

На правах рукописи

**КОШЕЛЬ Сергей Михайлович**

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

**25.00.35. - геоинформатика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2004

Работа выполнена на кафедре картографии и геоинформатики географического факультета Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова

**Научный руководитель:**

доктор географических наук,  
профессор

И.К. Лурье

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
профессор

А.И. Мартыненко

кандидат географических наук,  
старший научный сотрудник

А.В. Кошкарев

**Ведущая организация -**

Тверской Государственный Университет,  
кафедра картографии и геоэкологии

Защита состоится " **28** " **октября** 2004 года в 15 часов на заседании диссертационного совета по геоморфологии и эволюционной географии, гляциологии и криологии Земли, картографии, геоинформатике (Д-501.001.61) в Московском Государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, аудитория 2109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке географического факультета МГУ на 21 этаже.

Автореферат разослан " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2004 г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим отправлять по адресу: 119992, Москва, ГСП-2, Ленинские горы, МГУ, географический факультет. Факс: (095)939-38-01. E-mail: gislab@geogr.msu.ru

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
профессор

Ю.Ф.Книжников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 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 программное 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.

**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 112 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу, 27 рисунков, 1 приложение с цветными иллюстрациями. Список литературы насчитывает 153 наименования, 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.

## СОДЕРЖАНИЕ И ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

### Глава 1. Современное состояние и задачи создания и использования цифровых моделей рельефа в географических исследованиях и автоматизированном картографировании

Рельеф земной поверхности играет важнейшую роль при решении широкого круга географических задач (картографическая визуализация, картометрический и морфометрический анализ, гидрологический анализ, моделирование климата, геоэкологические исследования 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. В толковом словаре основных терминов геоинформатики под ред. Берлянта А.М. и Кошкарева А.В. 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". Аналогичные определения приняты и в зарубежных источниках.

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*). Область определения в этих 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. Каждая из указанных форм имеет свои достоинства и недостатки, однако триангуляционные модели применяются в основном для крупных масштабов, в то время как сеточные - для любых.

Блоки или программные модули для отображения и анализа рельефа стали неотъемлемой частью большинства геоинформационных систем (ГИС). Кроме того, существует и специализированное программное обеспечение, используемое самостоятельно или 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. 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 Землю, например, модель SRTM, созданная в результате обработки данных радиолокационной съемки комплексом SRTM с корабля-челнока "Индевор" в полете STS-99 (февраль 2000 г.). Такие модели хранятся в сеточной форме, легко доступны, в частности, через интернет, и имеют невысокую стоимость либо бесплатны.

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 (см. Табл. 1). В области анализа приведены только базовые методы карто- и морфометрии, как наиболее часто используемые в большинстве исследований и составляющие основу многих других методов анализа.

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.

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		●					●
Скользющие 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 В-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 горизонталы							★
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 в ГИС

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 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.

### *Алгоритм создания ЦМР по горизонталям, оцифрованным с топографических карт*

Для многих российских пользователей практически единственным источником получения ЦМР являются топографические карты. Таким образом, большое значение приобретают методы создания ЦМР по горизонталям, оцифрованным с топографических карт. Можно представить горизонтали как набор точек с высотами и использовать методы моделирования по точкам, однако при этом 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 всего, необходимо сформулировать требования, диктуемые свойствами исходных данных, по которым должно оцениваться качество методов.

В первую очередь, построенная модель была *достоверной по высотам*. Указывая точку на топографической карте, всегда можно точно 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 склона. 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 должны совпадать с исходными горизонталями с точностью, зависящей только от шага сетки ЦМР (отклонение не должно превышать шага сетки) и метода вычисления изоли-

ний.

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, аналитиче-

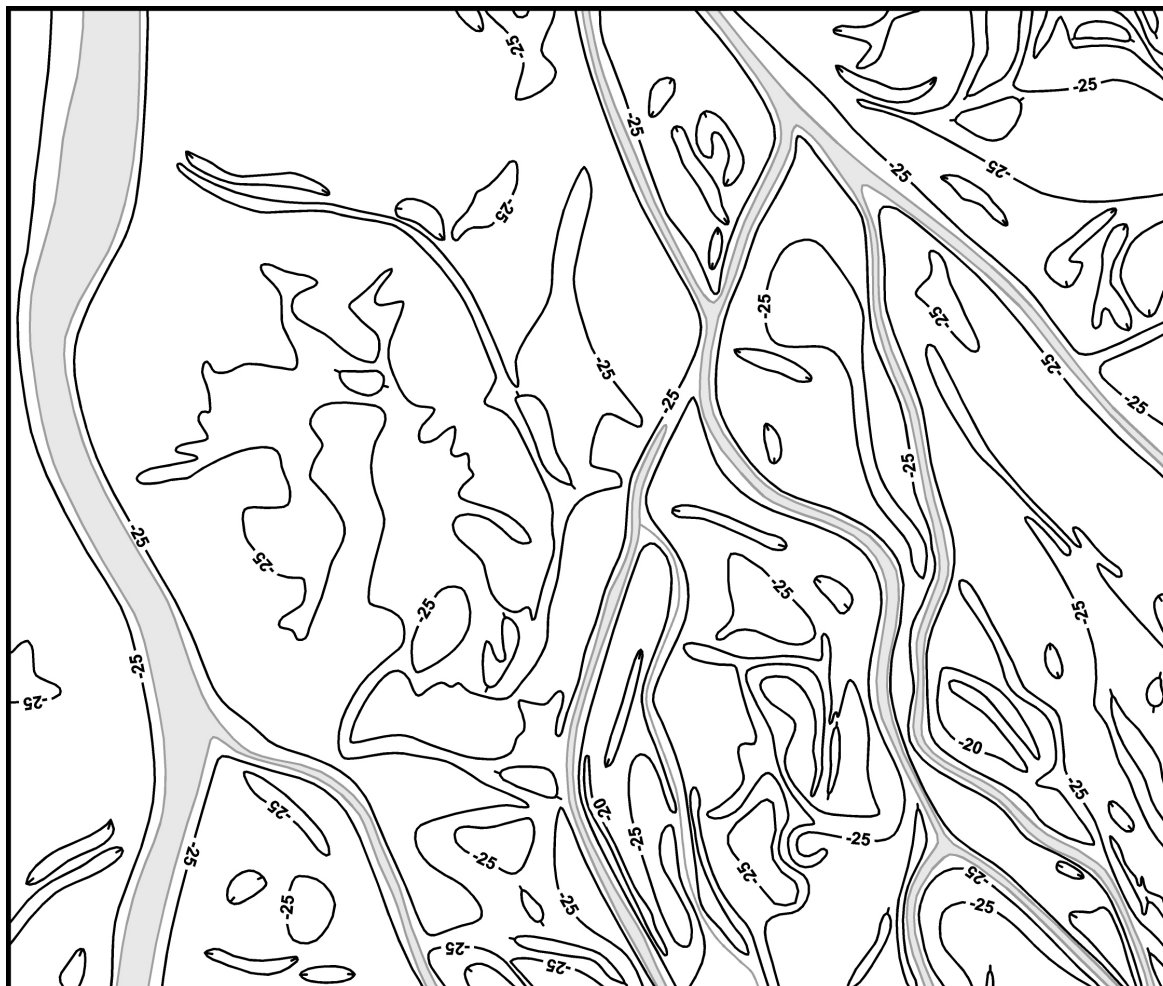
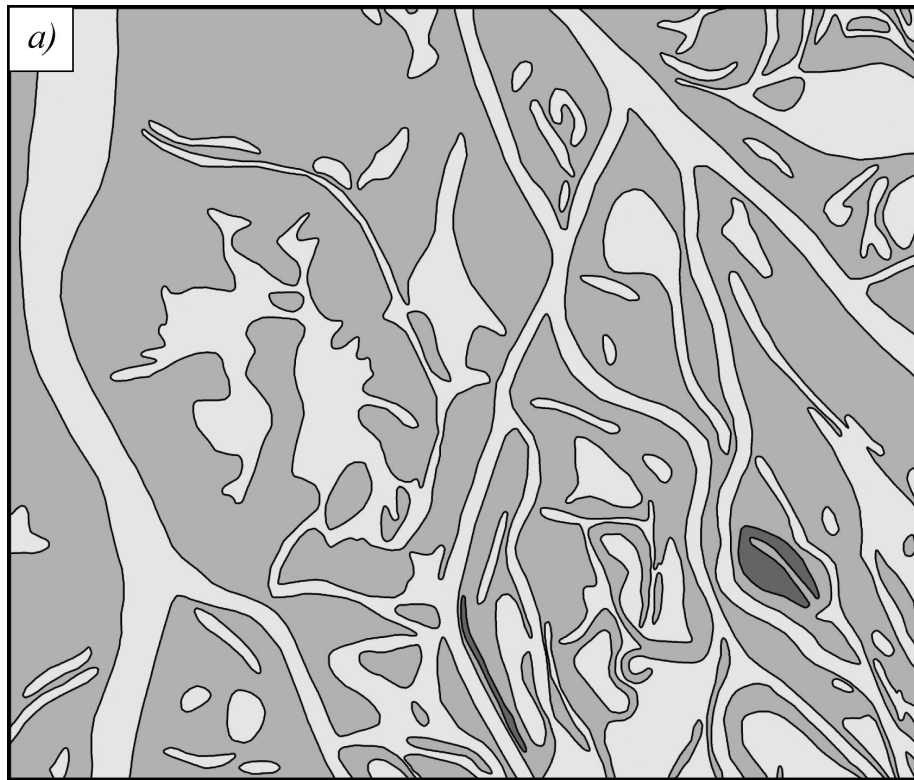


Рис.1. Район дельты Волги вблизи пос. Гандурино, Камызякский р-н Астраханской обл. Горизонтالي оцифрованы с топографической карты масштаба 1:50000

ской 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.



Высота в метрах

ниже -25	-20	выше

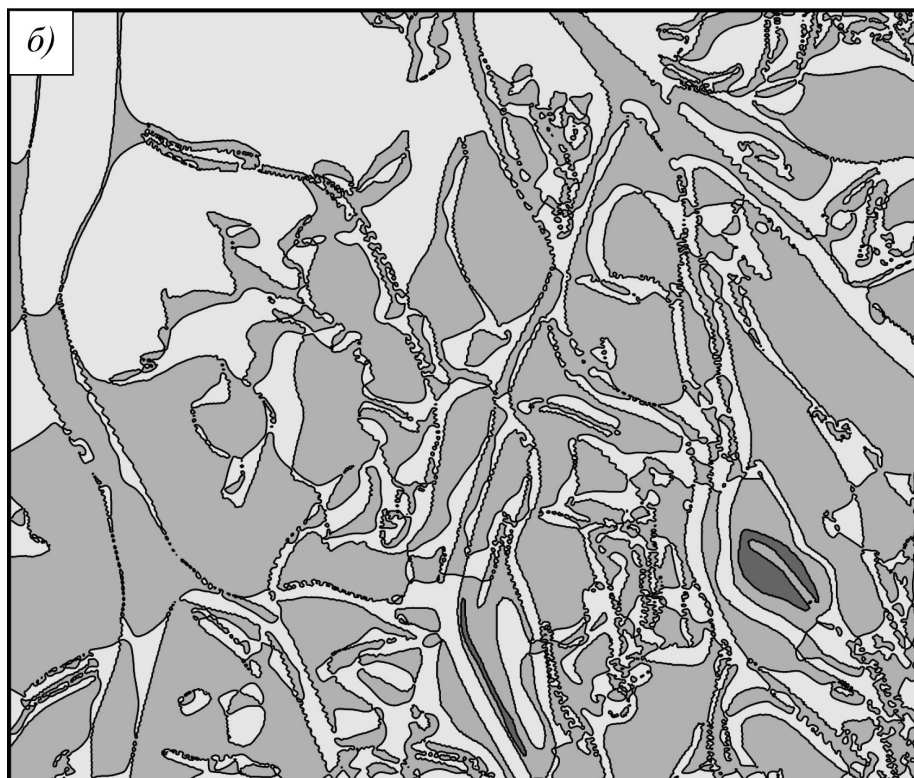


Рис.2. Результаты моделирования по данным рис.1: а) авторский метод (время счета 0.7 мин.); б) метод Хатчинсона (8 мин.).

На настоящий момент методов моделирования по изолиниям разрабо-

тано не очень много (см. Табл. 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.1. Сложность для моделирования состоит в том, что все горизонталы, 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.

В работе предлагается алгоритм, позволяющий создавать достоверные по высотам ЦМР для любого типа рельефа, в том числе и представленного на рис.1. В своей базовой части (как и в пакетах GRASS и ILWIS) он основан на быстром вычислении расстояний до двух ближайших изолиний разного уровня (расстояния измеряются вдоль линий, не пересекающих горизонталы), 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.1 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.

Разработанный алгоритм имеет высокую эффективность с вычислительной точки зрения. Время его работы в основном зависит только от размерности сетки, зависимость от объема исходных данных незначительна. Дополнения к базовой части алгоритма позволяют учитывать при моделировании линии обрывов, границы оврагов, объекты гидрографии с отметками урезов воды. Рис.2 иллюстрирует качество и эффективность предлагаемого метода по сравнению с подходом, реализованном в модуле TOPOGRID ArcGIS (модель имеет 901\*801 узлов).

#### *Алгоритм вычисления координат изолиний по сеточной ЦМР*

Способ горизонталей является наиболее широко используемым способом отображения рельефа и представляют собой метод количественной визуализации третьего измерения, обеспечивающий высокую метричность изображения. Геометрически горизонталы (изолинии) являются проекцией на ко-

ординатную плоскость XY сечений поверхности рельефа горизонтальными плоскостями. Предлагаемый в работе метод вычисления координат изолиний предназначен для сеточных ЦМР и базируется на идее *трассировки*. Он обеспечивает более высокое быстродействие по сравнению с другими известными методами, поскольку не требует дополнительной триангуляции прямоугольных ячеек сетки. Количество точек ломаной, представляющей изолинию, при этом значительно уменьшается (минимум на 30 %), что позволяет существенно сократить время ее рисовки. Корректность проведения изолиний вблизи седловин обеспечивается дополнительным анализом значений в углах прямоугольной ячейки сетки, содержащей седловину. Кроме того, алгоритм определяет и ориентацию изолиний, что важно при последующей картографической визуализации (расстановка подписей и бергштрихов).

#### *Аналитическая отмывка*

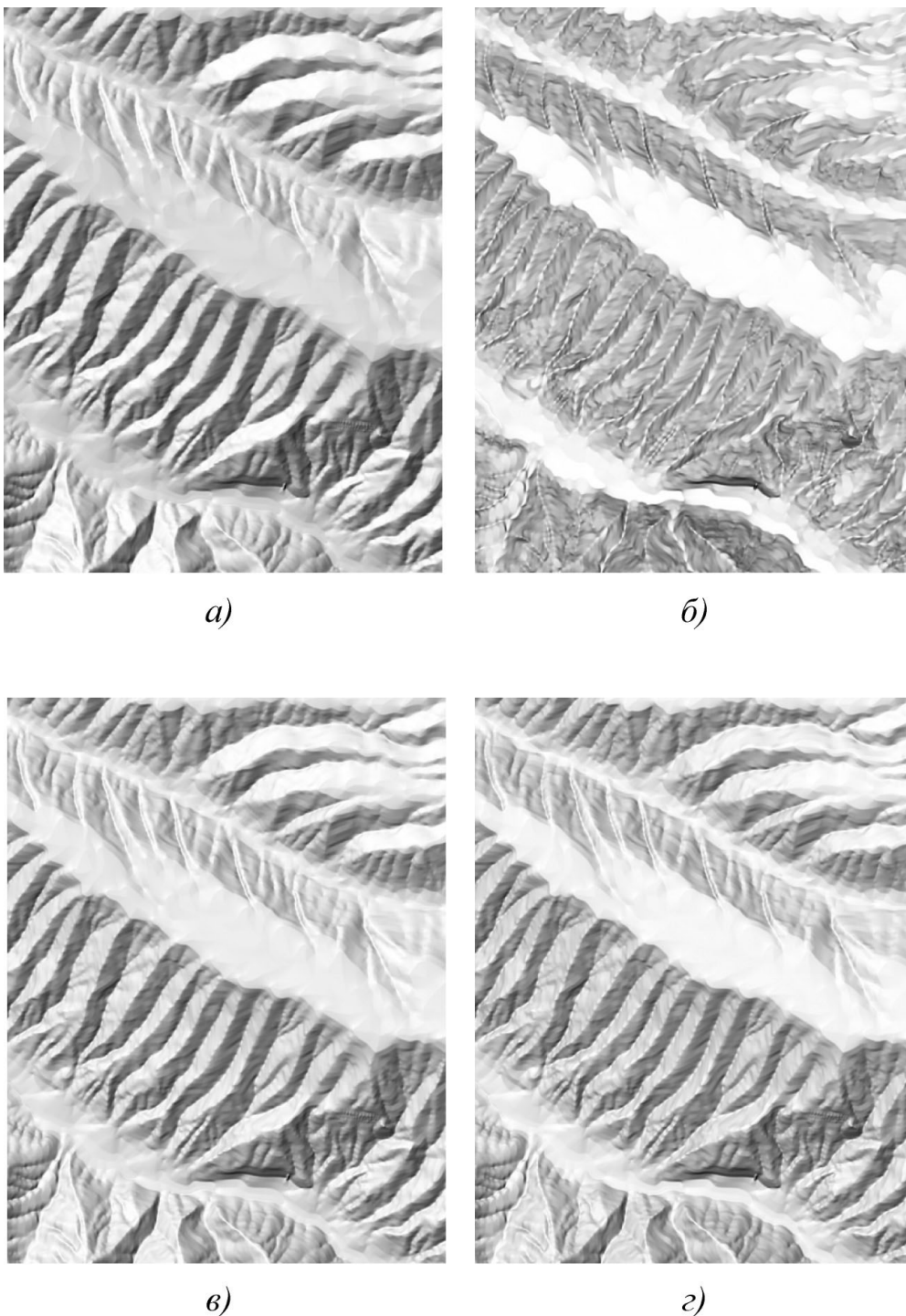
Цифровые методы светотеневого оформления рельефа, получившие название аналитической отмывки, позволяют создавать объемное, пространственное изображение рельефа на плоскости, и в настоящее время широко используется в оформлении топографических, общегеографических и тематических карт и для визуального анализа форм рельефа.

В ходе экспериментов выяснилось, что для целей светотеневой пластики наиболее подходит простейшая модель освещенности Ламберта, в которой предполагается диффузное отражение, а интенсивность отраженного света прямо пропорциональна косинусу угла между нормалью к поверхности и направлением на источник освещения и может быть вычислена по формуле:

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

где  $I$  – интенсивность отраженного света,  $\theta$  – угол между направлением на источник света  $\mathbf{L} = (L_x, L_y, L_z)$  и нормалью к поверхности  $\mathbf{n} = (n_x, n_y, n_z)$ . Сложные модели, учитывающие зеркальное отражение, а также зависимость интенсивности отраженного света от длины волны падающего света и свойств отражающей поверхности, более подходят для создания спецэффектов и реалистических изображений.

В проанализированных ГИС-пакетах реализован только метод с единственным постоянным источником освещения, причем разрешение создаваемого растрового изображения соответствует размерности сетки ЦМР. Для улучшения качества изображения предлагается использовать три дополнительных метода:



*Рис. 3. 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.*

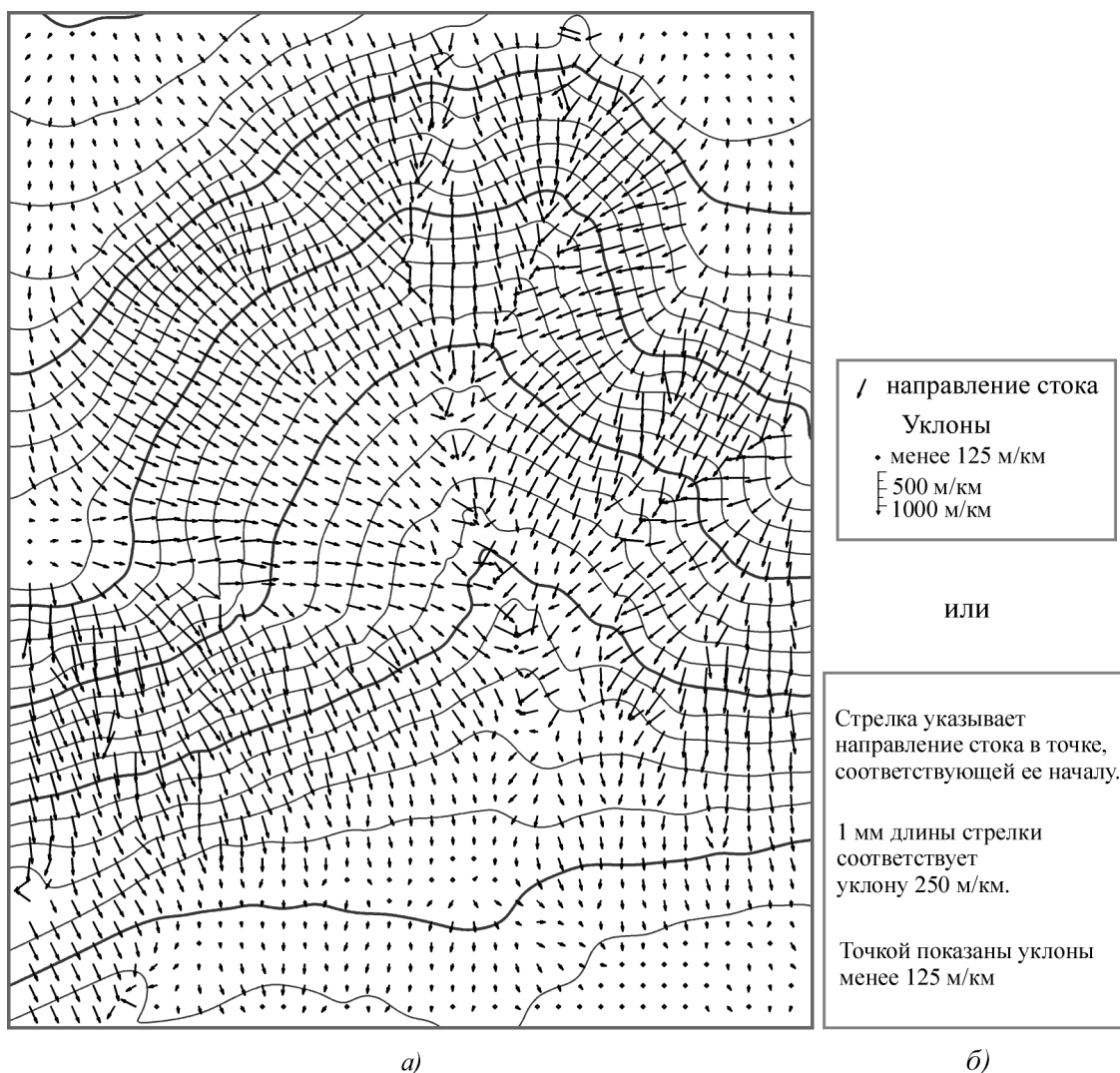
1) с несколькими постоянными источниками освещения разной интенсивности и цвета;

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

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 свойств самих методов. Для достижения лучшего качества можно также комбинировать методы между собой.

#### *Создание карт градиентного поля*

Карта градиентного поля является средством визуализации не самой



*Рис.4. Градиентное поле (первый способ изображения): а) - вариант карты; б) - варианты оформления легенды.*





длиной вектора градиента. Варианты отличаются используемыми картографическими знаками и способами их классификации. На рис.4 и рис.5 представлены два основных способа из предлагаемых трех.

Карты градиентного поля, выполненные *первым способом* (рис.4), 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.

Во *втором способе* (рис.5), идею которого предложил С.Н.Сербенюк (1991), знаки представляет собой стрелки одинаковой длины, но разного направления и толщины. Наибольший интерес такие карты представляют в задачах, связанных с классификацией склонов по углам наклона и экспозициям. 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 знаках цвета.

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.

Важная роль при создании карт градиентного поля отводится цвету. Его использование в каждом из предлагаемых вариантов изображения позволяет либо усилить визуальное восприятие одного из показателей, либо отобразить другую трактовку (другой смысл, другую классификацию) направления и длины вектора градиента, либо отразить на карте еще один дополнительный показатель, не связанный непосредственно с градиентом (высота, кривизна, толщина снежного покрова, осадки и т.д.), но важный при решении конкретной задачи.

#### *Создание карт линий тока*

Карты линий тока (рис.6) тесно связаны с картами градиентного поля, поскольку касательной к линии тока в каждой точке является вектор градиен-

та. 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:

$$\begin{cases} x'(t) = -f_x(x, y) \\ y'(t) = -f_y(x, y) \end{cases}; x(0) = x_0, y(0) = y_0, \text{ для значений параметра } t > 0,$$

где через  $f(x, y)$ ,  $f_x$ ,  $f_y$  обозначены модельная функция, описывающая рельеф, и ее частные производные.

В ГИС-пакетах для численного интегрирования приведенных уравне-

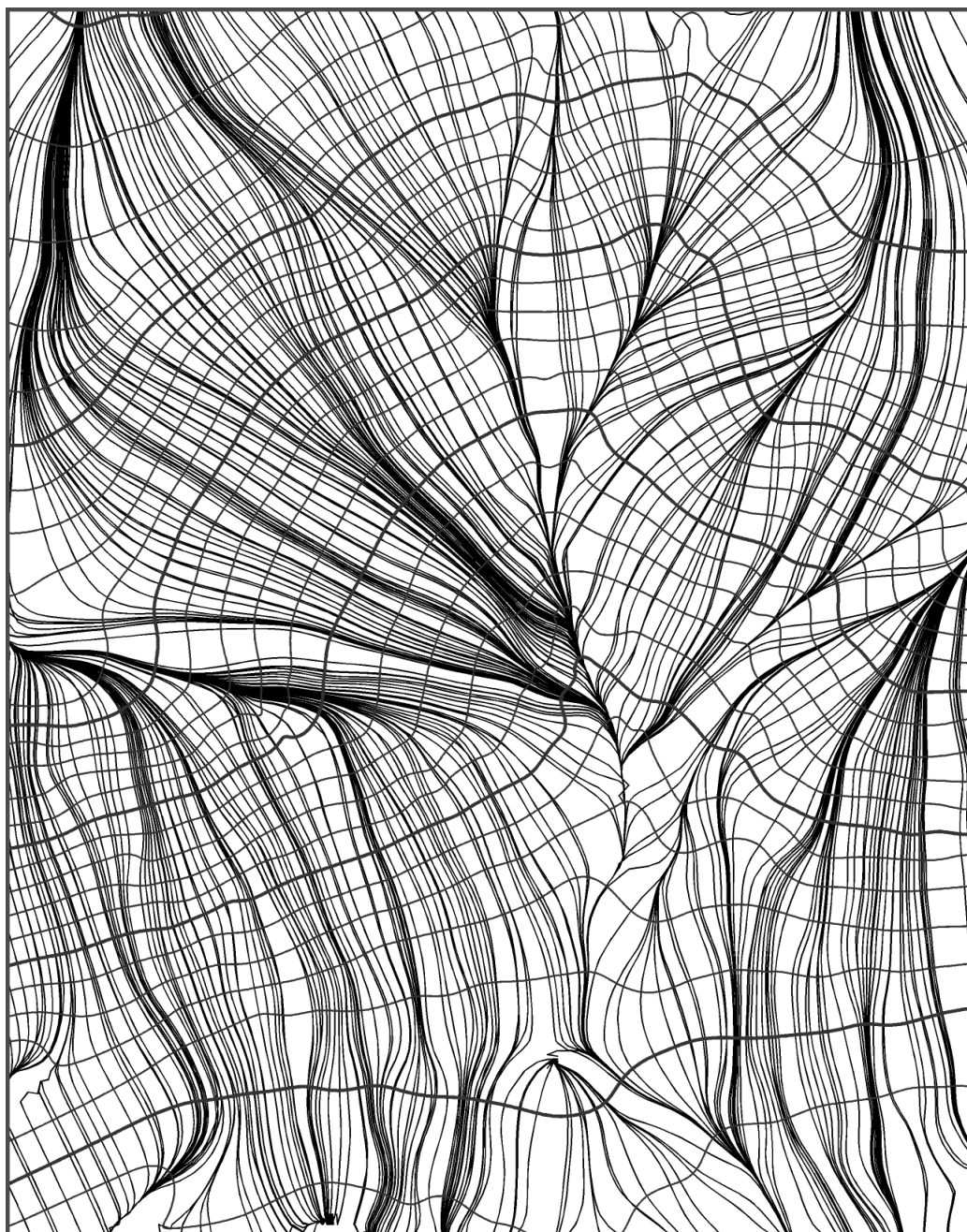


Рис.6. Линии тока (1656=36\*46 начальных точек на регулярной сетке).

ний используется простейший метод Эйлера и растровый подход, при котором движение происходит только в восьми направлениях и вершинами ломаной, представляющей линию тока, являются узлы сетки. Получаемое таким образом изображение имеет низкое качество с картографической точки зрения. Значительно повысить точность интегрирования и получать линии хорошего с картографической точки зрения качества даже для сеток с большим шагом позволяет предлагаемый в работе векторный подход и метод интегрирования Рунге-Кутты-Фельберга четвертого-пятого порядка. Шаг интегрирования при этом выбирается адаптивно в зависимости от кривизны линии, масштаба, шага сетки и значений правой части системы уравнений, а сама линия тока отслеживается до тех пор, пока модуль градиента (уклон) не станет меньше некоторого числа, определяемого автоматически.

Карта линий тока может создаваться как в интерактивном режиме, так и в автоматическом. При автоматическом размещении начальных точек в узлах регулярной прямоугольной сетки, получаемые линии размещены на карте неравномерно, их сгущение отражает положение структурных линий поверхности – тальвегов, водоразделов, гребней и др.

Карты линий тока очень интересны с точки зрения структурного анализа поверхности. Поведение линий тока при движении вниз по склону можно разбить на три типа: *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). 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. Дивергентное поведение наблюдается вблизи таких структурных линий, как водоразделы, гребни, хребты. Степень концентрации линий тока около таких структурных линий отвечает степени выраженности соответствующих структурных элементов. Нейтральному поведению линий тока соответствуют простые ровные склоны, не имеющие достаточно выраженных структурных элементов.

На рис.6 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.

При создании карт линий тока предусмотрена дополнительная возмож-

ность использования цвета. В частности, при окраске линий тока в три цвета в соответствии со значениями поперечной кривизны поверхности (в сечении нормальной плоскости, перпендикулярной градиенту), характер их поведения легко определяется визуально.

### **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 разработан программный комплекс МАГ (Моделирование и Автоматизация в Географии), предназначенный для создания, визуализации и анализа цифровых моделей рельефа. Идея его создания была выдвинута проф. С.Н. Сербенюком в 80-х гг., активное участие в разработке первой версии в начале 90-х гг. принимал О.Р. Мусин. Структурно-функциональная схема комплекса в его современном виде представлена на рис.7. Комплекс построен по модульному принципу и может быть легко встроен в любую оболочку ГИС, имеющую собственный язык программирования или объектную библиотеку для создания приложений.

Методы, реализованные в модулях комплекса МАГ, приведены в Таблице 1 в последней колонке. Звездочкой отмечены те из них, которые усовершенствованы или разработаны автором.

Например, моделирование на основе триангуляции Делоне реализовано практически во всех программах только в простейшем варианте путем линейной интерполяции на треугольниках. Это приводит к кусочно-линейной функции, имеющей разрывы производной на ребрах треугольников и, как следствие, получаемые по такой модели изолинии имеют качество весьма далекое от картографических стандартов. Существенным недостатком является также и то, что область моделирования ограничена выпуклой оболочкой исходного множества точек и наблюдаются значительные искажения в граничных треугольниках, ребра которых являются ребрами выпуклой оболочки. В комплексе МАГ реализованы возможности для устранения всех перечисленных недостатков: для моделирования могут быть использованы гладкие функции класса  $C^1$  и  $C^2$ , не дающие осцилляций (это важно); граничные эффекты устраняются путем автоматического добавления дополнительных точек на выпуклой оболочке; возможна экстраполяция на прямоугольную область моделирования.

В качестве другого примера можно привести методы вычисления про-

изводных 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. По-

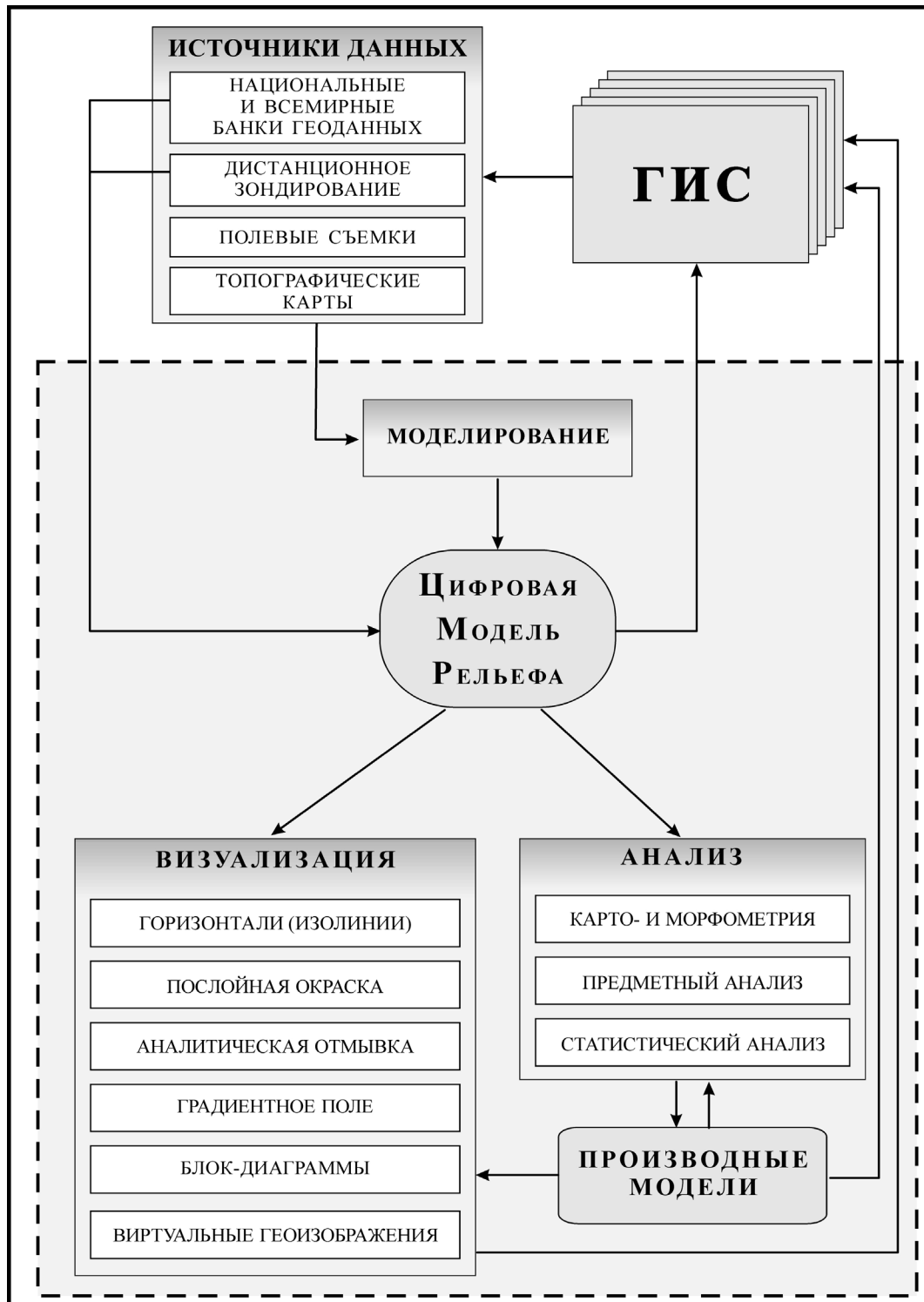


Рис.7. Структурно-функциональная схема блока моделирования и анализа рельефа в ГИС.

сколькx 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.

Большинство модулей комплекса объединены также в самостоятельную программу MAGSURF, которая дает возможность работать с ними в автономном режиме вне ГИС-оболочки. Программой предусмотрена загрузка исходных данных в форматах наиболее популярных ГИС-пакетов (MapInfo MIF/MID, ArcInfo Shape) и картографического редактора DIGITMAP (разработка кафедры 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. Интерфейс программы создан по принципу послойной организации 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 анализ одновременно нескольких геополей.

Благодаря наличию в комплексе МАГ большого количества разнообразных методов моделирования его можно использовать для работы с любыми географическими полями, а не только с рельефом земной поверхности. Важным достоинством комплекса, отличающим его от многих других программ подобного рода, является и то, что многие методы реализованы не только для функций двух переменных (географических координат), но и нескольких. 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.

Большое внимание при разработке комплекса МАГ уделено картографической визуализации. В нем реализованы практически все способы, используемые в классической картографии, причем особое внимание уделено качеству создаваемых изображений. Кроме перечисленных в таблице 1 методов реализованы также способы наклонных горизонталей и освещенных горизонталей. Некоторые из предлагаемых методов либо отсутствуют в других программах, либо требуют выполнения нескольких последовательных манипуляций. Для удобства совместного использования с другими программами в комплексе предусмотрен экспорт изображений в различные растровые и векторные графические форматы и в форматы ГИС.

С помощью комплекса МАГ было выполнено большое количество научно-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), рис.3-5;
- создание ГИС «Черное море» в рамках международной программы BSEP;
- создание базовых слоев (модели рельефа, углов наклона, экспозиции склонов, кривизны поверхности; карты с наложением послойной окраски и аналитической отмывки для визуального анализа) для региональной ГИС «Лавины Хибин»;
- создание базовых слоев ГИС г. Саратова;
- создание блока для моделирования уровня грунтовых вод на основе цифровых моделей рельефа и замеров в скважинах в программном комплексе «Мелиорация» (Зарубежводстрой);
- прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем на примере Черных земель Калмыкии (здесь для создания карт динамики опустынивания использовалось многомерное моделирование).

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.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе проведенных теоретических исследований и экспериментальных работ достигнута основная цель диссертации: 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 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 автома-



тическом 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, технология и программное обеспечение для автоматизированного создания карт с использованием светотеневой пластики. Технология основана 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.

Основные научные результаты диссертации **опубликованы** в работах:

1. Creation and usage of geofields digital models // Regional Conference on Asian Pacific countries International Geographical Union. August 13-20, 1990, Beijing, China. Abstracts, vol.2, p.13-22 (соавторы С.Н.Сербенюк, О.Р.Мусин).

2. Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография.-1990.-№7.-с.31-35 (соавторы С.Н.Сербенюк, О.Р.Мусин).

3. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография. - 1991. - №4. - с.44-46 (соавторы С.Н.Сербенюк, О.Р.Мусин).

4. 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 (соавтор О.Р.Мусин).

5. Опыт создания глобальной цифровой базы данных по гипсометрической карте мира в масштабе 1:15000000 // Геоморфология. - 1991.- №2 (Апрель-Июнь). - с.25-31 (соавторы А.М.Берлянт, О.Р.Мусин, И.А.Суетова) (переведена в журнале Mapping Sciences and Remote Sensing, 1992, 29, 2, pp.146-154).

6. Автоматизированное картографирование по материалам фототеодолитных съемок // Геодезия и картография.-1992. - №8. - с.43-48 (соавторы Б.А.Новаковский, А.А.Сучилин).

7. Автоматизированное создание карты высоты снежного покрова по материалам фототеодолитной съемки. // Геоинформационное картографирование. - Московский центр Русского Географического общества. - Москва. - 1993. - с.166-181 (соавторы Б.А.Новаковский, П.С.Волков).

8. Spatial Modelling and Analysis for GIS // Int. Conf. "Europe in Transition" (GIS Brno 1994), August 28-31, 1994, Brno, Czech Republic, Abstracts, p.30 (соавтор О.Р.Мусин).

9. Surface modeling for contour data // Proc. of Int. Conference "GIS Frontiers in

Business and Science", April 20-24, 1996, Brno, Czech Republic, pp. II-2-5 (соавтор И.В.Калинкин).

10. Реализация проекта ГИС "Черное море" // Геодезия и картография.-1997.- №6.- с.34-40 (соавторы Берлянт А.М., Мамаев В.О., Мусин О.Р., Аляутдинов А.Р., Калинкин И.В).

11. Особенности использования цифровых моделей рельефа при компьютерном геоэкологическом картографировании // Всероссийская научно-практическая конференция "Геоэкологическое картографирование", 24-27 февраля 1998 г., тезисы докладов, ч. I, с.114-116 (соавторы Симонов Ю.Г., Кружалин В.И., Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Переверзев М.В.).

12. Использование ГИС-технологий и цифровых моделей рельефа при решении геоэкологических задач // Экология и промышленность России, апрель 1998 г., с. 41-45 (соавторы Симонов Ю.Г., Кружалин В.И., Новаковский Б.А., Прасолов С.В.).

13. ГИС "Черное море", под ред. А.М. Берлянта, В.О. Мамаева, О.Р. Мусина, М.: Астрей, 1999, 59 с. (соавторы Аляутдинов А.Р., Берлянт А.М., Калинкин И.В. и др.).

14. Картографическое обеспечение решения экологических задач: морфометрические методы и геоинформационные технологии // Материалы межд. конф. Inercarto-5 "ГИС для устойчивого развития территорий", Россия, Якутск. 1999, с.142-150 (соавторы Кружалин В.И., Новаковский Б.А., Прасолов С.В.).

15. 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.

16. 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. (соавтор О.Р.Мусин).

17. Прогнозирование пространственно-временной динамики нарушенных экосистем методом универсального кригинга по аэрокосмическим снимкам // Доклады академии наук. Общая биология.-2000.-т.371.- №2.- с. 264-268 (соавторы Б.В. Виноградов, К.Н. Кулик, О.Р. Мусин, П.Б. Федотов) (переведена в журнале Doklady Biological Sciences.-2000.-Vol.371.-pp.147-151).

18. Прогнозирование пространственно-временной динамики экосистем методом универсального кригинга // Экология. - 2000. - №5. - с.323-332 (соавторы Б.В. Виноградов, К.Н. Кулик) (переведена в журнале Russian Journal of Ecology.-2000.-Vol.31.- No.5. - pp.293-302).

19. Оформление карт: Компьютерный дизайн: Учебник. Под ред. А.В.Востоковой. - М.: Аспект Пресс, 2002. - 208 с. (главы 3, 4.6, 10.7).

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