узле происходит по тому же принципу, что и на первом этапе (три возможных случая). Итерации выполняются до тех пор, пока в значениях расстояний, приписанных узлам, происходят изменения. Можно доказать, что количество итераций при этом всегда будет конечно. Для ускорения сходимости (уменьшения количества итераций) порядок обхода узлов сетки циклически изменяется. Сначала обход начинается из левого нижнего узла, затем из правого верхнего, левого верхнего, правого нижнего и т.д. Для некоторых типов рельефа такой подход позволяет сократить количество итераций почти на треть, что существенно при большой размерности сетки ЦМР. Практический опыт показывает, что в среднем требуется выполнить 10-12 итераций, причем их количество зависит только от топологической структуры изолиний (извилистости).

После того, как цикл итераций завершен, всем узлам сетки будут приписаны расстояния до ближайших изолиний и значения уровней этих изолиний. Однако для некоторых узлов ближайших изолиний будет две, а для некоторых – только одна. Дело в том, что изолинии разбивают область определения ЦМР на участки, в границу которых могут входить либо изо-

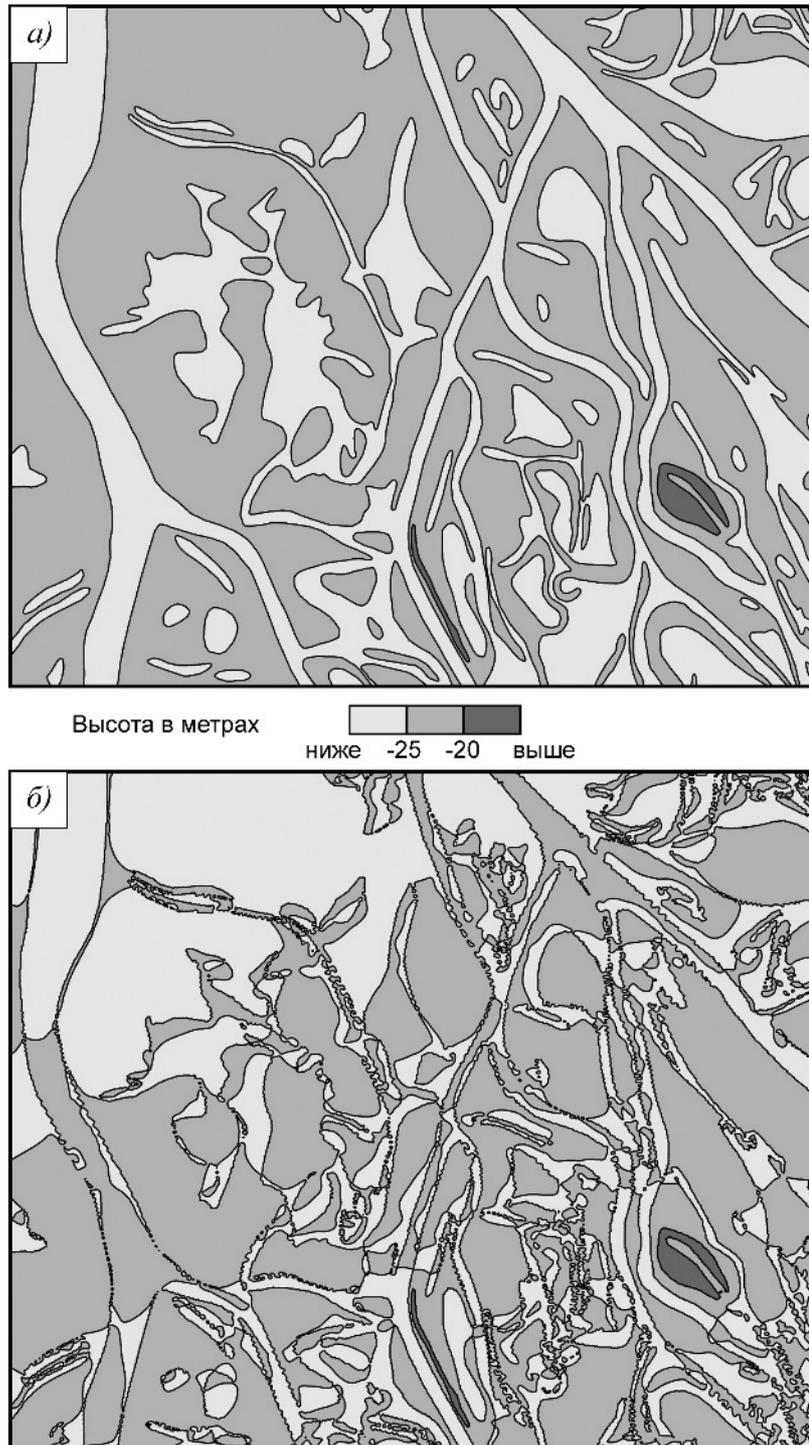


Рис. 14. Результаты моделирования по данным **Рис. 11**: а) авторский метод (время счета 0.7 мин.); б) метод Хатчинсона (8мин.).

линии двух различных уровней, либо только одного (локальные холмы и впадины, граничные участки). В узлах с двумя значениями уже можно вычислить высоты по формуле

$$h = \frac{h_1 d_2 + h_2 d_1}{d_1 + d_2},$$

где  $d_1, d_2$  - расстояния до ближайших изолиний,  $h_1, h_2$  - значения их уровней.

В растровых алгоритмах, используемых пакетами GRASS и ILWIS, вычисления на этом заканчиваются, а узлам с одним расстоянием присваивается значение высоты, равное уровню соответствующей изолинии, что приводит к горизонтальным участкам для областей, ограниченных изолинией одного уровня. Несмотря на разные способы вычисления расстояний, значения высот при использовании различных алгоритмов получаются близкими. Однако растровые алгоритмы могут потребовать значительно меньшего шага сетки, чем предлагаемый векторный алгоритм, поскольку они работают корректно только в том случае, если изолинии разного уровня не попадают в одни и те же точки растра при растеризации. Исходя из этого требования и определяется максимально допустимый шаг сетки. В предлагаемом алгоритме допускается прохождение через одну ячейку сетки произвольного количества изолиний, корректность его работы при этом не нарушается. Главным же недостатком растрового подхода является принципиальная невозможность выполнить дальнейшую обработку узлов с одним значением расстояния, возможную при векторном подходе.

Выполняется такая обработка с помощью дополнительных циклов итераций. Для этого снимается метка с тех ребер, у которых к одному из узлов приписаны два расстояния, а к другому только одно. Тем самым разрешается прохождение "волны" через такие ребра. Далее выполняется дополнительный цикл итераций, аналогичный первому, причем для сокращения времени счета узлы, для которых высоты уже вычислены, в процессе итераций пропускаются. В результате появляются новые узлы с двумя расстояниями, однако по-прежнему могут оставаться и узлы с одним расстоянием (именно такое происходит при моделировании рельефа, представленного на **Рис. 11**). В этом случае выполняется аналогичным образом еще один дополнительный цикл итераций. Такие дополнительные циклы повторяются до тех пор, пока всем узлам не будут приписаны расстояния до двух изолиний разного уровня. Количество требуемых дополнительных циклов опять же зависит от топологической структуры изолиний, в частности для рельефа **Рис. 11** их требуется девять. Вычисление высот в узлах с двумя расстояниями, которые появились после выполнения дополнительных циклов итераций, выполняется по формуле

$$h = h_1 + 0.6 \cdot (-1)^{k+1} \cdot (h_1 - h_2) \sqrt{\frac{d_1}{d_2}},$$

где расстояния пронумерованы так, что  $d_1 < d_2$ , а  $k$  - порядковый номер дополнительного цикла. Коэффициент 0.6 подобран эмпирически, он отвечает за высоту (глубину) локальных максимумов (минимумов) относительно уровня ограничивающей их изолинии.

Благодаря векторному подходу и учету топологической структуры изолиний предлагаемый метод, в отличие от других, позволяет создавать достоверные по высотам модели для **любого** типа рельефа. Использование волнового итерационного алгоритма для вычисления сеточных расстояний делает его высокоэффективным с вычислительной точки зрения - алгоритм работает очень быстро. Время работы второго этапа линейно зависит только от количества узлов сетки. На первом этапе присутствует зависимость времени счета как от объема исходных данных, так и от размерности сетки, время его работы составляет в среднем 0.5-2% от времени работы второго этапа. Результаты расчета для рельефа **Рис. 11** приведены на **Рис. 14а**. Размерность сетки 951\*801 узлов (шаг 10 метров), время счета 0.7 минуты. Для сравнения на **Рис. 14б** приведены результаты моделирования методом Хатчинсона (время счета 8 минут), который используется в модуле TOPO-GRID ArcGIS и считается одним из лучших на сегодняшний день методов моделирования рельефа по изолиниям. Хорошо видно, что построенная ЦМР не отвечает требованию достоверности по высотам. Практически на всей области определения ЦМР, за исключением небольших участков вокруг изолиний уровня -20, значения высот этой модели не отклоняются от значения -25 более чем на 0.1 метра. Различия между моделями хорошо видны на цветных иллюстрациях (Приложение **XV**), где в качестве способа визуализации использована аналитическая отмывка, совмещенная с послойной окраской, а также показаны исходные изолинии, по которым строилась модель, и объекты гидрографии.

Выше изложена только базовая часть алгоритма. Дополнения к ней позволяют учитывать при моделировании линии обрывов, границы оврагов, площадные объекты гидрографии с отметками урезов воды. В настоящий момент ведется работа по усовершенствованию алгоритма с целью использования в процессе моделирования линейных объектов гидрогра-

фии, а также дополнительной обработки ЦМР, имея ввиду конечной целью создание структурно достоверных цифровых моделей.

## 2.2. Вычисление координат изолиний по сеточной ЦМР

Горизонталы – основной способ изображения рельефа на современных картах, обеспечивающий высокую метричность изображения [5,7]. Геометрически горизонталы (изолинии) являются проекцией на координатную плоскость XY сечений поверхности рельефа горизонтальными плоскостями и определяются как множество точек, удовлетворяющих уравнению  $f(x, y) = const$ , где  $f(x, y)$  - модельная функция, описывающая рельеф. Заметим, что решением указанного уравнения является не одна горизонталь, а весь набор горизонталей заданного уровня.

С алгоритмической точки зрения автоматическое отображение рельефа в горизонталях можно разбить на два этапа:

- вычисление координат горизонталей по ЦМР;
- отображение горизонталей в соответствии с правилами, принятыми в картографии.

Теоретические и практические работы по автоматическому выделению изолиний по ЦМР появились в начале 60-х годов, одновременно с началом разработки концепций цифровой модели рельефа и методов ее создания [57]. Самые первые программы сводились к построению сегмента изолинии в виде отрезка внутри элементарной ячейки цифровой модели (треугольник либо прямоугольник) и непосредственному отображению этого отрезка, то есть, второй этап создания карты, состоящий из отображения изолиний, выполнялся одновременно с первым. Поскольку при таком подходе невозможно в полной мере решать задачи второго этапа (автоматическое размещение подписей и бергштрихов, сглаживание, отображение в виде штрих-пунктирных линий и т.д.), в которых требуется наличие линии целиком, потребовалось разработать алгоритмы вычисления горизонталей не в виде хаотического набора отрезков, а в виде ломаных, представляющих собой упорядоченную последовательность отрезков. Кроме того, чтобы правильно разместить подписи или бергштрихи, линии должны иметь определенную ориентацию, то есть, при движении вдоль линии от начала к концу область с меньшими значениями высот должна находиться, например, справа. При решении этой задачи, составляющей

основу первого этапа, сформировалось два подхода.

В первом из них сегменты изолинии сразу вычисляются в нужном порядке. Для этого сначала ищется любая ячейка, через которую проходит изолиния, вычисляется сегмент внутри этой ячейки, определяется его ориентация, то есть, направление, в котором необходимо двигаться, а затем делается переход к соседней ячейке, находящейся в нужном направлении. Для триангуляционных моделей отношения соседства ячеек (в данном случае это треугольники) хранятся в структуре триангуляции. В сеточных ЦМР отношения соседства ячеек определяются самой структурой сетки, для перехода к соседней ячейке необходимо просто изменить на единицу индекс ячейки по вертикали или горизонтали. Вычисления заканчиваются, когда отслеживаемая изолиния либо возвращается к начальной точке, либо выходит на границу области определения ЦМР. Алгоритмы, реализующие такой подход, получили название алгоритмов *трассировки*, время их работы оценивается как  $O(n)$ , где  $n$  – количество вершин ломаной, представляющей изолинию. Алгоритмы, реализующие первый подход, описаны в работах [57, 61, 97, 106, 141].

Во втором подходе сегменты вычисляются в произвольном порядке, а затем сортируются так, чтобы они образовали нужную последовательность с заданной ориентацией. Такие алгоритмы получили название алгоритмов *сборки*, время их работы оценивается в лучшем случае как  $O(n \log n)$ , поскольку это лучшее время работы алгоритмов сортировки, составляющих их основную часть. Примеры алгоритмов, реализующих второй подход, содержатся в работах [55, 92, 118, 138].

Несмотря на худшее время выполнения по сравнению с алгоритмами трассировки, алгоритмы сборки имеют свои достоинства. Они не требуют для своей работы хранения в оперативной памяти компьютера сразу всей модели целиком, что может быть полезным при вычислении координат горизонталей по триангуляционным ЦМР очень большого объема.

Оба указанных выше подхода опираются на вычисление сегмента изолинии внутри одной ячейки ЦМР. В триангуляционных моделях ячейка является треугольником и для представления поверхности внутри ячейки используется линейная функция, коэффициенты которой однозначно определяются по значениям высот в вершинах треугольника. Изолиния в этом случае пересекает ровно две стороны треугольника и внутри него пред-

ставляет собой отрезок. Координаты точки пересечения изолинии с ребром треугольника вычисляются по формулам:

$$\begin{cases} x_p = x_1 + c(x_2 - x_1) \\ y_p = y_1 + c(y_2 - y_1) \end{cases}$$

где  $c = (z_p - z_1)/(z_2 - z_1)$ ;  $x_1, y_1, z_1$  - координаты первой вершины ребра и значение высоты в ней;  $x_2, y_2, z_2$  - координаты второй вершины ребра и соответствующее значение высоты;  $x_p, y_p, z_p$  - координаты точки пересечения и значение уровня изолинии.

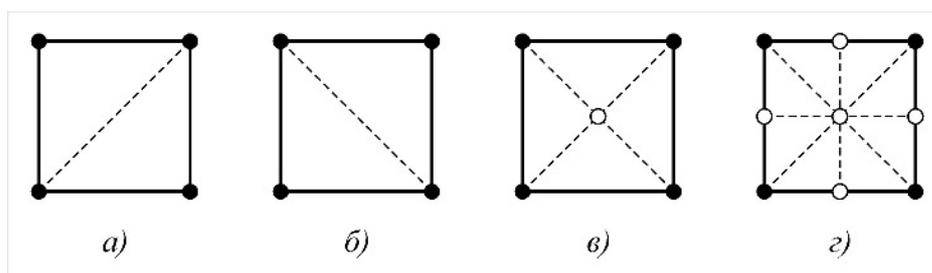


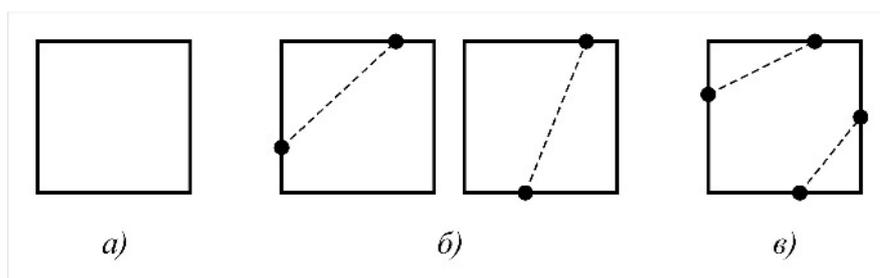
Рис. 15. Способы триангуляции прямоугольной ячейки в случае сеточной ЦМР: а), б) разбиение на два треугольника; в) разбиение на четыре треугольника с добавлением одной дополнительной точки; г) разбиение на восемь треугольников с добавлением пяти дополнительных точек.

Для сеточных ЦМР дело обстоит несколько сложнее. Как правило, задача сводится к предыдущей путем триангуляции ячеек сетки. Такая триангуляция может быть выполнена несколькими способами, некоторые из них показаны на **Рис. 15**. Варианты в) и г) требуют вычисления значений высот в дополнительных точках, расположенных в центре ячейки и в середине ребер. Это можно сделать с помощью билинейной функции

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

коэффициенты которой однозначно определяется по значениям в четырех точках, являющихся узлами ячейки. В случае редкой сетки (большого шага между узлами) для получения достаточно гладкой изолинии можно использовать полиномы более высокой степени – биквадратические или бикубические [69], требующие для вычисления коэффициентов привлечения значений в узлах соседних ячеек. Каждый из способов триангуляции ячейки сетки имеет свои недостатки. Первые два варианта во многих случаях приводят к появлению в рисунке горизонталей некоторой структурности, создающей впечатление вытянутости форм рельефа вдоль диагонали ячей-

ки, с помощью которой выполнена триангуляция. Третий и четвертый способы позволяют получить горизонтали хорошего качества, особенно для



*Рис. 16. Возможные виды ячеек сетки ЦМР при проведении горизонтали заданного уровня: а) ребра ячейки сетки не имеют пересечений с горизонталью; б) горизонталь пересекает два ребра из четырех; в) горизонталь пересекает все четыре ребра (случай седловины).*

сеток с небольшим числом узлов (большим шагом). Однако для сеток с маленьким шагом эти способы приводят к избыточному количеству вершин ломаной, представляющей изолинию, без улучшения качества их отображения. Такая лишняя информация требует дополнительных затрат машинной памяти и времени на вычисление, обработку и отрисовку горизонталей, что существенно при интерактивной визуализации.

Для повышения эффективности (сокращение требуемого объема памяти и времени вычисления) без потери качества изображения был разработан новый алгоритм вычисления координат изолиний, базирующийся на идее трассировки и не требующий дополнительной триангуляции прямоугольных ячеек сетки. Суть алгоритма состоит в следующем (изложены только основные идеи без деталей реализации на конкретном языке программирования).

Для каждого фиксированного уровня  $z_p$  изолинии выполняется поиск ребер сетки, которые эта изолиния пересекает, исходя из условия, что на ребрах функция высоты является линейной. Таким образом, изолиния может пересекать ребро только в одной точке, а именно, когда значение высоты в одном узле больше уровня горизонтали, а в другом меньше. Такие ребра помечаются как имеющие пересечение с изолинией. Поскольку каждая ячейка сетки имеет четыре ребра, возможны следующие ситуации (**Рис. 16**):

- 1) ни одно из ребер ячейки не помечено – через такую ячейку изолиния

не проходит;

- 2) помечены ровно два ребра из четырех – такая ячейка содержит один сегмент изолинии, соединяющий обе точки пересечения;
- 3) помечены все четыре ребра – ячейка содержит два сегмента изолиний, соединяющих точки пересечения попарно.

### Элементарный

анализ показывает, что других ситуаций быть не может. Третий случай соответствует седловине, здесь существуют три возможных способа попарного соединения точек пересечения, показанных на

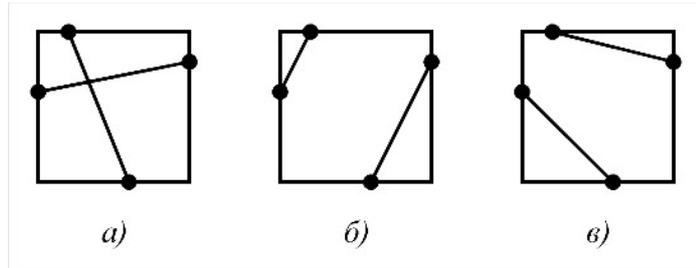


Рис. 17. Способы проведения элементарных сегментов горизонталей внутри одной ячейки сетки в случае седловины: а) неправильно; б), в) правильно.

**Рис. 17.** Поскольку с целью сокращения количества вершин ломаной триангуляция ячейки не выполняется, необходимо выбрать из трех возможных вариантов один. На самом деле, приходится выбирать только из двух, поскольку вариант **Рис. 17а** не удовлетворяет картографическим требованиям (изолинии в этом случае пересекаются). Выбор между оставшимися двумя вариантами делается на основе анализа поведения внутри ячейки билинейной функции, интерполирующей значения высот в ее узлах. Обозначим значения высот в узлах ячейки с индексами  $i$  и  $j$  через  $z_{ij}$ ,  $z_{i+1,j}$ ,  $z_{i,j+1}$ ,  $z_{i+1,j+1}$  (значение  $z_{ij}$  соответствует левому нижнему узлу ячейки). Основой для принятия решения служит величина  $v$ , вычисляемая по формуле

$$v = \frac{z_{ij}z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j}z_{i,j+1}}{z_{ij} + z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j} - z_{i,j+1}}.$$

Если значения  $(z_{ij} - v)$  и  $(z_p - v)$  имеют одинаковый знак, то для соединения точек выбирается вариант **Рис. 17в**, в противном случае – вариант **Рис. 17б**. Таким образом, способ проведения элементарного сегмента изолинии внутри одной ячейки сетки полностью описан. Ориентация сегмента определяется по значениям в узлах сетки, находящихся слева от отрезка при движении вдоль него от первой точки ко второй. Ориентацию

требуется определять и запоминать только для первого сегмента изолинии.

Перейдем теперь к описанию алгоритма трассировки. Сначала последовательно перебираются все ячейки сетки до тех пор, пока не будет найдена ячейка, содержащая помеченные ребра, то есть та, через которую проходит изолиния. Внутри этой ячейки по правилам, указанным выше, вычисляется сегмент изолинии и определяется его ориентация. Далее делается переход в ячейку, смежную с текущей по ребру, на котором лежит вторая точка сегмента и внутри нее вычисляется следующий сегмент изолинии. При этом требуется вычислять координаты только одной точки. Переход к смежным ячейкам и последовательное вычисление координат очередной вершины ломаной продолжается до тех пор, пока мы либо не вернемся к первому ребру, либо не попадем на границу. В первом случае получается замкнутая изолиния и остается только изменить порядок следования вершин ломаной (ориентацию), если первый сегмент был ориентирован в направлении, противоположном требуемому. Во втором случае мы имеем дело с изолинией, которая начинается и заканчивается на границе области определения ЦМР. Здесь необходимо вернуться к первой ячейке и начать отслеживать изолинию в противоположном направлении, пока она вновь не выйдет на границу ЦМР. Получившиеся два участка изолинии "склеиваются" затем в одну ломаную с учетом требуемой ориентации. В ходе трассировки с ребер сетки, через которые уже прошла вычисленная изолиния, снимается метка. Такой подход гарантирует, что одна и та же изолиния не будет вычисляться бесконечное число раз.

После того, как координаты очередной изолинии данного уровня вычислены, продолжается перебор ячеек сетки до тех пор, пока опять не будет найдена ячейка, через которую проходит следующая изолиния. Затем, начиная с найденной ячейки, вычисляются координаты очередной изолинии. Алгоритм заканчивает работу, когда все ячейки сетки будут проверены. Результатом работы алгоритма является набор ломаных нужной ориентации (некоторые из них замкнутые), которые представляют весь набор изолиний данного уровня. Таким образом, задача первого этапа автоматического отображения рельефа в горизонталях полностью решена.

Разработанный алгоритм позволяет без потери качества изображения по крайней мере на треть уменьшить количество вершин ломаной, представляющей изолинию, по сравнению с вариантами, использующими до-

полнительную триангуляцию. Соответственно уменьшается используемая машинная память, время на дополнительную обработку (сглаживание, расстановка подписей) и рисовку.

Рассмотрим теперь задачи второго этапа – отображения горизонталей в соответствии с правилами, принятыми в картографии. Наибольший интерес с точки зрения автоматизации представляют следующие из них:

- сглаживание горизонталей;
- автоматическая расстановка подписей;
- автоматическая расстановка бергштрихов.

Задачи по отображению горизонталей в виде утолщенных и разного типа штрих-пунктирных (для вспомогательных и полугоризонталей) линий с алгоритмической точки зрения не представляют интереса, поскольку решаются, как правило, с помощью возможностей, заложенных в системных графических библиотеках. Большой интерес, наряду с задачей выбора шкалы сечений, они представляют с точки зрения организации удобного интерфейса пользователя. Так, например, в интерфейс программы визуализации должны быть заложены возможности как создавать собственную шкалу сечений, так и выбирать один из стандартных вариантов шкал сечений для конкретных диапазонов высот и масштабов, заранее заложенных в программу разработчиком, либо созданных и сохраненных самим пользователем.

Перечисленные выше задачи наиболее значимы при оформлении печатного варианта карты, позволяя создавать качественное и легко читаемое изображение, в частности, подписи и бергштрихи служат для определения уровня каждой конкретной горизонтали и направления убывания высот. При интерактивной же визуализации на экране дисплея надобность в подобных элементах оформления может не возникать по двум причинам. Первая из них – плохая читаемость из-за низкого разрешения экрана дисплея. Во-вторых, средства для определения уровня горизонталей и направления убывания высот могут быть тем или иным способом встроены в интерфейс программы. Это возможно, поскольку, в отличие от бумажного варианта, здесь не теряется непосредственная связь изображения с цифровой моделью.

В частности, уровень горизонтали может быть показан цветом в соответствии с некоторой цветовой шкалой (аналогично послойной окраске),

значение уровня горизонтали может быть показано или в виде всплывающей подсказки при приближении курсора мыши к конкретной линии, или по щелчку мыши в отдельном окне. Кроме того, в отдельном окне может осуществляться непрерывный показ значений координат и высот, соответствующих текущему положению курсора мыши в пределах области определения ЦМР (именно такой вариант реализован в программе "MAGSURF", **Рис. 18**).

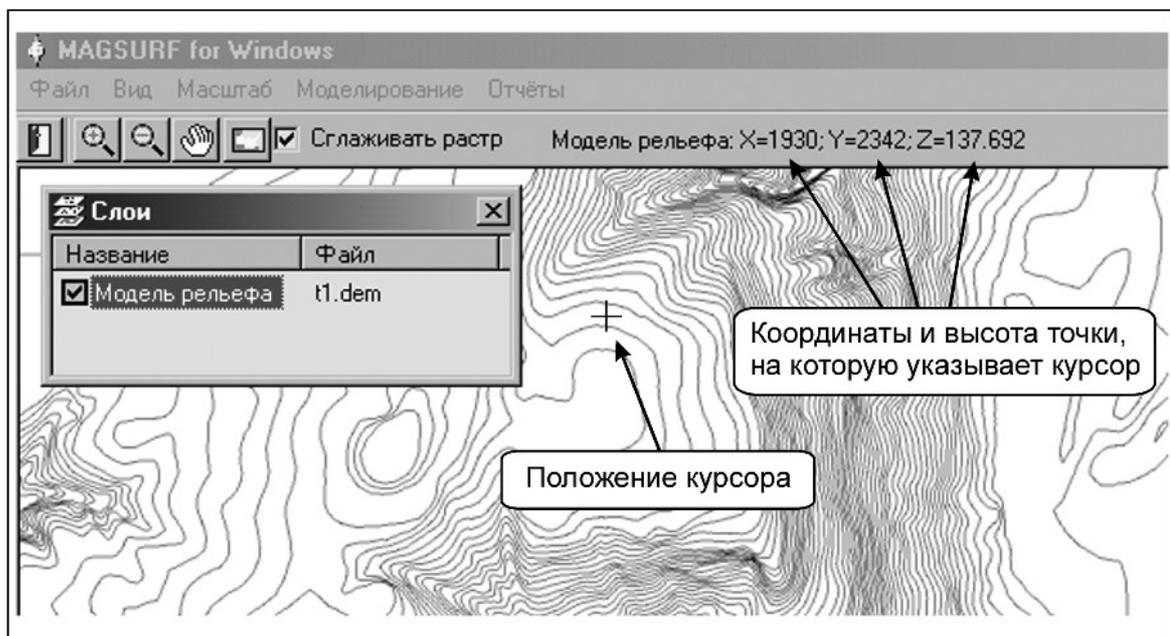


Рис. 18. Интерактивный показ в программе MAGSURF координат и высоты в точке, соответствующей положению курсора.

Необходимость предварительного (перед рисовкой) сглаживания полученных на первом этапе ломаных, представляющих изолинии, может возникнуть по двум причинам. Во-первых, излишняя угловатость, изломанность линий может быть обусловлена методом моделирования, использованным для создания ЦМР. Типичным примером здесь может служить метод, основанный на триангуляции, когда поверхность представляется в виде кусочно-линейной функции. Во-вторых, причиной недостаточной гладкости линий может служить малая размерность сетки ЦМР, особенно при использовании для вычисления координат изолиний алгоритмов, разбивающих ячейку сетки не более чем на два треугольника.

В математике для построения гладких кривых по набору точек на плоскости (в данном случае это вершины ломаной, представляющей изолинию) используют два типа методов:

- *интерполяционные* (кривая проходит точно через точки) – сплайны различной степени [1,16,36,47], сплайны с натяжением [128,65] и др.;
- *аппроксимирующие* (кривая проходит рядом с точками) - кривые Безье [36], сглаживающие сплайны [16,36] и др.

Практические эксперименты показали, что среди аппроксимационных методов для решения задачи сглаживания изолиний более всего подходит математический аппарат сглаживающих сплайнов и кривых Безье второй и третьей степени, с помощью которых на основе исходной ломаной строится гладкая кривая (**Рис. 19**). Более высокая степень полиномов, с помощью которых они определяются, может приводить к слишком сильному сглаживанию и, кроме того, нерациональна с вычислительной точки зрения.

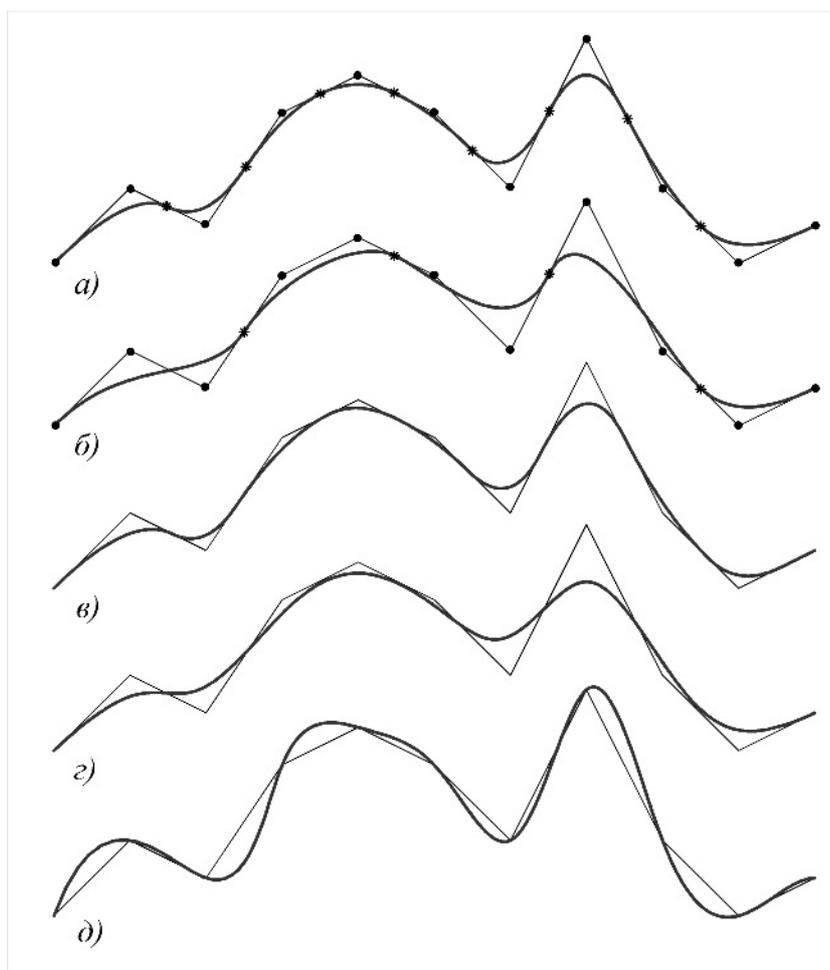


Рис. 19. Способы сглаживания ломаных с помощью: а) кривых Безье 2-й степени; б) кривых Безье 3-й степени; в) В-сплайнов 2-й степени; г) В-сплайнов 3-й степени; д) интерполяционных сплайнов 3-й степени; точками обозначены вершины исходной ломаной, звездочками - дополнительные точки для склейки кривых Безье.

Интерполяционные сплайны (**Рис. 19д**), которые проходят через все точки, для сглаживания изолиний не годятся, поскольку получаемые кривые могут сильно отклоняться от исходной ломаной и, тем самым, либо выходить за пределы области определения ЦМР, либо пересекаться с соседними кривыми (**Рис. 19е**). Это означает, что сглаженные кривые уже не будут являться изолиниями, то есть линиями уровня некоторой поверхности.

Кривая Безье порядка  $n$  определяется по  $n+1$  точке  $\mathbf{p}_k = (x_k, y_k)$ ,  $k = 0, 1, \dots, n$ , с помощью параметрических уравнений

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=0}^n (1-t)^{n-k} t^k C_n^k x_k \\ y(t) = \sum_{k=0}^n (1-t)^{n-k} t^k C_n^k y_k \end{cases}, \quad (5)$$

где  $C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  - биномиальные коэффициенты, а параметр  $t$  изменяется от 0 до 1 [36]. Из уравнений (5) видно, что кривая начинается в точке  $\mathbf{p} = \mathbf{p}_0$  (при  $t=0$ ) и заканчивается в точке  $\mathbf{p} = \mathbf{p}_n$  (при  $t=1$ ). Через остальные точки, за исключением некоторых частных случаев, кривая не проходит. Функции в правой части уравнений (5) являются полиномами степени  $n$ . Поскольку использование высоких степеней при моделировании кривых нежелательно (а ломаные, представляющие изолинию, могут состоять из нескольких сотен или тысяч точек), для сглаживания используются нужным образом состыкованные сегменты в виде кривых Безье 2-й или 3-й степени. Для таких кривых уравнения (в векторной форме) выглядят как

$$\mathbf{p}(t) = (1-t)^3 \mathbf{p}_0 + 3t(1-t)^2 \mathbf{p}_1 + 3t^2(1-t) \mathbf{p}_2 + t^3 \mathbf{p}_3$$

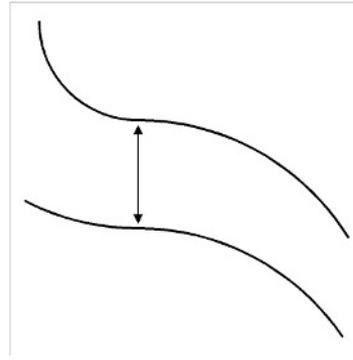
для третьей степени и

$$\mathbf{p}(t) = (1-t)^2 \mathbf{p}_0 + 2t(1-t) \mathbf{p}_1 + t^2 \mathbf{p}_2$$

для второй.

Хорошо известен факт, что при рассматривании гладкой кривой (гладкой мы будем называть кривую, имеющую непрерывную первую производную) человек способен воспринимать нарушение непрерывности второй производной (скачкообразное изменение кривизны кривой). Классическим примером здесь может служить кривая, показанная вверху на **Рис. 20**, которая состоит из двух гладко стыкующихся дуг окружностей

разного радиуса. Для сравнения внизу на этом же рисунке показан гладкий стык двух дуг одного радиуса, где скачка второй производной не происходит. Таким образом, для того, чтобы соединение соседних сегментов кривых Безье было незаметно для глаза, необходимо совпадение первых и вторых производных в точках стыка. Достигается это добавлением до-



*Рис. 20. Кривые с разрывной и непрерывной второй производной. Место стыка двух сегментов окружностей разного радиуса (вверху) и одного радиуса (внизу) показано стрелкой.*

полнительных точек на серединах соответствующих отрезков ломаной. Для кривой второй степени такие точки будут расположены на каждом отрезке (кроме крайних), и для построения внутренних сегментов кривой используются три точки - вершина исходной ломаной и середины отрезков, смежных с этой вершиной. Для построения крайних сегментов используются две крайние точки и середина второго отрезка. Пример сглаживания ломаной с помощью кривых Безье второй степени показан на **Рис. 19а**, где хорошо видно, что построенная кривая проходит через середину каждого отрезка ломаной, за исключением крайних. Для кривых третьей степени дополнительные точки располагаются на каждом втором отрезке, начиная с третьего, и для построения внутренних сегментов используются четыре точки – две соседние вершины исходной ломаной и середины отрезков, смежных с этими вершинами. Первый сегмент определяется первыми тремя вершинами ломаной и серединой третьего отрезка. При некоторых значениях количества вершин исходной ломаной для построения последнего сегмента может не хватать одной точки. В этом случае в качестве последнего сегмента берется кривая Безье второй степени. Пример сглаживания ломаной с помощью кривых Безье третьей степени показан на **Рис. 19б**.

Для набора точек  $x_1, x_2, \dots, x_n$  на прямой (эти точки называются узловыми точками сплайна) сплайн  $S_m(x)$  степени  $m$  определяется как непрерывная кусочно-полиномиальная функция, являющаяся полиномом степе-

ни  $m$  на каждом из отрезков  $[x_i, x_{i+1}]$  и имеющая непрерывные производные вплоть до порядка  $m-1$ . Если в узловых точках заданы некоторые значения  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , то сплайн, удовлетворяющий условиям  $S_m(x_i) = y_i, i = 1, \dots, n$  называется *интерполяционным*, то есть, интерполирующим значения  $y_i$  в точках  $x_i$ . При заданных узлах сплайны фиксированной степени образуют линейное пространство, базисом которого являются так называемые В-сплайны, определяемые рекуррентными соотношениями [16]:

$$B_{i,0}(x) = \begin{cases} 1, & x \in [x_i, x_{i+1}] \\ 0, & x \notin [x_i, x_{i+1}] \end{cases},$$

$$B_{i,k}(x) = \frac{x - x_i}{x_{i+k} - x_i} \cdot B_{i,k-1}(x) + \frac{x_{i+k+1} - x}{x_{i+k+1} - x_{i+1}} \cdot B_{i+1,k-1}(x),$$

где индекс  $i$  соответствует номеру узловой точки, а индекс  $k$  – степени полинома. Тот факт, что В-сплайны  $B_{i,m}(x)$  являются базисом пространства сплайнов степени  $m$  означает, что любой сплайн  $S_m(x)$  может быть представлен в виде суммы В-сплайнов с некоторыми коэффициентами:  $S_m(x) = \sum_{i=-m+1}^{n-1} c_i B_{i,m}(x)$ , причем в построении базисных сплайнов участвуют дополнительные  $m$  узлов, совпадающих с первой точкой  $x_1$ , и дополнительные  $m$  узлов, совпадающих с последней точкой  $x_n$ .

Если в качестве коэффициентов  $c_i$  взять значения  $y_{i+(m+1)/2}$  (это верно только для нечетных  $m$ ), в дополнительных узлах совпадающие с  $y_1$  и  $y_n$ , то получится *аппроксимирующий* сплайн. Именно такие сплайны дают хорошие результаты при сглаживании ломаных. Для этого аппроксимирующий сплайн нужно строить отдельно для каждой координаты, используя в качестве параметра расстояние вдоль ломаной. Например, параметрическое уравнение для сглаживающей кривой, построенной по В-сплайнам третьей степени, в векторной форме выглядит следующим образом:

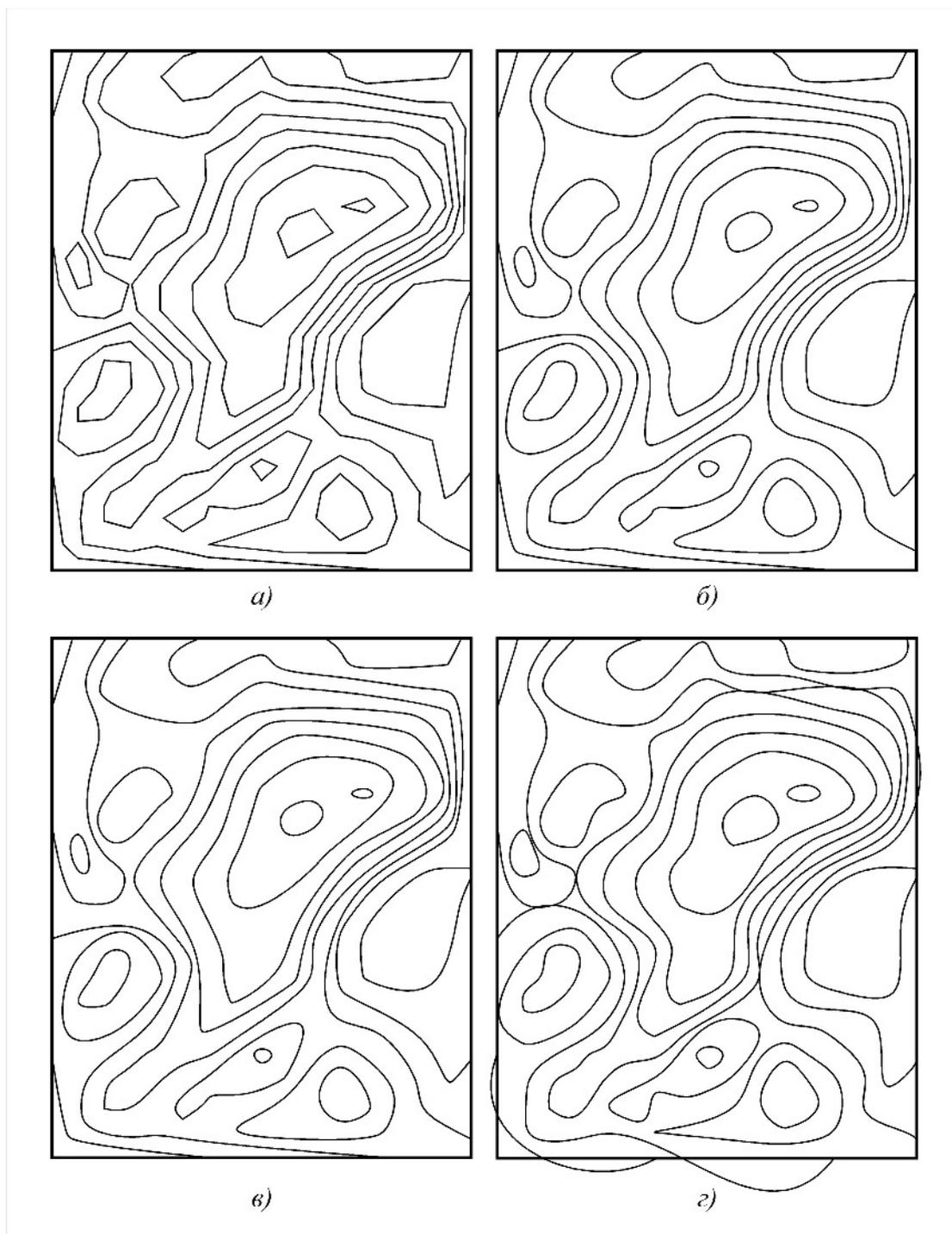
$$\mathbf{p}(t) = \sum_{i=0}^{n+1} \mathbf{p}_i B_{i-2,3}(t), \quad (6)$$

где узлами являются  $t_1 = 0$ ,  $t_2 = |\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2|$ ,  $t_3 = |\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2| + |\mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3|$ , ... , и

$t_n = \sum_{i=1}^{n-1} |\mathbf{p}_i, \mathbf{p}_{i+1}|$  - длина исходной ломаной. Пример сглаживания ломаной с

помощью кубических В-сплайнов показан на **Рис. 19г**, а на **Рис. 19в** – пример сглаживания с помощью В-сплайнов второй степени. Для сравнения на **Рис. 19д** показана кривая, построенная с использованием интерполяционных сплайнов, которые вычисляется по формуле, аналогичной формуле (6), но с заменой аппроксимирующих сплайнов на интерполяционные. Кривая в этом случае проходит через все вершины ломаной.

Результаты применения описанных выше способов к сглаживанию изолиний показаны на **Рис. 21**. В качестве примера взята ЦМР, построенная методом кусочно-линейной интерполяции на основе триангуляции на сетке с небольшим количеством узлов. Исходные изолинии, построенные по ЦМР, показаны на **Рис. 21а** и хорошо отражают условия, при которых требуется сглаживание. Эти горизонталы представляют собой некий "каркас", опираясь на который требуется провести гладкие линии и очень напоминает предварительный набросок при проведении горизонталей вручную по данным полевых измерений (этот набросок также выполняется на основе триангуляции). Результаты сглаживания исходных изолиний с использованием кривых Безье 2-й степени и аппроксимирующих сплайнов 3-й степени показаны на **Рис. 21б** и **Рис. 21в** соответственно. Основываясь на большом количестве практических экспериментов, мы можем утверждать, что из описанных выше возможных способов сглаживания эти два дают наилучшие результаты. Для данного примера, на наш взгляд, наиболее предпочтителен вариант с кривыми Безье. Уже отмеченные выше недостатки интерполяционных сплайнов (в данном случае это сплайны 3-й степени) хорошо видны на **Рис. 21г**. Это выход полученных в результате сглаживания линий за пределы области определения ЦМР и пересечение соседних линий. Единственным же недостатком кривых Безье и В-сплайнов является некоторое уменьшение в размерах замкнутых контуров изолиний, причем тем больше, чем больше степень сглаживающих кривых. Впрочем, этот недостаток можно частично устранить, если перед сглаживанием искусственно "раздуть" исходный контур.



*Рис. 21. Сглаживание изолиний (ЦМР создана методом кусочно-линейной интерполяции на основе триангуляции) : а) исходные изолинии; б) кривые Безье 2-й степени; в) В-сплайны 3-й степени; г) интерполяционные сплайны 3-й степени.*

Следует заметить, что возможность сглаживания изолиний имеется не во всех коммерческих пакетах, а там, где имеется, ограничена, как правило, лишь одним из приведенных выше способов.

### 2.3. Автоматизированное создание карт градиентного поля

Карты градиентного поля являются средством визуализации не самой земной поверхности, а производного показателя – градиента, с которым связаны многие важные характеристики рельефа (углы наклона, экспозиция склонов, направление и скорость потоков на поверхности и т.д.). Такие карты могут быть базовыми слоями для ГИС природно-ресурсной и экологической тематики, использоваться при решении гидрологических задач, определении эрозионной и лавинной опасности и т.д. Для визуального анализа градиентное поле лучше показывать в сочетании с горизонталями и/или послойной окраской.

Для карт градиентного поля предлагается использовать несколько вариантов изображения, каждый из которых представляет собой значковый способ, где знаки отнесены к узлам регулярной прямоугольной сетки. Это позволяет отразить на карте сразу два показателя: направление стока и скорость потока, экспозицию склона и угол наклона, или любые другие возможные пары показателей, связанных с направлением и длиной вектора градиента. Варианты отличаются используемыми картографическими знаками и способами отображения количественных характеристик.

В первом способе (Рис. 22) знак представляет собой стрелку одной и той же формы, но разного направления и длины, причем в точку отнесения знака помещается начало стрелки. Ориентировка стрелки противоположна направлению градиента и отражает направление стока (или экспозицию склона), длина же стрелки пропорциональна либо длине вектора градиента (уклону), либо ее арктангенсу (углу наклона) в точке отнесения знака. Если угол наклона или уклон меньше некоторого порогового значения, задаваемого пользователем (плоские участки), то вместо стрелки используется точка. Зависимость направления стрелки от направления вектора градиента может быть как непрерывной (направления совпадают; наиболее предпочтительна для указания направления стока), так и дискретной (стрелки могут иметь только несколько фиксированных направлений, соответствующих попаданию вектора градиента в определенный угловой сектор; общепринята для отображения экспозиции склонов). Аналогичным образом может быть устроена и зависимость длины стрелки от величины градиента: непрерывная, более предпочтительная для отражения скорости потока, либо дискретная (стрелки могут иметь несколько фиксированных

длин, соответствующих попаданию значения угла наклона в определенный диапазон заранее выбранной шкалы), более предпочтительная для отражения углов наклона. Варианты оформления легенды для карты, выполненной первым способом, показаны на **Рис. 22**.

Карты градиентного поля, выполненные первым способом, наиболее полезны в задачах, связанных с изучением переноса вещества на земной поверхности, возникающих в гидрологии, гляциологии, геоморфологии, геохимии, экологии и др. Параметры градиента интерпретируются при этом как направление и скорость переноса вещества (потоков), а зависимость параметров стрелки от параметров градиента должна быть для таких карт непрерывной.

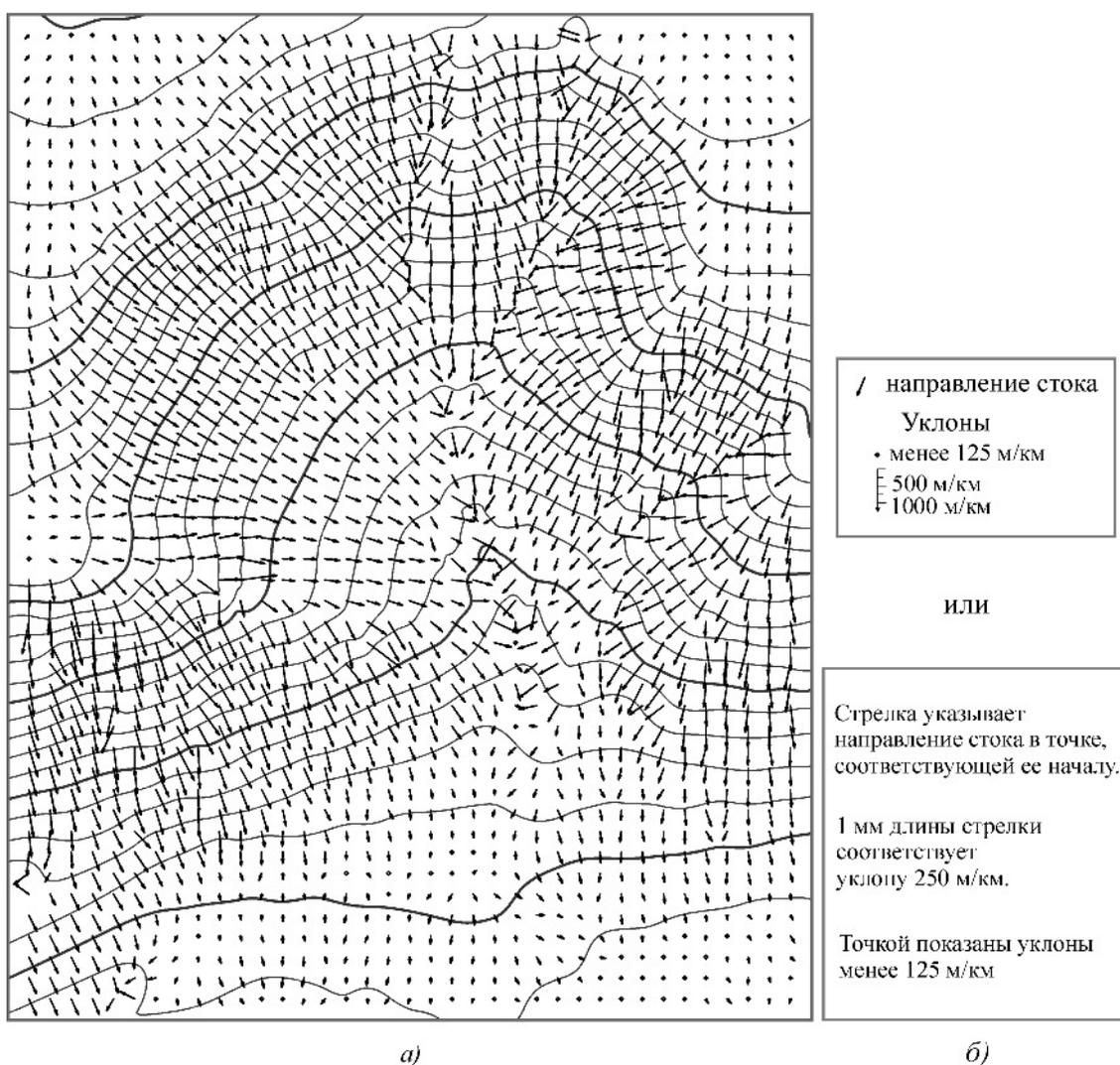


Рис. 22. Градиентное поле (первый способ изображения): а) - вариант карты; б) - варианты оформления легенды.

Во втором способе (Рис. 23), идею которого предложил С.Н. Сербенюк [40], знаки представляет собой стрелки одинаковой длины, но разного направления и толщины. Точке отнесения знака соответствует начало стрелки, ее направление противоположно направлению градиента, а толщина пропорциональна углу наклона или уклону в точке отнесения знака. Если угол наклона или уклон не превышают некоторого порогового значения, задаваемого пользователем, то стрелка заменяется на точку. Как показывают практические эксперименты, для наилучшего визуального восприятия такой карты длина стрелки должна составлять 0.8-0.9 от шага сетки точек привязки знаков. Как и в первом способе, зависимость направления

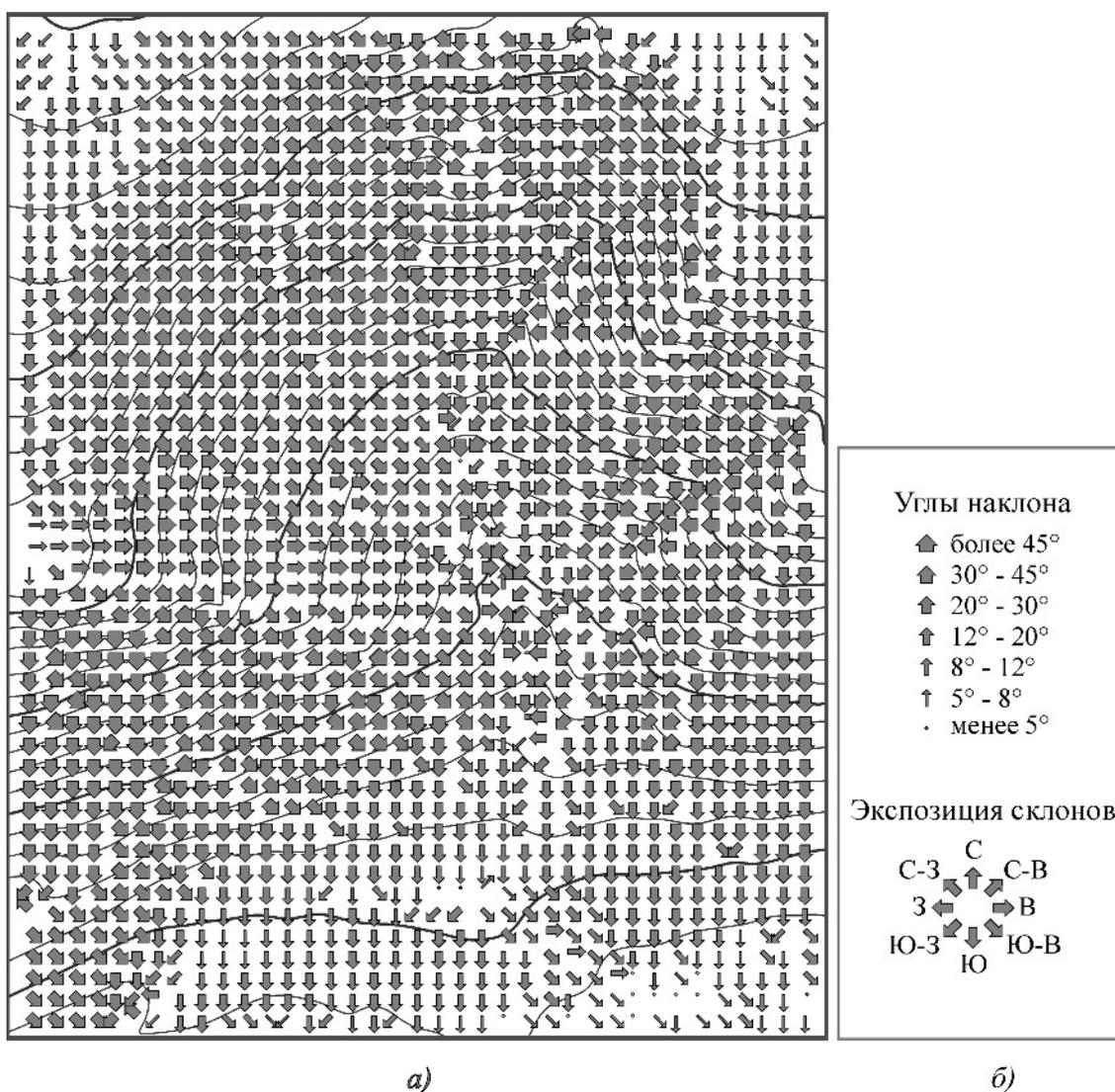
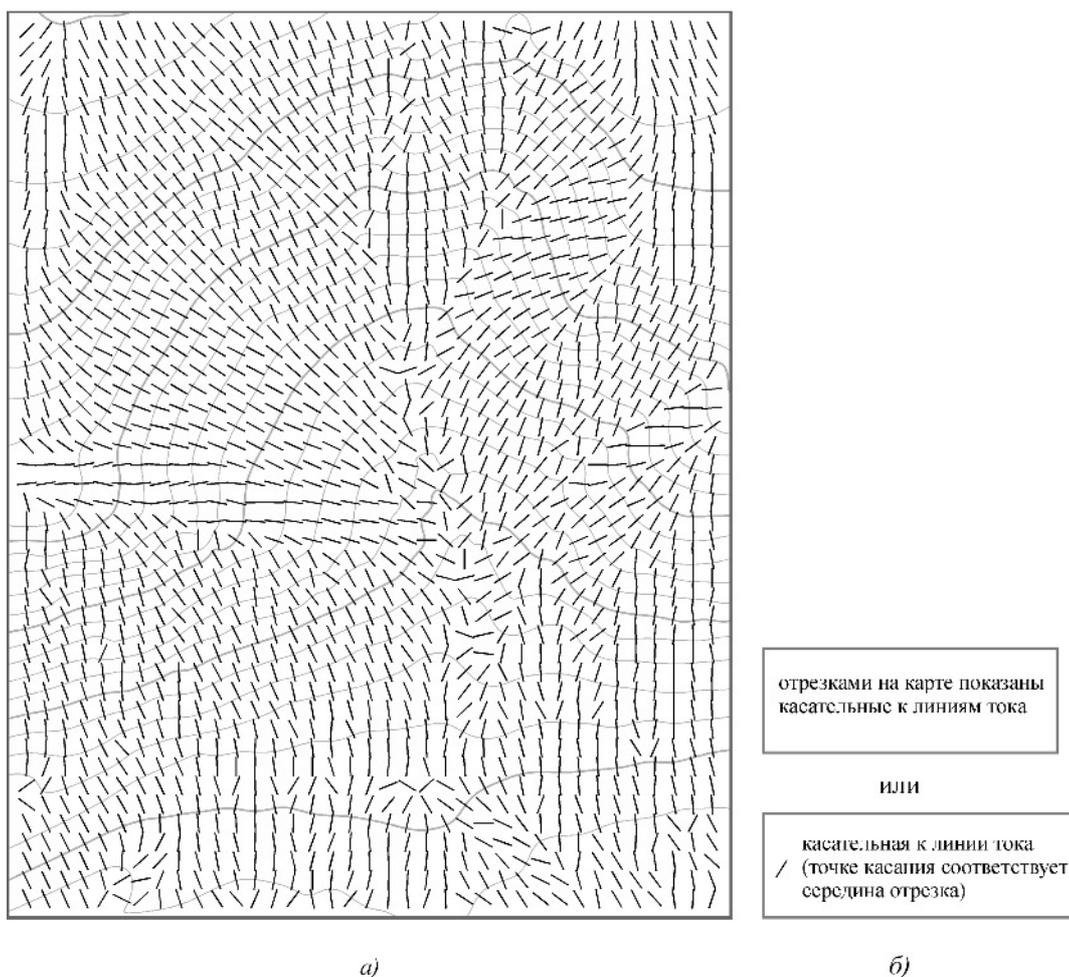


Рис. 23. Градиентное поле (второй способ изображения): а) - вариант карты; б) - варианты оформления легенды.

и толщины стрелки от параметров градиента может быть либо непрерывной, либо дискретной. Пример оформления легенды для карты, выполненной вторым способом, показан на **Рис. 23**.

Наибольший интерес карты градиентного поля, выполненные вторым способом, представляют в задачах, связанных с классификацией склонов по углам наклона и экспозициям. Параметры градиента интерпретируются при этом как угол наклона и экспозиция склона, а зависимость параметров стрелки от параметров градиента должна быть дискретной, то есть экспозиция показывается по румбам, а толщина стрелки может принимать некоторый конечный набор значений, соответствующих попаданию угла наклона в тот или иной интервал задаваемой пользователем шкалы углов наклона (например, эрозионной или лавинной опасности). Такой способ отображения позволяет визуально проводить классификацию территории на основе указанных параметров, особенно при использовании в



*Рис. 24. Градиентное поле (третий способ изображения): а) - вариант карты; б) – варианты оформления легенды.*

знаках цвета, о чем будет сказано ниже.

И первый, и второй способ изображения являются метрическими, то есть позволяют проводить измерения по карте, основанные на данных, приведенных в легенде и с точностью, соответствующей выбранной шкале.

В *третьем способе* (**Рис. 24а**) знак представляет собой отрезок фиксированной длины (желательно также 0.8-0.9 от шага сетки точек привязки), направление которого совпадает с направлением градиента, а точке привязки соответствует его середина. Фактически знак представляет собой отрезок касательной к линии тока в точке привязки. Такую карту можно рассматривать как значковую карту линий тока и использовать как некоторую заготовку, "каркас" при проведении линий тока вручную. В отличие от первых двух способов, длина вектора градиента на карте, выполненной третьим способом, не отражается, что позволяет при визуальном анализе сосредоточить внимание только на поведении линий тока. Направление переноса вещества вдоль линии тока определяется по горизонталям. Возможно также использование для этих целей знака в виде стрелки, хотя это несколько ухудшает визуальное восприятие распределения линий тока. Вариант легенды для карты, выполненной третьим способом, показан на **Рис. 24б**. Заметим, что легенда может отсутствовать в тех случаях, когда смысловое наполнение знака ясно из названия карты.

Важная роль при создании карт градиентного поля отводится цвету. Его использование в каждом из трех способов изображения позволяет либо усилить визуальное восприятие одного из показателей, либо отобразить другую трактовку (другой смысл, другую классификацию) одного и того же параметра градиента (например, направление вектора  $-\text{grad}f$  можно трактовать как направление стока и как экспозицию склона), либо отразить еще один дополнительный показатель, не связанный непосредственно с градиентом. Проиллюстрируем сказанное на примерах.

Стрелки на карте **Рис. 23а**, выполненной вторым способом, могут быть окрашены в восемь различных цветов в соответствии с экспозицией склонов. В этом случае направление стрелки и ее цвет отражают один и тот же показатель, однако использование цвета облегчает визуальную классификацию склонов в соответствии с экспозицией. Пример такой карты приведен на рисунке Приложения **VIII**. На этой же карте цветом стрел-

ки можно показать диапазоны углов наклона в той же шкале, что и толщиной. Один и тот же показатель тогда будут отражать толщина стрелки и ее цвет, а использование цвета облегчает визуальную классификацию склонов в соответствии с углами наклонов (см. Приложение IX). Цветом может быть отражена и другая шкала углов наклона, не совпадающая со шкалой, соответствующей толщине стрелки. Такой прием позволяет показать на одной карте одновременно две различные классификации склонов по углам наклонов.

На карте Рис. 22а, выполненной первым способом, стрелки могут быть окрашены в соответствии с восемью румбами экспозиции склонов. В этом случае цвет и направление стрелки отражают две различные трактовки одного и того же параметра вектора градиента – его направления. Заметим, что направление стрелки, указывая направление стока, изменяется непрерывно, а цвет стрелки изменяется дискретно, принимая восемь различных значений в соответствии с экспозицией склонов. Если же с помощью цвета стрелки отобразить углы наклона в некоторой шкале, то длина стрелки и ее цвет будут отражать две различные трактовки другого параметра вектора градиента – его длины. В этом случае длина стрелки, изменяясь непрерывно, отражает скорость потока, а цвет стрелки, изменяясь дискретно, отражает классификацию склонов в соответствии с выбранной шкалой углов наклона.

Таким образом, при создании карт градиентного поля на основе ЦМР реализованы следующие возможности:

- ✓ выбор одного из трех вариантов изображения, различающихся используемым картографическим знаком;
- ✓ выбор способа отображения количественных характеристик (непрерывный или дискретный) для каждого из параметров градиента;
- ✓ выбор цвета знаков в соответствии с любым пространственно распределенным показателем, заданным в виде цифровой модели на регулярной сетке.

Наличие большого количества вариантов оформления наряду с использованием цвета для отображения дополнительных показателей позволяет создавать карты градиентного поля, наиболее подходящие при решении конкретной задачи.

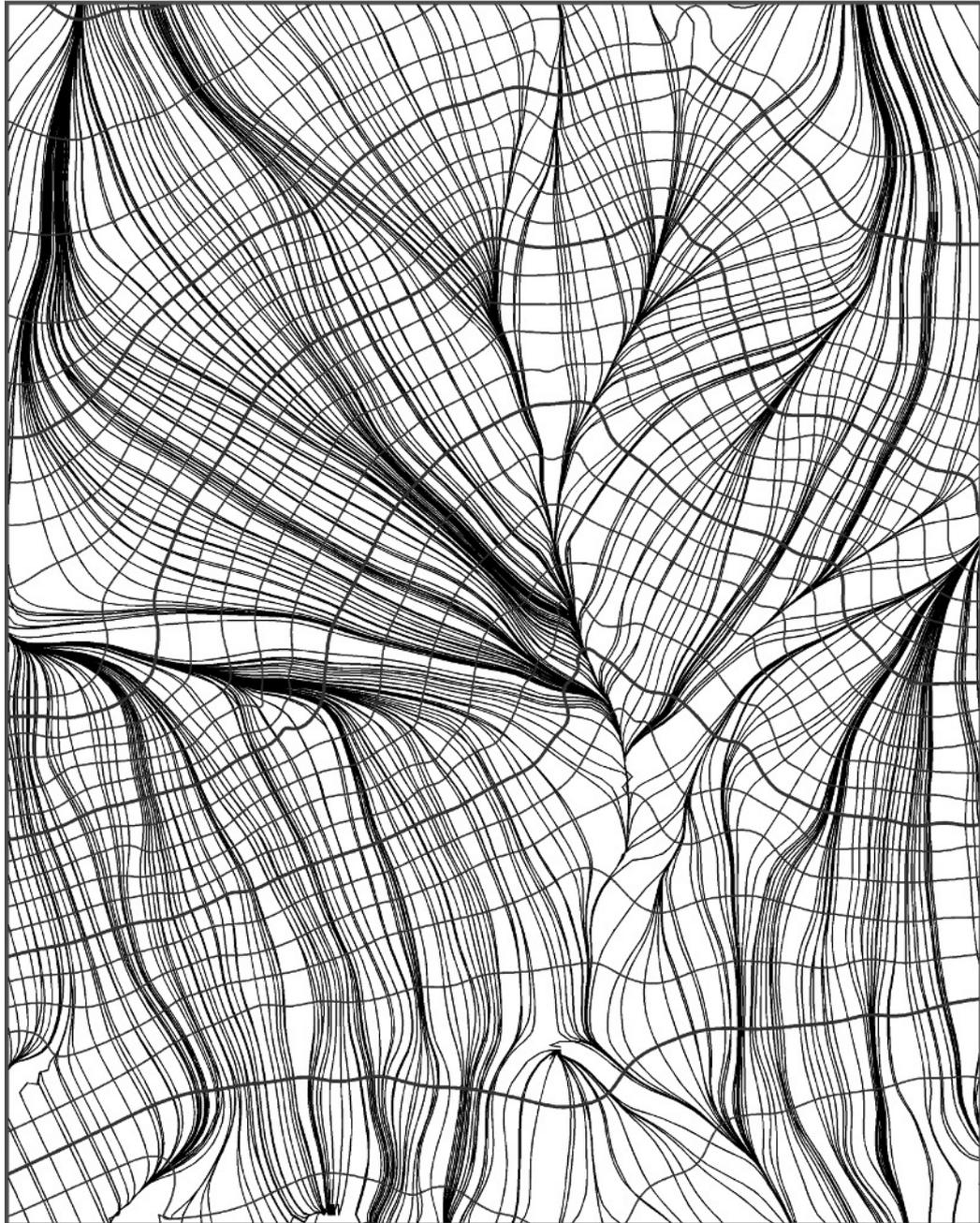
## 2.4. Автоматизированное создание карт линий тока

Карты линий тока тесно связаны с картами градиентного поля, поскольку касательной к линии тока в каждой точке является вектор градиента. 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:

$$\begin{cases} x'(t) = -f_x(x, y) \\ y'(t) = -f_y(x, y) \end{cases}; x(0) = x_0, y(0) = y_0, \quad (7)$$

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

В ГИС-пакетах, проанализированных в Главе 1, для численного интегрирования уравнений (7) используется простейший метод Эйлера, имеющий первый порядок, и растровый подход, при котором движение происходит только в восьми направлениях, а вершинами ломаной, представляющей линию тока, являются узлы сетки. Благодаря свойствам градиентного поля (уравнение устойчиво), корректность проведения линий тока при этом соблюдается, однако получаемое изображение имеет низкое качество с картографической точки зрения, особенно для сеток с большим шагом. Для повышения точности интегрирования и получения линий хорошего с картографической точки зрения качества предлагается использовать векторный подход и метод интегрирования Рунге-Кутты-Фельберга четвертого-пятого порядка [49]. В процессе интегрирования важную роль играет выбор приращения параметра  $t$  для получения координат очередной точки. Для получения линий высокого картографического качества предлагается выбирать приращение этого параметра адаптивно, в зависимости от кривизны линии тока (с увеличением кривизны приращение уменьшается). Для оценки кривизны линии тока можно использовать отношение длины дуги к длине стягивающей хорды. В результате вершины ломаной, представляющей линию тока, будут сгущаться в местах наибольшей кривизны линии, и располагаться редко на прямолинейных участках, что позволяет экономить время вычислений и рисовки без потери качества.



*Рис. 25. Линии тока (1656=36\*46 начальных точек на регулярной сетке).*

При соответствующей организации интерфейса пользователя карты линий тока, вычисление координат которых основано на предлагаемом алгоритме, могут создаваться в интерактивном режиме. Для этого пользователю необходимо указать мышью начальную точку и выбрать направление движения - вверх или вниз по склону (либо сразу два направления). Несмотря на хорошее качество создаваемых интерактивно карт, этот процесс довольно трудоемкий, поэтому предусмотрено создание таких карт и в автоматическом режиме. Начальные точки линий тока при этом могут выби-

раться в узлах регулярной прямоугольной сетки или случайно с равномерным распределением внутри области моделирования. Размерность сетки начальных точек или их количество подбираются интерактивно исходя из вида получаемой карты. Для карты на **Рис. 25** использовались начальные точки на регулярной сетке. Линии тока при автоматическом выборе начальных точек размещены на карте неравномерно, их сгущение отражает положение структурных линий поверхности - тальвегов и водоразделов, гребней и др.

Карты линий тока очень интересны с точки зрения структурного анализа поверхности [25, 100, 101]. Поведение линий тока на поверхности можно разбить на три типа (поведение линий тока рассматривается при движении вниз по склону): конвергентное, когда соседние линии тока сближаются, дивергентное, когда соседние линии тока расходятся, и нейтральное, когда соседние линии тока остаются практически параллельными (сближаются или расходятся незначительно). При движении вниз по склону линия тока может заканчиваться либо в точке (или области, как в случае озер) локального минимума, либо на границе области определения цифровой модели, а при движении вверх по склону – в точках локального максимума или, опять же, на границе области определения ЦМР.

Конвергентное поведение линий тока наблюдается вблизи структурных линий, являющихся потенциальными водотоками (тальвегами), около таких элементов поверхности линии тока при движении вниз по склону сходятся (собираются) в один пучок. Степень концентрации линий тока около таких структурных линий отвечает степени выраженности тальвегов. Чем шире пучок сходящихся линий тока, тем слабее выраженными, "размытыми", являются тальвеги. Чем уже пучок, вплоть до случая, когда линии тока сходятся к одной линии, тем сильнее выраженным является тальвег.

Дивергентное поведение наблюдается вблизи таких структурных линий, как водоразделы, гребни, хребты. Степень выраженности этих структурных элементов, как и в первом случае, определяется по степени концентрации вокруг них линий тока, но при движении вверх по склону. Нейтральному поведению линий тока соответствуют простые ровные склоны, не имеющие достаточно заметных перечисленных выше структурных элементов. На **Рис. 25** можно наблюдать все приведенные случаи поведения

линий тока: конвергентное, дивергентное, сильно и слабо концентрированные пучки линий тока, а также нейтральное поведение. Кроме того, хорошо заметны точки локальных максимумов и минимумов, расположенных в нижней части карты, в которых линии тока начинаются и заканчиваются.

Еще один пример карты линий тока показан на рисунке Приложения **VI**. Данный участок поверхности характеризует сильная изрезанность склонов, наличие большого количества ярко выраженных тальвегов и водоразделов (хребтов, гребней), что находит свое отражение на карте линий тока. Здесь присутствуют только концентрированные пучки линий тока, сходящиеся к одной структурной линии. Цифровая модель рельефа построена авторским методом (раздел 2.1) по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:25000 (образец №109 из "Альбома образцов изображения рельефа на топографических картах" [3])

Поскольку для определения типа поведения линий тока требуется знать направление вниз по склону, то карты линий тока желательно выполнять в сочетании с горизонталями или послойной окраской. Направление вниз по склону может быть также показано с помощью стрелок. Еще одним приемом является окраска участков линий тока в различный цвет в соответствии с высотой, аналогично послойной окраске. Параметром для определения цвета может быть не только высота, но и любой другой пространственно распределенный показатель, заданный на области определения цифровой модели.

Наибольший интерес при отображении совместно с линиями тока представляет такой производный показатель, как *кривизна* (продольная либо поперечная). Использование *поперечной кривизны* (кривизна сечения поверхности нормальной плоскостью, перпендикулярной направлению градиента) позволяет выделить участки поверхности в соответствии с приведенной выше классификацией, основанной на поведении линий тока. Положительные значения кривизны соответствуют конвергентному поведению линий тока, отрицательные – дивергентному, а близкие к нулю – нейтральному. С геометрической точки зрения знак такой кривизны соответствует вогнутости или выпуклости поверхности в направлении, перпендикулярном градиенту (касательном к горизонталям). С увеличением абсолютного значения поперечной кривизны степень выраженности соответ-

ствующего поведения линий тока увеличивается. Линии тока в наиболее простом варианте, таким образом, окрашиваются в три цвета, соответствующие трем типам поведения. Основываясь на численных экспериментах, можно предложить в качестве диапазона значений, соответствующих нейтральному поведению, использовать интервал, симметричный относительно нуля и имеющий длину, составляющую 0.015 от диапазона значений кривизны по всей модели. В случае неудовлетворительного результата выбор диапазона необходимо осуществляться интерактивно, используя указанный интервал в качестве первого приближения. Использование окраски в три цвета позволяет четко выделить участки поверхности, через которые проходят структурные линии разных типов – тальвеги и водоразделы (хребты, гребни), а в случае их яркой выраженности и сами структурные линии (см. рисунки Приложений V, VI).

Линии тока могут быть окрашены и в соответствии со знаком другой кривизны – *продольной* (кривизна сечения поверхности нормальной плоскостью, проходящей через вектор градиента). Продольная кривизна совпадает с кривизной самой линии тока. С геометрической точки зрения знак такой кривизны соответствует вогнутости или выпуклости поверхности в направлении, касательном градиенту (перпендикулярном к горизонталям). С физической точки зрения знак продольной кривизны соответствует замедлению (положительный) или ускорению (отрицательный) потока. На участках с положительным значением продольной кривизны форма поверхности способствует накоплению вещества (например снега, влаги), а при отрицательных – препятствует, т.е. при такой форме поверхности вещество скатывается, не задерживается (в некоторой степени аналогичный смысл может иметь и знак поперечной кривизны, поэтому способность к накоплению усиливается при положительных значениях и той и другой кривизны одновременно).

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что высокое с картографической точки зрения качество при отображении линий тока на основе ЦМР достигается благодаря реализации следующих возможностей:

- ✓ векторный подход к вычислению координат линий тока с использованием для решения дифференциального уравнения метода Рунге-Кутты высокого порядка и адаптивным выбором шага интегрирования в зависимости от кривизны линии;

- ✓ интерактивный и автоматический (в узлах регулярной прямоугольной или равномерной случайной сеток) выбор начальных точек линий тока при создании карт;
- ✓ выделение цветом участков линий тока в соответствии с любым пространственно распределенным показателем, заданным в виде цифровой модели на регулярной сетке или в аналитическом виде.

### **ГЛАВА 3. ФУНКЦИИ И СТРУКТУРА БЛОКА МОДЕЛИРОВАНИЯ, ОТОБРАЖЕНИЯ И АНАЛИЗА РЕЛЬЕФА В ГИС, ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КАРТОГРАФИИ**

На основе проведенного анализа существующих методов и программных средств, а также собственных алгоритмов и методик разработана структура и содержание блока моделирования, отображения и анализа рельефа в ГИС, а также создана его программная реализация в виде комплекса МАГ (Моделирование и Автоматизация в Географии) [21]. Комплекс построен по модульному принципу и может быть легко встроен в любую оболочку ГИС, имеющую собственный язык программирования или объектную библиотеку для создания приложений.

Идея создания такого программного комплекса была выдвинута и обоснована С.Н. Сербенюком в 80-х годах. Разработанная и реализованная к тому времени на графических станциях PERICOLOR-200, GRAFIXI, MicroVAX II, Автоматизированная Картографическая Система МГУ (АКС-МГУ) [34,30,29,33,32] была ориентирована, в основном, на задачи математико-картографического моделирования. Моделирование и анализ геополей составляли лишь небольшую часть этой системы. Начало созданию комплекса "МАГ", его теоретическому и практическому обоснованию было положено серией статей [39, 41, 42], активное участие в этой работе, наряду с С.Н. Сербенюком, принимал О.Р. Мусин. Описание структуры и функций начальной версии можно найти в работе [40], более поздней – в [21].

#### **3.1. Функции и структура программного комплекса моделирования и анализа рельефа в ГИС**

Структурно-функциональная схема комплекса в его современном виде представлена на **Рис. 26**.

Для сравнения с другими программными продуктами методы моделирования, реализованные в модулях комплекса МАГ, приведены в Таблице 1 (стр. 37) в последней колонке. Звездочкой отмечены методы, которые были усовершенствованы или разработаны автором.

Комплекс состоит из трех основных блоков: "Моделирование", "Ви-

зуализация" и "Анализ".

В состав блока "Моделирование" комплекса "МАГ" включено большое количество методов моделирования по данным в нерегулярно расположенных точках, в частности:

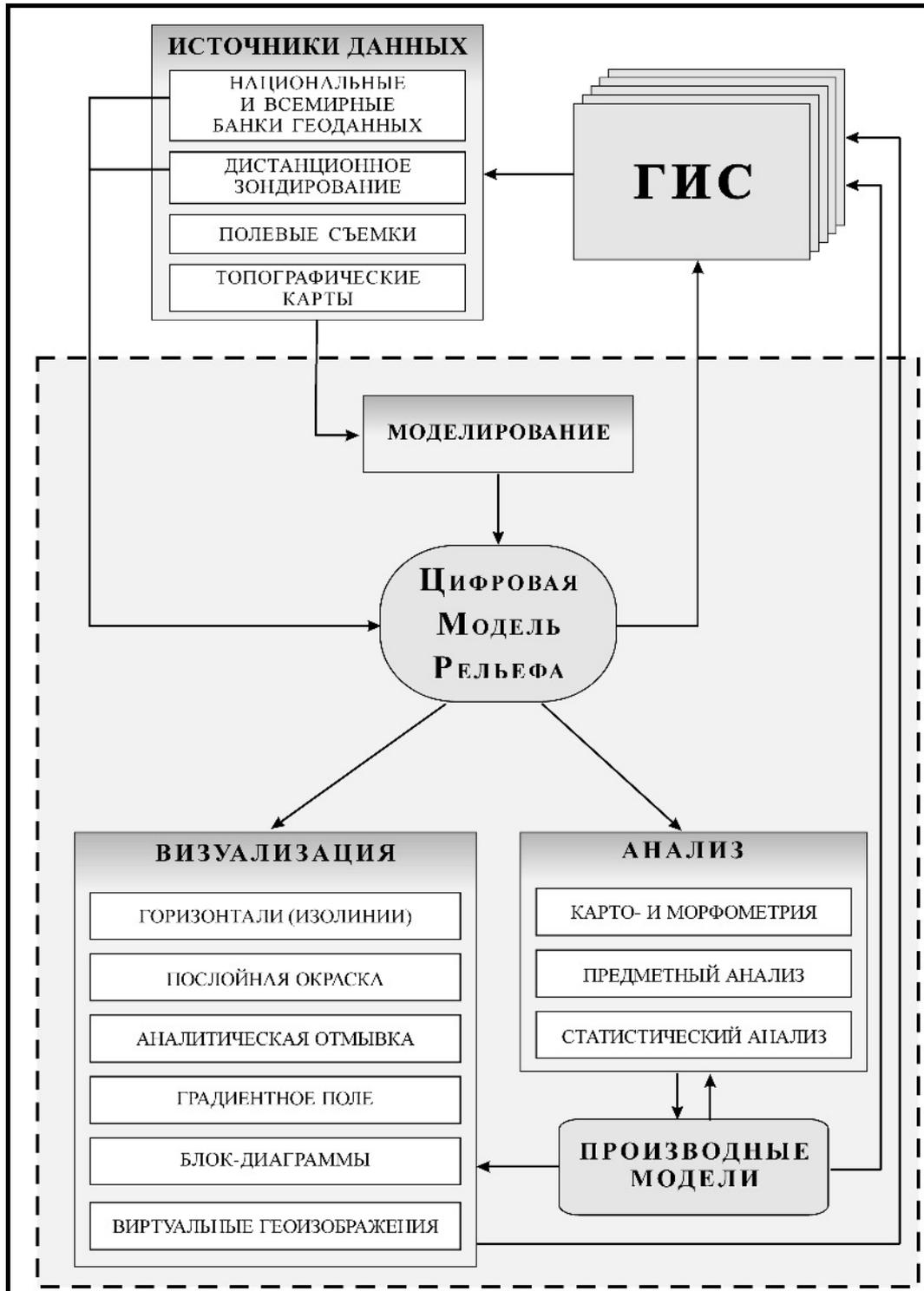


Рис. 26. Структурно-функциональная схема блока моделирования и анализа рельефа в ГИС.

- средневзвешенная интерполяция и аппроксимация, включая обобщенный метод Шепарда;
- скользящие средние, в том числе линейные и квадратичные с вычислением коэффициентов методом наименьших квадратов с весами;
- универсальный кригинг с вариографией и большим выбором модельных вариограмм;
- радиальные базисные функции, включая мультиквадрики и все виды сплайнов;
- сплайны с натяжением (численный подход на основе решения бигармонического дифференциального уравнения);
- интерполяция на основе триангуляции с использованием не только кусочно-линейных, но и гладких функций, с устранением граничных эффектов и возможностью экстраполяции за пределы множества опорных точек;
- интерполяция и аппроксимация с помощью иерархических В-сплайнов.

Большинство из перечисленных методов реализованы также в многомерном варианте (три и более независимых переменных), что является отличительной особенностью комплекса МАГ по сравнению с большинством других программных средств. В частности, третьей переменной может быть время (динамические модели), глубина (моделирование температуры, плотности, солености воды в океане), высота и т.д. Возможно также моделирование и в пространстве признаков, не связанных с координатами, например, степени засоления почв в зависимости от уровня залегания грунтовых вод, их минерализации, состава почв, растительности и других показателей.

Кроме того, в блок "Моделирование" входят специализированные методы, предназначенные для моделирования по исходным данным в изолинейной форме (необходимость наличия таких методов обоснована в Главе 1):

- авторский метод (раздел 2.1), позволяющий создавать достоверные по высотам модели для любого типа рельефа, в том числе и практически плоского;
- аналог метода Хатчинсона, использующий ту же идею, но в другой численной реализации.

Наличие большого количества разнообразных алгоритмов позволяет ис-

пользовать комплекс "МАГ" для моделирования не только рельефа, но и любых других географических полей, как реальных, так и абстрактных. В частности, методы моделирования по изолиниям дают возможность применить всю мощь современных средств пространственного моделирования и анализа для обработки данных, существующих только в виде изолинейных карт (например, климатические карты, исторический рельеф до извержения вулканов и т.д.), в то время как ранее такой анализ проводился вручную (см., например, [6, 7], где изложены способы анализа показателей по изолинейным картам).

Большое внимание в комплексе "МАГ" уделено картографической визуализации ЦМР. В нем реализованы практически все способы, используемые в классической картографии, причем особое внимание уделено качеству создаваемых изображений. Блок "*Визуализация*" включает следующие способы изображения рельефа:

- горизонталей на основе авторского алгоритма, с возможностью автоматической расстановки подписей и бергштрихов, возможностью выбора различных линейных картографических знаков (утолщение, штрих-пунктир для дополнительных горизонталей и т.д.) в автоматическом и ручном режимах, возможностью сглаживания линий различными методами (раздел 2.1);
- послышной окраски, с удобным интерфейсом выбора цветовой шкалы;
- наклонных и освещенных горизонталей;
- блок-диаграмм;
- светотеневой пластики (аналитическая отмывка), с возможностью создавать растровое изображение отмывки любого разрешения вне зависимости от размера сетки ЦМР, с использованием разнообразных алгоритмов, с возможностью совмещения с послышной окраской (более подробно этот способ описан в разделе 3.2).

Кроме того, в блок "*Визуализация*" включены модули, для создания производных карт, тесно связанных с рельефом, на которых могут быть показаны:

- градиентное поле с несколькими видами способов изображения, с возможностью непрерывной или дискретной зависимости используемых картографических знаков от параметров градиента (направления и длины), с возможностью использования цвета для отображения дополни-

тельного показателя (раздел 2.3);

- линии тока высокого картографического качества, с возможностью создания карт в автоматическом режиме и возможностью использования цвета для отображения дополнительных показателей (раздел 2.4).

Некоторые из предлагаемых методов либо отсутствуют в других программах, либо требуют выполнения нескольких последовательных манипуляций. Для получения карт хорошего качества все включенные в этот блок методы, для которых такое возможно, базируются на векторном подходе к созданию графических изображений, в то время как блоки визуализации всех проанализированных ГИС-пакетов используют растровый подход (исключение составляет специализированный пакет SURFER), что значительно снижает качество изображения. Для удобства совместного использования с другими программами в комплексе предусмотрен экспорт изображений в различные растровые и векторные графические форматы и в форматы ГИС вместе с атрибутивной информацией.

В блок "*Анализ*" вошли как специфические методы, традиционно используемые при анализе рельефа земной поверхности, так и общие (например, статистические), используемые для пространственного анализа любых географических полей, в том числе и абстрактных. Функции, выполняемые этим блоком, можно разбить на три основные группы:

- 1) *Карто- и морфометрия*. Сюда входит вычисление производных показателей – углов наклона, экспозиций склонов, различных кривизн, гистограммы распределения высот, вычисление длин линий на поверхности, площадей поверхности и объемов, вертикальной и горизонтальной расчлененности и т.д. Большинство из включенных методов изложено в работах [6, 7, 25, 43].
- 2) *Статистический анализ*. Сюда входит вычисление статистических полей (среднее, медиана, дисперсия, автокорреляция и т.д.) методом скользящего окна. В частности, автокорреляция была использована в работе [20] при моделировании локальных особенностей климата Северного Кавказа. Имеется также возможность вычислять поля корреляции двух различных показателей, заданных в виде сеточных цифровых моделей.
- 3) *Предметный анализ*. Сюда входят методы, специфические для конкретной области географических исследований, например гидрологи-

ческий анализ, построение зон прямой и радиовидимости с учетом кривизны Земли т.д. Наиболее развиты в настоящее время методы гидрологического анализа, многие из них уже включены в комплекс МАГ, другие находятся в стадии подготовки. Если первые две группы можно считать в основном сформированными, то данная группа постоянно пополняется новыми методами.

Многие методы, входящие в блок "Анализ", не имеют аналогов в других программных средствах. В качестве примера можно привести методы вычисления производных показателей (углы наклона, экспозиция склонов, кривизны). В большинстве программ для нахождения частных производных используется центральный разностный оператор. В результате получаются средние значения производных, причем степень осреднения зависит от шага сетки. Поскольку этот факт заложен в алгоритме неявно, скрыт от пользователя, ему обычно не придают значения. В некоторых случаях, однако, информацию о том, по площадке какого размера вычисляются средние уклоны, необходимо учитывать при дальнейшем анализе и выводах. В комплексе МАГ предусмотрена возможность вычислять производные показатели с любой заданной степенью осреднения исходя из конкретных требований к решаемой задаче. Эти же методы используются и при вычислении вектора нормали в алгоритмах аналитической отмывки.

Отличительной особенностью комплекса "МАГ" является его постоянное обновление, в нем используются самые последние разработки в области создания и анализа ЦМР, в том числе и авторские.

### **3.2. Методика и компьютерная технология создания карт с использованием светотеневой пластики**

*Отмывка* считается наиболее выразительным приемом светотеневого изображения, позволяющим создавать объемное, пространственное изображение рельефа на плоскости [13], и в настоящее время широко используется в оформлении топографических, общегеографических и тематических карт. С развитием вычислительной техники и появлением цифровой картографии стали разрабатываться цифровые методы светотеневого оформления рельефа, получившие название *аналитической отмывки*. К первым практическим опытам в этом направлении относится работа Йоэли [142], выполненная в конце 60-х годов. Для создания аналитической от-

мывки он использовал простейшую модель освещенности Ламберта, в которой предполагается диффузное отражение (отражающая поверхность является идеальным рассеивателем), а интенсивность отраженного света прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением на источник освещения (Рис. 27):

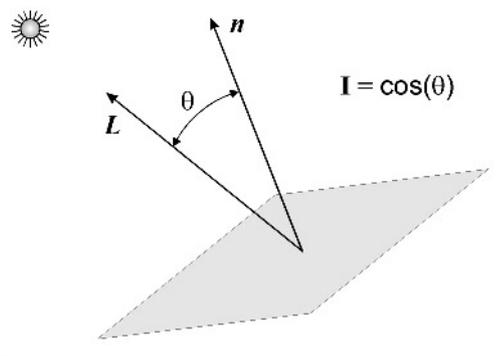


Рис. 27. Модель освещенности Ламберта (диффузное отражение):  $L$  – вектор направления на источник света,  $n$  – нормаль к поверхности,  $I$  – интенсивность отраженного света.

$$I = \cos \theta = \frac{L_x n_x + L_y n_y + L_z n_z}{\|L\| \cdot \|n\|}, \quad (8)$$

где  $I$  – интенсивность отраженного света,  $\theta$  – угол между направлением на источник света  $L = (L_x, L_y, L_z)$  и нормалью к поверхности  $n = (n_x, n_y, n_z)$ .

В дальнейшем предпринимались попытки использовать более сложные модели освещения (например, модель Фонга [120], учитывающая зеркальное отражение и зависимость интенсивности отраженного света от длины волны падающего света и свойств отражающей поверхности, или метод закраски Гуро [50]), которые применяются в машинной графике для создания реалистичных изображений предметов. В ходе экспериментов выяснилось, что для целей светотеневой пластики наиболее подходит простейшая модель отражения Ламберта с некоторыми дополнениями. Более сложные модели не нашли применения в методах аналитической отмывки и используются в основном для создания спецэффектов.

Для цифрового графического представления аналитической отмывки используется растровое изображение в черно-белой шкале. Стандартным является формат, в котором отводится 8 бит (1 байт) для кодировки цвета в одном пикселе, что позволяет отобразить 256 оттенков серого цвета. Как правило, размер результирующего растрового изображения может быть выбран произвольно исходя из предполагаемого устройства вывода (дисплей или печатающее устройство), хотя некоторые программы, работаю-

щие с сеточными ЦМР, позволяют создавать изображение только того же размера, что и цифровая модель.

В комплексе "МАГ" реализованы следующие методы аналитической отмывки (все основаны на модели освещенности Ламберта):

- 1) с единственным постоянным источником освещения;
- 2) с несколькими постоянными источниками освещения разной интенсивности и цвета;
- 3) с несколькими постоянными источниками освещения, интенсивность которых для каждой точки поверхности меняется в зависимости от экспозиции склона в этой точке;
- 4) с единственным источником освещения, положение которого локально изменяется согласно карте структурных линий (хребтов и тальвегов).

В большинстве ГИС и программ для автоматизированного картографирования используется только простейший первый метод, представляющий собой непосредственную реализацию модели освещенности Ламберта. Параметром здесь является вектор направления на источник освещения, который задается, как правило, с помощью горизонтального (азимут) и вертикального углов. Азимут может отсчитываться либо от направления на север по часовой стрелке (как принято в геодезии), либо от направления на восток против часовой стрелки (как принято в математике). В дальнейшем при указании значений азимута будет использоваться математический способ. Вертикальный угол принимает значения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Значение вертикального угла  $90^\circ$  соответствует отвесному освещению. Требуемые в формуле (8) координаты вектора направления на источник вычисляются следующим образом:

$$L_x = \cos v \cdot \cos a; \quad L_y = \cos v \cdot \sin a; \quad L_z = \sin v;$$

где  $a$  – азимут,  $v$  – вертикальный угол. Чаще всего используют значения  $135^\circ$  для азимута и  $45^\circ$  для вертикального угла. На **Рис. 28а** приведен пример аналитической отмывки с этими параметрами, а на **Рис. 28б** - при отвесном освещении. Процесс создания аналитической отмывки выглядит следующим образом. Вначале вычисляют вектор нормали к поверхности для каждой точки растра, затем направление на источник света и определяют косинус угла между ними по формуле (8). Следует заметить, что для всех точек направление на источник света остается постоянным, поскольку

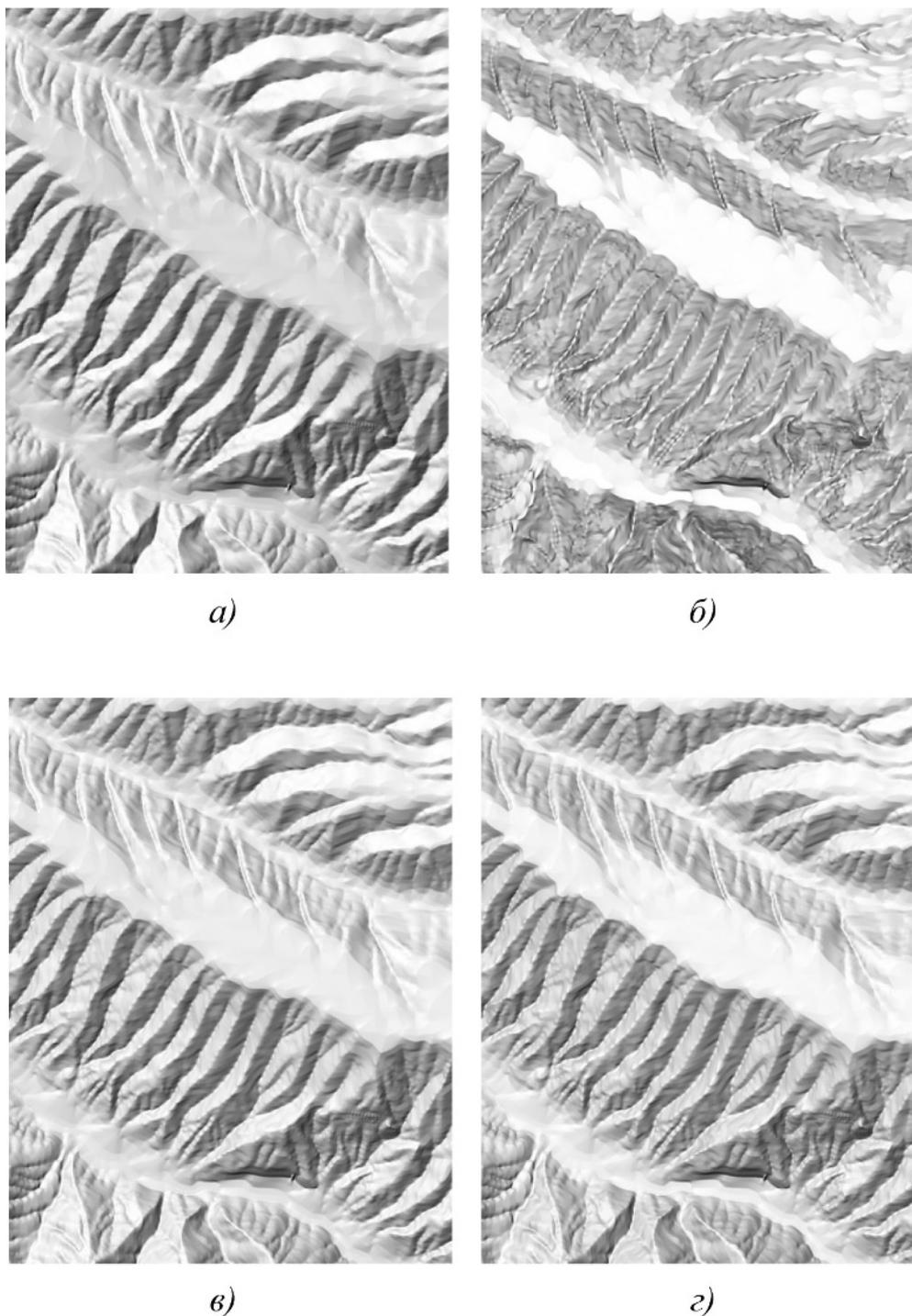
предполагается, что он находится в бесконечности, а положение нормали меняется. Построение для обеих форм представления ЦМР проводится одинаково, за исключением вычисления вектора нормали, где требуется найти частные производные от функции, задающей поверхность:

$$\mathbf{n} = \left( -\frac{\partial f}{\partial x}, -\frac{\partial f}{\partial y}, 1 \right).$$

Для триангуляционных ЦМР частные производные вычисляются непосредственно на каждом треугольнике исходя из представления поверхности в виде линейной функции от двух переменных. Для сеточных ЦМР используют численные методы нахождения частных производных. Реализация в комплексе "МАГ" предусматривает использование нескольких способов вычисления частных производных с разной степенью осреднения.

Согласно формуле (8), значения интенсивности могут варьироваться от -1 до 1. Для получения требуемых целых значений интенсивности серого цвета в пределах от 0 до 255 применяют формулу пересчета  $I_p = [127.5 \cdot (I + 1)]$ , где  $I = \cos \theta$  - исходная интенсивность,  $I_p$  - значение пиксела растрового изображения, а символ  $[ \cdot ]$  обозначает целую часть действительного числа. Возможны и другие формулы пересчета, в частности, можно использовать не весь диапазон градаций серого цвета, а только его часть, например, от 15 до 250, что позволяет избегать практически белых или черных участков на изображении. Метод с одним постоянным источником освещения позволяет неплохо отражать крупные формы рельефа, однако он имеет существенные недостатки. Дело в том, что хребты и тальвеги, простирающиеся вдоль направления на источник освещения, слабо подчеркнуты тенью, в то время как те же элементы, простирающиеся в перпендикулярном направлении, оттенены слишком сильно.

Простейшим способом если не устранить, то уменьшить эти недостатки является использование в модели не одного, а нескольких постоянных источников освещения. Сначала значения интенсивности отраженного света подсчитываются для каждого источника отдельно, а окончательное значение интенсивности получается как их взвешенная сумма. Это соответствует тому, как если бы источники освещения имели разную интенсивность (мощность).



*Рис. 28. Аналитическая отмывка: а) один источник освещения с азимутом  $135^\circ$  и вертикальным углом  $45^\circ$  (косое освещение); б) один источник освещения с вертикальным углом  $90^\circ$  (отвесное освещение); в) три источника освещения с азимутами  $135^\circ$ ,  $210^\circ$ ,  $60^\circ$ , вертикальным углом  $45^\circ$  и весами 2, 1, 1; г) комбинация косого (азимут  $135^\circ$ , вертикальный угол  $45^\circ$ , вес 2) и отвесного (вертикальный угол  $90^\circ$ , вес 1) освещения.*

На **Рис. 28в** приведен пример аналитической отмывки с тремя источниками освещения. Основной источник расположен по азимуту  $135^\circ$  и

имеет вес (или мощность) 2. Два других источника расположены по обе стороны от основного на угловом расстоянии  $75^\circ$ , то есть по азимутам  $210^\circ$  и  $60^\circ$ , и имеют вес 1. Вертикальные углы всех источников равны  $45^\circ$ . Неплохие результаты обычно дает комбинация косоугольного и отвесного освещения, когда один источник имеет азимут  $135^\circ$ , вертикальный угол  $45^\circ$  и вес 2, а второй имеет вертикальный угол  $90^\circ$ , азимут произвольный и вес 1. Вторым источником в такой комбинации подчеркиваются тени крутые склоны вне зависимости от их экспозиции. Пример аналитической отмывки с такими параметрами приведен на **Рис. 28г**. Особенно хорошие результаты дает этот прием при отмывке равнинно-эрозионного рельефа (см. Приложение X, где на нижнем рисунке второй источник имеет вертикальный угол  $80^\circ$ , что близко к отвесному освещению; хорошо видны различия в изображении эрозионных форм на нижнем и верхнем рисунках).

При использовании модели с несколькими источниками необходимо учитывать, что из-за вычисления взвешенных средних контрастность изображения может существенно уменьшиться. Этот эффект хорошо заметен при сравнении изображений *a*) и *в*), *г*) на **Рис. 28**.

Дальнейшее улучшение качества отмывки возможно за счет использования при вычислении окончательной интенсивности не постоянных, а переменных весов, которые зависят от экспозиции склона в каждой точке. Такой подход был опробован Марком [108] при создании аналитической отмывки рельефа острова Гавайи. Для данного участка земной поверхности он предложил применять четыре источника освещения с азимутами  $a_1 = 225^\circ$ ,  $a_2 = 180^\circ$ ,  $a_3 = 135^\circ$ ,  $a_4 = 90^\circ$  и вертикальным углом  $30^\circ$ . Веса источников определяются по формуле

$$w_i = \sin^2(a - a_i), \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad (9)$$

где угол  $a$  - экспозиция склона,  $a_i$  - азимут  $i$ -го источника,  $w_i$  - вес  $i$ -го источника. Экспозиция при этом вычисляется не по исходной ЦМР, а по генерализованной путем укрупнения исходной сетки (увеличения шага). Кроме того, вычисленные значения экспозиции сглаживаются с помощью трех проходов скользящих средних с матрицей  $3 \times 3$ . Очевидно, что предложенные Марком параметры не являются универсальными для любого типа рельефа и должны подбираться экспериментальным путем для каждого отдельного участка. В частности, для горного альпийского рельефа, в

котором присутствуют как мелкие, так и крупные формы,

Лукас и Вайбель [107] предложили другой метод сглаживания значений экспозиции, причем без генерализации исходной ЦМР. Ими также отмечен тот факт, что чем более сглаживаются значения экспозиции, тем более контрастным получается результирующее изображение отмывки. В комплексе "МАГ" реализовано обобщение такого метода с большим количеством параметров, позволяющих выбирать количество, азимуты и веса источников освещения, а также выбирать разные способы и степень предварительного сглаживания ЦМР.

Метод с использованием локальной вариации весов позволяет хорошо отразить мелкие формы рельефа. Крупные формы при таком подходе выражены менее четко, чем в предыдущих методах. Следует заметить, однако, что правильный подбор способа вычисления весов источников освещения для конкретной территории позволяет достичь некоторого компромисса при отображении мелких и крупных форм.

Описанные выше методы аналитической отмывки позволяют получать во многих случаях изображения неплохого качества при минимальных затратах времени и не требуют специальных знаний и навыков. Они широко применяются при создании современных картографических произведений, в том числе и карт для телевидения. Тем не менее, с их помощью не удастся достичь качества ручной отмывки. В связи с этим некоторыми исследователями были предложены алгоритмы, имитирующие процесс создания отмывки ручным способом, приемы и методы которого основаны на глубоких географических знаниях территории и требуют составления орографической схемы в качестве предварительного этапа [13]. Один из вариантов такого подхода был предложен Брасселем [59]. Он использовал один источник освещения, азимут которого меняется в соответствии со схемой структурных линий (хребтов и тальвегов). Такую схему можно считать первым приближением к орографической схеме, составляемой при выполнении отмывки вручную. Вычисления производились по формуле (8), но вектор направления на источник освещения, как и нормаль, вычислялся индивидуально для каждой точки поверхности, причем изменялся только азимут направления на источник, а вертикальный угол оставался постоянным. Азимуты вычислялись следующим образом. Для ячеек сетки, через которые проходит структурная линия, бралось направ-

ление касательной к структурной линии в данной точке (направление ее простирания), значения в остальных ячейках вычислялись с помощью интерполяции (здесь можно использовать некоторые из алгоритмов моделирования по данным в точках, описанных в Главе 1). В отличие от методов, описанных ранее, использование метода Брасселя требует участия высококвалифицированного специалиста для создания схемы структурных линий, хотя этот этап также может быть автоматизирован, благодаря разработке программ, позволяющих строить структурные линии по цифровой модели рельефа. Непосредственная реализация метода локальной вариации азимута источника в виде, предложенном Брасселем, не дает существенных улучшений качества отмывки по сравнению с другими способами, однако этот метод имеет несомненный потенциал для дальнейшего развития. В частности, существенные улучшения может дать классификация структурных линий по степени значимости, а также изменения в алгоритме вычисления локальной вариации азимута. В комплексе "МАГ" метод реализован в виде, предложенном Брасселем, отличия заключаются в способе интерполяции азимутов.

Ни один из указанных методов не является универсальным, дающим наилучший результат для любого типа рельефа, поэтому при создании аналитической отмывки необходимо подбирать метод индивидуально, исходя из требований, предъявляемых к результирующему изображению и описанных выше свойств самих методов. Для достижения лучшего качества можно также комбинировать методы между собой. Например, Лукас и Вайбель [107] отмечают, что неплохие результаты для альпийского рельефа дает комбинация простейшего метода с одним постоянным источником и метода, предложенного Марком, с весами 3 и 1 соответственно.

Для улучшения качества при создании аналитической отмывки могут быть использованы также некоторые дополнительные эффекты [91], большинство из них реализовано в комплексе "МАГ".

*Эффект воздушной перспективы.* Простейшим и неплохо работающим способом создания эффекта воздушной перспективы является предложенное Брасселем [59] нелинейное преобразование вычисленных тем или иным методом значений интенсивности как функции высоты. Преобразование подбирается так, чтобы для регионов с малыми высотами контрастность изображения уменьшалась, а для регионов с большими высота-

ми - увеличивалась.

*Цветная аналитическая отмывка.* Для создания этого эффекта три матрицы интенсивности, рассчитанные для разных постоянных источников освещения, рассматриваются как интенсивности трех цветовых компонент - красной, зеленой и синей, в результате чего получается синтезированное цветное растровое изображение. Цветная аналитическая отмывка хорошо отражает мелкие формы рельефа. На рисунках Приложений **Iб**, **IIб** показаны примеры такой отмывки. Азимуты источников равны  $160^\circ$  (красная компонента),  $135^\circ$  (зеленая компонента) и  $110^\circ$  (синяя компонента), а вертикальный угол всех трех источников равен  $45^\circ$ . Цветная аналитическая отмывка интересна еще и тем, что фактически включает в себя карту экспозиций склонов, поскольку цветовой тон синтезированного таким способом изображения непосредственно связан именно с экспозицией. Например, при указанном расположении источников освещения юго-западные склоны окрашены в теплые тона (золотистый, оранжевый, коричневый), а склоны северо-восточные – в холодные (различные оттенки голубого, серого и синего).

*Увеличение контрастности.* Такой эффект может быть достигнут как за счет увеличения вертикального масштаба при вычислении нормали к поверхности, так и с помощью любых программ для обработки растровых изображений, например Adobe Photoshop.

*Адаптивное увеличение контрастности.* Глобальное увеличение контрастности может приводить к нежелательным эффектам на некоторых участках, особенно с небольшими уклонами. Этого можно избежать, если использовать не постоянный вертикальный множитель, как в предыдущем случае, а зависящий от угла наклона в данной точке. Лукас и Вайбель [107] предлагают вычислять локальный вертикальный множитель по формуле

$$zf_p = zf - c \cdot \left( zf - \frac{s \cdot zf}{sm} \right), \quad (10)$$

где  $zf$  – выбираемый пользователем глобальный вертикальный множитель,  $c$  – выбираемый пользователем параметр вариации глобального множителя (с его ростом увеличиваются возможные отклонения локального множителя от глобального),  $s$  – угол наклона в данной точке,  $sm$  – средний угол наклона по всей ЦМР,  $zf_p$  - локальный вертикальный множитель. На оконча-

тельном изображении контрастность будет увеличиваться больше на участках с большими углами наклона. В формуле (10) используется аддитивное изменение вертикального множителя, поэтому контрастность изображения, пусть и неравномерно, но увеличивается на всех участках. Если требуется как увеличивать, так и уменьшать контрастность, то необходимо использовать формулы с мультипликативным изменением вертикального множителя. Например, можно предложить следующую формулу:

$$zf_p = zf \cdot \left( 1 + c \cdot \frac{s - sm}{s_{\max} - s_{\min}} \right) \quad (11)$$

где  $s_{\max}$  и  $s_{\min}$  - максимальный и минимальный углы наклона. При использовании формулы (11) контрастность для участков с малыми углами наклона при соответствующем выборе параметра  $c$  будет уменьшаться. В качестве фактора, управляющего изменением вертикального множителя, можно использовать не только угол наклона, но и высоту. В этом случае получается другой, отличный от предложенного Брасселем, способ создания эффекта воздушной перспективы.

Для повышения точности и пластичности изображения рельефа лучше всего применять сочетание отмывки с горизонталями и (или) послойной окраской [13]. Горизонтالي при таком сочетании рисуются поверх изображения отмывки. При совмещении аналитической отмывки и послойной окраски значения интенсивности в точках растра отмывки трактуются как коэффициенты уменьшения яркости в соответствующих точках цветового фона (Приложение **Ia**, **IIa**, **III**, **VII**, **X**). Изображение аналитической отмывки в серых тонах может быть также цифровым способом совмещено не только с послойной окраской, но и с цветовым фоном карты любого содержания. Такой прием часто используется в настоящее время при оформлении общегеографических, административных, туристических и других карт с помощью средств цифровой картографии. Примеры создания таких карт приведены на рисунках Приложений **XI**, **XII**, где аналитическая отмывка совмещена с картами углов наклона и экспозиций склонов, а также горизонталями и гидрографией.

Интересный эффект дает также сочетание цветной аналитической отмывки и послойной окраски. Пример такого изображения приведен на рисунке Приложения **IV**.

Разработанные методики и технологии создания и применения аналитической отмывки рельефа вошли в виде отдельной главы в учебник "Оформление карт" [13]. Для курса "Оформление карт" разработан практикум по выполнению аналитической отмывки рельефа в сочетании с послойной окраской.

### **3.3. Программная реализация, использование в практических и учебных целях**

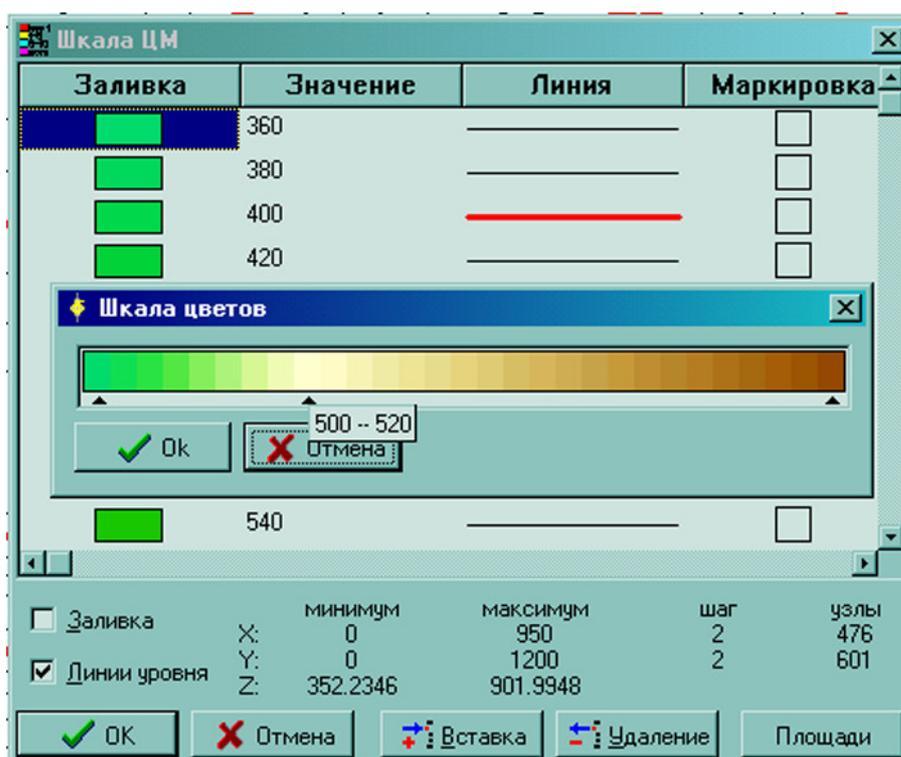
Программный комплекс "МАГ" в современной версии реализован на языке программирования Fortran 90, отдельные модули могут использоваться как в виде объектных библиотек, так и в виде динамических библиотек DLL, что позволяет их легко встраивать в любую ГИС, имеющую собственный язык программирования или объектную библиотеку для создания приложений.

Многие из модулей комплекса объединены также в самостоятельную программу MAGSURF, которая дает возможность работать с ними в автономном режиме вне ГИС-оболочки. Здесь хотелось бы выразить благодарность за неоценимую помощь в создании интерфейса программы И.В. Калинин, сотруднику Лаборатории комплексного картографирования Географического факультета МГУ. Программой предусмотрена загрузка исходных данных в форматах наиболее популярных ГИС (MapInfo MIF/MID, ArcInfo Shape) и картографического редактора DIGITMAP (автор В.Н. Семин, кафедра картографии и геоинформатики). Созданные цифровые модели могут быть сохранены как в собственном формате, так и формате GRD пакета SURFER фирмы Golden Software. В собственном формате вместе с матрицей высот и параметрами сетки сохраняются также заданная пользователем шкала сечений и цвета послойной окраски, что позволяет не тратить время на выбор этих параметров заново при последующей загрузке модели в программу.

В отличие от программы SURFER, интерфейс создан по принципу ГИС-пакетов с послойной организацией информации. На слое могут размещаться данные для моделирования, цифровая модель рельефа или картографическая основа, причем координатные системы всех слоев должны быть согласованы. Для каждой из загруженных моделей может быть выбран свой способ отображения, что позволяет проводить визуальный ана-

лиз одновременно нескольких геополей. В организации интерфейса программы MAGSURF использовано много оригинальных приемов, отсутствующих в других программных средствах, которые повышают удобство и эффективность при работе с программой. Примеры таких приемов интерфейса приведены на **Рис. 18, Рис. 29**.

С помощью комплекса МАГ было выполнено большое число науч-



*Рис. 29. Пример диалога для создания цветовой шкалы в программе MAGSURF. Всплывающая подсказка указывает, какому интервалу шкалы соответствует данный цвет.*

но-исследовательских и практических работ, связанных с созданием и анализом цифровых моделей рельефа и других географических полей, с разработкой ГИС природно-ресурсной, экологической тематики. Среди них можно выделить следующие:

- создание серии карт для изучения очага водоснежных потоков склона горы Айкуайвенчорр (Хибины) [32, 31];
- создание ГИС «Черное море» в рамках международной программы BSEP [2];
- создание базовых слоев (модели рельефа, углов наклона, экспозиции склонов, кривизны поверхности; карты с наложением послойной окраски и аналитической отмывки для визуального анализа) для регио-

нальной ГИС «Лавины Хибин»;

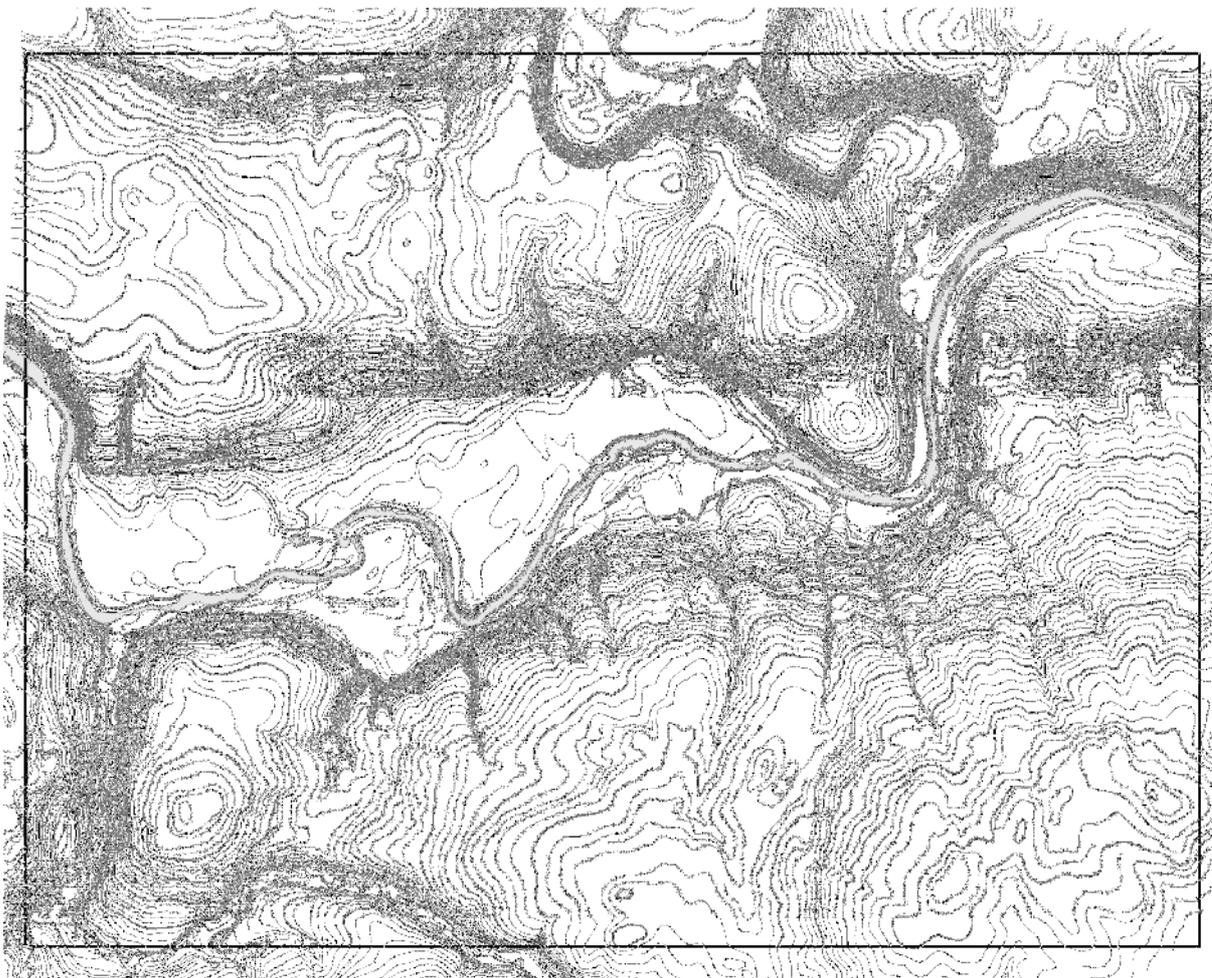
- создание базовых слоев (модели рельефа, углов наклона, экспозиции склонов; карты с наложением послойной окраски и аналитической отмывки для визуального анализа) для учебной ГИС «Сатино»;
- создание базовых слоев (рельеф и морфометрические показатели) ГИС г. Саратова [18];
- создание блока для моделирования уровня грунтовых вод (абсолютных и относительных отметок) на основе цифровых моделей рельефа и замеров в скважинах, а также автоматизированного оформления соответствующих карт в программном комплексе «Мелиорация» (Зарубежводстрой);
- прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем на примере Черных земель Калмыкии [11, 12] (здесь для создания карт динамики опустынивания использовалось многомерное моделирование с привлечением времени в качестве независимой переменной).

Комплекс МАГ используется также как базовое программное обеспечение при подготовке студентов географических и экологических специальностей на Географическом факультете МГУ им. Ломоносова, а также в Саратовском и Казанском университетах.

Проиллюстрируем использование комплекса МАГ при создании базовых слоев ГИС природно-ресурсной тематики на примере учебной ГИС "Сатино", охватывающей территорию Сатинского полигона географического факультета МГУ им. М.В.Ломоносова (Боровский район Калужской области). Исходными данными для создания цифровой модели рельефа послужили горизонтали, оцифрованные с топографической карты масштаба 1:5000 (см. **Рис. 30**), сплошные горизонтали проведены через 1 метр.

Участок моделирования имеет размеры 4740 м в направлении запад-восток и 3360 м в направлении юг-север. Важным этапом при создании ЦМР является выбор шага сетки. Он должен быть достаточно малым, чтобы в цифровой модели были адекватно отражены все особенности поведения исходных горизонталей, и в то же время не слишком малым в целях экономии машинной памяти и времени обработки и рисовки изолиний по модели, тем более, что начиная с некоторого момента уменьшение шага уже не приводит к увеличению точности модели.

Как правило, шаг приходится подбирать экспериментальным путем, исходя из начального предположения, что он должен быть в два-три раза меньше, чем расстояние между участками изолинии одного уровня, образующих петли (в районе оврагов или потенциальных водотоков). В данном случае шаг сетки был выбран равным 2.5 м.



*Рис. 30. Горизонталы и объекты гидрографии, оцифрованные с топографической карты (территория Сатинского полигона). Рамкой выделен участок моделирования.*

Цифровая модель рельефа была создана с помощью программы MAGSURF методом, описанным в разделе 2.1. На рисунках Приложения **X** показан результат расчетов – аналитическая отмывка и послойная окраска созданы средствами визуализации комплекса МАГ на основе построенной ЦМР. Кроме того, утолщенные горизонталы на **Рис. 30** построены по ЦМР и проведены поверх оцифрованных горизонталей (они не выходят за рамки области определения ЦМР). С помощью программ, входящих в блок "Анализ" комплекса МАГ (**Рис. 26**) были вычислены производные цифровые

модели - углов наклона и экспозиций склонов, причем во избежание излишней детальности при создании модели экспозиций склонов использовалось вычисление градиента с осреднением, что позволило выполнить предварительную генерализацию контуров фактически на этапе вычисления производной модели. Соответствующие карты показаны на рисунках Приложений **XI** и **XII**. Там же показано, как эти карты выглядят в сочетании с аналитической отмывкой, при создании которой была использована построенная цифровая модель рельефа.

На рисунках Приложения **XIII** показаны виртуальные геоизображения (вид с различной высоты и различных ракурсов) модельного участка. В качестве текстуры использовано сочетание аналитической отмывки и послойной окраски вместе с гидрографией и горизонталями сечением 5 метров (горизонтали построены уже по ЦМР). Еще раз отметим, что все необходимые данные для создания таких изображений были подготовлены с помощью комплекса МАГ, само изображение создано специализированным модулем Terrain программы Scanex Image Processing (разработка фирмы SCANEX).

Таким образом, в состав ГИС входят не только базовые слои с производными картами, которые предназначены в основном для визуального анализа, но и наряду с цифровой моделью рельефа и сами производные цифровые модели, которые могут быть использованы для пространственного анализа и различного рода классификаций территории с помощью соответствующих средств ГИС-пакетов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ достигнута основная цель диссертации: разработаны и теоретически обоснованы структура и функции блока моделирования и анализа рельефа в ГИС, разработаны новые и усовершенствован ряд существующих методов моделирования и визуализации рельефа и предложены способы их практического применения для решения географических задач с использованием геоинформационных технологий.

**Результаты** диссертационного исследования заключаются в следующем:

- 1) Систематизированы и проанализированы методы и программные средства создания и использования цифровых моделей рельефа, обобщены требования к ним по критериям эффективности их применения в географо-картографических целях.
- 2) Для дальнейшего совершенствования математического обеспечения впервые разработаны:
  - эффективный алгоритм построения сеточной цифровой модели рельефа по горизонталям, оцифрованным с топографических карт, основанный на быстром вычислении сеточных расстояний до двух ближайших горизонталей разного уровня. Алгоритм позволяет в автоматическом режиме восстанавливать поверхность в области локальных максимумов и минимумов без ввода дополнительных точек, учитывать объекты гидрографии (озера) при моделировании. Отличительной особенностью разработанного алгоритма является его высокое быстродействие и возможность получать достоверную по высотам модель для любого типа рельефа, в том числе и равнинного (практически плоского). На основе алгоритма создано программное обеспечение и выработаны методические рекомендации по подготовке исходных данных для моделирования.
  - метод вычисления изолиний по сеточным ЦМР, использующий идею трассировки, который без выполнения дополнительной триангуляции (что как минимум на треть уменьшает количество точек, необходимых для представления изолинии) обеспечивает высокую скорость работы и корректность проведения изолиний вблизи седловин.

Алгоритм также позволяет получать ориентированные изолинии, что необходимо для автоматической расстановки подписей горизонталей и бергштрихов;

- метод вычисления линий тока, основанный на решении системы дифференциальных уравнений с адаптивным выбором шага интегрирования для получения гладких кривых в области быстрого изменения кривизны линии тока, а также способы создания карт линий тока в автоматическом режиме;
  - способы создания и оформления карт градиентного поля поверхности, а также методические рекомендации по выбору способа изображения в зависимости от целей использования таких карт;
- 3) Разработаны методика и технология для автоматизированного создания карт с использованием светотеневой пластики, основанная на аналитической отмывке рельефа, получаемой по ЦМР.
  - 4) Обосновано и разработано учебное программное обеспечение для подготовки студентов-географов в области создания и использования цифровых моделей рельефа, разработаны методические основы такой подготовки.
  - 5) Разработан и создан оригинальный программный комплекс "МАГ" моделирования, визуализации и анализа рельефа, который может быть легко встроен в оболочку большинства ГИС, а также использоваться самостоятельно как для выполнения научно-исследовательских и практических работ, так и в учебных целях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. *Алберг Дж., Нильсон Э., Уолли Дж.* Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972.
2. *Аляутдинов А.Р., Берлянт А.М., Калинин И.В., Кошель С.М. и др.* ГИС "Черное море", под ред. А.М. Берлянта, В.О. Мамаева, О.Р. Мусина. - М.: Астрейя, 1999, 59 с.
3. Альбом образцов изображения рельефа на топографических картах. // Труды ЦНИИГАиК. 1968. - Вып.184. – 59 с.
4. *Ананьев С.Н., Моисеенко А.А.* Цифровая модель рельефа Украины масштаба 1:200000, методические и технологические аспекты создания // <http://www.ecomm.kiev.ua/gis/p2002/docs/dem200.doc>
5. Берлянт А.М. Картография: Учебник для вузов. - М.: Аспект Пресс, 2002. – 336 с.
6. *Берлянт А.М.* Картографический метод исследования. - М.: Изд-во МГУ, 2-е изд., 1988. - 254 с.
7. *Берлянт А.М.* Образ пространства: карта и информация. - М.: Мысль, 1986. - 240 с.
8. *Берлянт А.М., Мамаев В.О., Мусин О.Р., Аляутдинов А.Р., Калинин И.В., Кошель С.М.* Реализация проекта ГИС "Черное море" // Геодезия и картография. 1997, №6, с.34-40.
9. *Богомолов А.Л., Казанцева М.Н., Мусин О.Р.* Методика автоматизированного составления батиметрических карт // Вестн. Моск. ун-та. Сер. Геогр. 1990. №4. с.37-40.
10. *Василенко В.А.* Сплайн-функции: теория, алгоритмы, программы. Новосибирск: Наука, 1983.
11. *Виноградов Б.В., Кошель С.М., Кулик К.Н.* Прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем методом универсального кригинга // Экология. - 2000. - №5. - с.323-332.
12. *Виноградов Б.В., Кошель С.М., Кулик К.Н., Мусин О.Р., Федотов П.Б.* Прогнозирование пространственно-временной динамики нарушенных экосистем методом универсального кригинга по аэрокосмическим снимкам // Доклады академии наук. Общая биология.-2000.-т.371.- №2.- с. 264-268.
13. *Востокова А.В., Кошель С.М., Ушакова Л.А.* Оформление карт. Ком-

пьютерный дизайн. - М.: Аспект Пресс, 2002. - 288 с.

14. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. А.М. Берлянт, А.В. Кошкарев – ред., М.: ГИС-Ассоциация, 1999. - 204 с.

15. ГОСТ 28441-90. Картография цифровая. Термины и определения.

16. *де Бор*. Практическое руководство по сплайнам. – М.: Радио и связь, 1985. – 303 с.

17. *Дэвис Дж.* Статистический анализ данных в геологии. В 2-х томах. - М.: Недра, 1990.

18. *Жуков В.Т., Новаковский Б.А., Чумаченко А.Н.* Компьютерное геоэкологическое картографирование. – М.: Научный мир, 1999. – 128 с.

19. *Завьялов Ю.С., Иمامов А.* . О вариационных задачах теории сплайнов // Математический анализ и смежные вопросы математики. Новосибирск: Наука, 1978. - с.27-36.

20. *Кислов А.В., Чернышев А.В., Розинкина И.А, Кошель С.М.* Моделирование локальных особенностей климата Северного Кавказа в рамках общей модели циркуляции атмосферы // Вестн. Моск. Ун-та. Сер.5, География. 2003. №1. – с.35-41.

21. *Кошель С.М.* Цифровое моделирование и анализ геополей с помощью пакета "МАГ" // Взаимодействие картографии и геоинформатики (ред. А.М. Берлянт, О.Р. Мусин). - М.: Научный мир, 2000. - с. 41-49.

22. *Кошель С.М., Мусин О.Р.* Методы цифрового моделирования: кригинг и радиальная интерполяция // Информационный бюллетень ГИС-Ассоциации. – 2000. - №4(26)-5(27). – с.32-33; – 2001. - №1(28). – с.58; – 2001. - №2(29)-3(30). – с.23-24.

23. *Кошкарев А.В.* Понятия и термины геоинформатики и ее окружения: Учебно-справочное пособие. – М.: ИГЕМ РАН, 2000. – 76 с.

24. *Кравченко Ю.А.* Методы моделирования топографических поверхностей. М.: ЦНИИГАиК, 1984. - Вып.1. – 67 с.

25. *Ласточкин Ф.Н.* Морфодинамический анализ. - Л.: Недра, 1987.-256 с.

26. *Лурье И.К.* Основы геоинформационного картографирования: Учебное пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 2000. – 143 с.

27. *Мальцев В.А.* GST. Программный комплекс геостатистического моделирования и оценивания. - Москва, 1993.- 153 с.

28. *Мартыненко А.И.* Картографическое моделирование и геоинформационные системы // Геодезия и картография.-1994.-№9.-с.43-45.

29. *Мусин О.Р., Новаковский Б.А., Сербенюк С.Н.* Автоматизированное составление карт углов наклона и экспозиций склонов по аэрофотоснимкам // Геоморфология. – 1987. - № 4. - с. 30-36.
30. *Мусин О.Р., Сербенюк С.Н.* Цифровые модели "рельефа" непрерывных и дискретных географических полей // Банки географических данных для тематического картографирования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.- с. 156-170.
31. *Новаковский Б.А.* Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли: картографо-фотограмметрическое моделирование. – М.: - Изд-во МГУ, 1997. – 208 с.
32. *Новаковский Б.А., Волков П.С., Кошель С.М.* Автоматизированное создание карты высоты снежного покрова по материалам фототеодолитной съемки. // Геоинформационное картографирование. - Московский центр Русского Географического общества. - Москва.-1993. -с.166-181.
33. *Новаковский Б.А., Кошель С.М., Сучилин А.А.* Автоматизированное картографирование по материалам фототеодолитных съемок. // Геодезия и картография.-1992.-№8.-с.43-48.
34. *Петров П.В.* Программное обеспечение для использования картографических банков данных при создании карт // Банки географических данных для тематического картографирования. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987.- с. 122-131.
35. *Препарата Ф., Шеймос М.* Вычислительная геометрия: Введение. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
36. *Роджерс Д.Ф., Адамс Дж.* Математические основы машинной графики. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
37. *Родионов В.Ф. и др.* Справочник по математическим методам в геологии. - М.: Недра, 1987. – 367 с.
38. *Свентэк Ю.В.* Теоретические и прикладные аспекты современной картографии. – М.: Эдиториал УРСС, 1999. – 80 с.
39. *Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р.* Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография. – 1990. - № 11. - с. 31-35.
40. *Сербенюк С.Н., Кошель С.М., Мусин О.Р.* Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. – 1991. - № 4. - с. 44-46.

41. *Сербенюк С.Н., Мусин О.Р.* Автоматизированное построение изолинейных карт и производных от них изображений // Геодезия и картография. – 1986. - № 7. - с. 42-45.
42. *Сербенюк С.Н., Мусин О.Р.* Математико-картографическое моделирование для автоматизированного решения карто- и морфометрических задач // Геодезия и картография. – 1989. - № 5. - с. 42-46.
43. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. – Москва-Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. - 272 с.
44. *Симонов Ю.Г., Кошель С.М., Кружалин В.И., Новаковский Б.А., Прасолов С.В.* Использование ГИС-технологий и цифровых моделей рельефа при решении геоэкологических задач. // Экология и промышленность России, апрель 1998 г. – с. 41-45.
45. *Скворцов А. В.* Триангуляция Делоне и ее применение. - Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2002.-128 с.
46. Справочник по специальным функциям. / Под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М.: Наука, 1979.
47. *Стечкин С.Б., Субботин Ю.Н.* Сплайны в вычислительной математике. – М.: Наука, 1986.
48. *Тикунов В.С.* Моделирование в картографии: Учебник. – М.: Изд-во МГУ, 1997. – 405 с.
49. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Мир, 1980.
50. *Фоли Дж., вэн Дэм А.* Основы интерактивной машинной графики. В 2-х т. – М.: Мир, 1985.
51. *Халугин Е.И., Жалковский Е.А., Жданов Н.Д.* Цифровые карты. М.: Недра, 1992. - 416 с.
52. *Agishtein M.E., Migdal A.A.* Smooth surface reconstruction from scattered data points // Computer & Graphics, 1991, vol.15, No.1, pp.29-39.
53. *Akima H.* A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points // ACM Trans. Math. Software, 4,2 (June, 1978), pp.148-159.
54. *Alfeld P.* Scattered data interpolation in three or more variables // Mathematical Methods in Computer Aided Geometric Design. Academic Press, Boston, 1989, pp.1-33.
55. *Anderson D.P.* Techniques for reducing pen plotting time // ACM Transac-

tions on Graphics, 1983, 2(3), pp.197-212.

56. *Barnhill R.E., Dube R.P., Little F.F.* Properties of Shepard's surfaces // Rocky Mt. J. Math., 1983, 13, 2, pp.365-382.

57. *Batcha J.P., Reese J.R.* Surface determination and automatic contouring for mineral exploration, extraction and processing // Colorado School of Mines Quarterly, 1964, 14(4), pp.187-194.

58. *Brandli M.* A Triangulation-Based Method for Geomorphological Surface Interpolation from Contour Lines // Proceedings 3<sup>rd</sup> European Conference and Exhibition on GIS (EGIS '92), Munich, 1992, Vol.1, pp. 691-700.

59. *Brassel K.* A model for automatic hillshading // The American Cartographer, 1974, 1(1), pp.15-27.

60. *Briggs I.C.* Machine contouring using minimum curvature // Geophysics, 1974, v.39, pp.39-48.

61. *Buys J., Messerschmidt H.J., Botha J.F.* Including known discontinuities directly into a triangular irregular mesh for automatic contouring purposes // Computer & Geosciences, 1991, 17(7), pp.875-881.

62. *Carter, J.R.* The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs // Cartographica, Toronto, 1992, 29(1), pp.22-34.

63. *Cebecauer T., Hofierka J., Suri M.* Processing digital terrain models by regularized spline with tension: tuning interpolation parameters for different input datasets // Proc. of Open Source GIS – GRASS users conference 2002, Trento, Italy, 11-13 September, 2002, pp.123-134.

64. *Clarke A.L., Gruen A., Loon J.C.* The Application of Contour Data for Generating High Fidelity Grid Digital Elevation Models // Proceedings of Auto-Carto 5, ACSM/ASP Conference, Crystal VA, 1982, pp. 213-222.

65. *Cline A.K.* Scalar- and Planar-Valued Curve Fitting Using Splines Under Tension // Comm. of the ACM, 1974, Vol.17, N4, pp.218-220.

66. *Cole G., Macinnes S., Miller J.* Conversion of Contoured Topography to Digital-Terrain Data // Computers & Geosciences, 1990, 16(1), pp. 101-109.

67. *Douglas D.H.* Collected Algorithms // Paper No.20, Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis, Graduate School of Design, Harvard University, 1974.

68. *Douglas D.H.* The XYNIMAP Family of Programs for Geographic Information Processing and Thematic Map Production // Proceedings of Auto-Carto Six, Ottawa, 1983, Vol.II, pp. 2-15.

69. *Doysther Y., Hall J.K.* Interpolation of DTM using bi-directional third-degree parabolic equations, with FORTRAN subroutine // *Computers & Geosciences*, 1997, 23(9), pp.1013-1020.
70. *Duchon J.* Interpolation des fonctions de deux variables suivant le principe de la flexion des plaques minces // *R.A.I.R.O. Anal. Num.*, 1976, vol.10, pp.5-12.
71. *Felicisimo A.M.* Error propagation analysis in slope estimation by means of digital elevation models // *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.1, pp.94-98.
72. *Forsey D.R., Bartels R.H.* Surface Fitting with Hierarchical Splines // *ACM Transactions on Graphics*, Vol.14, No.2, 1995, pp.134-161.
73. *Franke R.* Scattered data interpolation: tests of some methods // *Math. Comput.*, 1982, v.38, pp.181-200.
74. *Franke R.* Smooth interpolation of scattered data by local thin plate splines // *Comput. Math. Applic.*, 1982, v.8, pp.273-281.
75. *Franke R.* Thin plate spline with tension // *Comp. Aided Geom. Design*, 1985, v.2, pp.87-95.
76. *Fuchs H., Kedem Z.M., Uzelton S.P.* Optimal surface reconstruction from planar contours // *Communications of the ACM*, 1977, 20(10), pp.693-702.
77. *Ganthapy S., Dennehy T.G.* A new general triangulation method for planar contours // *ACM Computer Graphics*, 1982, 13(3), pp.311-319.
78. *Garcia M.A.* Smooth Approximation of Irregular Triangular Meshes with G1 Parametric Surface Patches // *Proc. Third Int. Conf. on Computational Graphics and Visualization Techniques*, 1993, Alvor, Portugal, pp.380-389.
79. *Gesch D.B., Oimoen M.J., Greenlee S.K., Nelson C.A., Steuck M., Tyler D.J.* The National Elevation Dataset // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, vol.68, No.1, pp.5-12.
80. *Gordon W.J., Wixom J.A.* Shepard's method of "metric interpolation" to bivariate and multivariate interpolation // *Math. Comput.*, 1978, 32, 141, pp.253-264.
81. *Gorte B.G.H., Koolhoven W.* Interpolation between isolines based on the Borgfors distance transform // *ITC Journal*, 1990, 3, pp.245-247.
82. *Gousie M., Franklin R.* Converting Elevation Contours to a Grid. // *Proceedings, Eighth International Symposium on Spatial Data Handling*, 1998. T. Poiker and N. Chrisman, Eds., pp. 647-656.
83. *Hardy R.L.* Multiquadric equations of topography and other irregular sur-

faces // *J. Geophysical Res.*, 1971, v.76, pp.1905-1915.

84. *Hardy R.L.* Theory and applications of the multiquadric-biharmonic method // *Comput. Math. Applic.*, 1990, v.19, pp.163-208.

85. *Heller M.* Triangulation algorithms for adaptive terrain modelling // *Proceedings 4<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Data Handling*, 1990, Columbus, Ohio, Vol.1, pp.163-174.

86. *Hutchinson M.F.* Calculation of hydrologically sound digital elevation models // *Proc. of the Third International Symposium on Spatial Data Handling*, 1988, IGU, Columbus, Sidney, pp.117-133.

87. *Hutchinson M.F.* A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. // *Journal of Hydrology*, 1989, 106, pp.211-232.

88. *Hutchinson M.F.* A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models // *Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, NCGIA, 1996, University of California, Santa Barbara.

89. *Hutchinson M.F., Dowling T.I.* A continental hydrological assessment of a new gridbased digital elevation model of Australia // *Hydrological Processes*, 1991, 5, pp. 45-58.

90. *Ishii Masaharu.* The reproduction of terrain models: from the geometrical arts to the geomorphological science // *Proceedings of the 17th International Cartographic Conference*, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.1, pp.687-691.

91. *Jenny B.* An Interactive approach to Analytical Relief Shading // *Cartographica*, Vol.38, No.1&2, 2001, pp.67-75.

92. *Jones N.L., Kennard M.J., Zundel A.K.* Fast algorithm for generating sorted contour strings // *Computers & Geosciences*, 2000, 26, pp.831-837.

93. *Journel A.G., Huijbregts C.J.* *Mining Geostatistics*: Academic Press, 1978, 600 p.

94. *Imhof E.* *Cartographic Relief Presentation*. Ed. by H.J. Steward de Gruyter. Berlin-N.Y., 1982.

95. *Kennelly P.J.* Desktop Hachure Maps from Digital Elevation Models // *Cartographic Perspectives*, 2000, N37, pp.78-81.

96. *Kennely P., Kimerling A.J.* Modifications of Tanaka's Illuminated Contour Method // *Cartography and Geographic Information Sciences*, 2001, vol.28, No.2, pp.111-123.

97. *Kok R., Begin J.* Evaluation of automatic contouring methods for drainage design // Transactions of the ASAE, 1981, 24(1), pp.87-96.
98. *Koshel, S., Kalinkin, I.* Surface modeling for contour data. // Proc. of Conference "GIS Frontiers in Business and Science", April 20-24, 1996, Brno, Czech Republic, pp.II-2-5.
99. *Koshel S.M., Musin O.R.* Digital models for studying of environmental change // Proc. of Int. Symp. on Environmental Change and GIS (INSEG'91), August 25-28, 1991, Asahikawa, Japan. - vol.2, - p.321-327.
100. *Krcho J.* Morphometric analysis of relief on the basis of geometric aspect of field theory // Acta UC, Geogr. Physica 1, 1973, Bratislava, SPN.
101. *Krcho J.* Georelief as a subsystem of landscape and the influence of morphometric parameters of georelief on spatial differentiation of landscape-ecological processes // Ecology /CSFR/, 1991, v.10, pp.115-157.
102. *Lee S., Wolberg G., Shin S.Y.* Scattered Data Interpolation with Multilevel B-Splines // IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol.3, No.3, 1997, pp.228-244.
103. *Kubik K., Wu X.* Mapping from SPOT Images Using Digital Photogrammetric Workstation // Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.1, pp.266-274.
104. *Legates D.R., Wilmott C.J.* Interpolation of Point Values from Isoline Maps // American Cartographer, 1986, Vol. 13, No.4, pp.308-323.
105. *Linn C.C., Chen A.J., Chern D.C.* New approach to semi-automatically generate digital elevation data by using a vidicon camera // Proceedings of the 7th International Symposium (Enschede). 25-29 August, 1986, Commission UII. Rotterdam; Boston, 1986, v.26, Part 7/1.
106. *Lodwick G.D., Whittle J.* A technique for automatic contouring field survey data // The Australian Computer Journal, 1970, 2(3), pp.104-109.
107. *Lukas K., Weibel R.* Assessment and improvement of methods for analytical hillshading // Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.2, p.2231-2240.
108. *Mark R.K.* A multidirectional, oblique-weighted, shaded relief image of the island of Hawaii. US Geological Survey Open-File Report 92-422, U.S. Department of the Interior, 1992.
109. *Matheron G.* Principles of geostatistics // Economic Geology, 1963, v.58, pp.1246-1266.

110. *Matheron G.* Splines and Kriging: their formal equivalence // Down to the earth statistics, D.F. Merriam (ed.), Academic Press, N.Y., Geology Contributions 8, 1981, pp.77-95.
111. *Mitas L., Mitasova H.* General variational approach to the interpolation problem // Comp. Math. Applic., 1988, v.16, pp.983-992.
112. *Mitasova H., Mitas L.* Interpolation by regularized spline with tension: I. Theory and implementation // Mathematical Geology, 1993, v.25, pp.641-655.
113. *Mitasova H., Hofierka J.* Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis // Mathematical Geology, 1993, v.25, pp.657-671.
114. *Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R.* Digital terrain modeling : a review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrol. Processes, 1991, v.5, pp.3-30.
115. *Muraki S., Yokoya N., Yamamoto K.* Surface Reconstruction from a Contour Line Image by Regularization // Systems and Computers in Japan, Vol.23, No.2, April 1992, pp.81-91.
116. *Muraki S., Yokoya N., Yamamoto K.* 3D surface reconstruction from contour line image by a Regularization method // Proc. of SPIE Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, September 1990, Vol. 1395, pp.226-233.
117. *Neteler M., Mitasova H.* Open Source GIS: A GRASS GIS Approach. – 2000.- Kluwer Academic Publishers, 434 p.
118. *Nickerson B.G., Judd P.A., Mayer L.A.* Data structures for fast searching of SEG-Y seismic data // Computers & Geosciences, 1999, 25(2), pp.179-190.
119. *Oimoen M.J.* An Effective Filter for Removal of Production Artifacts in U.S. Geological Survey 7.5-minute Digital Elevation Models // Proc. of the Fourteenth Int. Conf. on Applied Geologic Remote Sensing, 2000, 6-8 November, Las Vegas, NV.
120. *Phong Bui-Tuong.* Illumination for computer generated images // CACM, Vol.18(6), 1975, pp.311-317.
121. *Renka R.J.* Multivariate Interpolation of Large Sets of Scattered Data // ACM Transactions on Mathematical Software, 1988, Vol.14, No.2, pp.139-148.
122. *Renka R.J.* Algorithm 790: CSHEP2D: Cubic Shepard Method for Bivariate Interpolation of Scattered Data // ACM Transactions on Mathematical Software, 1999, Vol.25, No.1, pp.70-73.
123. *Renka R.J.* Algorithm 791: TSHEP2D: Cosine Series Shepard Method for

- Bivariate Interpolation of Scattered Data // ACM Transactions on Mathematical Software, 1999, Vol.25, No.1, pp.74-77.
124. *Ripley B.D.* Spatial statistics. N.Y., J. Wiley and Sons, 1981. – 252 pp.
125. *Schaback R.* Creating Surfaces from Scattered Data Using Radial Basis Functions // Mathematical methods in CAGD III. M. Dahlen, T. Lyche, L.L. Schumaker (eds.), 1995, pp.1-21.
126. *Schneider B.* Adaptive Interpolation of Digital Terrain Models // Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.2, pp.2206-2210.
127. *Schneider B.* Geomorphologically Sound Reconstruction of Digital Terrain Surfaces from Contours // Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Data Handling, IGU GIS Study Group, Vancouver 1998, pp.657-667.
128. *Schweikert D.G.* An interpolation curve using a spline in tension // J. of Math. and Physics, 1966, 45, pp.312-317.
129. *Serbenyuk S.N., Koshel S.M., Musin O.R.* Creation and usage of geofields digital models // Regional Conference on Asian Pacific countries Inter. Geogr. Union. August 13-20, 1990, Beijing, vol.2, p.13-22.
130. *Shepard D.* A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data // Proceedings, 23rd National Conference, Association of Computing Machinery, 1968, pp.517-524.
131. *Smith W.H.F., Wessel P.* Gridding with continuous curvature splines in tension // Geophysics, 1990, v.55, No.3, pp.293-305.
132. *Tanaka K.* The relief contour method of representing topography on maps // Geographical Review, 1950, 40, pp.444-456.
133. *Taud H., Parrot J., Alvarez R.* DEM generation by contour line dilation // Computers & Geosciences, 1999, 25, pp.775-783.
134. *Thompson T.W., Zebker H.A. et al.* The NASA/JPL aircraft topographic synthetic aperture radar (TOPSAR) system for rapid production of digital terrain models // Proceedings of the 17th International Cartographic Conference, 3-9 September, 1995, Barcelona, Vol.1, pp.99-106.
135. User's reference manual for synagraphic computer mapping 'SYMAP' version V. Laboratory for Computer Graphics, Harvard Univ., June 1968.
136. *Vozenilek V.* Generating surface models using elevations digitised from topographical maps // Proceedings 5<sup>th</sup> European Conference and Exhibition on GIS (EGIS '94), Utrecht, 1994, Vol.1, pp.972-982.

137. *Ware J.M.* A procedure for automatically correcting invalid flat triangles occurring in triangulated contour data // *Computers & Geosciences*, 1998, 24(2), pp.141-150.
138. *Watson D.F.* *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Pergamon, Oxford, 321 pp.
139. *Weibel R., Heller M.* *Digital Terrain Modeling // Geographical Information Systems: principles and applications*, Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind W.D., eds., 1991, Longman, London, Vol.1, pp.269-297.
140. *Wessel P., Bercovici D.* Interpolation with splines in tension: A Green's function approach // *Math. Geol.*, 1998, v.30, pp.77-93.
141. *Yates S.R.* CONTUR: a FORTRAN algorithm for two-dimensional high-quality contouring // *Computer & Geosciences*, 1987, 13(1), pp.61-76.
142. *Yoeli P.* The Mechanisation of Analytical Hillshading. // *The Cartographic Journal*, 1967, Vol.4(2), pp.82-87.
143. *Yoeli P.* Computer-aided relief presentation by traces of inclined planes // *American Cartographer*, 1976, Vol.3(1), pp.75-85.
144. *Yoeli P.* Computer-executed interpolation of contours into arrays of randomly distributed height-points // *Cartographic Journal*, 1977, Vol.14(2), pp.103-108.
145. *Yoeli P.* Shadowed contours with computer and plotter // *The American Cartographer*, 1983, 10, pp.101-110.
146. *Yoeli P.* Topographic relief depiction by hachures with computer and plotter // *Cartographic Journal*, 1985, 22, pp.111-124.
147. *Yoeli P.* Computer executed production of a regular grid of height points from digital contours // *The American Cartographer*, 1986, Vol.13, pp.219-229.
148. *Zevenbergen L.W., Thorne C.R.* Quantitative analysis of land surface topography // *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, v.12, pp.47-56.
149. *Zhang W., Tang Z., Li J.* Adaptive Hierarchical B-Spline Surface Approximation of Large-Scale Scattered Data // *Proc. Pacific Graphics '98*, 1998, pp. 8-16.
150. *Zhou Qiming.* Relief shading using digital elevation models // *Computers and Geosciences*, 1992, 18(8), pp.1035-1045.
151. <http://cres.anu.edu.au/outputs/anudem.html>
152. <http://www.itc.nl/ilwis/default.asp>
153. <http://www.idrisi.clarku.edu/home.asp>

154. <http://www.geomodel.sk/projects/dtm25-sk.htm>

155. <http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>

*Различные варианты аналитической отмывки горного рельефа (крупный масштаб). Цифровая модель построена по изолиниям, оцифрованным с топографической карты масштаба 1:25000, методом, описанным в Главе 2, с помощью программы MAGSURF.*

а) Совмещение послойной окраски и аналитической отмывки.

б) Цветная аналитическая отмывка. Используются три источника освещения одинаковой интенсивности с азимутами: красный - 170°, зеленый - 135°, синий - 100°.



а)



б)

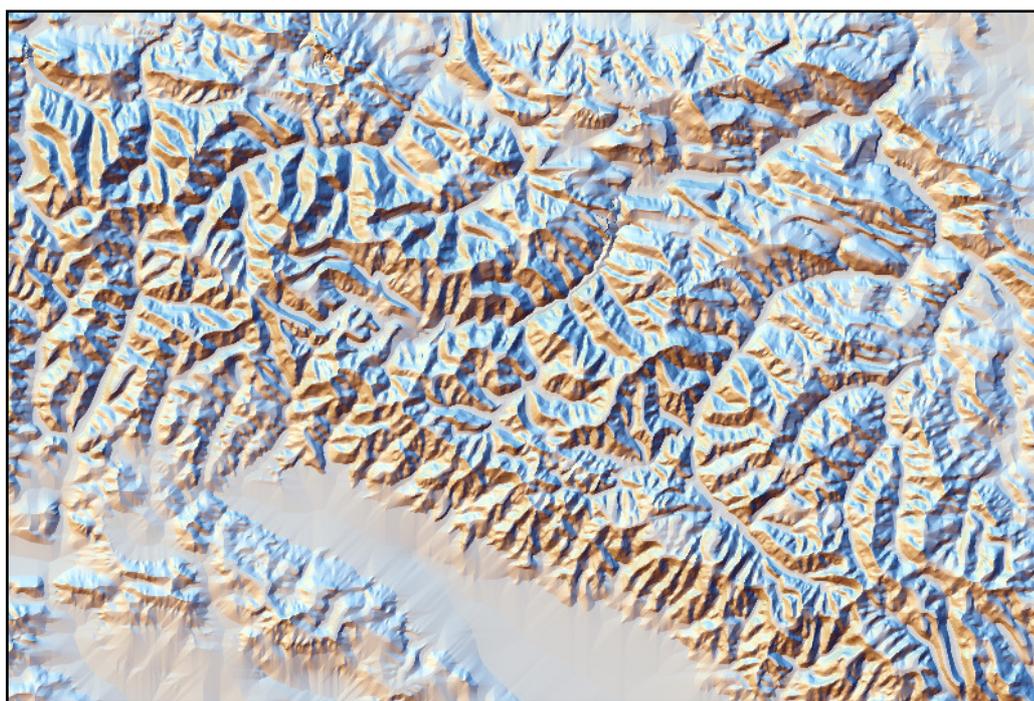
Образец №109 из "Альбома образцов изображения рельефа на топографических картах" [3].

Различные варианты аналитической отмывки горного рельефа (мелкий масштаб). Цифровая модель построена по изолиниям цифровой основы компании ESRI масштаба 1:1000000, методом, описанным в Главе 2, с помощью программы MAGSURF.

- а) Совмещение послойной окраски в осветляющейся шкале и аналитической отмывки.
- б) Цветная аналитическая отмывка. Использованы три источника освещения одинаковой интенсивности с азимутами: красный - 165°, зеленый - 135°, синий - 105°.



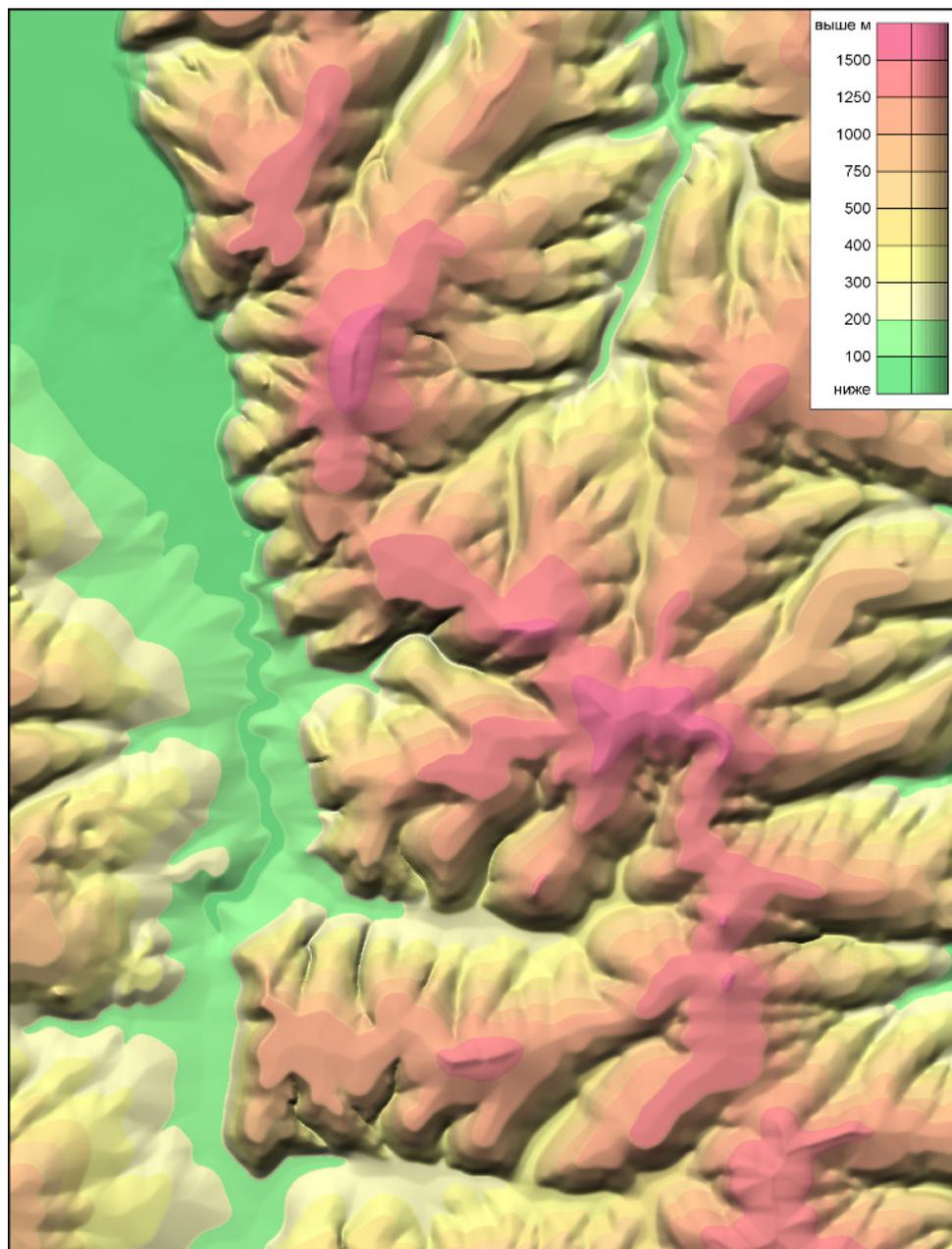
а)



б)

*Аналитическая отмывка среднегорного рельефа (средний масштаб). Цифровая модель построена по изолиниям, оцифрованным с топографической карты масштаба 1:200000, методом, описанным в Главе 2, с помощью программы MAGSURF.*

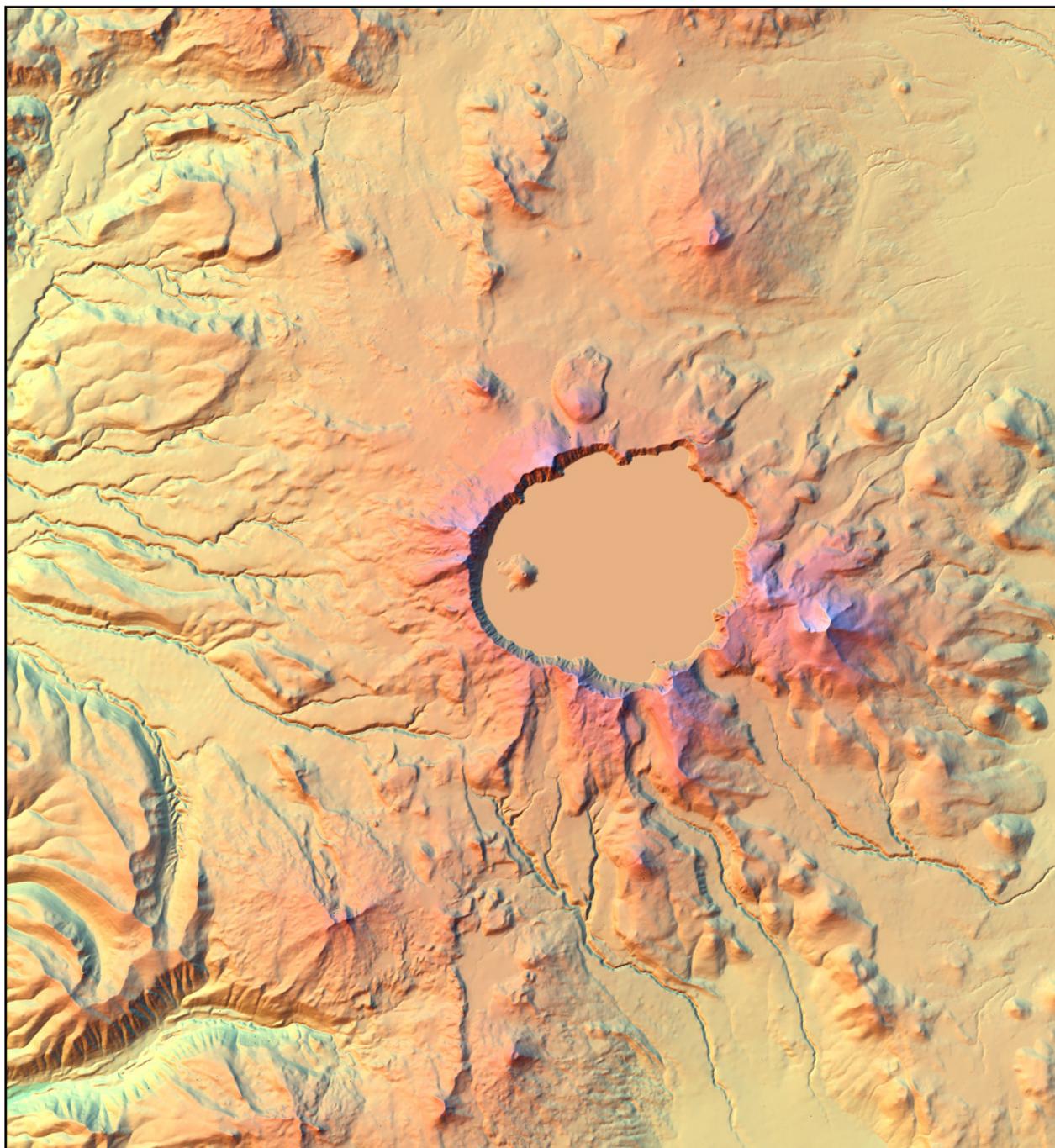
Совмещение аналитической отмывки и послойной окраски (в шкале возрастающей насыщенности и теплоты цвета).



## Приложение IV

*Аналитическая отмывка вулканического рельефа. Использована цифровая модель рельефа с шагом сетки 10 метров с интернет-сайта Геологической съемки США (USGS) на участок территории заповедника "Crater Lake", США.*

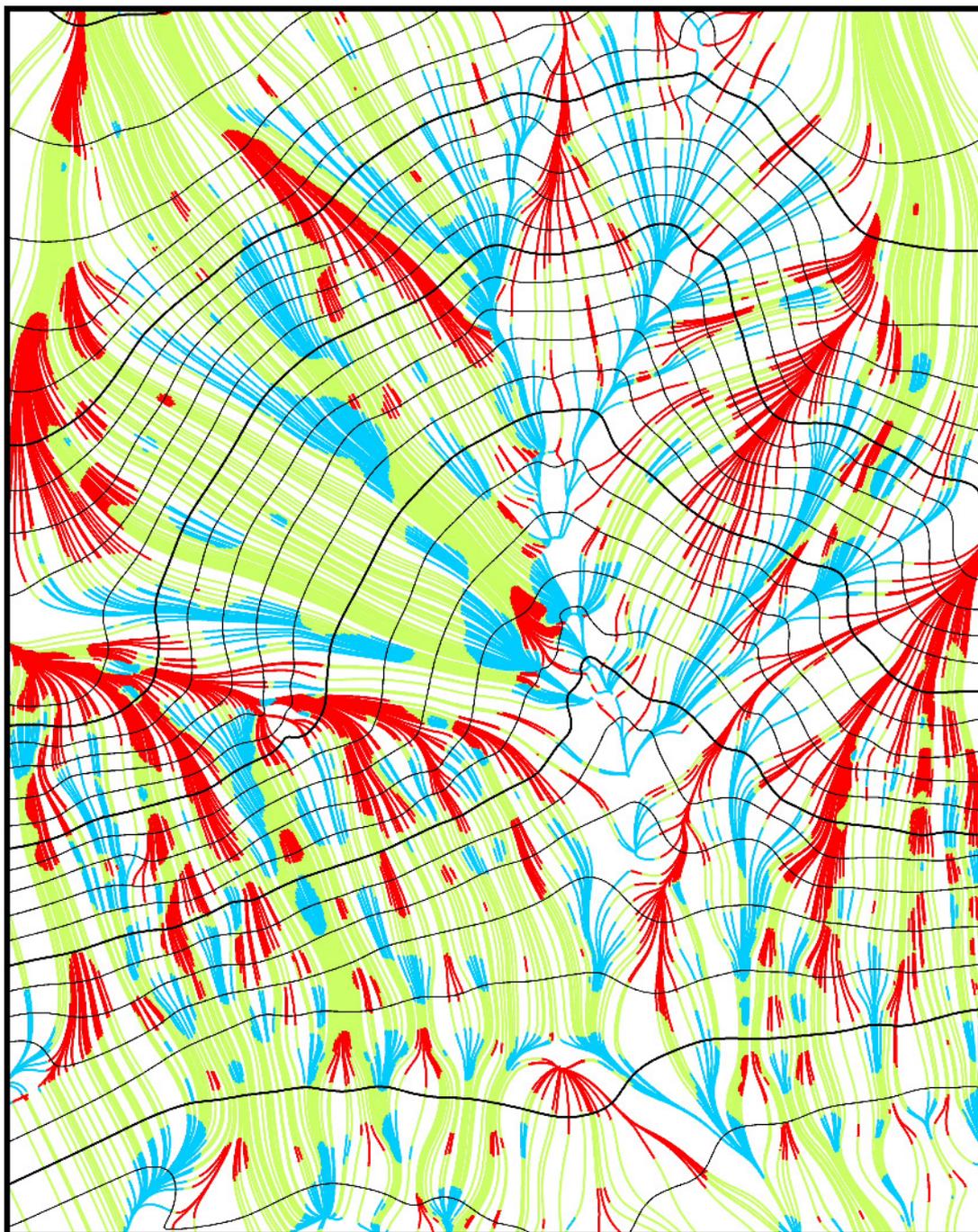
Совмещение цветной аналитической отмывки с адаптивным увеличением контрастности (раздел 2.3) и послойной окраски.



*Конвергентное и дивергентное поведение линий тока на тестовом участке (склон горы Айкуайвенчорр, Хибины, Рис. 2).*

Участки линий тока окрашены в соответствии со знаком поперечной кривизны (кривизна нормального сечения, перпендикулярного вектору градиента):

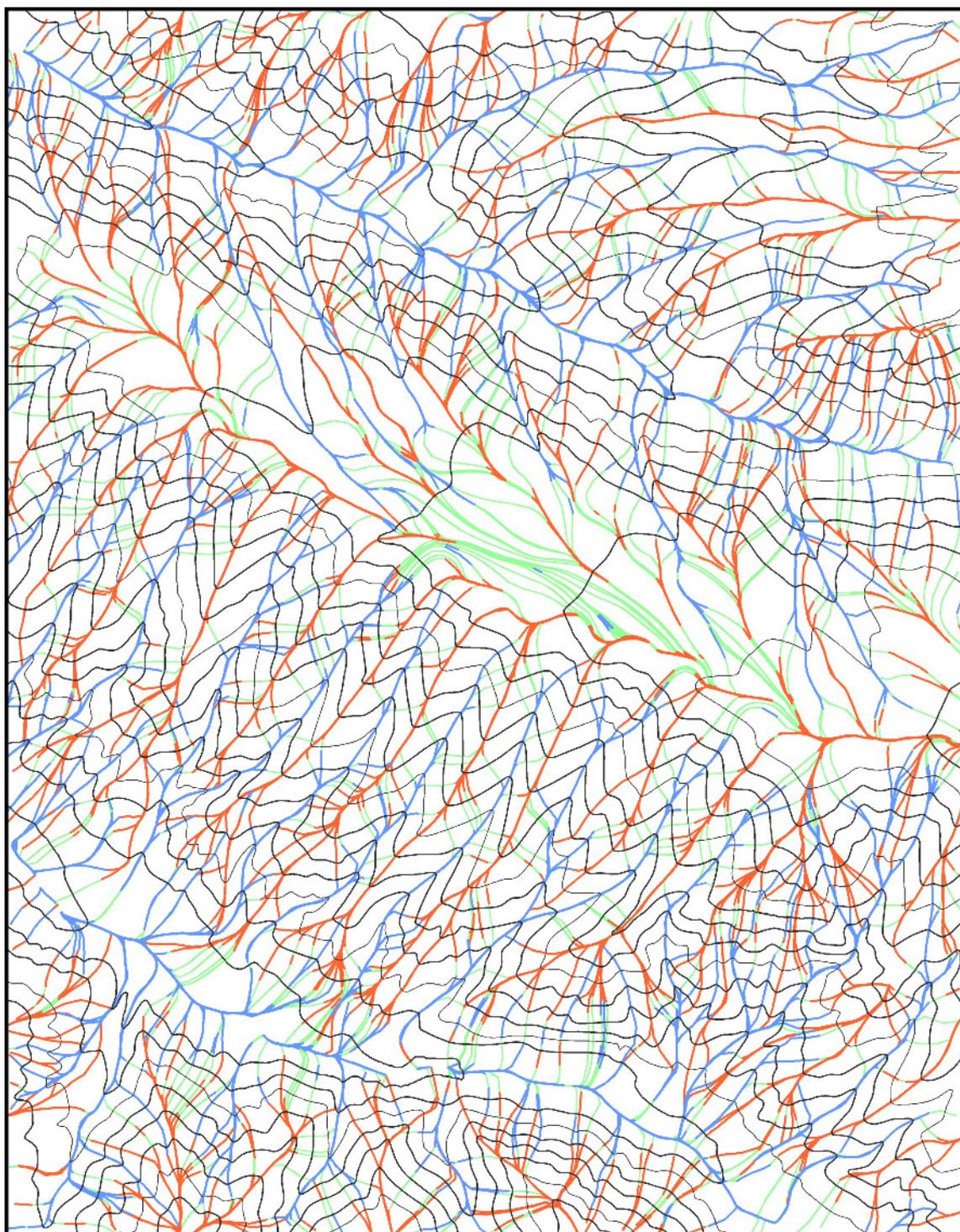
- красный* – дивергентное поведение, кривизна отрицательна
- синий* – конвергентное поведение, кривизна положительна
- зеленый* – нейтральное поведение, кривизна близка к нулю



*Конвергентное и дивергентное поведение линий тока (рельеф с ярко выраженными структурными линиями, Рис. 28).*

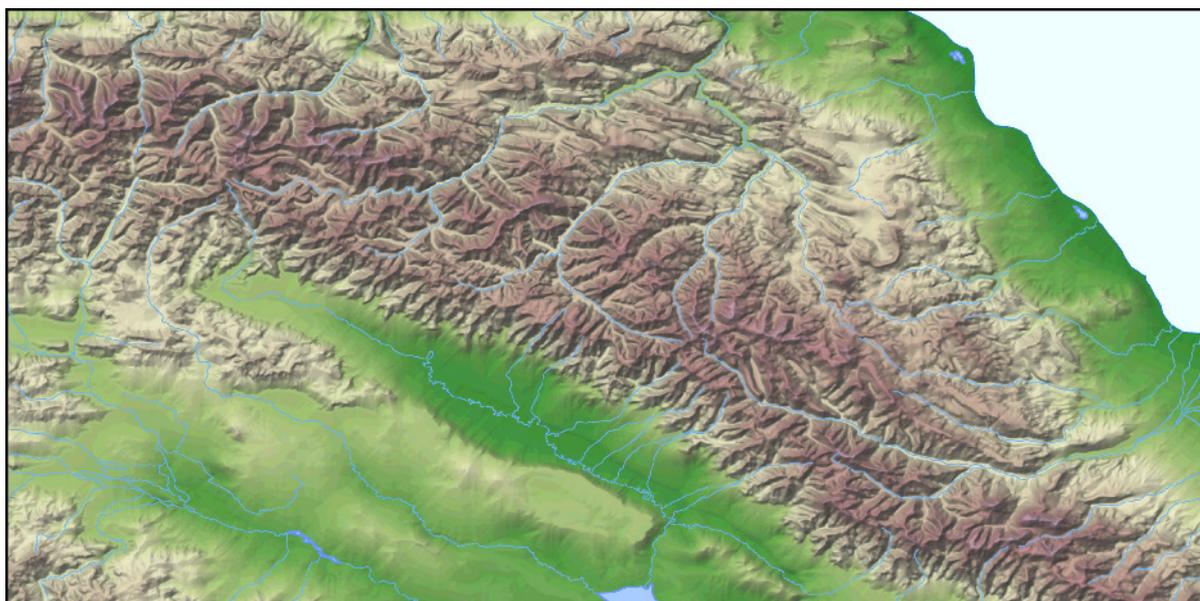
Образец №109 из "Альбома образцов изображения рельефа на топографических картах". Участки линий тока окрашены в соответствии со знаком поперечной кривизны (кривизна нормального сечения, перпендикулярного вектору градиента):

- |                |  |
|----------------|--|
| <i>красный</i> | – дивергентное поведение, кривизна отрицательна  |
| <i>синий</i>   | – конвергентное поведение, кривизна положительна |
| <i>зеленый</i> | – нейтральное поведение, кривизна близка к нулю  |



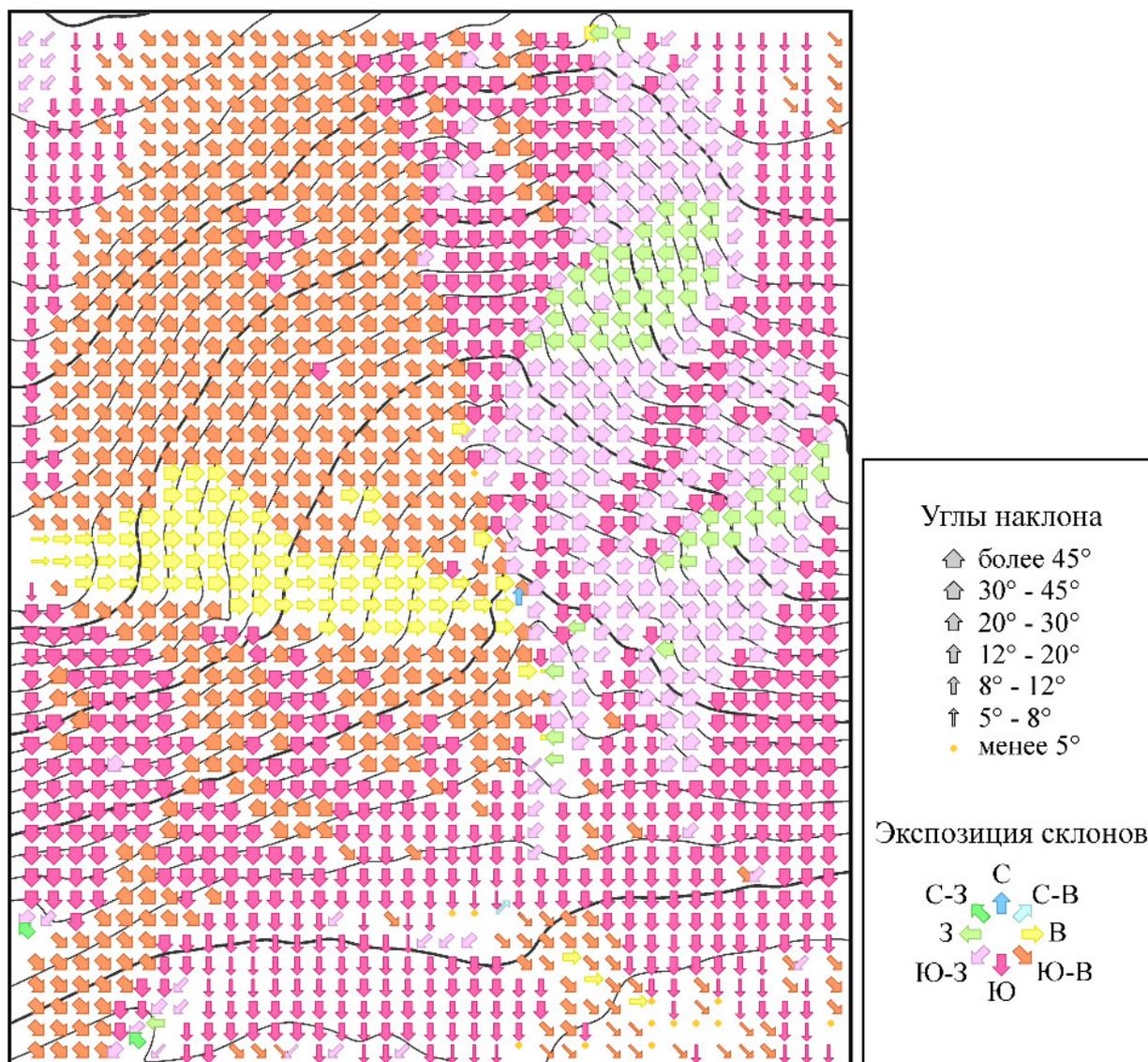
*Различные варианты аналитической отмывки горного рельефа (мелкий масштаб). Цифровая модель построена по изолиниям цифровой основы компании ESRI масштаба 1:1000000, методом, описанным в Главе 2, с помощью программы MAGSURF.*

Совмещение послойной окраски, аналитической отмывки и векторного слоя гидрографии.



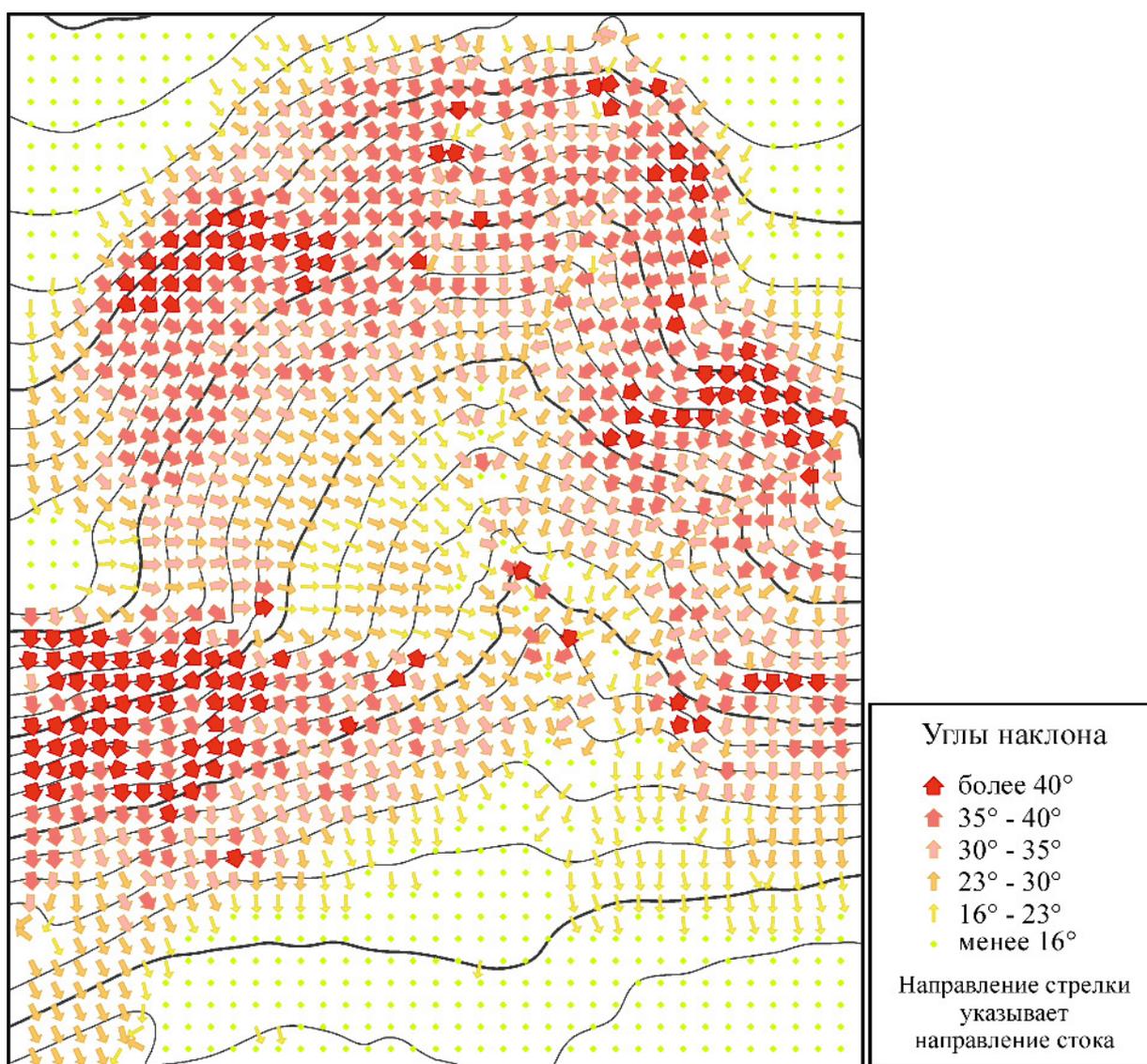
Карта градиентного поля для тестового участка (склон горы Айкуайвенчорр, Хибины, Рис. 2), выполненная вторым способом.

Направление стрелок изменяется дискретно по восьми румбам, цветом показана соответствующая экспозиция склонов. Толщина стрелок также изменяется дискретно в зависимости от углов наклона.

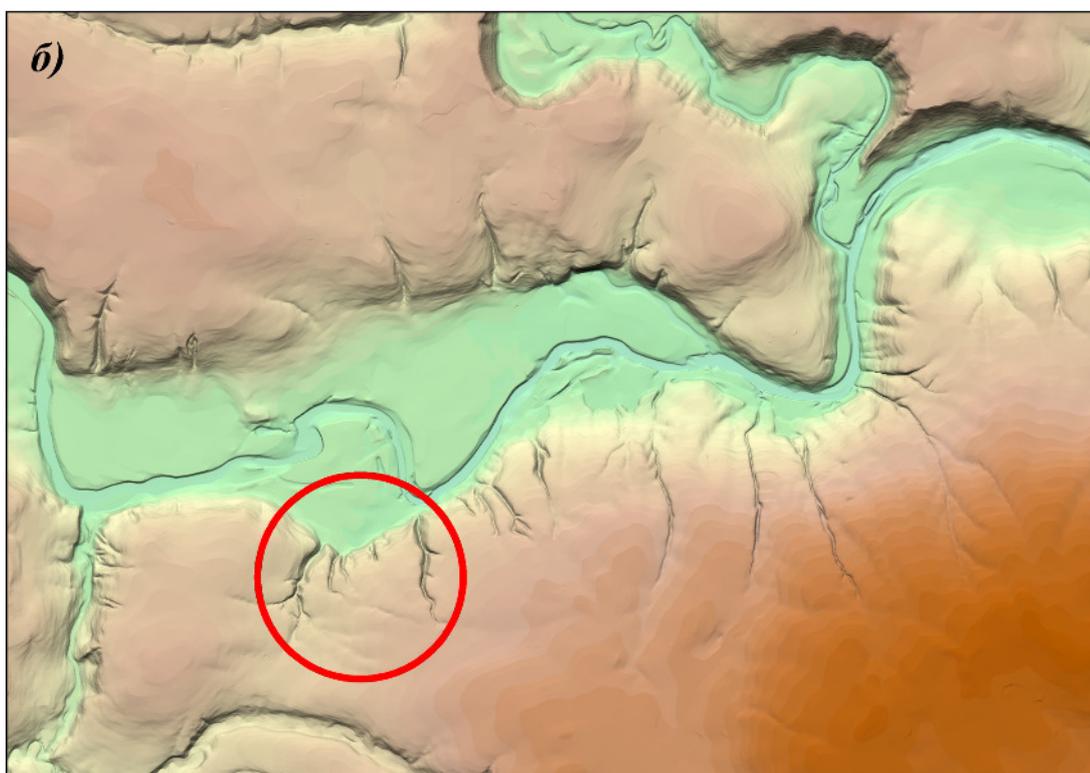
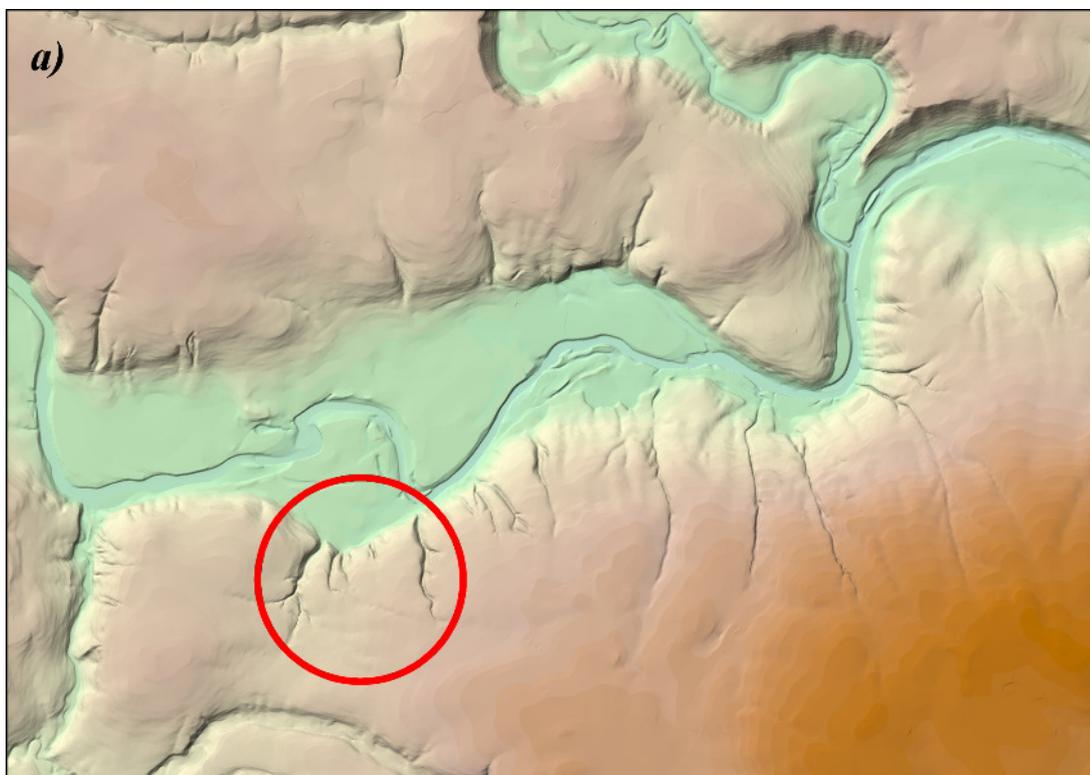


*Карта градиентного поля для тестового участка (склон горы Айкуайвенчорр, Хибины, Рис. 2), выполненная вторым способом.*

Направление стрелок изменяется непрерывно и указывает направление стока. Толщина стрелок изменяется дискретно в зависимости от углов наклона, цветом показаны соответствующие интервалы шкалы углов наклона.

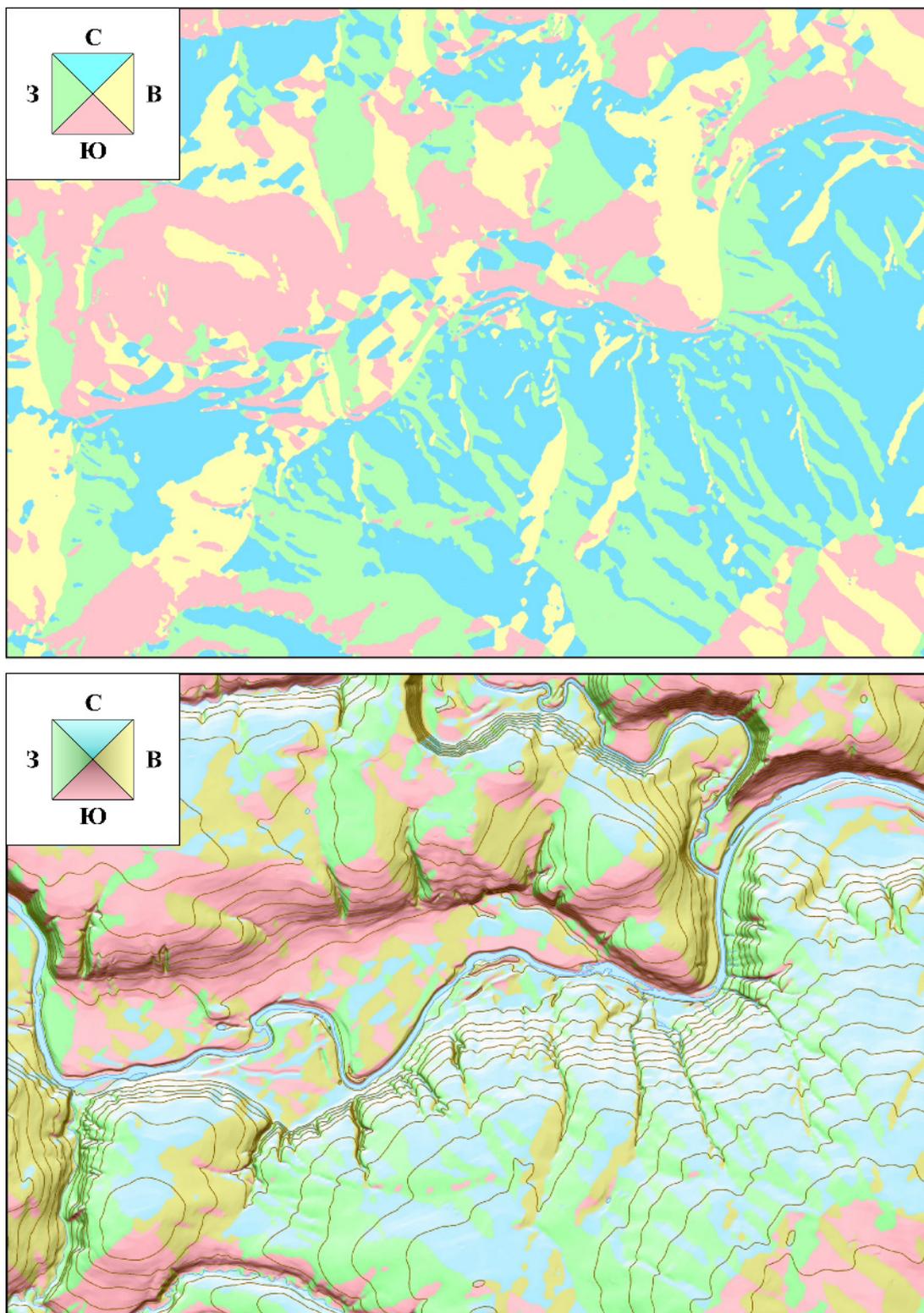


Аналитическая отмывка с одним (а) и двумя (б) источниками освещения, совмещенная с послойной окраской (территория Сатинского учебного полигона). ЦМР построена по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:5000 с помощью программы MAGSURF, шаг сетки модели 2.5 метра.  
Хорошо заметны различия в изображении оврагов (обведено красным кружком).



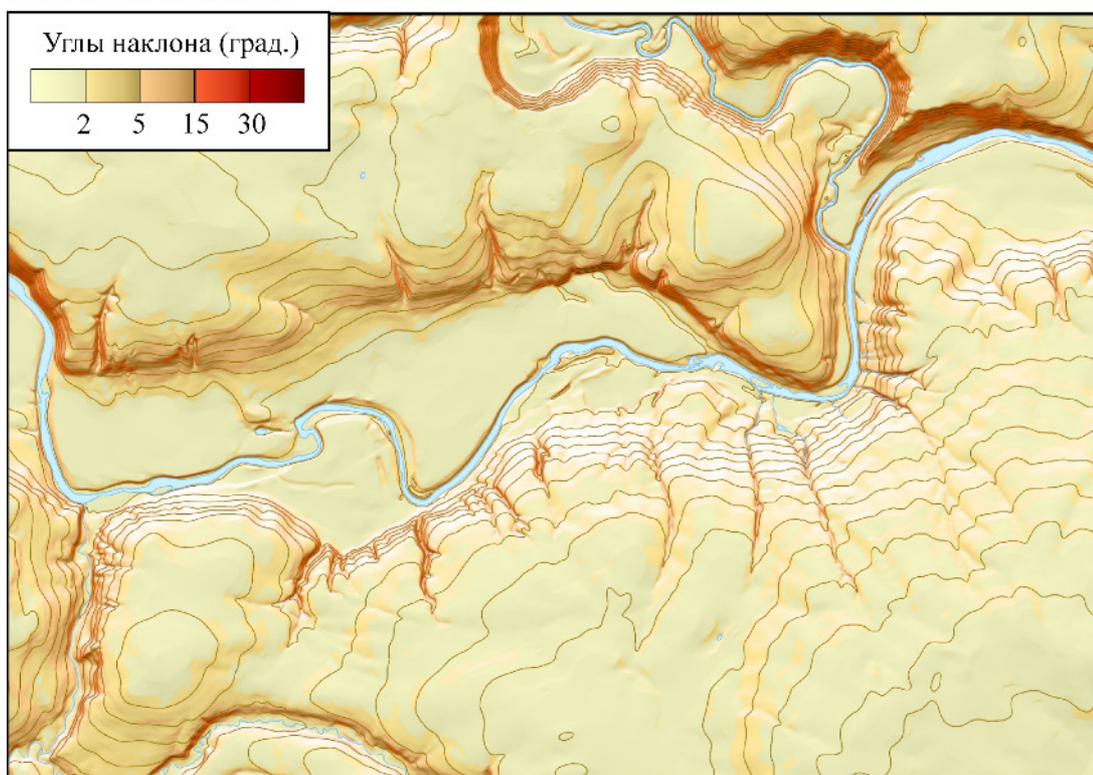
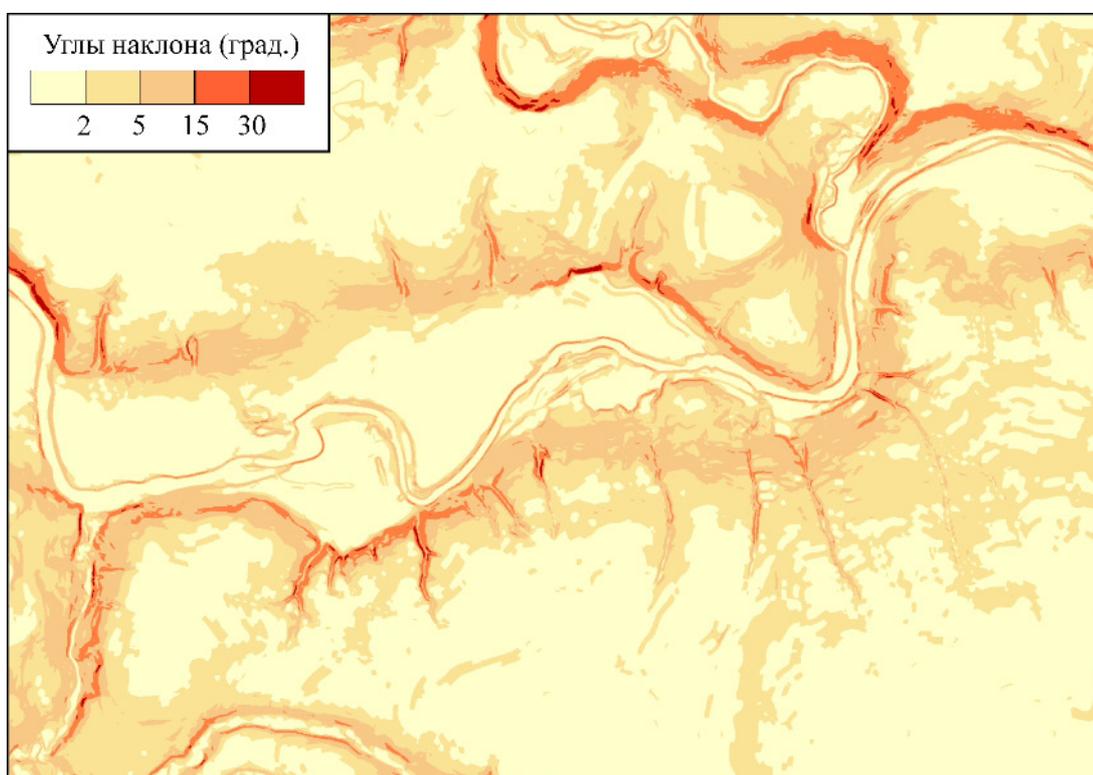
*Совмещение аналитической отмывки с картой экспозиций склонов и базовыми слоями горизонталей и гидрографии (территория Сатинского учебного полигона).*

ЦМР построена по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:5000 с помощью программы MAGSURF, шаг сетки модели 2.5 метра. Карта экспозиций и аналитическая отмывка созданы с помощью пакета МАГ на основе построенной ЦМР.



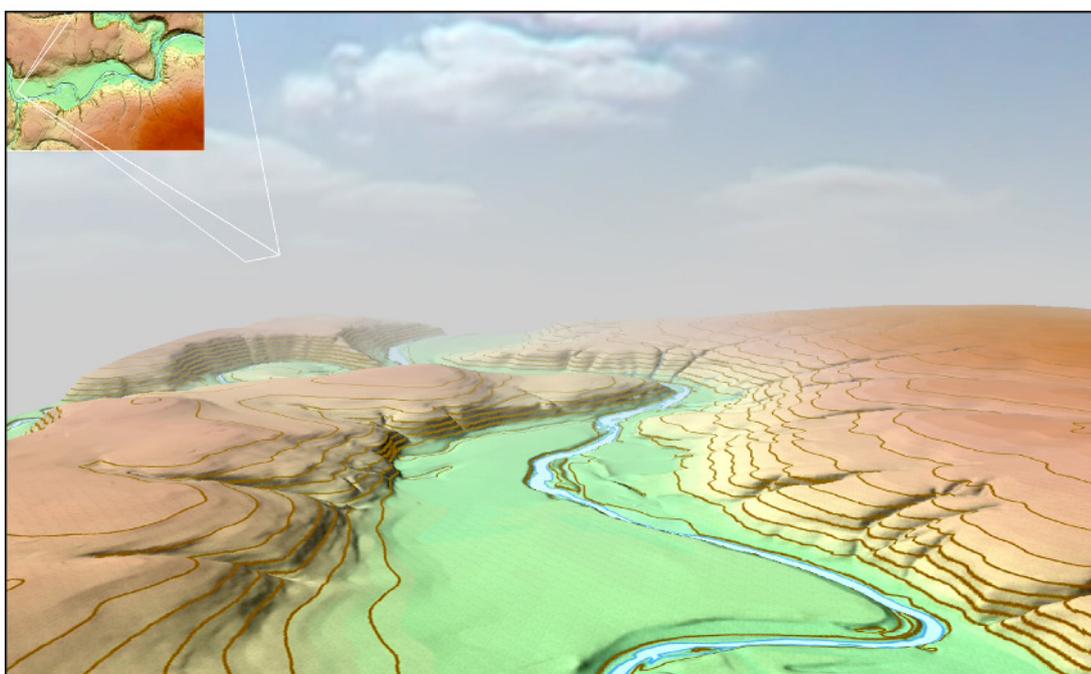
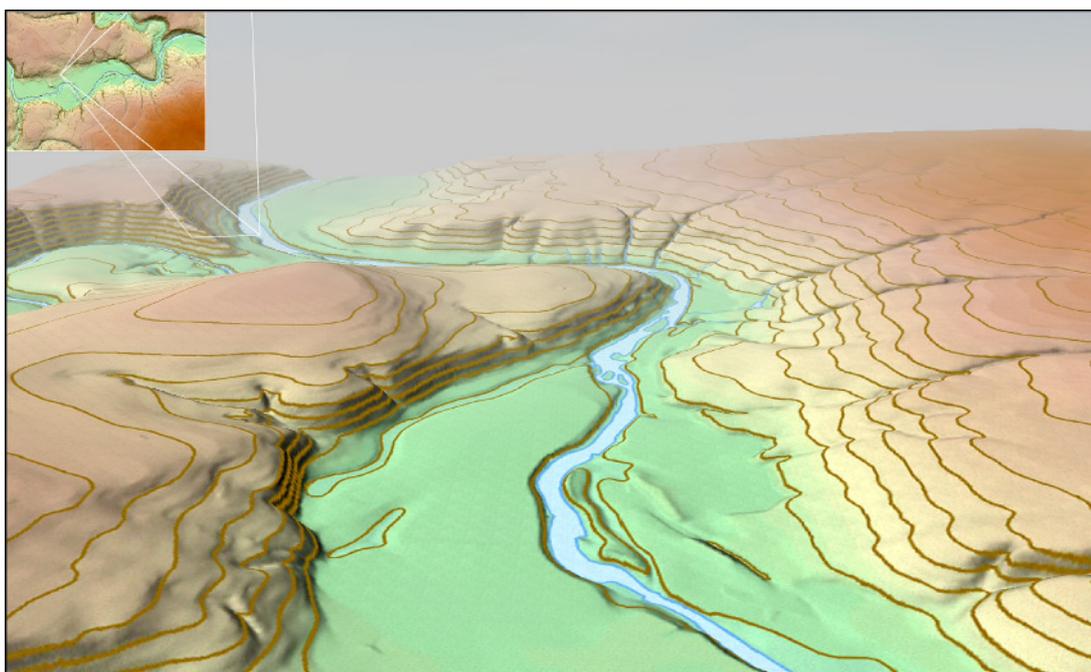
*Совмещение аналитической отмывки с картой углов наклона и базовыми слоями горизонталей и гидрографии (территория Сатинского учебного полигона).*

ЦМР построена по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:5000 с помощью программы MAGSURF, шаг сетки модели 2.5 метра. Карта углов наклона и аналитическая отмывка созданы с помощью пакета МАГ на основе построенной ЦМР.



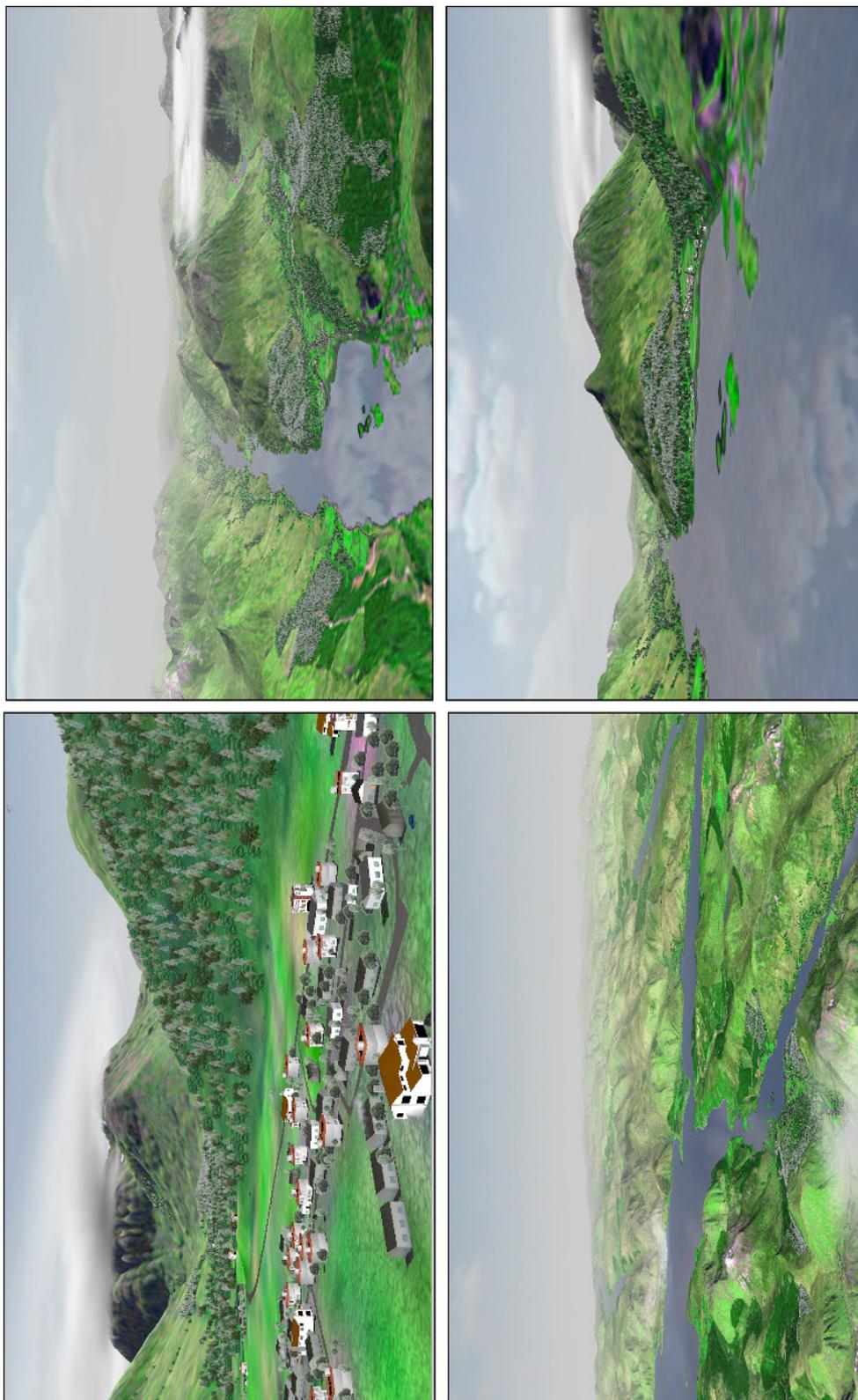
*Примеры виртуальных геоизображений (территория Сатинского учебного полигона).*

ЦМР построена по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:5000 с помощью программы MAGSURF, шаг сетки модели 2.5 метра. В качестве текстуры использована карта из Приложения X. Вертикальный масштаб увеличен в 2.5 раза. Изображение создано с помощью модуля Terrain программы Scanex Image Processor (разработка фирмы SCANEX).



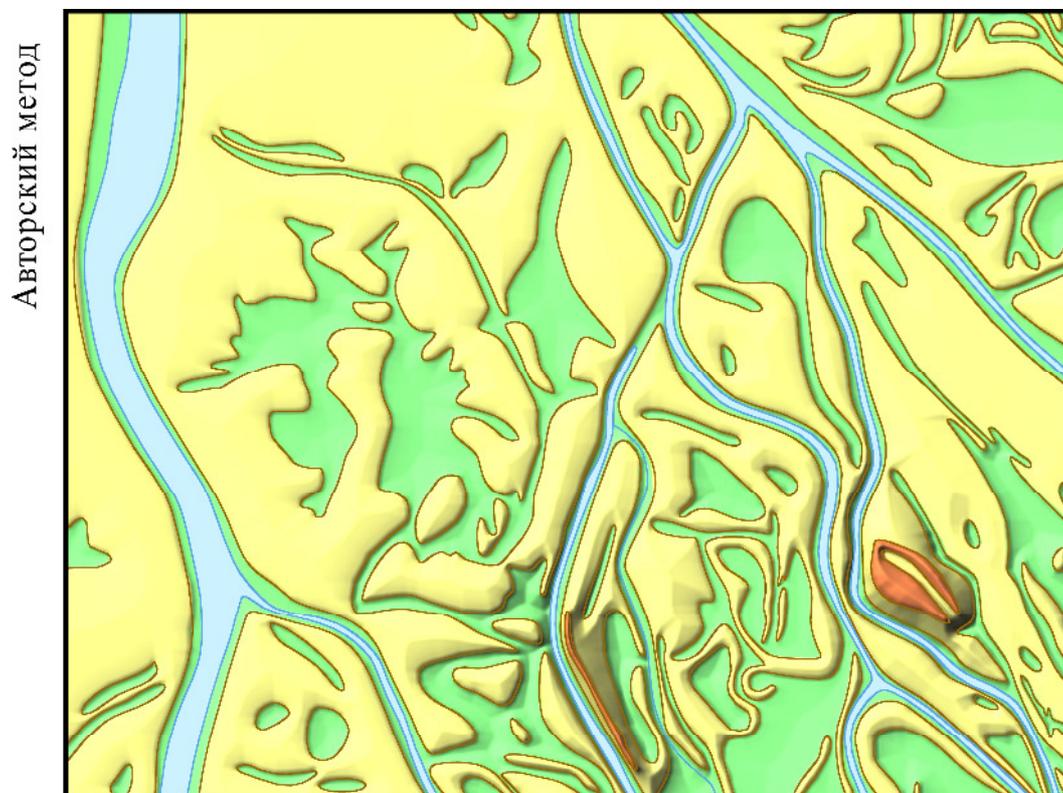
*Примеры виртуальных геоизображений (территория Гленко (Glencoe), Шотландия).*

Использована модель SRTM (мелкий масштаб) и ЦМР, построенная по изолиниям, оцифрованным с карты масштаба 1:10000, с помощью программы MAGSURF (крупный масштаб в районе населенного пункта). В качестве текстуры использованы снимки LANDSAT. Изображение создано с помощью модуля Terrain программы Scanex Image Processor (разработка фирмы SCANEX).



Результат моделирования рельефа по изолиниям авторским методом и методом Хатчинсона (район дельты Волги вблизи пос. Гандурино, Камызякский р-н Астраханской обл., горизонтали оцифрованы с топографической карты масштаба 1:50000).

Послойная окраска выполнена по цифровым моделям рельефа, показаны также исходные изолинии, по которым выполнялось моделирование и объекты гидрографии.



Высота в метрах

ниже -25	-20	выше

