

УДК 51-74

Моделирование поверхности Фобоса¹

В. А. Садовничий, О. Р. Мусин, Б. А. Новаковский

Введение

Проблематика, связанная с дистанционными методами изучения Земли и планет, разработкой новых математических и технических подходов, всегда была приоритетной в Московском университете. В середине 80-х был организован междисциплинарный семинар (научный руководитель - В.А.Садовничий), на котором заслушивались и обсуждались доклады ведущих специалистов страны по этим вопросам. Основная идея семинара - привлечь ученых МГУ для решения актуальных задач космических исследований. Довольно быстро появились и практические результаты, выразившиеся как в договорах с ведущими космическими центрами страны, так и в новых фундаментальных научных работах участников семинара. Одной из важных тем, которой посвятили свои исследования участники семинара, была обработка космических снимков и применение результатов цифровой обработки для анализа состояния окружающей среды и природных ресурсов (см., например, [1], [2]). Остановимся более подробно на чрезвычайно важной и интересной работе из этой серии.

Один из докладов на семинаре в 1987 году был посвящен проекту "Фобос". На нем рассматривалась научная программа исследования межпланетными станциями "Фобос-1, -2" загадочного спутника Марса - Фобоса, а также исследования самого Марса, Солнца и межпланетной среды.

Рамки эксперимента предусматривали проведение двух видов съемок : обзорные съемки Фобоса с дальних расстояний с орбиты искусственного спутника Марса и съемки поверхности Фобоса с сантиметровым разрешением. Приоритетное значение на первом этапе

¹ В сб.: Избранные вопросы математики, механики и их приложений. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1999 г., с. 411-437.

имела навигационная задача по уточнению параметров орбиты Фобоса для обеспечения сближения с ним АМС. Одновременно предполагалось уточнить различные физические параметры Фобоса (масса, плотность, характеристики гравитационного поля и др.).

К приоритетным научным задачам эксперимента можно отнести исследование мелкомасштабной структуры поверхности Фобоса, основных форм рельефа (кратеров и борозд) и механизмов, формирующих его природу; топографическое, геологическое и морфометрическое картирование поверхности, проверка гипотез о происхождении Фобоса и некоторые другие. Важной вспомогательной задачей телевизионных съемок являлась пространственная привязка измерений других приборов.

Одновременно с исследованиями поверхности Фобоса в рамках эксперимента ставились задачи телевизионных съемок Марса для обеспечения подготовки будущих марсианских экспедиций и решения следующих научных задач: исследования рельефа, минералогического состава, облачности, динамики и запыленности атмосферы Марса и др.

Одной из важных проблем для успешного выполнения навигационной обработки и последующего телевизионного эксперимента была задача построения трехмерной цифровой модели поверхности Фобоса. Эта задача не требовала сложных технических средств и больших материальных затрат, и поэтому появилась идея построения компьютерной модели Фобоса силами участников семинара. Был организован исследовательский коллектив под руководством В.А. Садовничего в который вошли сотрудники МГУ: С.Н.Сербенюк, В.П.Белов, В.В.Комиссаров, О.Р.Мусин, и Б.А.Новаковский, а также сотрудники ИКИ АН СССР: И.Н.Сытенко и Д.А.Усиков. Цифровая модель поверхности Фобоса была построена после года напряженной работы всего коллектива.

При организации работ по программе "Фобос" задача построения модели поверхности Фобоса была поручена нескольким научным учреждениям СССР. Работа нашей группы была инициативной, и официально она не принимала участия в подготовке проекта. Однако, в 1988 году при приемке моделей, предоставленных Государственной Комиссии именно эта модель была признана наиболее точной и корректной, и стала в дальнейшем использоваться в проекте для решения навигационных и других задач.

По результатам этой работы была опубликована одна небольшая статья

(В. А. Садовничий и др., 1991) [3]. Кроме того, наши материалы частично вошли в монографию "Телевизионное исследование Фобоса"

[4], где описан весь комплекс работ по программе "Фобос".

Мы решили опубликовать здесь статью по моделированию поверхности Фобоса, так как значение проведенной работы выходит за рамки конкретного проекта. Разработанные в процессе ее выполнения методики и алгоритмы в дальнейшем нашли применение, как в научных исследованиях и приложениях [5], так и в учебной работе [6]. В частности, бывший сотрудник ИКИ АН СССР, инженер и программист И.Н.Сытенко на основе созданных методик разработал компьютерную систему по построению модели поверхности и огранки алмазов, которую он успешно внедряет на производстве.

Цифровые модели рельефа

Основой представления данных для геоинформационных систем и автоматизированной картографии являются цифровые модели. Под цифровой моделью какого-то геометрического (географического) объекта мы будем понимать определенную форму представления исходных данных и способ их структурного описания, позволяющий "вычислять" (восстанавливать) объект путем интерполяции, аппроксимации или экстраполяции.

Термин "цифровые модели" - это калька с английского "Digital Model". Интересно, что в болгарской научной литературе используется термин "численная модель", например, "численная модель рельефа", вместо нашего "цифровая модель рельефа" и английского "Digital Elevation Model". На наш взгляд, такой перевод удачно передает смысл, хотя и вызывает определенные ассоциации с некоторыми терминами прикладной математики: численный анализ, численные методы, численный эксперимент и т.д. Как бы то ни было, термин "цифровые модели" прочно утвердился в научном языке и русскоязычной научно-технической литературе и трудно, да в общем-то и нереально, от него отказаться. Отметим наиболее важные вопросы, относящиеся к ЦМ: источники для создания ЦМ; методы создания (моделирования) ЦМ; способ хранения ЦМ в базе данных; использование ЦМ, возможные запросы о ЦМ в системе; трансформация модели при изменении масштаба.

Для обозначения модели рельефа давно уже сложилась терминология, и такую модель называют *цифровой моделью рельефа*, и обозначают аббревиатурой - ЦМР, а по-английски - DEM (Digital Elevation Model). Не только рельеф, но и температура, осадки, геофизические поля, поллютанты и т.д., можно представлять как "рельеф" поверхности.

Основным картографическим средством моделирования геополей служат линии уровня (изолинии), отображающие их распространение. Данные для цифровых моделей рельефа получают путем натурных измерений, дистанционного зондирования, фотограмметрической (аналитической) обработки снимков, карто- и морфометрических измерений и т.д. В зависимости от формы представления исходных данных ЦМГ можно разбить на три группы: 1) с регулярным положением точек на прямоугольных, треугольных или гексагональных сетках; 2) с нерегулярным представлением по характерным точкам, центрам площадей, случайным сеткам и т.д.; 3) с полурегулярным заданием точек, расположенных равномерно на изолиниях, профилях и др.

Иногда способ представления данных исследователь может выбирать по своему желанию, например, когда используется снимок или карта. Но в ряде случаев он вынужден довольствоваться представленной ему сетью наблюдений (регистрации), например, в метеослужбе, органах статистического учета и т.п. В такой ситуации он не может упростить моделирование объекта на уровне представления данных и должен только надеяться на выбор подходящего способа структурного описания заданного рельефа.

При нерегулярном способе задания ЦМР возникает задача интерполяции (восстановления) ее поверхности, которая представляется как функция двух переменных $z = f(x, y)$, и пересчета в регулярный способ представления. Формально задача восстановления выглядит так: дан набор точек (x_i, y_i) и значения в них z_i ; требуется по этому набору построить функцию $z = f(x, y)$ такую, что $f(x_i, y_i) = z_i$.

В настоящее время известны десятки методов интерполяции поверхностей. С некоторыми из них, а также с методами использования ЦМР можно познакомиться по нашим публикациям в 1986-1991 гг. (см., например, [7], [8], [9]). Это интерполяции на основе триангуляции Делоне (в некоторых системах она называется по структуре двойственной этой триангуляции - диаграмма Вороного); кригинг; средне-взвешенная (среднегармоническая) интерполяция - метод Шепарда; полиномиальное и кусочно-полиномиальное сглаживание. Каждый из этих методов заслуживает отдельного обсуждения, и здесь мы ограничимся лишь краткими пояснениями.

Метод моделирования на основе триангуляции состоит в следующем. Строится разбиение области неперекрывающимися треугольниками (триангуляция), вершинами которой являются опорные точки. В каждом из треугольников поверхность представляется либо линейной функцией (полиэдральная модель), либо полиномиальной поверхностью, коэффициенты которой определяются по значениям и част-

ным производным в вершинах треугольника (частные производные находятся численно). Повышая степень полиномов, можно добиться заданной степени гладкости кусочно-полиномиальной поверхности. В подавляющем большинстве случаев используется т.н. триангуляция Делоне, названная в честь известного советского математика Б.Н.Делоне (1890-1980).

Метод кригинга назван по фамилии южно-африканского геолога D.G.Krige, который применял его для определения запасов золота в россыпях. Иногда неправильно называют этот метод крайгингом (как бы сохраняя английское произношение слова *kriging*). Фамилия Krige произносится и по-русски, и по-английски как Криге, и соответственно метод (и по-английски тоже) произносится как кригинг. В этой модели считается, что функция $f(x, y)$ является стационарной случайной функцией, т.е. измерение z в точке $p = (x, y)$ есть реализация случайной переменной Z . Из условия того, что модель задает минимум дисперсии выписываются т.н. уравнения кригинга. Это уравнение представляет собой систему линейных уравнений, численное решение которой позволяет вычислить значение функции в заданной точке. У этого метода два важнейших параметра: тип вариограммы (вид корреляционной зависимости) и радиус влияния вариационной функции, т.е. максимальный радиус взаимовлияния соответствующих процессов, происходящих в разных точках. Некоторые известные методы интерполяции такие, как мультиквадрики, аналитические сплайны и др. являются реализацией модели кригинга для соответствующих типов вариограмм.

Метод средневзвешенной интерполяции восходит к великому математику

К.Ф.Гауссу (он его придумал в начале XIX века для нужд геодезии), однако в западной литературе его связывают с именем Шепарда. В простейшем варианте этого метода:

$$f(x, y) = (w_1 z_1 + w_2 z_2 + \dots + w_n z_n) / (w_1 + w_2 + \dots + w_n)$$

, где $w_i = 1/r_i$, $r_i(x, y)$ - функция расстояния или другая функция, убывающая с ростом расстояния. Этот метод достаточно прост для реализации, однако, можно показать, что частные производные в опорных точках равны нулю. Это означает, что производные у истинной и модельной поверхности могут сильно различаться. Последнее обстоятельство заставляет прибегнуть к обобщению данного метода. При этом берется взвешенная сумма не показателей z_i , а локальных полиномов, коэффициенты которых определяются методом наименьших

квадратов по значениям z , ближайшим к i -ой опорной точке. Таким образом, интерполируются не только значения функции, но и ее частные производные.

Метод полиномиального (здесь используются как простые, так и тригонометрические полиномы) и кусочно-полиномиального сглаживания применяется в случае, когда данные сильно "за шумлены" или когда требуется выделить наиболее существенную компоненту пространственного распределения показателя. Нам известны несколько замечательных примеров того, как при экологической оценке территории только после построения трендовых поверхностей удавалось "ухватить" и проанализировать пространственное распространение загрязнителей. В математической статистике этот подход называется тренд-анализом. Коэффициенты полиномиального тренда обычно вычисляются по исходным данным методом наименьших квадратов (МНК). В методе кусочно-полиномиального сглаживания фиксируется степень полинома и выбирается область моделирования, содержащая все опорные точки. Далее, эта область разбивается на систему более мелких участков. Для каждого участка по ближайшим к нему точкам с помощью МНК строятся локальные полиномы, и функция $f(x, y)$ на всей области конструируется из них с помощью специального вида "склейки".

Коротко коснемся очень важной задачи - восстановления поверхности по изолиниям. Мы называли этот способ задания полурегулярным. Возможно, это покажется странным, но из нашего опыта следует, что это наиболее часто встречающаяся практическая задача при создании ЦМР. Это связано и с реалиями нашей российской действительности (на рынке нет ЦМР на территорию России средних и крупных масштабов), и с тем, что зачастую из-за недостатка данных приходится редактировать вручную изолинейные карты экспертам в данной области. Оцифрованные изолинии практически невозможно использовать при решении конкретных задач, таких как построение трехмерных изображений, вычислений углов наклона, объемов, зон видимости и т.д., и т.п.

Таким образом, возникает задача восстановления поверхности, заданной набором ее изолиний, и пересчета значений показателя в узлы регулярной сетки. (Над решением этой задачи в 70-е и 80-е годы были мощные коллективы разработчиков в военно-топографических службах США и других стран Запада. Проводилась такая работа и в СССР. Актуальность этой задачи была связана с тем, что т.н. крылатые ракеты "летают по рельефу" и поэтому на их борту должна быть цифровая запись рельефа того коридора, по которому нацелены

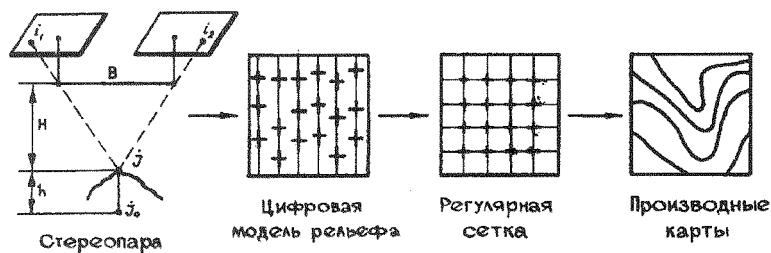


Рис. 1: Схема автоматизированного получения производных карт рельефа по аэрофотоснимкам.

эти ракеты.)

На наш взгляд для решения этой задачи самым эффективным является т.н. "волновой" алгоритм. Каждая точка (узел сетки) области находится между двумя изолиниями. Если известны оба расстояния до изолиний, то значение в этой точке можно вычислить как средневзвешенное значений показателя на изолиниях, где веса обратно пропорциональны расстояниям до изолиний. Для вычисления расстояний до изолиний и используется волновой алгоритм. Для этого от изолиний выпускается "волна" и таким образом в узлах, находящихся на фронте волны от заданной изолинии вычисляется расстояние до изолинии. Это очень приблизительное описание алгоритма, т.к. его подробное описание займет слишком много места. Этот алгоритм был реализован в пакете программ "МАГ" разработанный на кафедре картографии и геоинформатики МГУ в 1986 - 1992 гг. [9].

Среди методов сбора исходной информации для создания и использования цифровых моделей рельефа земной поверхности выделяется дистанционное зондирование, например, аэрофотосъемочное. Современные фотограмметрические (аналитические) принципы получения исходных цифровых данных основаны на стереоизмерениях с применением соответствующей аналоговой техники или аналитических технологий, автоматизированной регистрации исходных количественных данных, извлекаемых из метрических аэрофотоснимков земной поверхности, использовании необходимого математического аппарата и ЭВМ. Общая схема построения цифровой модели рельефа, а также автоматизированного составления карт углов наклона, экспозиции склонов и других производных карт представлена на рис. 1.

В настоящее время проявляется повышенный научный и практиче-

ский интерес, включая и сферу природных исследований, к разработке эффективных аналитических подходов к извлечению из материалов дистанционного зондирования количественных данных для формирования цифровых моделей и автоматизированной их картографической, морфометрической, геоэкологической и других прикладных интерпретаций. Так, например, наряду с классическими подходами известны теоретические и прикладные разработки по определению углов наклона рельефа местности на основе цифровых моделей и использования ЭВМ. Однако, по нашему мнению, вопросы автоматизированного картографического отображения результатов аналитических определений по цифровым моделям углов наклона и экспозиции склонов земной поверхности разработаны недостаточно, а для многих направлений прикладного использования продолжают оставаться нерешенными.

Цифровые модели рельефа - основа автоматизированного создания его производных карт. Разработка производных карт рельефа - весьма важная задача. Это, в первую очередь, относится к картам углов наклона и экспозиции склонов, отражающим одну из основных морфометрических характеристик рельефа. Изучение этих характеристик позволяет выявить и уточнить проявление таких природных динамических процессов и явлений, как снежные лавины, сели, оползни, камнепады, развитие различных форм эрозии. Автоматизированное составление карт углов наклона представляет широкие возможности их использования в географических исследованиях, при планировании, проектировании и в других целях. В сельском хозяйстве такие карты используют при планировании севооборотов и очередности проведения сельскохозяйственных работ, землеустройстве, особенно на вновь осваиваемых массивах сельскохозяйственных земель, определении условий снегонакопления на полях, оценке развития овражной эрозии. Параметры углов наклона учитывают при разработке новых моделей сельскохозяйственной и транспортной техники, проектировании трасс железных и автомобильных дорог, трубопроводов, строительстве промышленных и бытовых зданий, разработке гидромелиоративных систем. При съемке шельфа возникает также необходимость определения углов наклона дна для выбора расстояния между съемочными галсами и высоты сечения рельефа дна, для определения скорости изменения глубин. Зная экспозиции склонов, можно уточнять графики проведения сельскохозяйственных работ, определять сроки готовности сельскохозяйственных земель к проведению агромероприятий, оценивать влияние различных погодных условий на рост и созревание растений, состояние лугов и пастбищ. Велико

значение этих карт для дорожной службы, где по ним можно прогнозировать возникновение снежных заносов и других неблагоприятных явлений, затрудняющих работу автомобильного и железнодорожного транспорта, сделать расчеты расхода топлива по отдельным участкам трасс и т.п.

Важным вопросом является выбор метода автоматизированного картографического представления углов наклона и экспозиции склонов. Один из них - способ изолиний, который можно реализовать с помощью графопостроителя. Однако картосхемы, построенные способом изолиний, трудно назвать легко читаемыми. При обстоятельном математическом обеспечении автоматизированного построения изолиний углов наклона и экспозиции склонов основной недостаток картографических отображений такого типа заключается в довольно запутанной структуре изолиний и обилии мелких малозначительных форм. Иной прием заключается в отображении углов наклона и экспозиции склонов штрихами крутизны. При этом методе остаются неразличимыми противоположные экспозиции (например, северная и южная).

Очевидно, что для геоморфологических (геометрических) целей наиболее приемлем традиционный картографический подход, суть которого заключается в выделении и соответствующей окраске площадей с дискретно выбранными и равными значениями отображаемых показателей (углов наклона, экспозиции склонов и т.п.). Наша цель состояла в разработке методики, математического обеспечения и создании соответствующего пакета программ автоматизации традиционного картографического подхода. Решение этой задачи тесно связано с использованием современных технических средств. Широкие возможности автоматизированного получения таких карт предоставляют автоматизированные картографические системы.

Процесс автоматизированного получения карт углов наклона и экспозиции склонов по цифровой модели рельефа, исходные данные которой извлечены из аэрофотоснимков по сети профилей постоянно и переменного шага со значениями отметок высот в характерных точках (см. рис.2), разделяется на несколько этапов. Первоначально профильная сеть отметок высот аналитически проводится к узлам регулярной сетки, для которой рассчитываются значения углов наклона и экспозиции склонов. По стандартной программе автоматического построения изолиний по этим показателям строятся изолинии. Операции генерализации и послойной окраски проводятся в интерактивном режиме с использованием цветного графического дисплея. В результате вызываются программы построения легенды и размеще-

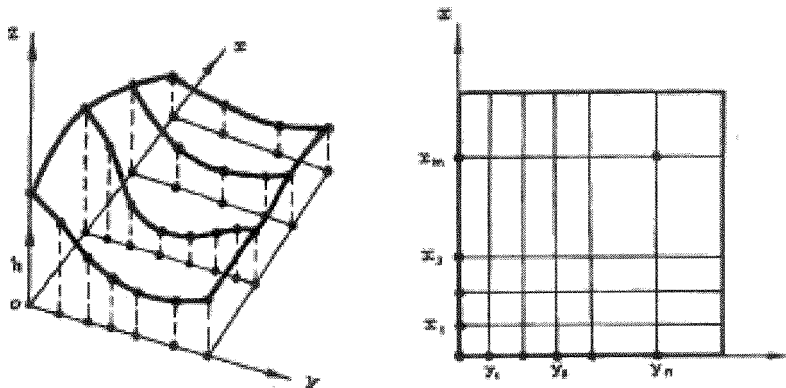


Рис. 2: Профильный принцип извлечения исходных цифровых данных.

ния надписей. Итоговая карта выводится на цветное струйное печатающее устройство.

Целесообразно остановиться на методическом и теоретическом обоснованиях отдельных этапов. Наличие в качестве промежуточного звена преобразования профильных исходных данных в регулярную сетку обусловлено тем, что подавляющее большинство алгоритмов и программ ориентировано на такой способ задания исходных данных. В противном случае математический аппарат будет тесно связан с данной цифровой моделью и неприемлем для других.

В различных областях науки и техники хорошо известен математический аппарат интерполирования, основанный на кубических сплайнах. Этот аппарат также может быть использован для вычисления высот точек земной поверхности по исходным дискретным цифровым значениям. Для описания алгоритма требуется формализовать задачу. Рельеф земной поверхности представляется некоторой функцией следующего общего вида:

$$h = z = f(x, y)$$

Профили разрезов, вдоль которых расположены исходные точки, - это линии пересечения поверхности параллельными плоскостями и ортогональными плоскости oxy (рис. 2а). Следы сечения этих плоскостей с плоскостью oxy будут называться линиями разрезов. По ис-

ходным дискретным точкам требуется рассчитать высоты земной поверхности в узлах регулярной сетки, заданной двумя семействами параллельных прямых (рис. 26). В простейшем случае они могут быть описаны уравнениями

$$y = x_i (i = 1, 2, 3, \dots, n); \quad x = y_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$$

Кратко остановимся на сущности алгоритма. Первоначально вычисляются параметры сплайн-функций, аппроксимирующих каждый исходный профиль. Затем находятся точки пересечения линий регулярной сетки с линиями разрезов и по построенным сплайнам вычисляются значения высот h в точках пересечения. Далее, по вычисленным значениям высот h для точек пересечения каждой линии регулярной сети строится сплайн-функция, аппроксимирующая профиль разреза вдоль этой линии. Наконец, определяются значения построенной сплайн-функции для каждого узла соответствующей линии регулярной сетки. Таким образом, выполняется интерполирование высот поверхности в узлах регулярной сетки на данную область картографирования.

Угол наклона α элементарного участка земной поверхности с координатами x, y может быть определен по следующей формуле :

$$\alpha = \arctg \sqrt{\left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)^2}$$

где $\frac{\partial f}{\partial x}$ и $\frac{\partial f}{\partial y}$ - частные производные функции $h = f(x, y)$.

Экспозиция склона определяется углом между векторами

$$\left(-\frac{\partial f(x, y)}{\partial x}; -\frac{\partial f(x, y)}{\partial y}\right)$$

В рассматриваемом случае поверхность $h = f(x, y)$ задана дискретно в узлах регулярной сетки. Поэтому при вычислении частных производных необходимо использовать численные методы. Для этой цели имеется ряд способов. В данном случае использовался один из наиболее распространенных. Пронумеруем узлы сетки индексами i и j ($i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$). Узел (i, j) лежит на пересечении прямых $y = x_i$ и $x = y_j$. Если высоту поверхности в узле (i, j) обозначить через z_{ij} , то частные производные могут быть вычислены по формулам

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{z_{i+1,j} - z_{i-1,j}}{x_{i+1} - x_{i-1}}, \quad \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{z_{i,j+1} - z_{i,j-1}}{y_{j+1} - y_{j-1}}$$

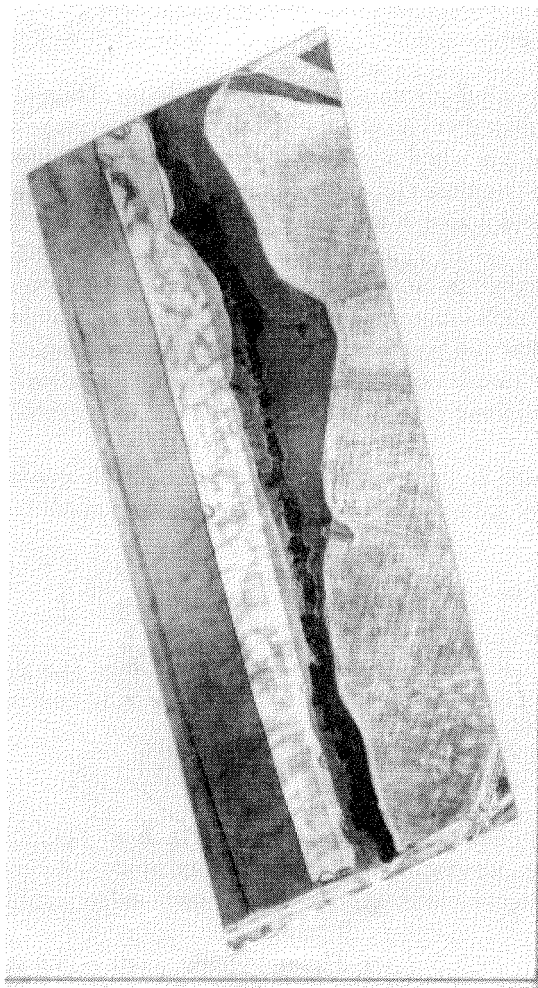


Рис. 3: Фрагмент аэрофотоизображения участка Земной поверхности.

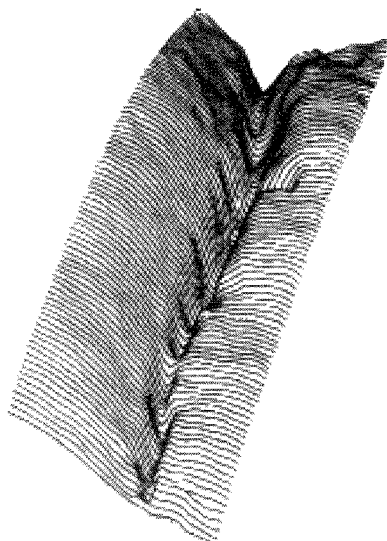


Рис. 4: Перспективная блок-диаграмма

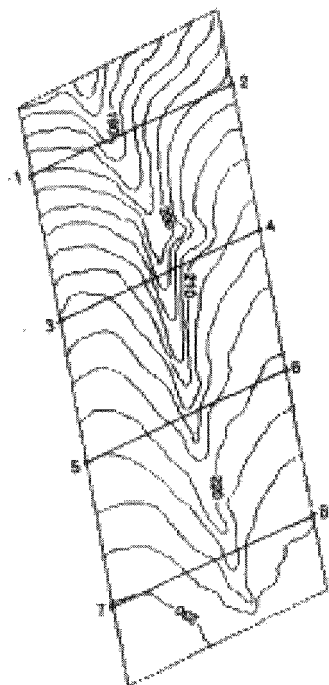


Рис. 5: Изолинии рельефа

Некоторые результаты автоматизированной картографической интерпретации цифровой модели рельефа, полученной по стереопаре крупномасштабных аэрофотоснимков отдельного участка (оврага) земной поверхности (см. рис. 3) приведены на рис. 4, 5, 6 и 7.

В заключение отметим, что имеется альтернативный подход к моделированию поверхности. Это, так называемые, аналитические модели поверхности. При этом подходе, поверхность аппроксимируется аналитическими функциями и по исходным данным вычисляются первые n коэффициентов. Этот подход практически не применяется в современных системах геометрического моделирования из-за медленной сходимости и трудоемкости вычислений. Вместе с тем, одна из моделей поверхности Фобоса, созданная американским исследова-

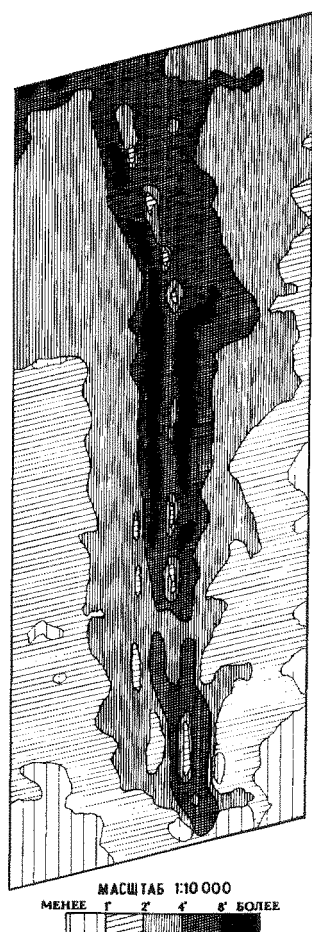


Рис. 6: Штриховой вариант производной карты рельефа (углы наклона), полученный автоматизированным путем по аэрофотоснимкам.

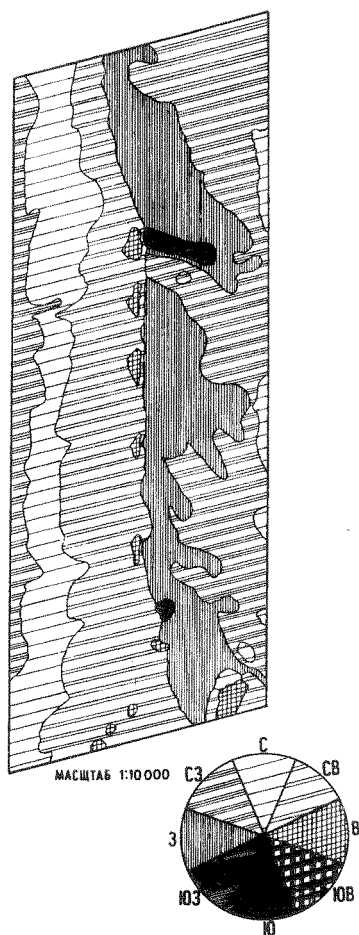


Рис. 7: Штриховой вариант производной карты рельефа (экспозиция склона), полученный автоматизированным путем по аэрофотоснимкам.

телем Т.Даксбери [4], основана на разложении поверхности Фобоса по сферическим функциям до 8-го порядка включительно. Однако, построенная им модель, судя по приведенным изображениям, выглядит "искусственной" и сильно уступает по точности нашей модели. (Это подтвердила и Государственная Комиссия, сделав выбор в нашу пользу.)

Построение цифровой модели поверхности Фобоса

Марсианский спутник Фобос - это малое планетное тело своеобразной формы, размеры которого составляют около 30x20x20 км. Фобос имеет очень темную неровную поверхность, изрытую многочисленными кратерами ударного происхождения. Отражательная способность поверхности около 5

Сенсацией экспедиции Викинг стали невиданные ранее ни на Земле, ни на других хорошо изученных телах Солнечной системы глобальные линейные структуры (борозды), покрывающие обширные области на его поверхности. Ширина почти прямых и идущих примерно параллельно борозд составляет 200-300 м, глубина 20-30 м. Борозды прослеживаются на расстоянии до 5 км. Почти все они начинаются у самого крупного кратера Стикни со средним диаметром 10 км. По одной гипотезе происхождение борозд связывается с образованием кратера Стикни в результате столкновения Фобоса с гигантским метеоритом. На поверхности Фобоса они образованы материалом, сдвинутым или даже сорванным с него в результате мощного толчка от удара или при столкновении спутника с различными по происхождению обломками околomarсианской орбиты.

Задача создания цифровой модели поверхности Фобоса возникла в связи с потребностями оперативного управления космическими аппаратами при выполнении завершающей части навигационной и исследовательской программ в рамках международного многоцелевого проекта Фобос (1988-1989). Ориентация и безопасность сближения космических аппаратов Фобос-1, -2 с одноименным спутником Марса, привязка полученных в ходе космической съемки данных, принятие решений при выборе мест посадки спускаемых аппаратов и другие операции значительно облегчаются при использовании объемной цифровой модели спутника. Для получения необходимой навигационной информации на Земле предусмотрено программное вращение цифровой модели до тех пор, пока она не совпадет с переданным из космоса изображением поверхности Фобоса.

Космическим аппаратом Фобос-2 были переданы на Землю три серии изображений Фобоса : 21 февраля - 10, 28 февраля - 14, 25 марта

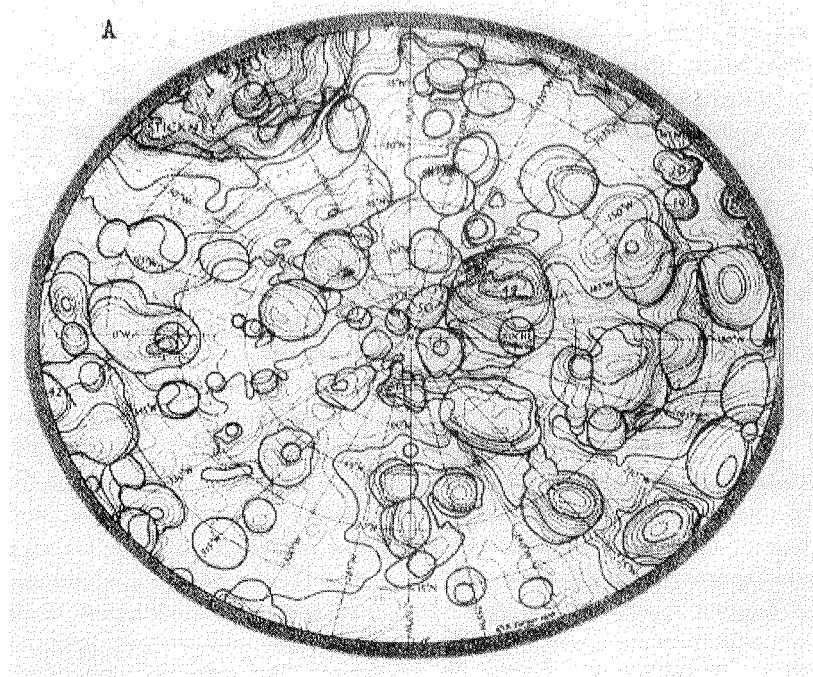


Рис. 8: Исходные топографические карты поверхности Фобоса: Северное полушарие.

- 15 шт. Первая серия получена при подлете к Марсу примерно на 900 км, а две другие серии получены с двух квазисинхронных орбит с расстояния около 400 и 200 км соответственно. По ним уточнялись взаимное расположение и ориентация космического аппарата и Фобоса. Далее предполагалось сближение космического аппарата с Фобосом до 50 м, причем на расстоянии около 1 км должен был включиться радиовысотомер. Таким образом, требования к точности при создании цифровой модели поверхности Фобоса составляли примерно 500 м.

Остановимся на некоторых принципах создания цифровой модели поверхности Фобоса. В данной цифровой модели использовалась изолинейная форма представления исходных данных. За основу взяты топографические карты Северного и Южного полушарий, поверхности Фобоса с сечением горизонталей 100 м (рис. 8, 9), составленные Р.Тернером в им же разработанной проекции. Предварительно по ре-

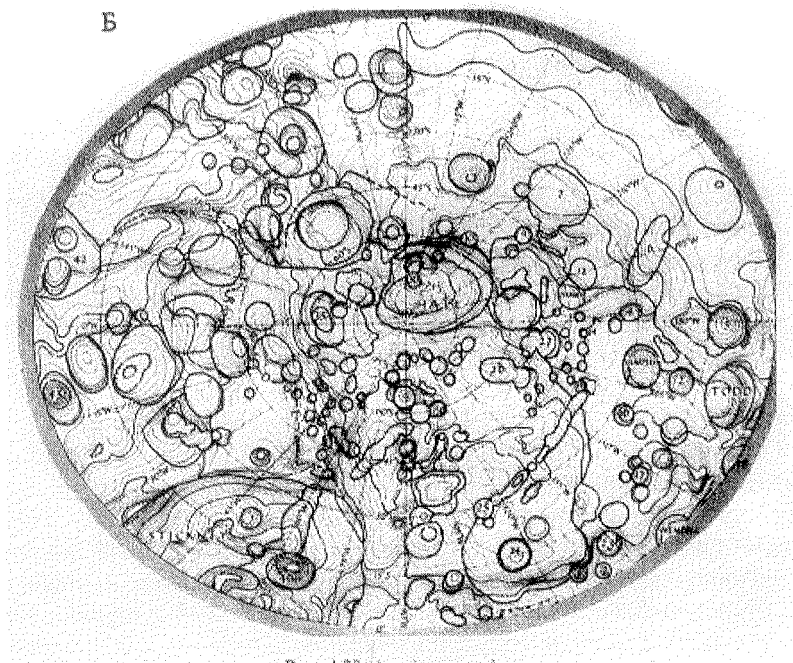


Рис. 9: Исходные топографические карты поверхности Фобоса: Южное полушарие.

результатам обработки 25 изображений Маринер-9 Р.Тернер создал физическую модель (пластик) Фобоса в масштабе 1 : 60 000. Горизонталы топографических карт получены по результатам измерений этой физической модели.

Приведем основные формулы проекции Р.Тернера. Был взят трехосный эллипсоид с полуосями $a=13,5$ км, $b=10,7$ км, $c=9,6$ км. Пусть ϕ и λ - широта и долгота точки на эллипсоиде. Тогда координаты этой точки в проекции карты определяются формулами

$$x = \mu R \sin \lambda, \quad y = -\mu R \cos \lambda,$$

где

$$R = \left(\frac{\cos^2 \lambda}{A^2} + \frac{\sin^2 \lambda}{B^2} \right)^{-1/2}; \quad A = B \frac{a}{b}$$

$$B = \sqrt{(c - \rho \sin \phi)^2 + \left(\frac{b}{a} \rho \cos \phi\right)^2}$$

$$\rho = \left(\frac{\sin^2 \phi}{c^2} + \frac{\cos^2 \phi}{a^2}\right)^{-1/2}$$

μ - масштаб карты.

Цифровая модель представляет собой набор точек на поверхности Фобоса с координатами (ϕ_i, λ_i, R_i) , где ϕ_i, λ_i - широта и долгота i -й точки, а R_i - расстояние от центра эллипсоида до поверхности Фобоса. Это расстояние может быть представлено в виде $R(\phi_i, \lambda_i) = r(\phi_i, \lambda_i) + h(\phi_i, \lambda_i)$, где $r(\phi_i, \lambda_i)$ - радиус-вектор точек на эллипсоиде с координатами (ϕ_i, λ_i) ; $h(\phi_i, \lambda_i)$ - отклонение Фобоса от эллипсоида.

Естественно, что плотность точек цифровой модели должна быть достаточно равномерной. Для этого на сфере выбиралась сеть $N - 1$ параллелей, равноотстоящих друг от друга, и на каждой k -й параллели выбиралось L_k точек. Количество точек на каждой параллели должно быть примерно пропорционально ее длине. В этих целях использовалась зависимость $L_k = 2N \sin(\pi \cdot k/N)$, где $k = 1, \dots, N - 1$, а долгота l -й точки на k -й параллели определялась по формуле $\lambda_k l = 2\pi l / L_k$. Для разработанной нами цифровой модели поверхности Фобоса, переданной в ИКИ АН СССР, общее количество точек модели составило 50833 при $N=200$.

Так как на исходных топографических картах Р.Тернера горизонты показывают уклонение поверхности Фобоса от эллипсоида, то величины $h(\phi_i, \lambda_i)$ определялись путем цифрования этих горизонталей. Использовалась сетка квадратов размером 128x128 ячеек. В каждом узле сетки определялись значения h . Величины h для точки, лежащей внутри ячейки, вычислялись как средневзвешенное значений в узлах ячейки. Эти данные вводились в память ЭВМ.

Дальнейшее уточнение цифровой модели по изображениям Викинг-1, -2, выполнено в ИКИ АН СССР. Для этого был составлен обширный пакет программ; работа проводилась в интерактивном режиме. По известным параметрам съемочной системы Викинг (точка съемки, углы наклона, освещенность и др.) и цифровой модели Фобоса на заданный участок создавалось синтезированное изображение в том масштабе, что и исходное Викинг. Проводилось визуальное сравнение, и по его результатам цифровая модель поверхности Фобоса изменялась (наносились кратеры, борозды и др.). Последовательность операций по уточнению цифровой модели приведена на рис. 10.

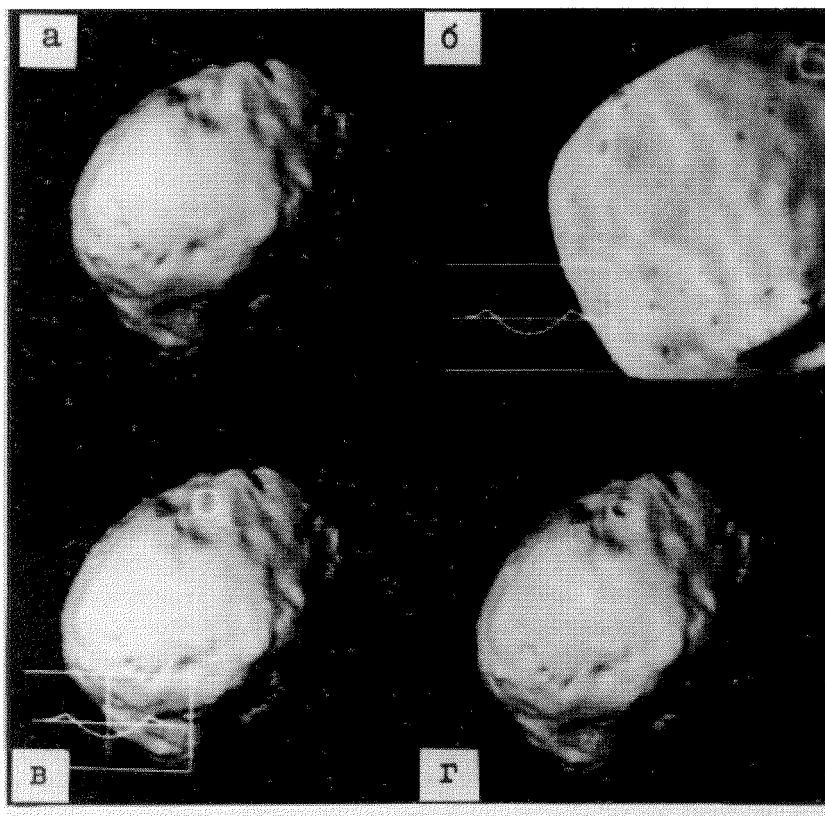


Рис. 10: Последовательность операций по уточнению цифровой модели: а – изображение цифровой модели; б – кратер, локализованный на изображении Фобоса; в – локализация этого кратера на цифровой модели; г – изображение уточненной модели.

Картографирование поверхности Фобоса

Кратко остановимся на некоторых аспектах решения этой проблемы. Современная техника растровой графики позволяет на основе цифровых моделей рельефа создавать синтезированные изображения, напоминающие традиционные. В растровых графических системах каждый элемент раstra представлен в памяти ЭВМ индивидуально, что позволяет использовать его в качестве исходного "кирпичика" при построении изображения. В данном случае синтез картографического изображения можно сравнить с художественной мозаикой, но в отличие от нее картографическому придается метричность. Синтезированные "изображения сохраняя черты традиционных, в то же время могут дополняться тематической и специальной нагрузкой, что приводит к получению синтезированных "фотокарт".

С появлением автоматизированных картографических систем наряду с традиционным представлением рельефа на картах горизонталями (изолиниями) стало широко применяться его отображение посредством пространственных блок-диаграмм. Несомненное достоинство блок-диаграмм в их наглядности. Однако такое отображение рельефа лишено важнейшего достоинства традиционной фотокарты - метричности. Синтезированные "фотокарты с одной стороны, обладают достоинствами блок-диаграмм, а с другой - они метричны. По нашему мнению, в этом - возможности и перспективы их использования при решении прикладных задач. Основа метричности заложена собственно цифровой моделью рельефа, ее строгой аналитико-математической формализацией. В традиционной картографии хорошо известен метод отмывки рельефа. Он придает большую наглядность отображения рельефа на картах. Однако этот метод чрезвычайно трудоемок и требует исполнителей высокой квалификации. В то же время известно, что идеальной "отмывкой рельефа" является фотоизображение местности при косом солнечном освещении. Решить эту задачу автоматизированным путем позволяют именно цифровые модели рельефа.

Во введении отмечалось, что именно работа междисциплинарного семинара (научный руководитель - В.А.Садовничий) привела к новым фундаментальным разработкам в области аналитико-цифровой обработки и интерпретации материалов орбитального дистанционного зондирования. Раскроем это на примере получения космических "фотоизображений" и "фотокарт синтезированным по цифровым моделям рельефа. Более того, заметим, что именно эти исследования и разработки предопределили становление и развитие в Московском

Университете и в России нового направления в картографии - создание и использование пространственных электронных карт земной поверхности, общепризнанного в настоящее время во всем мире. На экране монитора создается пространственный картографический образ желаемого как топографического, так и тематического, и другого специального содержания. Кроме того, эти научные разработки и практические подходы, их реализация по космическим фотоснимкам, позволили нетрадиционно подойти к решению проблемы картографирования поверхности Фобоса.

Остановимся на некоторых физических и математических аспектах автоматизированного получения синтезированных космических "фотоизображений основной составной части синтезированных космических "фотокарт". Известно, что интенсивность прямой солнечной освещенности E_s у поверхности Земли зависит от высоты Солнца над горизонтом - его зенитного расстояния Z_\odot , а также от коэффициента прозрачности земной атмосферы P . Эти показатели сведены в формулу $E_s = E_0 \cdot P^{\sec Z_\odot} \cdot \cos Z_\odot$, где E_0 - интенсивность источника (Солнца) на границе атмосферы.

При аналитической "отмычке" рельефа по его цифровой модели коэффициент $P^{\sec Z_\odot}$ теряет свой первоначальный смысл, и его можно опустить. В этом случае "освещенность" $E_{i,j}$ для каждого узла регулярной сетки с координатами i, j может быть определена следующим образом: $E_{i,j} \equiv c \cdot \cos Z_{\odot i,j}$, где c - постоянная, $Z_{\odot i,j}$ - угол между векторами нормали \bar{N} к земной поверхности в точке с координатами i, j и вектором направления \bar{L} на источнике света (Солнце). Вектор нормали \bar{N} в узле (i, j) можно определить по следующей приближенной формуле :

$$\bar{N} = \left(\frac{h_{i-1,j} - h_{i+1,j}}{2l}; \quad \frac{h_{i,j-1} - h_{i,j+1}}{2l}; \quad 1 \right)$$

, где $h_{i,j}$ - значение высоты рельефа в узле, l - сторона элементарной ячейки регулярной сетки. Величина "освещенности" в данном узле равна

$$E_{i,j} = c \cdot \frac{\bar{N} \cdot \bar{L}}{|\bar{N}| \cdot |\bar{L}|}$$

, где моделирующая функция $E_{i,j}$ может принимать значения от $-c$ до $+c$.

Для реализации модели и вывода изображений монитор автоматизированной картографической системы проводилась нормировка величин $E_{i,j}$. Необходимость нормировки вычисленных значений $E_{i,j}$



Рис. 11: Фрагмент космического ортофотоизображения на район Памиро-Алая.

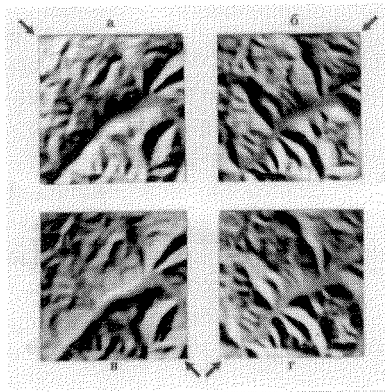


Рис. 12: Синтезированные космические "фотоизображения" для четырех случаев расположения источника света.

состоит в том, что заложенный в систему принцип создания изображений требует кодировки интенсивности света (или оттенка цвета) элемента изображения целой величиной, принимающей значение от 0 до 255.

В эксперименте исходные цифровые данные были перечислены в регулярную сетку. Исходные данные были получены в результате аналоговой стереофотограмметрической обработке стереопары космических фотоснимков МКФ-6 ("Союз-22") на район Памиро-Алтая. Этим же путем получено ортофотоизображение (космическое фотоизображение, исправленное из-за геометрических факторов перехода от центральной проекции к ортогональной, нарушения ориентации орбитального носителя фотосъемочной аппаратуры, рельефа земной поверхности), фрагмент которого приведен на рис. 11.

Согласно описанному выше принципу, построены синтезированные космические "фотоизображения" для четырех случаев расположения источника света : на северо-западе, северо-востоке, юго-востоке и юго-западе (рис. 12, соответственно *а*, *б*, *в*, *г*) при зенитном расстоянии источника $Z = 60^\circ$. Для повышения наглядности эти синтезированные изображения увеличивались в 8 раз совместно со сглаживанием по программе, реализованной в автоматизированной картографической системе аппаратно.

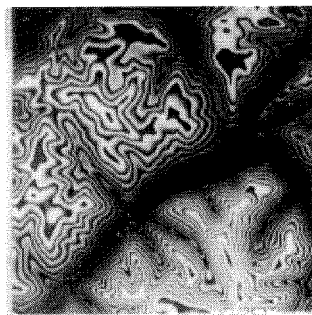


Рис. 13: Синтезированное гипсометрическое изображение на район Памиро-Алая.

На рис. 13 представлено синтезированное гипсометрическое изображение, полученное по цифровой модели рельефа путем замены высотных отметок уровнями интенсивности света (оттенков цвета) от 0 до 255. Аппаратно встроенные в автоматизированной картографической системе программы позволяют автоматически получать изолинии и пространственные блок-диаграммы (рис. 14). Некоторая обобщенность рисунка изолиний пространственных блок-диаграмм объясняется недостаточной детальностью исходных цифровых данных в рельефе (размер элемента изображения на местности соответствует 727x727 м).

Согласно этой методике получена серия черно-белых и цветных синтезированных изображений Южного полушария поверхности Фобоса для различных случаев расположения источника света и его зенитного расстояния. Они, в частности, использовались для уточнения исходных цифровых данных, исключения грубых ошибок цифрования. Также получено цветное гипсометрическое изображение поверхности Фобоса в Южном полушарии с изолиниями рельефа и послойной окраской. На наш взгляд, изображения, синтезированные по цифровым моделям, могут быть весьма полезны при автоматизированном составлении нового вида производных карт рельефа - морфометрических фотокарт. Серия различных синтезированных по цифровой модели изображений Юго-Западного полушария поверхности Фобоса приведена на рис. 15, а для Восточного полушария - на рис. 16.

Важный картографический итог использования цифровой модели - автоматизированное картографическое представление углов наклона и экспозиции склонов поверхности Фобоса. Его суть применительно

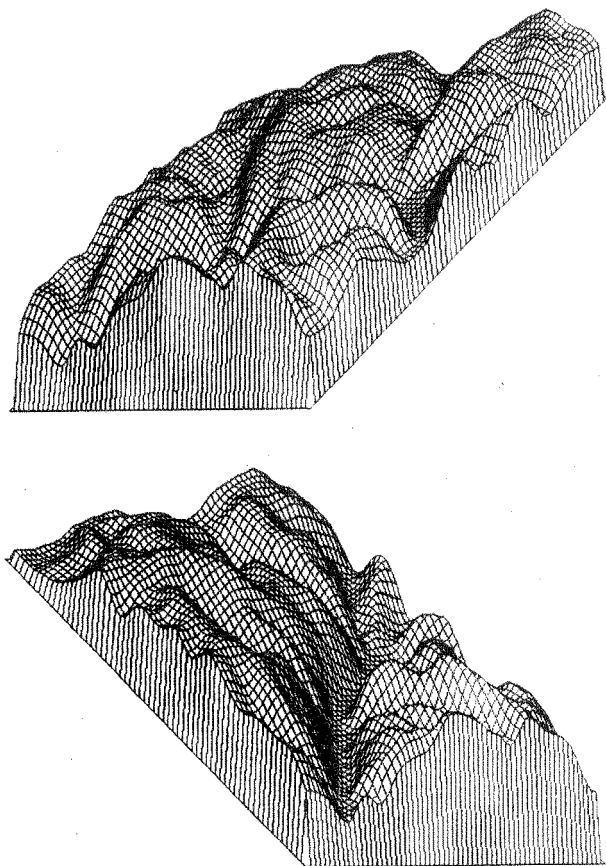


Рис. 14: Блок-диаграммы.

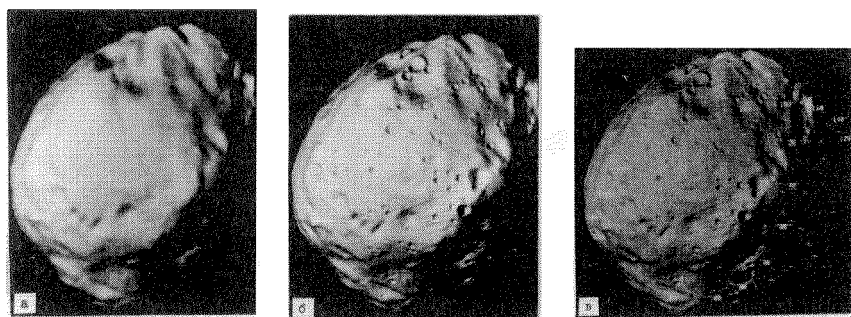


Рис. 15: Синтезированные изображения Юго-Западного полушария поверхности Фобоса: а – изображение цифровой модели, полученной по картам; б – изображение уточненной цифровой модели (нанесены кратеры и борозды); в – то же с координатной сеткой.

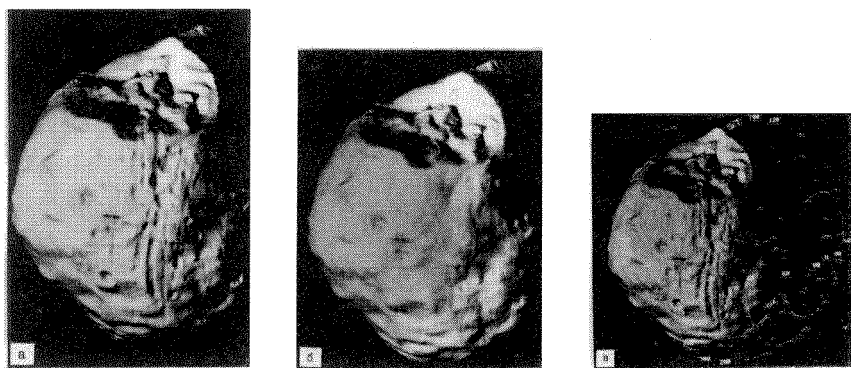


Рис. 16: Синтезированные изображения Восточного полушария поверхности Фобоса: а – изображение цифровой модели, полученной по картам; б – изображение уточненной цифровой модели (нанесены кратеры и борозды); в – то же с координатной сеткой.

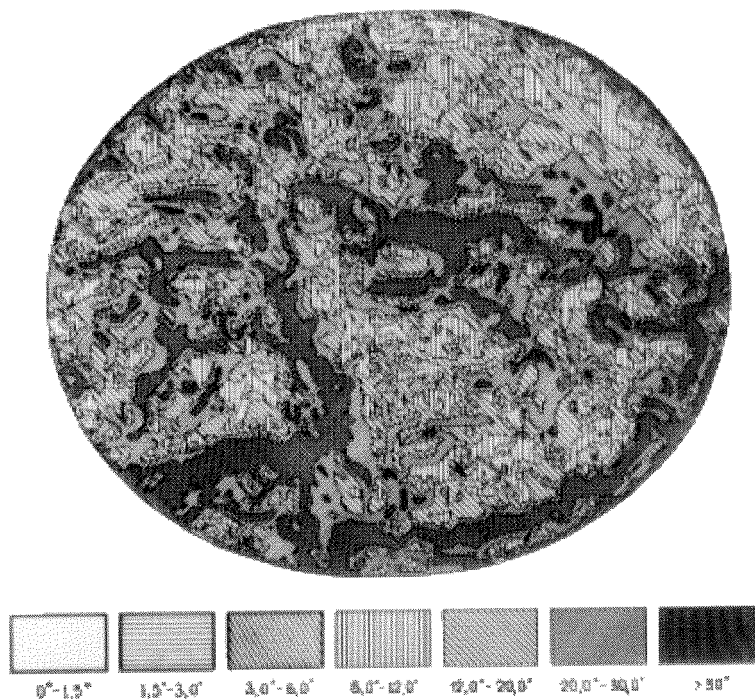


Рис. 17: Карта углов наклона поверхности в Южном полушарии (штриховая копия цветного компьютерного варианта).

- к крупномасштабным аэрофотоснимкам земной поверхности приведена выше. Штриховые образцы карт углов наклона и экспозиции склонов для Южного полушария представлены на рис. 17, 18. Заметим, что для Фобоса такие карты получены впервые.

Заключение

Данная методика цифрового моделирования поверхности Фобоса с использованием технических средств автоматизированной картографической системы и ее результаты имеют более общее теоретическое и практическое значение. Так, для картографии большой интерес представляют геополы: реальные - рельеф земной поверхности (поверхность Фобоса) или абстрактные - показатели загрязнения и т.п. - на

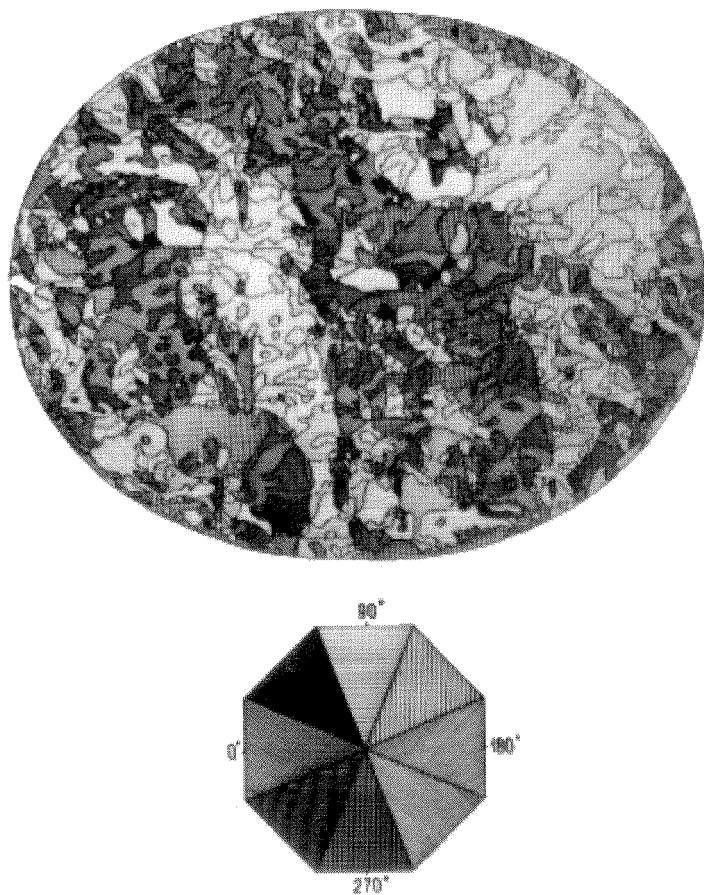


Рис. 18: Карта экспозиции (ориентации) склонов Южного полушария (штриховая копия цветного компьютерного варианта).

языке функций, для которых независимыми переменными являются пространственные координаты, а в качестве зависимых переменных служат исследуемые качественные показатели. Эффективность анализа геополей во многом зависит от методов их моделирования с применением современных ЭВМ и средств автоматизации. Предпосылкой автоматизации карто- и морфометрических работ служит преобразование картографических или дистанционных изображений в цифровую форму. Далее строится цифровая модель в вычислительной системе путем ее формализованного структурного описания - алгоритмического или эвристического. При таком подходе появляются широкие возможности автоматизированного создания новых типов карт, составление которых традиционными методами затруднительно. При этом повышается эффективность решения отдельных геологических задач, например, автоматизированного предсказания форм подземных сводов по нерегулярному набору исходных полевых данных, анализа геохимических полей (включая машинную визуализацию их составляющих и др.). Для многих направлений природных исследований цифровое моделирование становится самой современной технологией.

Решение проблем и задач картографирования поверхности Фобоса на основе цифрового моделирования позволили в настоящее время основательно продвинуть решение геоэкологических проблем путем разработок современных технологий компьютерного геоэкологического картографирования. На основе научных разработок, кратко изложенных в данной публикации, созданы серии компьютерных геохимических (загрязнение почвенного и снегового покровов), гидрохимических (качество поверхностных вод) и гидрогеологических (загрязнение подземных вод) карт отдельных административных районов Московской области. Анализ их содержания - это ключ к формированию и реализации соответствующей экологической политики.

Литература

1. В.А.Садовничий, О.Р.Мусин, Б.А.Новаковский, О.В.Селезнев. Автоматизированное картографирование динамики природных объектов по сканерным космическим изображениям: достижения, проблемы и перспективы. /В сб. "Дистанционное зондирование агропочвенных и водных ресурсов"Мат-лы Всес. Конф. - Барнаул : Изд-во Алт. ун-та, 1990. - с.1-7

2. Под ред. В.А.Садовниченко. С.Н.Сербенюк. Картография и геоинформатика – их взаимодействие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. – 159 с.
3. В.А.Садовнический, С.Н.Сербенюк и др. Цифровая модель Фобоса // Вестник МГУ, серия 5. География, 1991, N2, с. 43-45
4. Телевизионные исследования Фобоса. – М.: Наука, 1994. – 168 с.
5. В.А.Садовнический, Т.Даксбери, С.Н.Сербенюк и др. Априорные модели поверхности Фобоса. – В кн. "Телевизионные исследования Фобоса". – М.: Наука, 1994. – с.31-39
6. Б.А.Новиковский. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли : картографо-фотограмметрическое моделирование : Учеб. пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1997. – 208 с.
7. С.Н.Сербенюк, О.Р.Мусин. Автоматизированное построение изолинейных карт и производных от них изображений // Геодезия и картография, 1986, N7, с.42-45
8. С.Н.Сербенюк, С.М.Кошель, О.Р.Мусин. Методы моделирования геополей по данным в нерегулярно расположенных точках // Геодезия и картография, 1990, N11, с.31-35
9. С.Н.Сербенюк, С.М.Кошель, О.Р.Мусин. Программы МАГ для создания цифровых моделей геополей // Геодезия и картография, 1991, N4, с.44-46