

Б.А. Новаковский  
Р.В. Пермяков

**КОМПЛЕКСНОЕ  
ГЕОИНФОРМАЦИОННО-  
ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА**

МОСКВА  
ИЗДАТЕЛЬСТВО МИИГАиК  
2019

УДК 528.85:528.74:528.93

Н 15

**Рецензенты:**

профессор, доктор геогр. наук **В.С. Тикунов**  
(МГУ имени Ломоносова. Географический факультет);

профессор, доктор геогр. наук **С.В. Пьянков**  
(Пермский государственный национально-исследовательский университет)

**Новаковский Б.А., Пермяков Р.В.**

**Н 15** Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа: учебное пособие. – М.: Изд-во МИИГАиК. 2019. – 175 с., ил.

ISBN 978-5-91188-075-0

Изложены теоретические и практические вопросы создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) и их использования для решения географо-картографических задач: моделирования областей затопления, расчета поступления солнечной радиации, планировании строительства объектов инфраструктуры и для решения других задач. Рассмотрены различные трактовки ЦМР, способы построения и визуализации ЦМР, источники данных для их создания. Представлена методика геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа, которая основана на использовании профессиональной цифровой полнофункциональной фотограмметрической системы РНОТОМОД. Разработчик системы — компания «РАКУРС».

Для студентов старших курсов высших учебных заведений, магистрантов, аспирантов, обучающихся по направлениям «География», «Картография и геоинформатика», «Гидрометеорология», а также для научных сотрудников.

Электронная версия издания размещена на сайте НЭБ [elibrary.ru](http://elibrary.ru)

УДК 528.85:528.74:528.93

ISBN 978-5-91188-075-0

© Новаковский Б.А., Пермяков Р.В., 2019

© Издательство МИИГАиК, 2019

## ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРОВ

В последние годы тематическое картографирование, в том числе картографирование рельефа, развивается за счет активного использования геоинформационных технологий, в частности геоинформационной обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей поверхности (ЦМП). Представляя собой способ структурного описания такой фундаментальной части географического пространства как рельеф, ЦМР приобретают первостепенное значение при решении широкого круга географо-картографических задач: моделирования областей затопления, планирования строительства объектов инфраструктуры, расчета поступления солнечной радиации и многих других.

Возможности и функционал цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) выходят далеко за пределы стандартного построения ЦМР. Эти возможности позволяют оптимизировать и качественно улучшить методику составления карт для решения различных географо-картографических задач. К числу таких специфических особенностей ЦФС в первую очередь относится возможность работы в стереорежиме.

В книге представлена усовершенствованная методика геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа. Методика включает в себя широкий комплекс работ: от выбора материалов дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и их фотограмметрической обработки до проектирования содержания карт и интерпретации результатов моделирования. В уже известные методики совместного использования фотограмметрических и геоинформационных технологий авторам удалось внести ряд принципиальных уточнений и дополнений, позволивших сформулировать комплексное решение.

Обоснованы преимущества комплексного применения фотограмметрических и геоинформационных технологий для моделирования рельефа и его производных характеристик при составлении аналитических карт, среди которых основные преимущества ЦФС — возмож-

ность оперативного автоматизированного построения ЦМР высокой детальности с размером ячейки равным пространственному разрешению снимков. Уточнены известные и сформулированы новые критерии выбора разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения для формирования стереомоделей.

Серьезным потенциалом для прикладного применения обладает оптимизированная технология геоинформационного моделирования областей затопления и последствий наводнений на основе стереомоделей, сформированных из полученных в период межени разновременных космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

В первой главе книги авторы анализируют опыт создания, интерпретации и использования ЦМР в географо-картографических исследованиях. В этой главе рассматриваются различные терминологические трактовки ЦМР, исследуются способы построения и визуализации ЦМР, а также источники данных для их создания. Особый акцент сделан на фотограмметрической обработке материалов ДЗЗ.

Во второй главе авторы раскрывают смысл понятия «комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа». В этой главе изложена и обоснована усовершенствованная методика такого моделирования; сформулированы критерии выбора данных ДЗЗ в зависимости от поставленных географо-картографических задач, рассмотрены особенности фотограмметрического построения ЦМР как по материалам классической аэро- и космосъемки, так и по материалам разновременной космической съемки, съемки с БПЛА и наземной стереосъемки малоформатными цифровыми камерами; изложены ключевые моменты геоинформационной обработки полученных ЦМР. При рассмотрении этих вопросов особое внимание уделено классификации географо-картографических задач и связанных с ними параметров рельефа, а также специфике геоинформационного моделирования затопления территории, вызванного чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

В третьей главе представлены конкретные примеры апробации методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа и его параметров. Авторы предлагают собственные варианты решения различных географо-картографических задач, в частности, определение последствий наводнений в Крымске, Благовещенске и Бийске в 2012–2014 гг.; расчет суммарной солнечной

радиации в Армении, определение морфометрических факторов эрозии почв в Швейцарии и расчет объема извлеченной породы в алмазных карьерах Якутии.

Для апробации представленной в книге методики использованы данные высокого и сверхвысокого пространственного разрешения: стереопары аэроснимков, полученных камерами RC-30 и Sony ILCE-6000; стереопары космических снимков со спутников ALOS, SPOT-5, WorldView-1 и WorldView-2. Фотограмметрическая часть методики реализована с использованием программного обеспечения PHOTOMOD 6.3, геоинформационная часть — в программной среде ArcGIS 10.5.

PHOTOMOD — профессиональная, полнофункциональная фотограмметрическая система, используемая специалистами более чем в 80 странах мира. Разработчик системы — компания «Ракурс». Замкнутый технологический цикл программы: от аэротриангуляции и стереовекторизации до создания цифровых моделей рельефа, ортофотопланов и карт, позволяет в автоматическом и полуавтоматическом режимах обрабатывать материалы ДЗЗ, полученные с большинства известных сенсоров в ходе классической аэросъемки, космической съемки, съемки с БПЛА.

Авторы книги выражают глубокую признательность компании «РАКУРС» и лично генеральному директору Виктору Николаевичу Адрову за предоставленные материалы ДЗЗ, лицензионное программное обеспечение и финансовую поддержку при подготовке к изданию настоящего учебного пособия.

## Введение

Цифровые модели рельефа (ЦМР) представляя собой способ структурного описания такой фундаментальной части географического пространства как рельеф. ЦМР приобретают первостепенное значение при решении широкого круга географо-картографических задач.

В ряду источников данных для создания точных ЦМР в 2000-х гг. широкое распространение получили данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Важная роль в их обработке принадлежит аналитическим методам, основанным на технологии цифровой фотограмметрии. ЦМР, построенные путем фотограмметрической обработки ДЗЗ, лишены недостатков, свойственных ЦМР, созданным на основе топографических карт. Космические и аэроснимки могут быть оперативно получены и с высокой точностью автоматизированно обработаны средствами цифровых фотограмметрических систем (ЦФС).

Совместное использование фотограмметрических и геоинформационных технологий в географо-картографических исследованиях известно достаточно давно (Li et al., 2005; Hengl et al., 2009). Однако фотограмметрические технологии в этом тандеме до сих пор играли лишь второстепенную роль. Главным образом, они были предназначены для создания ЦМР по классическим материалам ДЗЗ (традиционным стереопарам аэро- и космических снимков). Вся же последующая обработка ЦМР, направленная на определение производных характеристик рельефа и составление аналитических карт, реализовывалась средствами геоинформационных технологий. Вместе с тем, возможности и функционал ЦФС выходят далеко за пределы стандартного построения ЦМР. И эти возможности позволяют оптимизировать и качественно улучшить методику составления карт для решения различных географо-картографических задач. К числу таких специфических особенностей ЦФС, в первую очередь относится возможность работы в стереорежиме. В ряду зарубежных монографий, посвященных систематизации принципов и технологий геоинформационной обработки ЦМР, в том числе

полученных фотограмметрическим способом (Li et al., 2005; Hengl et al., 2009), недостаточно внимания уделяется возможностям фотограмметрической обработки «неклассических» материалов ДЗЗ: разновременных космических снимков, полученных с разных витков движения сенсора, снимков с беспилотных летающих аппаратов (БПЛА), материалов наземной стереосъемки. Не определены четкие критерии выбора снимков для решения той или иной географо-картографической задачи средствами фотограмметрических и геоинформационных технологий. Серьезные пробелы — в освещении вопросов автоматизации построения ЦМР и создания общегеографической основы.

В ходе исследования были обоснованы преимущества комплексного применения фотограмметрических и геоинформационных технологий для моделирования рельефа и его производных характеристик при составлении аналитических карт, среди которых основные преимущества ЦФС — возможность оперативного, автоматизированного построения ЦМР высокой детальности с размером ячейки равным пространственному разрешению снимков, возможность измерения в стереорежиме высот природных и антропогенных объектов в местах, где данные о высотах отсутствуют или затруднен их сбор иными инструментальными средствами. Преимущество ГИС-пакетов — набор инструментов пространственного анализа и графических средств оформления карт.

Новаторскими можно считать предлагаемые авторами усовершенствованные методы фотограмметрической обработки материалов разновременной космической съемки, наземной съемки и съемки с БПЛА в рамках единого геоинформационно-фотограмметрического процесса с целью повышения достоверности создаваемых ЦМР.

Безусловное достижение исследования — уточнение известных и формулирование новых критериев выбора разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения для формирования стереомоделей, среди которых основные: ограничение угла конвергенции; минимальное различие значений высоты Солнца в момент съемки; минимальное различие в разрешении и масштабах снимков; отсутствие изменений местности, влияющих на восприятие стереообразующих деталей, за промежуток времени между съемками.

В своих исследованиях авторы опираются на методические принципы и методы картографирования рельефа, представленные в рабо-

тах: А.М. Берлянта, Т.В. Верещака, А.А. Медведева, К.А. Салищева, Т.Г. Сватковой, Ю.Г. Симонова, А.И. Спиридонова; передовые технологии фотограмметрического моделирования рельефа, изложенные в трудах Ю.Ф. Книжникова, Б.В. Краснопевцева, А.Н. Лобанова, Б.А. Новаковского; современные достижения в области геоинформационного картографирования и геоинформационного анализа рельефа, обозначенные в работах Е.Г. Капралова, А.В. Кошкарева, Ж. Ли (Z. Li), И.К. Лурье, С.В. Пьянкова, С.Н. Сербенюка, В.С. Тикунова, Т. Хенгла (T.Hengl).



## ГЛАВА 1

# ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА ПО МАТЕРИАЛАМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ГЕОГРАФО-КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

Использование цифровых моделей рельефа (ЦМР) в географо-картографических исследованиях имеет длительную и богатую историю. С течением времени представления ученых относительно того, что такое ЦМР и какими способами их можно получить, менялись, развивались и дополняли друг друга. В рамках данной главы поставлена задача, изучив мировой опыт, рассмотреть различные терминологические трактовки ЦМР, исследовать способы построения и визуализации ЦМР, а также источники данных для их создания. Особый акцент при этом будет сделан на фотограмметрической обработке материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и различных направлениях использования ЦМР для решения географо-картографических задач.

### § 1.1. Определение цифровой модели рельефа (ЦМР)

Рассматривая особенности создания ЦМР по материалам дистанционного зондирования, в первую очередь необходимо дать определение цифровой модели рельефа, проанализировать существующие толкования этого термина и выделить из них то, которое будет использоваться в целях настоящего исследования.

Моделирование — одно из наиболее распространенных понятий в науке. Словом «модель» обозначается уменьшенная копия, любой мысленный или условный образ какого-либо объекта, процесса или явления, используемый в качестве его заменителя. Моделирование же при этом понимается как процесс построения и изучения моделей [Советский энциклопедический словарь, 1981].

Принято считать, что первые данные для создания ЦМР были получены тогда, когда человек научился измерять высоты отдельных точек местности и наносить их на карту. Первая собственно цифровая модель местности была изготовлена в 1961 г. на кафедре картографии Военно-инженерной академии [Любков и др., 1963].

В научной среде нет единого мнения относительно того, что называть цифровой моделью рельефа. В зарубежной литературе ЦМР часто определяют как регулярный массив высот, отсчитываемых от какой-либо референсной поверхности [Wood, 2001]. По мнению ряда отечественных ученых, ЦМР представляют собой особый вид трехмерных математических моделей — множеств с определенными предикатами, показывающих отображение рельефа как реальных, так и абстрактных поверхностей. В качестве последних могут использоваться различные физические показатели: температура, давление, количество осадков, геофизические поля и прочие характеристики [Сербенюк, 1990].

В сравнении с аналоговой формой представления, ЦМР характеризуются рядом специфических черт:

разнообразием форм представления: ЦМР можно легко представить в виде вертикального профиля или 3D-анимации;

сохранением точности – если традиционные бумажные карты с течением времени могут деформироваться, точность ЦМР остается неизменной;

достоверной реализацией автоматической обработки в режиме реального времени – интеграция в ГИС данных о рельефе, представленных в цифровой форме, осуществляется гибче, чем в аналоговой форме;

упрощенной процедурой мультимасштабного представления – ЦМР могут быть получены с разным пространственным разрешением, в зависимости от их представления в разных масштабах [Li et al, 2005].

Не до конца урегулированным остается вопрос толкования и соотношения между собой схожих по своему смыслу терминов: цифровая модель рельефа (DEM — digital elevation model), цифровая модель местности (DTM — digital terrain model) и цифровая модель поверхности (DSM — digital surface model).

Так, по мнению словенского картографа Podobnikar, цифровая модель местности (DTM) – это непрерывная поверхность, которая помимо значений высот, сформированных в виде сетки (известной как цифровая модель рельефа (DEM)), также состоит и из других элементов, описы-

вающих топографическую поверхность, таких как склон или каркас местности [Podobnikar, 2009].

В терминологии американских разработчиков базы данных NEXТMap, DSM — это цифровая модель местности, содержащая высоты земной поверхности, объектов естественного (например, растительность) и искусственного происхождения (например, здания и сооружения). Что касается DТМ, по их мнению, — это цифровая модель местности, в которой содержатся высоты только земной поверхности [<https://www.intermap.com>].

В различных странах мира авторами предлагаются и иные формулировки: цифровая модель высот (DНМ — digital height model), цифровая модель Земли (DGM — digital ground model), цифровая модель высот местности (DТЕМ — digital terrain elevation model). Термин DEM широко распространен в Америке, DНМ — в Германии, DGM — в Великобритании, а термин DТЕМ введен Геологической службой и Картографическим агентством министерства обороны США [Petrie and Kennie, 1987].

Китайский картограф Ж. Ли попытался выявить различия в этих формулировках. По его мнению, цифровая модель местности (DТМ) — наиболее общее определение цифровой модели, которое включает в себя данные о высотах не только твердой поверхности Земли (как DGM), но и других естественных и искусственных объектов местности (растительность, гидрография, здания и строения), а также нетопографической информации [Li et al, 2005]. Идея возможного создания цифровых моделей не только для реальных, но и для абстрактных полей не нова. В разное время она обсуждалась различными специалистами [Садовничий и др., 1999; Мусин и др., 1987; Новаковский и др., 2003].

В настоящей работе термины DEM и DТМ считаются синонимичными, а термин «цифровая модель рельефа» рассматривается с точки зрения определения, сформулированного в «Толковом словаре основных терминов геоинформатики» [1999]: «ЦМР — это средство цифрового представления трехмерных пространственных объектов в виде трехмерных данных как совокупности высот или отметок глубин и иных значений аппликат (координаты  $Z$ ) в узлах регулярной сетки с образованием матрицы высот, нерегулярной треугольной сети (TIN) или как совокупность записей горизонталей или иных изолиний».

## § 1.2. Способы построения и визуализации ЦМР

Способ построения ЦМР оказывает непосредственное влияние на зрительное восприятие рельефа, точность ЦМР и точность, построенных по ним производных моделей. В связи с этим необходимо уделить особое внимание способам построения и визуализации ЦМР.

Как известно, в общем случае рельеф местности может быть представлен в аналоговой и цифровой формах. В первом случае имеется в виду изображение рельефа на традиционных бумажных картах методом отмычки, с помощью горизонталей и другими способами [Верещака и др., 2016]. Цифровая форма отображения рельефа представляет собой каталог координат определенным образом упорядоченных точек, описание связей между ними и алгоритм определения высот точек в зависимости от их местоположения.

По мнению С.М. Кошеля [Кошель, 2004], для анализа рельефа на основе численных методов наиболее удобны две формы его представления: в виде значений в узлах нерегулярной треугольной сети (триангуляционные модели) и в узлах регулярной сети (сеточные модели). Для моделирования рельефа по данным, полученным в точках, им были выделены следующие основные методы: средневзвешенная интерполяция и метод Шепарда; интерполяция и аппроксимация с помощью радиальных базисных функций, кригинг; интерполяция на основе триангуляции; интерполяция и аппроксимация на основе иерархических В-сплайнов.

Схожей по смыслу, но более упрощенной по содержанию является классификация способов построения ЦМР А.С. Назарова [Назаров, 2006]. Согласно ей, в зависимости от используемой схемы размещения точек и типа математической модели эти способы можно условно разделить на две группы.

Первая группа включает в себя способы, основанные на линейной и нелинейной интерполяции высот с применением корреляционных функций, сплайнов и полиномов. Параметры используемой математической модели вычисляются по опорным точкам, а затем используются для интерполяции высот произвольных точек в области моделирования.

*Полиномиальные способы* представляют моделируемую поверхность в виде полинома второй–пятой степени:

$$A_i = Z_i = a_0 + a_1 X_i + a_2 Y_i + a_3 X_i Y_i + a_4 X_i^2 + a_5 Y_i^2 + \dots \quad (1)$$

В целях нахождения неизвестных коэффициентов полинома для каждой опорной точки составляется одно уравнение поправок, неизвестными в котором являются коэффициенты полинома  $a_0 \dots a_5$ . Коэффициенты при неизвестных определяются как функции координат согласно уравнению (1). При этом свободные члены рассчитываются как разности между отметками опорных точек и их вычисленными значениями для начальных значений неизвестных. Сформированную таким образом систему уравнений решают последовательными приближениями, в каждом из которых неизвестные параметры рассчитываются методом наименьших квадратов. Рассчитанные коэффициенты  $a_0 \dots a_5$  используются для интерполяции высот произвольных точек области моделирования согласно уравнению (1).

*Кусочно-полиномиальные способы* подразумевают деление области моделирования на участки, расчет для каждого участка уникального локального полинома вида (1) и последующее объединение локальных полиномов с помощью переходных уравнений. Решение систем уравнений выполняется методом наименьших квадратов при условии минимума суммы квадратов расхождений высот точек между реальной и аппроксимирующей поверхностями. Похожее решение лежит в основе способов, основанных на применении *рядов Фурье* (разложений по сферическим гармоникам), и различного рода *сплайнов* (кубических, бикубических, на многообразиях) [Назаров, 2006].

Вторая группа способов построения ЦМР включает в себя способы, основанные на построении геометрически упорядоченной модели, в состав которой входят либо определенным образом упорядоченные линии, либо поверхности многогранников (треугольников, квадратов или иных фигур).

Формой представления *структурной модели* местности



Рис. 1. Структурная модель рельефа

являются отметки высот, размещенные в характерных точках рельефа — на линиях водоразделов, тальвегах, урезах воды, в точках локального экстремума (рис. 1). Минимальным числом точек такая модель достаточно точно отражает поверхность, однако, ее использование затруднено сложностями интерполяции высот.

Создание ЦМР с использованием данных TIN (рис. 2) сводится к построению оптимальной сети треугольников, которые стремятся быть

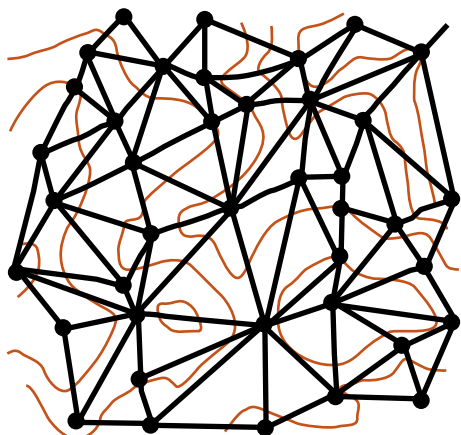


Рис. 2. ЦМР на треугольниках (модель TIN)

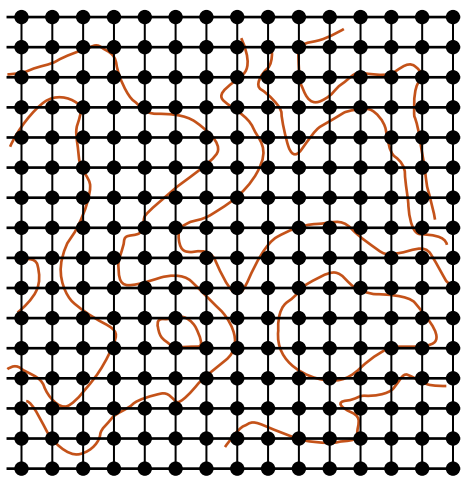


Рис. 3. Регулярная модель (матрица высот)

как можно ближе к равнобедренным (триангуляция Делоне). Использование модели TIN для получения высот новых точек не совсем удобно, поскольку для этого необходимо не только определить принадлежность точки конкретному треугольнику, но также определить ее барицентрические координаты и выполнить линейную интерполяцию высот этой точки по отметкам вершин треугольника.

В практических целях удобнее использовать модель сетки со сторонами, параллельными координатным осям  $X$  и  $Y$  системы местности (рис. 3). Такая модель называется регулярной и известна как модель *DEM* (*Digital Elevation Model*) или *матрица высот*. Эта модель не может быть построена непосредственно по точкам с известными отметками. Для ее построения используют либо TIN и горизонтали, предварительно созданные на основе опорных точек, либо полиномиальные методы. В первом случае отметки узлов регулярной сетки

рассчитываются с помощью линейной интерполяцией высот — по ближайшим точкам сети треугольников или горизонталей, а во втором — по известным параметрам полиномиальной функции [Назаров, 2006].

Большинство современных цифровых фотограмметрических систем (ЦФС) и ГИС-пакетов так или иначе способно реализовать все представленные выше методы создания ЦМР. Наибольшее распространение из их числа получили алгоритмы построения геометрически упорядоченных моделей TIN и DEM.

### **§ 1.3. Источники данных для создания ЦМР**

Выбор материалов для построения ЦМР зависит от цели и задач исследования, требований, предъявляемых к точности его результатов, а также особенностей территории. Основными источниками данных для цифрового моделирования рельефа являются крупномасштабные топографические карты, материалы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), а также материалы полевых инструментальных съёмок. Каждый из источников имеет свои достоинства и недостатки, обуславливающие соответствующие им методы обработки.

#### *Цифрование топографических карт*

Цифрование топографических карт — это результат перевода в цифровую форму аналоговых данных о рельефе, хранящихся на бумажных носителях в виде горизонталей и отметок высот. Главная задача цифрования — не просто скопировать содержимое карты, а максимально точно смоделировать рельеф поверхности, передать его «пластику». Наибольшую сложность при цифровании представляют участки обрывов и крутых склонов, обычно показываемые на топографических картах слитой в одну линию группой горизонталей [Хромых и др., 2007].

Следует заметить, что топографические карты и иные карты суши масштаба 1:500 000 и мельче практически непригодны для создания точных ЦМР [Капралов и др., 2004]. Это обусловлено несколькими причинами. Во-первых, особенностью отечественной гипсометрической школы. Большой акцент при создании карт рельефа делается не столько на точное положение горизонталей, сколько на «географическое правдоподобие, точность изображения и пластическую выразительность рисунка рельефа» [Виноградов, 1941; Заруцкая, 1958; Сваткова, 1998; Верещака, 2002]. Кроме того, весьма грубыми для создания ЦМР счи-

таются допуски на смещение горизонталей для создания карт того или иного масштаба [Гараевская и др., 1976].

Что касается собственно цифрования топографических карт, традиционно принято выделять пять его основных способов: 1) цифрование по точкам; 2) автоматическое цифрование; 3) интерактивное цифрование; 4) сканирование; 5) векторизация с помощью дигитайзера. Цифрование по точкам — наиболее трудоемкая процедура, полностью контролируемая пользователем. Она проводится в том случае, когда исходный материал отличается сложностью или плохим качеством изображения. Суть автоматического цифрования заключается в переводе растрового изображения в векторный формат без вмешательства человека. Интерактивный тип цифрования позволяет объединить преимущества каждого из выше обозначенных способов, отвечая за выборочную векторизацию материалов в зависимости от требований пользователя.

Помимо способов векторизации, в той или иной степени реализуемых человеком в специализированных программных продуктах, существуют и другие приемы. К ним относится цифрование исходных данных с помощью различного рода векторных (дигитайзер) и растровых (сканер) устройств. Долгое время эти приборы в равной степени использовались при векторизации материалов. Однако на сегодняшний день дигитайзер уступил свое место сканеру в связи с медленной скоростью первого при вводе данных и тенденцией к стабильному увеличению объема памяти жестких дисков на современных компьютерах [Новаковский и др., 2003].

### *Материалы полевых съемок и данные спутникового позиционирования*

Материалы полевых съёмок по-прежнему остаются одним из самых точных источников данных для построения ЦМР. За последнее время их инструментарий претерпел серьезные изменения. Стандартный набор современных инструментов для измерений углов и расстояний на местности включает в себя дальномеры, оптические и лазерные нивелиры, теодолиты, лазерные сканеры и тахеометры.

Дальномеры используются для измерения расстояний. Для измерения превышений предназначены оптические и лазерные нивелиры. Тахеометром называют теодолит, совмещённый с дальномером. Современные электронные тахеометры оснащены микрокомпьютерами, для вычисления углов и расстояний и преобразования их в координаты



точек на местности. Существуют отражательные и безотражательные тахеометры. В безотражательных тахеометрах используется мощный лазерный луч, который может отражаться от любых объектов на местности [Скворцов, 2006]. Лазерные сканеры по своим функциям похожи на электронные безотражательные тахеометры, но выполняют измерения не по одной точке, указываемой оператором, а несколькими пакетами сразу. Сканеры перемещают лазерный луч по горизонтали и вертикали, передавая информацию обо всех объектах местности.

В качестве элементов информационного обеспечения создания ЦМР постепенно приобретают популярность и данные, полученные с помощью приёмников систем спутникового позиционирования. В системах GPS и ГЛОНАСС роль геодезических пунктов выполняют космические аппараты [Серапинас, 2012].

В настоящее время как источники данных для создания ЦМР оцифрованные топографические карты и материалы полевых съёмок постепенно отходят на второй план, уступая место более прогрессивным и эффективным методам извлечения данных о рельефе — обработке материалов ДЗЗ.

### *Наземная стереофототопографическая съёмка*

Согласно традиционному подходу, наземную стереофототопографическую съёмку выполняют для создания топографических карт и планов в масштабах 1:5 000 и крупнее, в тех случаях, когда проводить аэросъёмку не целесообразно — в предгорной, горной и высокогорной местности. Вместе с этим, для создания топографических карт в масштабах 1:10 000 и мельче наземную стереофототопографическую съёмку можно проводить в сочетании с аэросъёмкой. В этом случае по наземным снимкам можно выполнить привязку аэрофотоснимков. Методика построения ЦМР по наземным снимкам схожа с методикой ее создания по материалам дистанционного зондирования, с использованием фотограмметрических методов [Краснопевцев, 2008].

### *Данные дистанционного зондирования Земли*

В качестве элемента информационного обеспечения ЦМР в последнее время растёт значение материалов ДЗЗ. По мнению А.В.Кошкарева [Кошкарев, 2004], этому способствуют технологические и технические причины:

рост пространственного разрешения систем сканерной съёмки;

широкое распространение цифровых фотограмметрических систем (ЦФС);

появление интерферометрического метода извлечения данных о рельефе.

Технология получения данных ДЗЗ наряду со спектральным диапазоном съемки, обуславливает свойства изображений и специфику их последующей обработки. По спектральному диапазону съемки снимки делятся на три основные группы изображения: в видимом, инфракрасном и радиодиапазоне. С учетом технологии получения изображения снимки в световом диапазоне подразделяются на фотографические, снимки оптико-механического сканирования и ПЗС-снимки. Снимки в радиодиапазоне в свою очередь дифференцируются на микроволновые радиометрические снимки, получаемые при регистрации собственного излучения исследуемых объектов, и радиолокационные снимки, получаемые при регистрации отраженного радиоизлучения, генерированного на носителе [Кравцова, 2005]. Из-за низкого пространственного разрешения и в связи с рядом других причин снимки в тепловом инфракрасном диапазоне и микроволновые радиометрические снимки для создания ЦМР не используются.

Одним из наиболее ярких примеров использования данных ДЗЗ для построения ЦМР в глобальном масштабе является обработка изображений, полученных со спутника Terra, оснащенного мультиспектральным сканирующим устройством ASTER. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) — улучшенный мультиспектральный сканер, установленный на борту спутника Terra в декабре 1999 г. Состоит из трех разделенных между собой инструментальных подсистем, каждая из которых ведет съемку в определенном спектральном диапазоне. За получение данных, используемых для создания ЦМР, отвечает подсистема, работающая в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра электромагнитных волн. Она состоит из двух камер, одна из которых ведет съемку в видимом диапазоне спектра в надири, а другая — в ближнем инфракрасном под углом  $27,7^\circ$  от надира. Главными отличительными чертами подсистемы ASTER являются высота над поверхностью Земли равная 705 км и возможность последующей стереоскопической обработки снимков. Данные, полученные с помощью сенсора ASTER, находятся в свободном доступе в Internet и позволят пользователям создавать ЦМР с пространственным разрешением и вы-

сотной точностью порядка 15 м [Nikolakopoulos et al., 2006].

Помимо фотографических и сканерных способов получения данных ДЗЗ, особую популярность в последнее десятилетие получили активные методы съемки Земли с авиационных и с космических носителей. К их числу относятся различные модификации лидарной и радиолокационной съемки.

### *Данные лидарной съемки*

LiDAR (Light Identification, Detection and Ranging) — технология получения информации о земной поверхности с помощью активных оптических систем, использующих явления отражения света и его рассеивания в прозрачных и полупрозрачных средах [Barber et al., 2004].

В целях картографирования земной поверхности лидары, размещаемые на воздушных носителях, оснащаются активными лазерными излучателями, инерциальными навигационными системами (INS) и GPS-приемниками [Hodgson et al., 2005]. Объединение технологий INS и GPS направлено на точное определение в пространстве положения лидара, направления его движения и расстояния до объектов местности [Barber et al., 2004]. Каждую секунду лидар способен испускать до 10 000 импульсов, одновременно принимая и обрабатывая те из них, что уже отразились от земной поверхности. Точность данных лидарной съемки зависит от высоты и скорости полета, а также от угла сканирования. Угол лидарной съемки с самолета, как правило, не превышает 20°, в то время как рекомендуемая для сканирования высота полета составляет 1000 м [Ackermann, 1999]. Плотность покрытия поверхности точками сканирования напрямую зависит от скорости полета и размера ячейки лазерного сигнала на местности. В большинстве случаев этот параметр для первичных данных лидарной съемки варьируется в пределах 2–4 м [MMSI, 2001].

Плановая точность результатов сканирования рассчитывается исходя из высоты полета, деленной на 2000. Таким образом, в том случае, если плотность облака точек составляет 1–5 точки/м<sup>2</sup>, точность высотного положения облака точек, полученных в ходе лидарной съемки, находится в пределах 0,1 м, а точность их планового положения не превышает 0,5 м [Lohr, 1998].

Авиационные лидары позволяют получать трёхмерные координаты сотен миллионов точек земной поверхности. Традиционно одной из

основных задач в процессе обработки лидарных данных для генерации высокоточных ЦМР является автоматическая классификация отражений лазерного луча на отражения от земли и отражения от зданий и растительности [Горькавый, 2011]. Программное обеспечение по обработке данных воздушного лазерного сканирования постоянно совершенствуется. Помимо инструментов автоматической классификации они обладают возможностями полуавтоматической фильтрации точек и их ручного редактирования [Hug et al., 2014].

### *Данные радиолокационной интерферометрической съемки*

Интерферометрическая радиолокационная съемка с синтезированной апертурой (InSAR) — особый метод обработки фазового компонента радиолокационных сигналов, возвращающихся от объектов земной поверхности [Riedmann et al., 2005].

Радиолокационная интерферометрия использует эффект интерференции электромагнитных волн. Технология интерферометрической обработки радиолокационных данных предполагает получение нескольких когерентных измерений одного и того же района земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны радиолокатора. Основная идея метода заключается в формировании интерферограммы, которая представляет собой результат перемножения двух комплексных радиолокационных изображений одной и той же территории, полученных идентичными съемочными SAR-системами из близко расположенных точек орбиты [Никольский, 2008].

Успешной попыткой реализации интерферометрической радиолокационной съемки в целях получения широкоохватных высотных данных о рельефе Земли относительно высокого пространственного разрешения стала миссия SRTM. SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) — проект радиолокационной интерферометрической съемки поверхности земного шара, осуществленной в феврале 2000 г. с борта космического корабля многоцелевого использования [Farr et al., 2000]. В качестве активного излучателя был использован сенсор SIR-C/X-SAR — радар с синтезированной апертурой, излучающий сигналы в X-диапазоне (с длиной волны порядка 3 см) и в C-диапазоне (с длиной волны около 5,6 см). В результате миссии удалось получить высотные данные о 80% поверхности Земли между 60° с.ш. и 56° ю.ш с пространственным разрешением порядка 30 м. Согласно документации проекта, средняя

квадратичная ошибка определения высот ЦМР с вероятностью 90% не превзойдет 16 м ( $LE_{90}=16$  м) [Nikolakopoulos et al., 2006]. Достаточно широкий охват съемки, приемлемый показатель пространственного разрешения, а также открытый доступ к данным в Internet обусловили живой интерес пользователей данными ДЗЗ к проекту SRTM.

Обработка данных радиолокационной интерферометрической съемки обладает рядом особенностей. Интерферометрическая обработка данных ДЗЗ представляет собой процесс восстановления данных о рельефе по интерферометрической паре снимков, полученных с помощью сигналов разной фазы. Радиолокационное изображение содержит информацию об амплитуде, характеризующей отражательные свойства объекта, а также о фазе сигнала, которая определяется удаленностью до объекта. Для определения геометрических характеристик объекта необходимо знать разность фаз между двумя радиолокационными изображениями интерферометрической пары, полученными из близко расположенных точек в пространстве, разницу наклонных дальностей, а также геометрические параметры съемки [Никольский, 2008]. Результатом комплексного перемножения основного и вспомогательного изображений является интерферограмма. Для ее качественного построения и правильного определения высот необходимо, чтобы два радиолокационных изображения обладали высокой когерентностью и геометрической согласованностью [<http://www.racurs.ru>].

### ***Радарграмметрическая обработка данных ДЗЗ***

Системы обработки радарных снимков находятся несколько в стороне от традиционных фотограмметрических систем. С появлением на рынке данных сенсоров космического базирования с высокой разрешающей способностью (TerraSAR-X, COSMO-Skymed, RADARSAT-2) роль последних существенно возросла. Эти системы, называемые радарграмметрическими, позволяют создавать ЦМР с точностью по высоте в пределах первых метров, а также высокоточные карты смещений земной поверхности [Сечин, 2008].

Под радарграмметрией принято понимать обработку стереопары радиолокационных изображений. Она не нашла широкого практического применения, так как конечная точность данных невысокая, по сравнению с точностью данных, получаемых при обработке стереопар оптических изображений и интерферометрической обработке радиолокационных

данных. Это вызвано тем, что при радарграмметрической обработке исходной является амплитудная информация, т. е. используются только значения интенсивности радиолокационных изображений, полученных под двумя различными углами, а вследствие того, что снимки имеют невысокие изобразительные свойства и зашумлены, точность цифровых моделей поверхности и рельефа, получаемых по радиолокационным стереоснимкам, по сравнению с оптическими не высока. В случае же с интерферометрическим подходом, ключевой информацией является не амплитудная информация, а фазовая, по которой и проводится восстановление высот местности.

Из современных радиолокационных систем, данные с которых используются для радарграмметрии, можно выделить RADARSAT-1 и RADARSAT-2, обладающие высокими возможностями по проведению съемки в различных режимах и под различными углами. Условием получения радиолокационных снимков, пригодных для стереообработки, является съемка с одноименных витков (восходящих или нисходящих) с разностью углов визирования примерно от 5 до 30°. При подборе стереопар желательно выбирать снимки, сделанные с меньшим временным интервалом, чтобы избежать взаимной декорреляции изображений из-за различных изменений на земной поверхности, произошедших за время между съемками [Никольский, 2008].

Таким образом, несмотря на все многообразие источников данных для построения ЦМР и способов их обработки, в последнее время принято опираться на наиболее совершенные из них. Уже долгое время не утрачивают своей значимости материалы полевых съемок, полученные средствами современных геодезических приборов. В комплексе с данными спутникового позиционирования они позволяют получить высокоточные сведения о рельефе территории, отличающейся небольшим охватом.

Вместе с тем уже отчетливо прослеживается тенденция вытеснения традиционного метода создания ЦМР путем цифрования топографических карт радарграмметрическим и фотограмметрическим методами обработки материалов ДЗЗ. На последнем методе следует остановиться подробнее.

## § 1.4. Фотограмметрическое моделирование рельефа

В настоящее время фотограмметрическая обработка считается наиболее эффективным способом извлечения данных о рельефе по фотографическим и сканерным снимкам. Фотограмметрия — наука и технология получения достоверной информации о предметах реального мира и окружающей их среде путем регистрации, измерения и интерпретации снимков и электромагнитного излучения, поступающего от системы датчиков [Новаковский, 1997]. Серии снимков при этом должны быть сформированы таким образом, чтобы соседние изображения образовывали стереопары. Обязательным условием создания стереомодели является наличие полученных в процессе построения и уравнивания фототриангуляционной сети элементов взаимного и внешнего ориентирования снимков [Лобанов и др., 1980].

Теоретической основой фотограмметрической обработки снимков служат математические зависимости между координатами точек на местности и координатами отображения этих точек на снимках. В формулы, устанавливающие связь между координатами, входят параметры, характеризующие съемочную аппаратуру, вид и условия съемки. Для определения съемочных параметров разработаны специальные методики, составляющие необходимый элемент фотограмметрической обработки [Книжников и др., 2004].

### *Стереοизмерение снимков*

Извлечение из стереомодели информации о высотах осуществляется с помощью стереοизмерений. Хорошо известен метод стереοизмерений, основанный на способе двух марок. Модифицированный способ двух марок с успехом применяется для стереοизмерений экранных снимков на компьютере. Измерительными марками в этом случае служат два идентичных курсора, вычленяемых из изображений и высвечиваемых ярким цветом на экране. Курсоры могут перемещаться как одновременно, так и относительно друг друга. Эти реализованные программно возможности позволяют наблюдателю с помощью мыши или клавиатуры навести пространственно воспринимаемую марку-курсор (стереοкурсор) на любую точку стереомодели и зарегистрировать ее координаты и параллаксы в пикселах.

Автоматические стереοизмерения основаны на выполнении ком-

пьютером нескольких процедур, основная из которых заключается в отождествлении идентичных точек на левом и правом цифровых снимках стереопары путем оценки корреляции изображений [Книжников и др., 2004].

Таким образом, измерение пространственных координат при обработке стереопары снимков вне зависимости от степени автоматизации этого процесса основано на способе двух марок. Изначально этот способ использовался при стереоскопическом визировании на аналоговых (фототрансформаторы, стереографы, стереопроекторы) и аналитических (стереоанаграфы) фотограмметрических приборах, а впоследствии стал неотъемлемой частью и цифровых фотограмметрических систем (ЦФС).

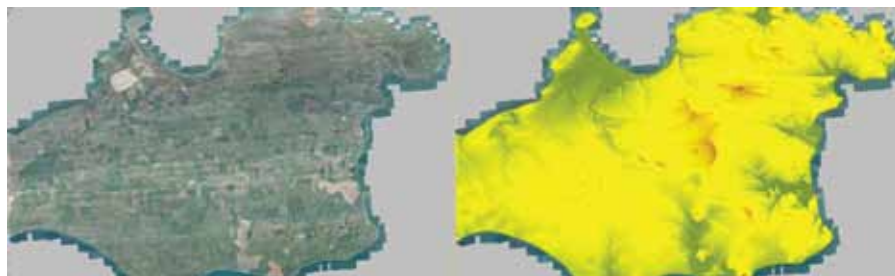
### ***Цифровые фотограмметрические системы. PHOTOMOD***

Одним из наиболее достоверных и надежных инструментов создания ЦМР фотограмметрическим способом являются цифровые фотограмметрические системы (ЦФС). В конце 80-х гг. XX в. они пришли на смену аналоговым и аналитическим фотограмметрическим приборам. ЦФС представляют собой набор специальных аппаратных средств для обработки данных ДЗЗ. Программный комплекс фотограмметрической системы позволяет работать в стереорежиме с использованием специальных инструментов: 3D-мониторов, затворных, поляризационных, анаглифических очков. [Новаковский и др., 2011]. В настоящее время рынок фотограмметрического программного обеспечения насыщен цифровыми фотограмметрическими системами: PHOTOMOD, Trimble INPHO, IMAGINE Photogrammetry, PCI Geomatica, Summit Evolution и др.

Одной из первых на мировом рынке ЦФС для персональных компьютеров стала программа PHOTOMOD [<http://www.racurs.ru>]. Разработанная компанией «РАКУРС» в 1993 г., ЦФС PHOTOMOD используется в настоящее время более чем в 80 странах мира коммерческими организациями, академическими структурами, органами исполнительной власти. PHOTOMOD — самая распространенная ЦФС в России и странах СНГ; базовая ЦФС государственной корпорации по космической деятельности (Роскосмос), Министерства Обороны, федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии (Росреестр), федерального агентства лесного хозяйства (Рослесхоз).

PHOTOMOD — полнофункциональная, профессиональная фотограмметрическая система с широким спектром возможностей и ориги-





**Рис. 4. Ортофотоплан и ЦМР. Крым (съемка камерой UltraCam)**

нальным графическим интерфейсом. Замкнутый технологический цикл программы — от аэротриангуляции и стереовекторизации до создания цифровых моделей рельефа, ортофотопланов (рис. 4), 3D-моделей (рис. 5–7) и топографической основы карт позволяет в автоматическом и полуавтоматическом режимах обрабатывать материалы ДЗЗ, полученные с большинства известных сенсоров из космоса и в ходе классической аэросъемки и съемки с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

PHOTOMOD имеет гибкую модульную структуру, обеспечивающую оптимальное соответствие конфигурации задачам пользователя. Режим распределенной обработки позволяет задействовать неограниченное количество компьютеров для ускорения фотограмметрических процессов. Программа успешно прошла испытания в облачных хранилищах данных с использованием высокопроизводительных вычислительных



**Рис. 5. 3D-модель (облако точек). Грац, Австрия (съемка камерой UltraCam)**



**Рис. 6. 3D-модель (3D-TIN). Иерусалим (съемка камерой VisionMapA3)**

ресурсов и на сегодняшний день доступна для работы в таких облачных сервисах, как GeoCloud [<https://www.geocloud.work/>] и CloudEO [<https://store.cloudeo-ag.com/photomod-workbench>].

Новые и адаптированные разработчиками компании «РАКУРС» алгоритмы поиска связующих точек, построения плотных ЦМП, облаков точек и истинных ортофотопланов значительно повышают производительность фотограмметрической обработки данных ДЗЗ и качество создаваемых продуктов, а автоматизированное создание ЦМР позволяет существенно расширить возможности использования ЦФС в географических исследованиях.

В связи с развитием науки и техники фотограмметрический способ создания ЦМР на протяжении всего времени своего существования



**Рис. 7. Векторная 3D-модель. Екатеринбург (космическая съемка Pleiades)**

претерпевал изменения. В основном эти изменения касались аппаратной части фотограмметрических приборов и данных, используемых в обработке. С увеличением пространственного разрешения данные космической съемки по своей точности стали приближаться к материалам аэросъемки, существенно снизив при этом расходы на получение данных с 1 км<sup>2</sup> местности. На смену аналоговым и аналитическим приборам пришли цифровые фотограмметрические системы. Однако базовые принципы фотограмметрии со временем не изменились. В настоящее время фотограмметрическая обработка материалов ДЗЗ как наиболее точный способ построения ЦМР уже практически вытеснила цифрование топографических карт, а при сохранении тенденции на снижение стоимости данных аэро- и космосъемки, а также активное использование ЦФС, через два–три года — его полностью заменят.

Основные преимущества создания ЦМР фотограмметрическим методом:

- оперативность получения актуальных и ретроспективных материалов дистанционного зондирования Земли, лежащих в основе моделирования;

- автоматизация процесса моделирования средствами современных цифровых фотограмметрических систем;

- высокая точность моделирования.

## **§ 1.5. Использование ЦМР в географо-картографических исследованиях**

Перед тем, как перейти к рассмотрению практического применения ЦМР, полученных фотограмметрическим методом, необходимо проанализировать мировой опыт использования ЦМР для решения различных географо-картографических задач.

Рельеф — один из наиболее важных факторов, определяющих динамику процессов в приповерхностном слое планеты. Рельеф является одним из факторов почвообразования, определяет микроклиматические и метеорологические характеристики, влияющие на тепловой и гидрологический режим почв [Романова, 1977; Кондратьев и др., 1978; Флоринский, 2010], предпосылки латерального переноса воды и других веществ под действием силы тяжести [Kirkby et al., 1967; Speight, 1974]. Вместе с тем, будучи результатом взаимодействия эндогенных

и экзогенных процессов, рельеф представляет собой и индикатор геологического строения территории [Герасимов, 1959; Мещеряков, 1965; Уфимцев, 1984; Костенко, 1999]. В связи с этим информация о рельефе широко применяется в науках о Земле.

Анализируя историю моделирования рельефа и его характеристик для решения различных географо-картографических задач, можно выделить несколько этапов [Флоринский, 2010]. До 1990-х гг. главным источником количественной информации о рельефе были топографические карты, при анализе которых применялся методический аппарат морфометрии [Ченцов, 1948; Волков, 1950; Strahler, 1956; Николаевская, 1966; Звонкова, 1970; Спиридонов, 1970, 1975; Козлова, 1975; Червяков, 1984; Пириев, 1985; Ласточкин, 1987; Симонов, 1998]. Будучи неотъемлемой частью картографического метода исследования [Салищев, 1982; Берлянт, 1984, 2003] и математико-картографического моделирования [Жуков и др., 1980; Сербенюк, 1990], морфометрические методы получили распространение в геологии, геоморфологии и почвоведении [Философов, 1960; Романова, 1971; Ранцман, 1979; Волчанская, 1981; Осинцева, 2004].

В середине 1950-х гг. в фотограмметрии появилось новое направление — цифровое моделирование рельефа. По мере развития компьютерных технологий оно оформилось в научную дисциплину, предметом которой стало количественное моделирование и анализ рельефа земной поверхности, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем [Флоринский, 2010]. Переход от традиционных морфометрических методов к цифровому моделированию был предопределен несколькими факторами: усложнением задач исследований, необходимостью снижения уровня их субъективности и обеспечения воспроизводимости [Evans, 1972; Кошкарев, 1982; Buttough, 1986; Dikau, 1988; Сербенюк, 1990].

В изображении рельефа на картах, созданных по ЦМР, сохраняется историческая преемственность, перешедшая на новый уровень автоматизации. Развивая классический способ штрихов И. Лемана и А.П. Болотова, зарубежные и отечественные картографы предлагают свои алгоритмы этого способа изображения рельефа [Yoeli, 1985; Сербенюк, 1990; Imhof, 2007; Самсонов, 2008]. Аналогичные работы проводятся и в отношении автоматизации изображения «освещенных» и «затененных» горизонталей, впервые использованных Э.И. Тотле-

беном и К. Танака [Tanaka, 1932; Kennelly & Kimerling, 2001], а также в отношении создания наклонных горизонталей [Robinson et al., 1957; Kennelly & Kimerling, 2002], отмывки рельефа и точечного способа его изображения [Eckert, 1921; Виноградов, 1941; Новаковский и др., 2003; Верещака и др., 2016].

Вместе с цифровым моделированием рельефа и его характеристик возник широкий спектр новых сфер применения ЦМР: картографирование и дистанционное зондирование; геоботаника и гляциология; строительство и добывающая промышленность; моделирование военных действий и инженерные изыскания; моделирование гидрографической сети и наводнений [Catlow, 1986; Petrie and Kennie, 1990; Li and Zhu, 2000; Maune et al., 2001; Pike et al., 2008].

Принято считать, что первой практической сферой использования ЦМР стало гражданское, автомобильное строительство [Roberts, 1957; Коновалов, 1974]. Развитие транспортной инфраструктуры традиционно является приоритетной задачей любого государства. Ее создание в необходимых для общества масштабах осложняется дефицитом денежных средств, выделяемых на строительство дорог и трубопроводов. В связи с этим на первый план выходит аспект оптимизации расходов, большая часть которых приходится на земляные работы. Одним из способов такой оптимизации является планирование маршрутов для строительства объектов инфраструктуры с учетом рельефа и других факторов географической среды [Li et al., 2005; Рыльский, 2009; Al Samari, 2014].

В 1957 г. американский ученый R. Roberts первым предложил концепцию цифрового моделирования рельефа, основанную на построении профилей [Roberts, 1958]. Позднее С. Miller и R. Laflamme вместе с коллегами из Массачусетского технологического университета разработали первую систему моделирования поверхности. Эта система позволяла не только строить профили местности, но и рассчитывать объемы между ними [Miller et al., 1958]. В той или иной интерпретации данная система продолжает применяться в гражданском строительстве и сегодня, а сама методика выходит далеко за рамки строительства автомобильных дорог, занимая важное место в процессе сооружения трубопроводов и плотин, планирования зон искусственного затопления и пр.

Относительно недавно появившейся сферой применения ЦМР можно считать решение гидрографических задач путем моделирования речных бассейнов, наводнений и экологической опасности водохранилищ.

Теоретическим обоснованием моделирования географических полей в границах речного бассейна служит предположение о том, что бассейн является самостоятельной единицей географического пространства [Погорелов и др., 2007]. Русло реки и территория, с которой она собирает поверхностный и подземный стоки, в ландшафтном плане образуют сложную природную структуру — *бассейновую парагенетическую систему* [Мильков, 1981].

Морфометрическое изучение речных бассейнов принято называть Хортон-анализом, по фамилии первого исследователя, предложившего способ определения порядков рек [Хортон, 1948]. С течением времени его методика претерпела изменения и была усовершенствована А. Strahler и В.П. Философовым [Strahler, 1956; Философов, 1960]. С появлением цифрового моделирования рельефа и развитием аппаратных средств их обработки моделирование речных бассейнов и изучение их внутренней структуры получили новое звучание [Симонов и др., 2004, 2005; Яковченко и др., 2004].

В комплексе с инструментами геоинформационного анализа ЦМР позволяют решать задачи, связанные с прогнозом и мониторингом чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, в частности наводнений [Пьянков и др., 2014]. На основе ЦМР в ГИС составляется прогноз развития ситуации и дается оценка обстановки [Горбунов, 2011; Шарапов, 2004].

Работы по созданию гидрологических ГИС проводились во многих государственных учреждениях: Всероссийском научно-исследовательском институте по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций (ВНИИ ГОЧС) МЧС России [Шахраманьян, 2003, 2004], Национальном центре управления в кризисных ситуациях (НЦУКС) МЧС России [Епихин, 2010; Кобилов, 2009] и в некоторых регионах России [Павлов, 2006; Лукьянчикова, 2006; Шавнина и др., 2011].

Исходной информацией при моделировании выступали проектные материалы, натурные обследования и цифровые модели рельефа, построенные на основе данных, взятых с крупномасштабных карт (1:10 000–1:50 000). Один из алгоритмов моделирования зоны затопления представлен в работе [Шавнина, 2004]. В основе алгоритма лежит разбиение створа реки на ряд дискретных полигонов, каждому из которых присваивается среднее значение уреза воды. После преобразования полученных секторов в растровый слой он вычитается из ЦМР и сравнива-

ется с определенной высотой подъема воды в реке [Шавнина и др., 2011].

Созданные таким образом ГИС ориентированы в первую очередь на оценку фактического или вероятного ущерба от наводнений. Однако оперативный прогноз чрезвычайных ситуаций природного характера с их помощью получить нельзя [Пьянков и др., 2014].

Основным инструментом краткосрочного прогнозирования опасных гидрологических явлений являются модели формирования стока. Наиболее известными из них являются модель Mike SHE — для прогноза дождевого стока, модель DHVSM — для прогноза стока горных рек [Wigmosta, 2002; Zhao, 2009], а также концептуальные модели прогноза дождевых паводков TOPMODEL и IHACRES, интегрированные в ГИС SAGA.

Для прогноза распределения стока в период паводка или максимального расхода воды также используют широко освещенные в отечественной и зарубежной литературе метод кривых добегания либо метод единичного паводка [Аполлов и др., 1974; Бефани, 1977]. Наряду с традиционными графоаналитическими способами прогнозирования дождевых паводков на небольших водосборах накоплен определенный опыт использования математических моделей [Борщ, 2012]. Например, в Гидрометцентре России используется модель формирования талого, дождевого и тало-дождевого стока [Руководство по гидрологическим прогнозам, 1989].

Особое внимание при мониторинге опасных гидрологических явлений на основе ЦМР уделяется сооружению и эксплуатации водохранилищ. «Водоохранилище — это искусственный водоём, сформированный в долине реки водоподпорными сооружениями для накопления и хранения воды с целью её использования в хозяйственной деятельности» [Авакян, 1979]. Совместно с каналами и другими водопроводящими сооружениями водохранилища позволяют перераспределять сток, способствуя комплексному использованию водных ресурсов. Важный элемент проектирования водохранилища заключается в определении его технических параметров при обязательном учете природной и хозяйственной составляющих территории.

Описанная выше методика моделирования зон затоплений опробована на примере Уваровского, Очерского и Павловского водохранилищ [Шавнина и др., 2011]. Отдельные исследования затронули математико-картографические методы районирования водохранилищ по признаку

качественных изменений после понижения уровня воды [Матарзин, Мацкевич, 1970; Калинин и др., 2005; Пьянков, 2014]. Для моделирования процесса сработки водохранилищ и оценки мощности донных отложений рядом исследователей были применены геостатистические методы построения и обработки ЦМР [Максимович, 2012].

Серьезную опасность для населения, техносферы и природной среды представляют гидродинамические аварийные ситуации на водохранилищах. Начальная фаза гидродинамической аварии — прорыв плотины, в результате чего возникает волна прорыва, образующаяся во фронте потока воды. Скорость продвижения потока в горных и предгорных районах колеблется в пределах 80–100 км/ч. Высота волны находится в диапазоне от 2 до 12 м.

На примере Нижнезырянковского водохранилища гидрологами был рассмотрен сценарий развития гидродинамической аварии разрушения плотины водохранилища в результате сейсмических воздействий или воздействий в виде масштабного взрыва. Расчеты волны прорыва выполнены по программе «Волна» версия 2.0, разработанной ВИА им. Куйбышева, ЦНИЭКС, ВНИИ ГОЧС и предназначенной для прогнозирования масштабов затопления местности и характеристик волны прорыва при разрушении гидроузлов [Максимович, 2012].

Согласно сценарию развития гидродинамической аварии, поражающим фактором является разрушающая сила водного потока, определяемая его глубиной, шириной фронта движения воды и скоростью продвижения потока, обрушивающегося на территорию, расположенную в нижнем бьефе водохранилища (жилые дома и хозяйственные постройки, объекты промышленности и инфраструктуры). Последствия такой аварии: разрушение силой потока зданий и сооружений, техники и оборудования, затопление жилых домов и хозяйственных построек, находящихся в зоне воздействия потока. Построение зон затопления и осушения водохранилища в результате сработки осуществлялось с использованием программы ArcView GIS 3.2a [Максимович, 2012].

Вслед за морфометрическими способами анализа карт цифровое моделирование рельефа заняло свою методическую нишу в геологии и изучении почв. Первые работы с использованием ЦМР в этих дисциплинах были проведены в 1960-е гг. [Троех, 1964; Белонин и др., 1968]. В 1980-е гг. определились два основных тренда: моделирование свойств почвы [Burt et al., 1985; Pennock et al., 1987] и анализ геологических



структур [Moore et al., 1983; Schowengerdt et al., 1983]. В 1990-е гг. в почвоведении [Martz et al., 1990; Odeh et al., 1991; Moore et al., 1993; Quinn et al., 1991; Bell et al., 1994; King et al., 1999] и в геологии [Chorowicz et al., 1991; Onorati et al., 1992; Иоффе и др., 1997; Johansson, 1999] начался массовый переход от морфометрических методов к цифровому моделированию рельефа.

Определяемые по ЦМР свойства рельефа могут быть успешно использованы во многих исследованиях, ориентированных на изучение Земли и освоение ее ресурсов, в частности – в целях прогнозирования распределения почвенных свойств [Bishop et al., 2005], моделирования эрозионных процессов [Mitasova et al., 1995], картографирования растительности [Bolstad et al., 1992], оценки вероятности склоновых процессов [Guzzetti, 2005], анализа биоразнообразия и репродуктивных особенностей диких животных [Hernandez Encinas, 2006].

Геоморфометрический анализ способствует извлечению из модели рельефа элементарных почв и ландшафтов. Большую роль при этом играет автоматический метод определения элементарных форм рельефа с помощью неконтролируемой классификации нечетких множеств [Burrough et al., 2000; Козлов, 2009]. Кроме того, географическая направленность использования цифровых данных о рельефе находит свое отражение в таких научных областях как моделирование распространения ветровых потоков и солнечной радиации, управление сельским хозяйством [Li et al., 2005]. В последнее время возрастает роль ЦМР и моделей характеристик рельефа в реализации программ создания инфраструктур пространственных данных [Ротанова и др., 2014].

## **§ 1.6. Выводы**

В заключение главы необходимо сделать ряд обобщающих выводов.

1. ЦМР нашли широкое применение в научной и хозяйственной деятельности человека, став неотъемлемой частью почвенных и геологических исследований, инженерных работ и гражданского строительства, моделирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и многих других исследований. Аналитические карты и ГИС, создаваемые на основе различных характеристик рельефа, полученных по ЦМР, создают необходимую базу для принятия решений. Полезный эффект от использования ЦМР в научной и хозяйственной деятельности

человека, в условиях, когда управленческие или технические решения должны быть приняты обоснованно и оперативно, во многом зависит от свойств ЦМР: их математической точности, актуальности данных о рельефе и местности, возможностей оперативной обработки.

2. Наиболее оптимальные для анализа рельефа способы представления ЦМР — это триангуляционные (TIN) и сеточные (матрицы высот) модели.

3. Среди множества источников данных для создания ЦМР до недавнего времени лидирующие позиции занимали бумажные топографические карты. Однако их использование в современных условиях столкнулось с определенными ограничениями. Принцип географического правдоподобия в изображении рельефа на отечественных топографических картах оказал влияние на их математическую точность, равно как и на математическую точность ЦМР, создаваемых на их основе. Кроме того, традиционные топографические карты не отвечают требованиям актуальности: многие из них создавались десятки лет назад и к настоящему времени значительно устарели. И наконец, сам механизм перевода бумажных топографических карт в цифровую форму путем векторизации сопряжен со значительным объемом ручной работы.

4. С 2000-х гг. на первый план для оперативного создания ЦМР вышли методы обработки материалов ДЗЗ: данных аэро- и космической сканерной съемки, материалов лидарной и радарной съемки местности. Наиболее эффективным способом получения данных о рельефе является фотограмметрическая обработка аэро- и космических снимков средствами ЦФС. Главными достоинствами создания ЦМР фотограмметрическим методом можно считать оперативность получения исходных данных, автоматизацию их обработки и высокую точность готовых моделей.

## ГЛАВА 2

### **МЕТОДИКА КОМПЛЕКСНОГО ГЕОИНФОРМАЦИОННО- ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК**

Совместное использование цифровых фотограмметрических и геоинформационных технологий в географических исследованиях известно с 1990-х гг. Наиболее комплексными и фундаментальными работами в этой области являются монографии [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009]. Авторы обеих монографий рассматривают вопросы получения и контроля точности исходных данных для создания ЦМР, принципы моделирования и визуализации рельефа, оценку точности созданных моделей, их интерпретацию для определения характеристик рельефа и использование для решения различных научных и производственных задач.

Однако фотограмметрические технологии обработки материалов ДЗЗ в исследованиях [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009] играют лишь второстепенную, вспомогательную роль. Наряду с цифрованием бумажных топографических карт и полевой инструментальной съемкой, аналитические приемы фотограмметрии рассматриваются указанными авторами как один из многих способов создания ЦМР. При этом они не останавливаются на деталях цифровой фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ, указывая лишь на общие методические принципы. И если обработка классических стереопар аэро- и космических снимков в монографиях указанных авторов нашла свое отражение, то возможностям цифровой фотограмметрической обработки специфических данных ДЗЗ (аэроснимков с беспилотных летательных аппаратов; наземных снимков; разновременных космических снимков с разных витков движения сенсора) в этих работах уделено недостаточно внимания.

В отечественной науке исследования по вопросам использования стереопар разновременных космических снимков [Кравцова и др., 2014],

а также вопросам использования малоформатных цифровых камер для съемки с БПЛА и наземной съемки [Золотарев и др., 2004, Чибуничев и др., 2016] проводятся фрагментарно. Как правило, они носят сугубо фотограмметрический характер вне связи с географическими исследованиями, либо направлены на решение специфических картографических задач [Кравцова и др., 2014]. Комплексного решения, позволяющего увязать разные типы данных ДЗЗ, критерии их выбора и технологии обработки в зависимости от поставленной географо-картографической задачи, в настоящий момент не существует.

Как уже было сказано, согласно работам [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009], основную роль в тандеме фотограмметрических и геоинформационных технологий моделирования рельефа играют последние. Обработка ЦМР, направленная на определение различных характеристик рельефа и составление тематических карт, реализуется средствами ГИС-пакетов.

Вместе с тем, возможности и функционал ЦФС выходят далеко за пределы стандартного построения ЦМР. И эти возможности позволяют оптимизировать, автоматизировать и качественно улучшить методику составления тематических карт. К числу таких специфических особенностей ЦФС относятся автоматизированные алгоритмы построения ЦМП и ЦМР высокой детальности; автоматизированные инструменты выделения и фильтрации строений и растительности; возможность работы в стереорежиме.

Проведение стереоизмерений представляет собой наиболее надежный способ извлечения данных о высотах различных природных и антропогенных объектов в местах, где такие данные отсутствуют или затруднен их сбор иными инструментальными средствами. А возможность полностью автоматического построения ЦМР с размером ячейки равным размеру пиксела изображения выводит фотограмметрический метод в лидеры по производительности и эффективности в сравнении с другими способами создания ЦМР.

В связи со всем, изложенным выше, представляется целесообразным внести в уже существующие методики совместного использования фотограмметрических и геоинформационных технологий ряд принципиальных уточнений и дополнений, которые позволят предложить комплексное решение и существенно автоматизировать процесс создания карт характеристик рельефа для решения различных географо-

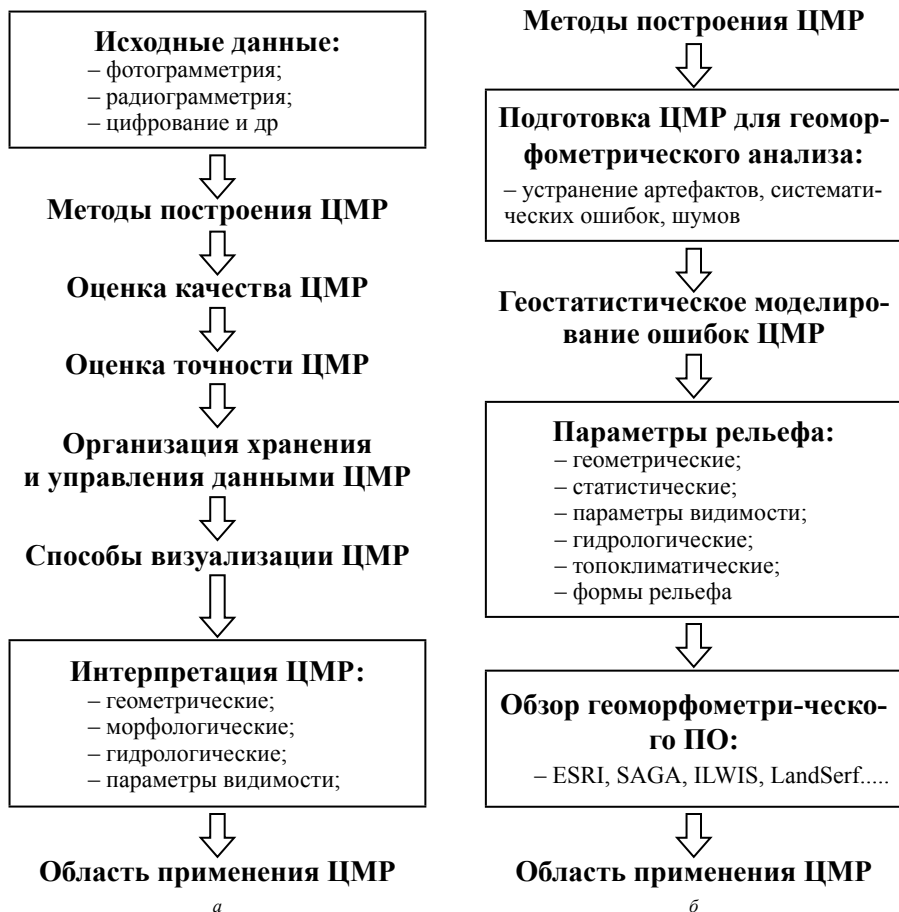
картографических задач.

В рамках данной главы дается определение понятию «комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа»; изложена и обоснована усовершенствованная методика такого моделирования; сформулированы критерии выбора данных ДЗЗ в зависимости от поставленных географо-картографических задач, рассмотрены особенности фотограмметрического построения ЦМР как по материалам классической аэро- и космосъемки, так и по материалам разновременной космической съемки, съемки с БПЛА и наземной стереосъемки малоформатными цифровыми камерами; изложены ключевые моменты геоинформационной обработки полученных ЦМР. При рассмотрении этих вопросов особое внимание уделено классификации географо-картографических задач и связанных с ними характеристик рельефа, а также специфике геоинформационного моделирования затопления территории, вызванного чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

## **§ 2.1. Общая схема методики**

Обоснование методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа и его характеристик должно основываться на общих представлениях о соотношении ее составных частей и сравнении с известными разработками в этой области (рис. 8).

Попытки авторов [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009] систематизировать все известные представления о ЦМР предсказуемо отразились на высокой степени их обобщения. Как видно из схем, существующие технологии создания тематических карт характеристик рельефа (области применения ЦМР) рассматривают материалы ДЗЗ и фотограмметрический метод их обработки как один из инструментов построения ЦМР, наряду с полевой топографической съемкой, лидарной съемкой и цифрованием топографических карт. Особенности фотограмметрического метода освещены в указанных работах исключительно на базе классических примеров аэро- и космической съемки. Недостаточно внимания уделено критериям выбора данных ДЗЗ, специфике обработки «неклассических» материалов ДЗЗ: снимков с БПЛА, разновременных космических изображений, наземных снимков. Фундаментальный характер работ [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009] обусловил характерное



**Рис. 8. Общие схемы совместного использования фотограмметрических и геоинформационных технологий для создания тематических карт:**

*a* — по Li et al, 2005; *б* — по Hengl et al, 2009

смещение акцентов в изложении элементов методики: практическое применение ЦМР оказалось вторично по отношению к свойствам ЦМР, методам их построения, оценки и визуализации.

Указанные недостатки были учтены автором при усовершенствовании методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа и его характеристик.

Комплексное геоинформационно-фотограмметрическое моделирование рельефа представляет собой оперативное, автоматизированное

ное создание ЦМП, ЦМР и моделей характеристик рельефа на основе материалов ДЗЗ разного типа с помощью фотограмметрических и геоинформационных технологий.

Комплексность методики заключается в разнообразии: характеристик рельефа и исследований, связанных с их определением (гидрографических, морфометрических, топоклиматических, геометрических); используемых типов данных ДЗЗ (классических аэроснимков, снимков с БПЛА, материалов классической и разновременной космической съемки, наземных изображений); критериев выбора снимков для решения географо-картографической задачи (пространственное разрешение, время съемки, процент облачности и др.); используемых средств и алгоритмов обработки данных (фотограмметрических, геоинформационных и др.); составляемых тематических карт.

Рассматривая исследования по определению характеристик рельефа и все географо-картографические задачи, решение которых так или иначе связано с использованием данных о рельефе и его характеристиках, можно представить следующую схему методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа (рис. 9).

#### *Формулирование задачи*

В основе указанной методики лежит правильное формулирование задачи. В общем случае все географо-картографические задачи можно сгруппировать по характеристикам рельефа, с которыми они непосредственно связаны. В соответствии с работами [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009] четыре основные категории таких характеристик – это геометрические, морфометрические, гидрографические и топоклиматические характеристики рельефа.

#### *Определение ключевых показателей решения задачи*

Сформулировав задачу, важно выделить специфические черты и примеры объекта/объектов исследования, которые могут оказать существенное влияние на процесс моделирования. Список таких особенностей может дополняться и изменяться в ходе исследования. Кроме того, сразу же после постановки задачи целесообразно определить те ключевые показатели, которые будут свидетельствовать о ее решении и достижении положительного результата. Это может быть список отдельных элементов, которые должны стать частью тематического содержания карты. Также это могут быть статистические показатели,



**Рис. 9. Общая схема методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа:**

— фотограмметрическая часть; — геоинформационная часть

указывающие на достоверность результатов моделирования, например, полученные путем сравнения расчетных результатов с независимыми референсными данными.

### *Источники данных и методы обработки*

Основные и обязательные методы решения географо-картографических задач в рамках рассматриваемой методики — картографический и геоинформационный. В зависимости от особенностей задачи эти методы могут дополняться и действовать в комплексе с другими, более специфическими и узконаправленными подходами и алгоритмами анализа данных.



Самый крупный блок схемы включает в себя источники данных и методы их обработки. К числу обязательных материалов, необходимых для создания тематических карт, относятся ЦМР и общегеографическая основа (объекты растительности, гидрографии, дорожная сеть, здания и сооружения). Однако специфика поставленной задачи всегда предъявляет к набору данных, необходимых для моделирования, дополнительные требования. Так, например, гидрографические задачи также требуют обязательного учета соответствующей гидрологической информации, а топоклиматические задачи — метеорологической информации.

Для получения указанной информации существует большое количество источников и методов их обработки. Как уже отмечалось, ЦМР могут быть построены путем цифрования топографических карт, обработки материалов полевой топографической и лидарной съемки и др. Однако, в рамках данного исследования внимание будет акцентировано на создании ЦМР по данным ДЗЗ фотограмметрическим способом. Эти же данные, наряду с растровыми топографическими картами и векторными данными из открытых источников Internet, могут использоваться для получения общегеографической информации, необходимой для создания карты. Векторизация объектов общегеографической основы может осуществляться средствами ЦФС как автоматически, так и вручную в стереорежиме. Источниками тематической информации об объекте исследования, как правило, являются фактические и статистические данные из официальных справочников органов исполнительной власти.

### ***Определение и уточнение критериев выбора снимков***

Выбор данных для создания общегеографической основы карты, и в особенности, выбор снимков для создания ЦМР — один из наиболее важных элементов рассматриваемой методики. Растровые и векторные топографические карты, в том числе полученные из открытых источников Internet, должны быть актуальными по своему содержанию и выполненными в требуемом для проведения исследования масштабе.

Основные критерии при выборе материалов ДЗЗ также следует сформулировать исходя из объекта и задачи исследования. Географо-картографические задачи предъявляют к материалам ДЗЗ специфические требования и вводят ограничения на тип съемки (аэро- или космическая), спектральный диапазон съемки (панхроматический или

многозональный), время съемки и пространственное разрешение изображений.

Материалы аэросъемки, как правило, используются для создания и обновления кадастровых и крупномасштабных топографических карт и планов. В отличие от космической съемки организация аэросъемки требует получения дополнительного разрешения органов исполнительной власти (Генштаба Вооруженных Сил РФ, ФСБ РФ и др.) на использование воздушного пространства, что является безусловным ограничением материалов аэросъемки. В последнее время в рамках этого направления активно развивается и съемка с беспилотных летательных аппаратов [Медведев и др., 2016]. Когда речь идет о необходимости оперативного картографирования (например, наводнений или других опасных природных явлений), целесообразно использовать актуальные материалы космической съемки. В таких случаях большой территориальный охват и возможность одновременного использования нескольких спутников делает космосъемку более привлекательным источником данных ДЗЗ.

Наземная съемка, как правило, проводится для создания крупномасштабных карт и планов на локальные, небольшие по площади участки местности, аэросъемка которых экономически нецелесообразна или затруднена природными или погодными условиями. Конструктивные особенности камер фототеодолитов, в отличие от цифровых камер, позволяют минимизировать дисторсию объективов. Для уменьшения влияния дисторсии при наземной съемке цифровыми камерами рекомендуется использовать длиннофокусные или нормальноугольные объективы.

Обработка космических и аэроснимков сопряжена с определенными особенностями. В отличие от аэроснимка (фотографического или цифрового), построенного в центральной проекции, изображение космического сканерного снимка по направлению полета и направлению сканирования строится в различных проекциях. Это следует учитывать при фотограмметрической обработке данных ДЗЗ. Спектральный диапазон съемки важен при создании 3D-моделей и дешифрировании объектов местности.

Когда речь идет о выборе архивных космических снимков, важным критерием является время съемки. Стереопара изображений должна содержать актуальные и значимые для проведения исследования стереобразующие детали, должна быть выполнена в определенный сезон

года, как правило, в отсутствие снежного покрова и облачности в целевой части снимков.

От пространственного разрешения исходных данных напрямую зависит масштаб картографирования: чем меньше размер пиксела снимка, тем крупнее масштаб карты. Пространственное разрешение аэроснимков, в том числе снимков с БПЛА, в зависимости от параметров камеры и высоты полета варьируется от единиц до десятков сантиметров. Космические снимки характеризуются большими показателями пространственного разрешения: от десятков сантиметров до сотен метров и километров.

Существует несколько подходов и критериев выбора пространственного разрешения снимков в зависимости от масштаба карт, составляемых на их основе. В инструкции по фотограмметрическим работам при создании топографических карт и планов [Инструкция, 2002] изложена методика расчета размера пиксела при сканировании аналогового снимка в зависимости от масштаба фотографирования и масштаба создаваемой карты. Применительно к материалам цифровой космической и аэросъемки этот вопрос на официальном уровне остается неурегулированным.

С.А. Кадничанский [2009] при выборе пространственного разрешения снимков предлагает учитывать не столько критерии точности, сколько потребности дешифрирования изображений и разработанные им таблицы номинальных рекомендуемых размеров пиксела. На примере снимков GeoEye он обосновывает пригодность материалов ДЗЗ с пространственным разрешением 0,5 м для составления карт масштаба 1:10 000.

Интерпретация Инструкции [2002], выполненная компаниями «СОВЗОНД» и «РАКУРС», увязывает масштаб карт и пространственное разрешение космических снимков через масштаб ортофотопланов, создаваемых на их основе [<http://www.racurs.ru/>, <http://sovzond.ru/>]. Исходя из требований [Инструкция, 2002] к точности определения плановых координат по ортофотоплану (0,2 мм в масштабе плана), для снимков IKONOS с разрешением 1 м возможный масштаб ортофотоплана — 1:5 000, для снимков ALOS с разрешением 2,5 м — 1:12 500. Ортофотопланы указанных масштабов могут использоваться для обновления топографических карт и составления отдельных элементов тематических карт аналогичных масштабов.

В Инструкции [2002] также указаны требования к разрешающей способности фотопланов (0,07 мм в масштабе плана). Это ограничение направлено на обеспечение пригодности снимков для дешифрирования и составления карт в определенном масштабе.

В работе [Изображения Земли из космоса..., 2005] обосновывается необходимость учета при выборе снимков графической точности рисовки и печати карт (0,1 мм). Например, для составления общегеографических карт масштаба 1: 100 000 снимки должны иметь разрешение не меньше 10 м. Авторы уточняют, что при тематическом картографировании требования к точности определения положения объектов будут ниже, чем для общегеографических карт. Соответственно по одним и тем же материалам ДЗЗ можно составлять тематические карты более крупного масштаба.

Результаты применения изложенных критериев показаны в табл. 1. Таким образом, следует подчеркнуть, что на сегодняшний день нет официального нормативного документа, позволяющего рассчитать пространственное разрешение цифровых аэро- и космических снимков для составления карт того или иного масштаба. Обобщая результаты существующих подходов и критериев, можно заключить, что материалы космической съемки сверхвысокого пространственного разрешения пригодны для составления карт масштаба 1:5 000 и мельче, а материалы космической съемки высокого разрешения – для составления карт масштаба 1:25 000 и мельче.

Т а б л и ц а 1

**Пространственное разрешение снимков (м) для составления карт  
разного масштаба**

Масштаб карты	Критерий (ограничение)			
	Рекомендуемые размеры пиксела, по Кадничанскому, 2009	Разрешающая способность фотоплана 0,07 мм, Инструкция, 2002	Предельная графическая точность карт 0,1 мм	Точность определения положения объектов по фотоплану, Инструкция, 2002
1:5 000	0,33	0,35	0,5	1
1:10 000	0,5	0,7	1	2
1:25 000	0,8	1,75	2,5	5

Данные аэросъемки позволяют создавать и обновлять топографические и тематические карты и планы масштаба до 1: 2 000 и крупнее. В зависимости от того, насколько важными являются вопросы пространственной привязки стереомоделей, их точности в плане и по высоте, производится уточнение критериев выбора снимков. На точность стереомоделей, а соответственно и ЦМР, создаваемых на их основе, помимо пространственного разрешения изображений серьезное влияние оказывает обеспеченность территории исследования необходимым количеством опорных точек с заданной точностью. Вместе с тем, материалы космической съемки, получаемые сенсорами с некоторых спутников, за счет использования особых алгоритмов определения параметров внешнего ориентирования (RPC-коэффициенты, rational polynomial coefficients) позволяют снизить влияние этого фактора.

Использование конкретного алгоритма фотограмметрической обработки снимков с различных сенсоров показано в табл. 2.

В случае если при сопоставимых характеристиках пространственного разрешения изображений требуется построить модель высокой точности, однако, возможности организовать полевые геодезические измерения опорных точек нет, представляется целесообразным использовать космические снимки с RPC-моделью обработки.

Так, например, для получения сопоставимых результатов по точности обработка стереопары панхроматических изображений со спутника Ресурс-ДК (пространственное разрешение 1 м) потребует наличия минимум четырех опорных точек, а обработка стереопары панхроматических снимков со спутника IKONOS (пространственное разрешение 1 м) — минимум одной опорной точки.

Уточнение выбора снимков может производиться и по другим критериям, в зависимости от степени проработанности темы исследования и необходимости учета других важных для моделирования факторов.

Т а б л и ц а 2

**Алгоритмы обработки изображений с различных спутников**

Алгоритм обработки	Спутник
Строгий	Ресурс-ДК, FORMOSAT-2, KOMPSAT-2, SPOT 1-7, TERRA/ ASTER, EROS A,B
RPC	GeoEye-1, IKONOS, KOMPSAT-3, QuickBird, OrbView-3, WorldView 1-3, Cartosat-1 (IRS P5), ALOS (PRISM), Pleiades, Ресурс-П, TH-1
Универсальный	Landsat 7/ ETM +, IRS-1C, ALOS (AVNIR 2)

### *Фотограмметрическая обработка материалов ДЗЗ*

После первоначального выбора набора снимков, удовлетворяющих основным критериям поставленной задачи, следует этап формирования на их основе предварительной стереомодели изучаемой территории. Следует отметить, что основным критериям может удовлетворять сразу несколько разнородных наборов данных. Согласно теории фотограмметрии, для получения стереомодели требуется по меньшей мере два обладающих взаимным перекрытием изображения. В результате проведения ряда обязательных фотограмметрических операций, реализуемых средствами ЦФС: внутреннего, взаимного, внешнего ориентирования снимков и их последующего уравнивания, из снимков формируются стереопары. Далее на их основе средствами ЦФС выполняются построения цифровой модели поверхности (ЦМП) и цифровой модели рельефа (ЦМР).

Получение данных о высотах по стереопаре может выполняться как в ручном, так и в автоматическом режиме. Измерение пикетов вручную (стереовекторизация) осуществляется оператором в стереорежиме с применением различного технического оборудования: стереомониторов; анаглифических; поляризационных или затворных очков. В процессе стереовекторизации оператор может измерять пикеты как произвольно, так и систематически. В последнем случае речь обычно идет о векторизации структурных линий рельефа, объектов гидрографии, контуров растительности на высоте крон и антропогенных объектов на высоте крыш. При этом выбор объектов для стереовекторизации зависит от типа выходного продукта: ЦМР или ЦМП. Контуров растительного покрова и антропогенных объектов при создании ЦМР не учитываются.

Алгоритмы автоматического построения позволяют без вмешательства оператора создавать «плотные» ЦМП — с размером ячейки, равным размеру пиксела (пространственному разрешению) исходных изображений. Для создания ЦМР на основе ЦМП производится автоматическая процедура фильтрации строений и растительности.

#### *Оценка пригодности ЦМР и алгоритмов их обработки*

С целью оценки пригодности построенных ЦМР для решения задачи исследования целесообразно сравнить их с независимыми референсными моделями, построить матрицы разности высот и статистически проанализировать гистограммы их распределения.

На основе ЦМР, пригодность которых для решения задач исследования была подтверждена, можно реализовать предварительные модельные расчеты с учетом предложенных методов, подходов и алгоритмов геоинформационной обработки. В ходе анализа предварительных результатов моделирования и принимая во внимание специфические особенности отдельных примеров объекта исследования, методика геоинформационной обработки может уточняться и корректироваться.

Окончательный результат моделирования после внесения соответствующих поправок в методику обработки должен быть верифицирован путем сравнения с независимыми, официальными источниками и результатами, полученными другими алгоритмами.

Расхождение расчетных величин с референсными показателями должно находиться в пределах, предусмотренных ключевыми показателями решения задачи, сформулированными в начале исследования. Таким образом происходит сверка запланированных и фактических результатов, соответствие которых свидетельствует о правомочности использования методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа для решения поставленных географо-картографических задач.

Верифицированные результаты моделирования следует проанализировать, и в свете такого анализа дать рекомендации по рациональному использованию полученных данных для решения научных и производственных задач, тесно связанных с задачей исследования.

## **§ 2.2. Фотограмметрический блок методики комплексного моделирования рельефа**

Схема методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа (см. рис. 9) носит обобщенный характер. В ней сформулирована принципиальная, с теоретической точки зрения, последовательность действий, необходимых для решения географо-картографической задачи по материалам ДЗЗ средствами цифровых фотограмметрических и геоинформационных технологий.

Детальные алгоритмы и технологические приемы фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ (красный пунктир на рис. 9) и геоинформационной обработки ЦМР, созданных на их основе (синий пунктир на рис. 9), являясь неотъемлемой частью методики, остались

за рамками ее общей схемы и в связи с этим требуют отдельного, более детального описания.

## Классические материалы аэро- и космической съемки

Фотограмметрический блок методики (рис. 10) включает в себя процессы фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ – классических стереопар аэро- и космических снимков, а также специфических данных (аэроснимков с БПЛА; разновременных космических снимков с разных витков движения сенсора; наземных снимков).

Сформированная из снимков стереомодель — необходимая основа построения ЦМР.

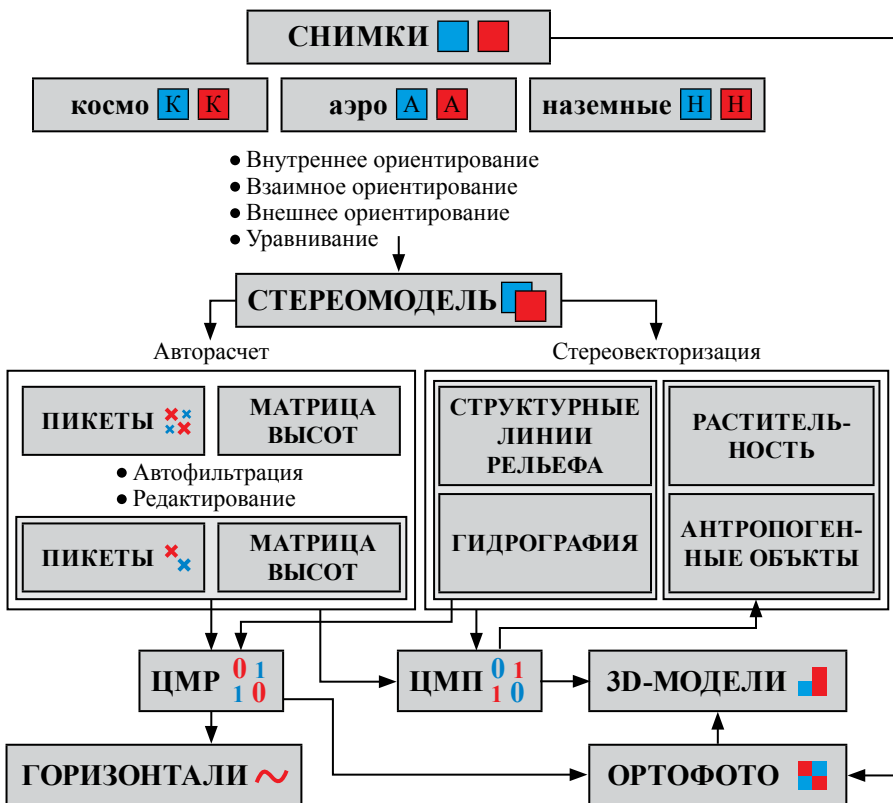


Рис. 10. Фотограмметрический блок методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа



### *Ориентирование изображений*

Цель ориентирования — вычисление неизвестных угловых и линейных величин, определяющих взаимное положение снимков в пространстве на момент съемки. *Элементы ориентирования* снимков принято разделять на элементы *внутреннего, взаимного и внешнего* ориентирования.

Для наземных и аэроснимков элементы внутреннего и внешнего ориентирования задаются вручную или полуавтоматически с учетом данных паспорта камеры. Для космических снимков — автоматически, на основе метаданных изображений и сопроводительных файлов к ним. В зависимости от сенсора космические изображения могут поставляться с различным набором таких файлов, что обуславливает использование тех или иных алгоритмов фотограмметрической обработки снимков: строгий, универсальный или RPC-алгоритм (rational polynomial coefficients — коэффициенты рациональных полиномов).

*Строгий алгоритм* позволяет обрабатывать космические снимки, которые содержат файлы метаданных с элементами внутреннего и внешнего ориентирования. Алгоритм обеспечивает точность обработки соизмеримую с величиной пространственного разрешения снимка по средним квадратическим ошибкам (СКО) на контрольных точках, что позволяет использовать минимальное количество опорных точек и получать более высокую точность при вычислении элементов внешнего ориентирования [<http://www.racurs.ru>].

*Универсальный алгоритм* с использованием параллельно-перспективной модели позволяет обрабатывать любые космические изображения, однако, требует при этом большего, по сравнению со строгим алгоритмом, числа опорных точек на стереопару (минимум 6 опорных точек).

*RPC-алгоритм* используют для обработки материалов дистанционного зондирования, которые содержат RPC-файлы метаданных (построчные данные об изменении элементов внешнего ориентирования) снимков. Наличие RPC-коэффициентов позволяет использовать небольшое количество опорных точек [<http://www.racurs.ru>].

К элементам внутреннего ориентирования аэроснимков относятся фокусное расстояние фотокамеры и координаты главной точки. В зависимости от типа камеры (цифровая, аналоговая) и точности ее калибровки, дополнительно могут задаваться и другие параметры: коэффициенты

дисторсии объектива, размер пиксела или размер сенсора (для цифровых камер), координаты меток (для аналоговых камер).

Элементы взаимного ориентирования – величины, определяющие взаимное положение снимков, образующих стереопару во время фотографирования. Для их расчета на снимках выполняют измерение соответственных связующих точек.

Модель, полученная в результате взаимного ориентирования снимков, не имеет определенного масштаба и в пространстве расположена произвольно. Дальнейшей задачей является внешнее ориентирование модели, которое состоит в приведении ее к заданному масштабу относительно геодезической системы координат. К элементам внешнего ориентирования относятся координаты центров проекции и углы наклона снимков в момент экспозиции. Для определения элементов ориентирования снимков на практике используется два основных способа.

*Измерения в полете.* Координаты центров проекции и углы наклона снимков определяются с помощью систем спутникового позиционирования и гироскопических приборов.

*Традиционный способ,* основанный на аналитическом сравнении координат опорных точек. Координаты точек определяются по картам или в ходе полевых работ.

### ***Уравнивание блока изображений***

Необходимым и достаточным требованием для уравнивания блока является наличие элементов внутреннего и взаимного ориентирования. Это значит, что уравнять блок фототриангуляции можно и в свободной модели — без данных о геопривязке снимков (элементов внешнего ориентирования). Однако при наличии опорных точек результаты уравнивания будут сориентированы в заданной системе координат.

Уравнивание блоков снимков центральной проекции предполагает предварительный выбор метода уравнивания и определение допусков на ошибки:

*начальное приближение* (методом независимых маршрутов или по схеме блока) для выявления грубых ошибок — неправильно заданных координат опорных точек или ошибок в положении соответственных связующих точек);

*метод независимых стереопар* (для выявления небольших ошибок);

*метод связок* (для детального окончательного уравнивания блока).

Для сканерных космических изображений предварительный выбор параметров уравнивания зависит от использования того или иного алгоритмов обработки данных: строгий, универсальный, RPC-алгоритм.

### ***Извлечение данных о высотах***

На основе полученных стереопар осуществляется следующий этап фотограмметрической обработки снимков – извлечение высотной информации. Под извлечением высотной информации следует понимать ручное и автоматизированное построение ЦМП и ЦМР в векторной (облака точек, TIN) и растровой форме (матрицы высот).

### ***Стереовекторизация***

Стереовекторизация осуществляется в стереорежиме с использованием специального оборудования: зеркальных или высокочастотных мониторов, анаглифических, поляризационных или затворных очков. Суть стереовекторизации – ручная оцифровка в стереорежиме элементов общегеографического содержания карт: структурных линий рельефа, гидрографической сети, растительности (по верхнему краю кроны), строений и сооружений (по контурам крыш) – в форме точечных, линейных или полигональных объектов.

### ***Автоматизированное построение ЦМП и ЦМР***

Помимо стереовекторизации снимков вручную, существует автоматизированный способ извлечения информации о высотах – автоматический расчет пикетов и автоматическое построение плотных ЦМП и ЦМР в сеточной (матрицы высот) и триангуляционной форме (TIN). Принцип действия автоматического алгоритма базируется на анализе коэффициента корреляции между соответственными точками снимков стереопары.

Для построения ЦМР и ЦМП по пикетам накладываются разные ограничения на состав исходных данных. ЦМР целесообразно создавать на основе отфильтрованных пикетов и проведенных в стереорежиме структурных линий рельефа и объектов гидрографии. А ЦМП – на основе неотфильтрованных пикетов, контуров строений (по границам крыш) и растительности (по верхнему краю кроны).

Современные ЦФС позволяют в значительной степени автоматизировать процесс построения ЦМП и ЦМР, обеспечивая при этом их

высокую детальность: размер ячейки сеточной ЦМР (матрицы высот) сопоставим с пространственным разрешением изображения стереопары. По соотношению скорость/качество наиболее распространенным алгоритмом автоматизированного построения ЦМР и ЦМП на сегодняшний день является алгоритм SGM (semi-global matching). Он реализован в большинстве современных ЦФС (Trimble INPHO, PHOTOMOD, Socet Set и др.) и сочетает в себе скорость локальных и качество глобальных алгоритмов построения ЦМП. Общий принцип работы SGM основан на расчете диспаратности (разницы смещения проекции точки относительно центра камеры на первом и втором снимках) в каждом пикселе изображения [Hirschmuller, 2005]. Существуют и другие алгоритмы автоматизированного построения плотных ЦМР, например, IDM (iterative deformation method), которые показывают лучшие результаты, по сравнению с алгоритмом SGM для отдельных типов местности [<http://www.racurs.ru>].

#### ***Сравнение скоростей построения ЦМР ручным и автоматизированными методами в ЦФС PHOTOMOD***

Для сравнения эффективности построения ЦМР средствами ЦФС PHOTOMOD в автоматизированном и ручном режимах произведен ряд экспериментов на примере различных материалов ДЗЗ и районов исследования. Ожидаемая скорость ручного измерения пикетов средствами ЦФС сопоставима со скоростью их измерения в аналоговых фотограмметрических системах (АФС). За основу взят квадратный участок площадью 1 000 000 м<sup>2</sup>, шаг ручного измерения пикетов – 20 м, размер ячейки ЦМР – 20 м. Особенности тестовых материалов, территорий исследования и результаты оценки скорости построения ЦМР представлены в табл. 3. Особенности фотограмметрической обработки указанных материалов ДЗЗ подробно описаны в главе 3.

Для расчета ЦМР в автоматизированном режиме использован компьютер на базе двухядерного процессора Intel Core 2 Duo с частотой 2,4 ГГц и оперативной памятью 16 ГБ.

Сопоставление скоростей автоматизированного и ручного создания ЦМР позволило сделать следующие выводы.

1. Автоматизированный расчет ЦМР предсказуемо быстрее создания ЦМР на основе пикетов, векторизованных вручную в стереорежиме.
2. Средняя скорость автоматизированного построения ЦМР методом IDM составляет порядка 180 000 пиксел/ч для равнинной местности

**Сравнение скорости построения ЦМР ручным и автоматизированными методами**

Территория	Спутник/ разрешение, м	Характер рельефа	Перепад высот, м	Время ручной вектори- зации, с	Время автопо- строения (метод), с	
					IDM	SGM
Благовещенск, Амурская обл.	World- Wiew1/0,6	Равнинный	30	5000	50	15
Бийск, Алтайский край	World- Wiew1/0,5	Равнинный	40	5250	50	20
Джермук, Армения	ALOS/2,5	Горный	300	6250	55	35
Крымск, Краснодарский край	SPOT5/2,5	Горный	400	6750	55	50

и порядка 165 000 пиксел/ч – для горной местности.

3. Средняя скорость автоматизированного построения ЦМР методом SGM составляет порядка 450 000–600 000 пиксел/ч для равнинной местности и порядка 180 000–255 000 пиксел/ч — для горной местности.

4. Средняя скорость построения ЦМР на основе пикетов, векторизованных вручную в стереорежиме, составляет порядка 1 750–1 800 пиксел/ч для равнинной местности и порядка 1 300–1 450 пиксел/ч — для горной местности.

5. На скорость автоматического построения ЦМР ключевое влияние оказывают следующие факторы: производительность аппаратных средств (число ядер, объем оперативной памяти), перепад высот и сложность рельефа территории, радиометрическое качество материалов ДЗЗ (наличие/отсутствие смазов и облачности, яркость, контрастность). Чем больше расчлененность рельефа и перепад высот местности, тем ниже скорость расчетов.

6. На скорость ручной стереовекторизации пикетов влияние оказывают: перепад высот и сложность рельефа территории, радиометрическое качество материалов ДЗЗ (наличие/отсутствие смазов и облачности, яркость, контрастность), опыт оператора.

7. Пространственное разрешение космических снимков не влияет на скорость построения ЦМР, поскольку размер ячейки ЦМР (20 м) существенно больше размера пиксела изображений (0,5 и 2,5 м).

### *Автоматизированное выделение контуров строений и растительности в ЦФС PHOTOMOD на основе плотных ЦМП и ЦМР*

Ключевым преимуществом ручной стереовекторизации, по сравнению с автоматизированным построением плотных ЦМР (матриц высот), является возможность геометрически точной рисовки отдельных контуров, в том числе контуров высотных объектов, составляющих топографическую основу карт: лесной растительности, зданий и сооружений. Стереовекторизация — один из традиционных инструментов обновления общегеографического содержания топографических карт.

«Плотные» ЦМР (матрицы высот), построенные автоматически, представляют собой единую растровую неструктурированную поверхность и непосредственно для обновления общегеографического содержания карт не предназначены. На их основе в автоматическом режиме возможно лишь построение горизонталей.

В ходе исследования была предпринята попытка выяснить, можно ли на основе «плотных» ЦМР (матриц высот) средствами ЦФС автоматизировать процесс выделения других элементов общегеографического содержания, для того чтобы избежать трудоемкой процедуры ручной стереовекторизации. Автоматическое трассирование речной сети на основе ЦМР вынесено за рамки этого эксперимента, поскольку задействует инструменты геоинформационного анализа и выполняется средствами ГИС-пакетов.

Автоматическое определение контуров растительности, зданий и сооружений по материалам ДЗЗ к настоящему времени реализуется двумя основными способами: 1) анализ спектральной яркости изображений; 2) автоматическая классификация облаков точек.

Первый способ представляет собой компьютерное дешифрирование материалов ДЗЗ на основе различий в значениях спектральной яркости. Второй способ оперирует облаками точек с известными значениями координаты  $Z$ . Облака точек при этом могут быть получены в результате лидарной съемки местности или путем фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ. Оба способа достаточно подробно описаны в научной литературе [Levner et al., 2003; Syed et al., 2005; Awrangzeb et al., 2014].

Для ускорения определения контуров высотных объектов (строений и растительности) по материалам ДЗЗ предлагается использовать «плотные» ЦМР (матрицы высот), построенные фотограмметрическим способом средствами ЦФС PHOTOMOD. Так как в программе нет

стандартного инструмента, выполняющего эту операцию, предлагается реализовать ее в несколько шагов. Последовательность действий показана на рис. 11.

1. Первый шаг заключается в построении «плотной» ЦМП с размером ячейки равным размеру пиксела изображений. Для реализации этого шага использован алгоритм SGM.

2. Второй шаг — фильтрация строений и растительности. Фильтрация осуществляется штатными средствами ЦФС PHOTOMOD на основе анализа взаимного влияния соседних ячеек ЦМП, перепада высот, углов наклона острых и наклонных выбросов. Параметры фильтрации уточняются, исходя из особенностей местности, площади растительного покрова и средних габаритов зданий. На месте зданий и растительности появляются пустые ячейки. ЦМП становится ЦМР.

3. Для устранения пустых ячеек в ЦМР производится их заполнение путем интерполяции высот по соседним ячейкам. В ходе анализа различных методов интерполяции высот (гладкая, линейная, полиномиальная, ближайшим значением) была выбрана гладкая интерполяция. Ее результаты лучше всего соответствуют реальному поведению рельефа на тестовой территории.

4. Путем вычитания ЦМР из ЦМП создается матрица разности. Значения высот матрицы разности соответствуют относительным высотам строений и растительности. В местах, где строений и растительности нет, значения высот равны нулю.

5. Штатными средствами ЦФС PHOTOMOD равные нулю ячейки матрицы разности преобразуются в пустые ячейки. В результате матрица разности разбивается на группы разделенных ячеек с известными значениями относительных высот строений и растительности. Контуры этих растровых групп соответствуют реальным контурам строений и растительности.

6, 7. Штатными средствами ЦФС PHOTOMOD разделенные между собой растровые группы относительных высот автоматически оконтуриваются. В результате создается векторный слой с полигонами, описывающими конфигурацию строений и растительности. Полигонам автоматически присваиваются относительные высоты строений и растительности, полученные из матрицы разности.

8. После анализа формы полигонов и относительных высот, полигоны, оконтуривающие растительность, автоматически отделяются



1 — построение плотной ЦМП



2 — построение ЦМР



3 — редактирование ЦМР



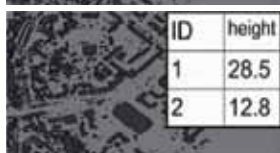
4 — построение матрицы разности ЦМП–  
ЦМР (матрица относительных высот)



5 — преобразование ячеек с нулевой высотой  
( $Z=0$ ) в пустые ячейки



6 — автоматическое выделение контуров  
строений и растительности



7 — присвоение относительных высот  
векторным контурам строений и растительности



8 — разделение строений и растительности  
по высоте и форме контуров

**Рис. 11.** Общая схема автоматизированного выделения контуров строений и растительности на основе плотных ЦМП в ЦФС PHOTOMOD



от полигонов, оконтуривающих строения.

Преимуществами предлагаемой последовательности шагов:

автоматизированное определение контуров полностью реализуется штатными средствами ЦФС PHOTOMOD. Нет необходимости в использовании дополнительного программного обеспечения, анализирующего спектральные яркости изображений;

расчетные операции с ЦМР сеточного типа (матрицами высот) занимают меньше времени, чем анализ векторных облаков точек путем классификации;

в отличие от горизонталей, автоматически построенных на основе ЦМП и также повторяющих контуры высотных объектов, контуры, рассчитанные по авторской технологии однозначны и содержат в себе более важную информацию об относительных, а не абсолютных высотах объектов.

Полученные автоматизированным способом контуры строений и растительности могут быть использованы для обновления общегеографической основы тематических карт. Сравнение рассчитанных векторных границ строений и растительности с их фактическим положением на ортофотоплане обнаруживает практически полное соответствие (рис. 12). Дальнейшее совершенствование технологии, выходящее за рамки данного исследования, заключается в автоматической генерализации контуров зданий и сооружений, которое позволит описать их границы наименьшим числом вершин.



**Рис. 12. Сравнение рассчитанных границ строений и растительности с фактическим положением на снимках**

### *Построение ортофотопланов и 3D-моделей*

По исходным материалам ДЗЗ с учетом ЦМП создается ортофотоплан – сшитая мозаика исходных изображений, скорректированных за рельеф и характеризующихся одинаковыми фотометрическими свойствами. Путем наложения ортофотоплана на ЦМР или ЦМП может быть создана 3D-модель. В отличие от традиционной карты, она создает объемное восприятие местности и характеризуется дополнительной глубиной пространства на плоскости. Помимо ЦМР или ЦМП, лежащих в основе 3D-модели, в нее могут быть включены трехмерные модели оцифрованных в стереорежиме антропогенных объектов, площадные и линейные объекты гидрографии, шоссейные и грунтовые дороги, элементы растительности. Все эти контуры приобретают объем после автоматического опускания боковых граней до поверхности ЦМР (ЦМП).

Таким образом, фотограмметрический блок методики предполагает ориентирование и уравнивание снимков, а также построение на их основе ЦМП, ЦМР и 3D-моделей. Такое построение может быть реализовано как вручную путем стереовекторизации, так и автоматизированными методами. Сравнение скоростей обоих методов подтвердило большую эффективность автоматизированного подхода и зависимость времени построения ЦМР от сложности рельефа и перепада высот в районе исследования. За счет использования оригинальной технологии обработки «плотных» ЦМП штатными инструментами ЦФС PHOTOMOD удалось автоматизировать процесс векторизации строений и растительности.

### **Данные разновременной космической съемки высокого разрешения**

Методика фотограмметрической обработки классических стереопар космических снимков была подробно рассмотрена в начале настоящей главы. При этом под классическими стереопарами снимков подразумеваются стереопары, получаемые в результате конвергентной стереосъемки с постоянным или произвольным отклонением направления оптической оси сканера вдоль или поперек трассы движения спутника на одном и том же витке [Кравцова и др., 2014].

Однако архив стереоснимков не ограничивается только материалами таких, специально проведенных стереосъемок. Зачастую для решения задач мониторинга на одну и ту же территорию используют снимки с разных витков движения сенсора, с различными параметрами съемки, полученные с достаточно большой разницей во времени.

Исследования по формированию и использованию стереопар разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения уже проводились отечественными специалистами в области картографии и ДЗЗ. В работе [Кравцова и др., 2014] изложены критерии выбора разновременных космических снимков для формирования стереомодели с целью дешифрирования по ней дюнного рельефа Анапской пересыпи с помощью стереоскопа: снимки должны быть подобными (конгруэнтными), получены одним и тем же или аналогичным сенсором с одинаковым или близким пространственным разрешением; доля облачности на снимках должна быть минимальной. В работе [Мазалова и др., 2013] критерий выбора разновременных космических снимков для формирования стереомодели средствами ЦФС сформулирован в целях построения ортофотопланов и топографических карт крупного масштаба: рекомендуемые значения угла конвергенции от 15 до 30°.

Анализ результатов этих работ и собственные экспериментальные исследования позволили сформулировать авторские рекомендации к выбору разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения и формированию на их основе стереомоделей для решения более широкого круга географо-картографических задач.

Помимо перечня известных критериев при выборе архивных снимков или организации новой съемки необходимо выполнение следующих дополнительных условий.

1. Пространственное разрешение и масштаб снимков не должны отличаться больше, чем на 15%.

2. Различие в значениях высоты Солнца в момент съемки, влияющей на степень освещенности территории, должно быть минимальным.

3. Разница между временем съемки первого и второго изображений стереопары должна быть такой, чтобы в целевой части снимков не было существенных изменений, влияющих на восприятие стереообразующих деталей территории.

При формировании стереомодели в ЦФС PHOTOMOD:

следует обеспечить наличие необходимого для уравнивания числа опорных (1–4), контрольных (1–2) и связующих (3–4) точек;

координаты опорных точек должны быть получены с высокой точностью (единицы сантиметров);

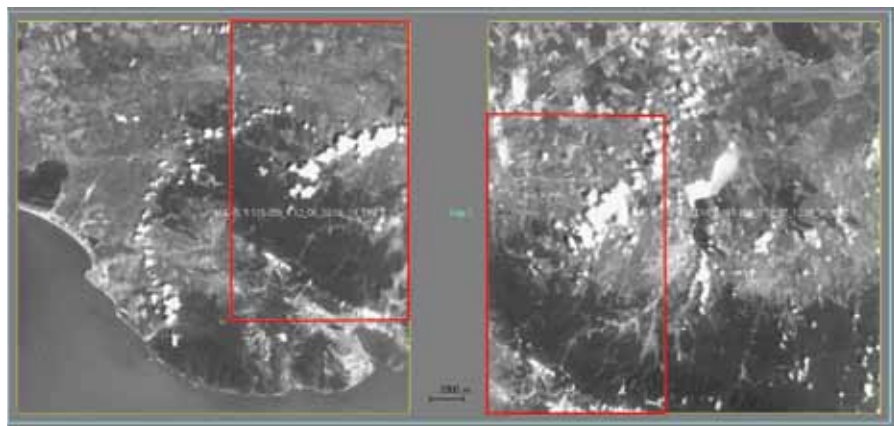
уравнивание при наличии в метаданных к снимкам RPC-коэффициентов (построчных данных об изменении элементов внешнего ориентирования снимков) должно быть выполнено RPC-алгоритмом.

В качестве тестовых данных использовался набор из шести разновременных панхроматических снимков с сенсора SPOT 5 (пространственное разрешение 2,5 м), полученных 22.06, 12.07 и 13.07.2012 года, а также набор из пяти разновременных панхроматических снимков с сенсора WorldView-1 (пространственное разрешение 0,5 м), полученных 08.05, 20.05, 11.06 и 28.06.2013 года. Все наборы снимков сделаны для одной и той же территории.

Применительно к набору данных SPOT 5 следует отметить, что сравнительно небольшая разница во времени между первой и второй съемкой (концом июня и серединой июля) не отразилась на конгруэнтности (подобии) материалов ДЗЗ. Изображения имеют аналогичные цветовые и тоновые характеристики. Помимо того, что они получены одним и тем же сенсором, с одинаковым пространственным разрешением, высота Солнца во время съемки была практически идентична ( $64,0-64,1^\circ$ ), также как и масштаб снимков. Для набора указанных изображений обнаружилось лишь два фактора, лимитирующих их использование для создания ЦМР: высокая, затрудняющая восприятие стереоэффекта в отдельных местах, доля облачности на некоторых снимках (18%) и недостаточный для формирования стереомодели угол конвергенции для разных комбинаций изображений.

В общем случае угол конвергенции рассчитывается как разница углов отклонения от надира оптической оси сенсора в момент съемки первого и второго изображений стереопары. Чем больше угол, тем больше базис съемки, тем больше расчетная точность стереофотограмметрического определения высот. Однако при слишком малых и слишком больших значениях угла конвергенции стереоскопическое наблюдение и измерение полученных стереопар снимков становится невозможным [Михайлов и др., 2014]. Таким образом, для формирования стереомодели из разновременных снимков были выбраны изображения, полученные спутником SPOT 5 22.06 и 12.07.2012 г. с 10% облачности и углом конвергенции в  $29,5^\circ$  (рис. 13).

Для набора данных WorldView-1 разница во времени между первой и последующими съемками (началом мая и концом июня) была больше и оказала на конгруэнтность (подобие) материалов ДЗЗ более значи-



**Рис. 13. Стереопара разновременных снимков SPOT 5**

тельный эффект, чем для снимков SPOT 5. В связи с тем, что снимки набора получены одним сенсором с одинаковым пространственным разрешением, в целом все они имеют схожие цветовые и тоновые характеристики. Масштаб снимков одинаков, облачность отсутствует. Однако высота Солнца во время съемок, менявшаяся с мая по июнь от  $59,8$  до  $72,2^\circ$ , оказала негативное влияние на освещенность идентичных объектов местности и соответственно затруднила их стереовосприятие. Помимо различной освещенности, лимитирующим фактором при выборе снимков для формирования стереомодели стал угол конвергенции для разных комбинаций снимков. Речь о нем уже шла. В итоге для формирования стереомодели из разновременных снимков были выбраны изображения, полученные спутником WorldView-1 08.05 и 11.06.2013 г. с высотой Солнца во время съемки в  $59,8$  и  $65,1^\circ$  и углом конвергенции в  $23,2^\circ$  (рис. 14).

Таким образом, в результате анализа различных наборов данных космической съемки высокого и сверхвысокого пространственного разрешения с учетом результатов исследований [Мазалова и др., 2013; Кравцова и др., 2014] можно сформулировать рекомендации к выбору разновременных космических снимков высокого разрешения, а также требования к методу уравнивания, числу и точности опорных точек в ходе их фотограмметрической обработки для автоматизированного формирования стереомоделей.

*При выборе архивных снимков или организации новой съемки для*



**Рис. 14. Стереопара разновременных снимков WorldView-1**

*сформирования стереомодели из разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения в ЦФС необходимо выполнение следующих условий.*

1. Снимки должны быть получены на один и тот же участок местности с разных витков движения сенсора.

2. Съемка должна быть выполнена одним и тем же или аналогичным сенсором с одинаковым или близким пространственным разрешением. Разница в пространственном разрешении должна быть не больше 15%.

3. Масштаб снимков должен быть одинаковым или отличаться не более, чем на 15%.

4. Доля облачности на снимках должна быть по возможности минимальной (полное отсутствие облаков в целевой части снимков).

5. Различие в значениях высоты Солнца в момент съемки, влияющей на степень освещенности территории, должно быть по возможности минимальным.

6. Рекомендуемые значения угла конвергенции для комфортного наблюдения стереоэффекта – от 15 до 30°.

7. Снимки должны быть подобными (конгруэнтными), т.е. обладать схожими тоновыми и цветовыми характеристиками.

8. Разница между временем съемки первого и второго изображений

стереопары должна быть такой, чтобы в целевой части снимков не было существенных изменений, влияющих на восприятие стереообразующих деталей территории.

*При формировании стереомоделей из разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения в ЦФС следует соблюдать данные условия.*

1. Обеспечить наличие необходимого для уравнивания снимков числа опорных, контрольных и связующих точек. Их количество зависит от типа съемочной системы и предусмотренного для него алгоритма фотограмметрической обработки. Строгий алгоритм, характерный для обработки материалов ДЗЗ высокого разрешения, поступающих со спутников KOMPSAT-2 и SPOT 1–4, требует для уравнивания 4–6 опорных точек, 3–5 контрольных точек на стереопару и 3–4 связующие точки в зоне четверного перекрытия. RPC–алгоритм (сенсоры GeoEye-1, IKONOS, ALOS PRISM) – 1–4 опорные точки, 1–2 контрольные точки на стереопару, 3–4 связующие точки в зоне четверного перекрытия;

2. Опорные и контрольные точки должны быть измерены GPS-приемниками в ходе полевых обследований местности либо получены на основе имеющихся картографических материалов крупного масштаба с высокой точностью (единицы сантиметров), необходимой для решения измерительных задач по стереомодели. Помимо точности измерения опорных и контрольных точек на точность уравнивания стереопары и ЦМР, получаемых на ее основе, также влияет точность опознавания точек на изображениях;

3. Уравнивание (при наличии в метаданных к снимкам RPC-коэффициентов) должно быть выполнено RPC-алгоритмом.

Построение ЦМР по уравненной стереопаре разновременных космических снимков высокого разрешения осуществляется аналогично общей методике фотограмметрической обработки. Таким образом, технология фотограмметрической обработки стереопар разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения средствами ЦФС в целом идентична методике фотограмметрической обработки их классических стереопар.

## Данные аэро съемки с БПЛА

Методика фотограмметрической обработки материалов аэро съемки с БПЛА в целом аналогична методике обработки классических данных аэро съемки. Однако есть ряд существенных отличий, обусловленных спецификой конструкции БПЛА и особенностями камеры на его борту (рис. 15).

В силу своих размеров и массы, значительно уступающих габаритам самолетов, БПЛА гораздо в большей степени подвержены влиянию метеорологических условий — ветра и осадков. Это негативно отражается на управляемости БПЛА и точности элементов внешнего ориентирования снимков. Второй момент — использование некалиброванных камер. Отсутствие калибровки у малоформатных камер, входящих в стандартную поставку БПЛА, снижает фактическую точность элементов внутреннего ориентирования снимков.

Низкая точность элементов внешнего ориентирования вызывает необходимость дополнительного уточнения предварительной схемы накладки монтажа за счет измерения большего числа связующих точек. В связи с этим в ЦФС РНОТОМОД перед стандартной процедурой взаимного ориентирования предусмотрена стадия автоматической триангуляции БПЛА. Связующие точки, автоматически измеренные на этой стадии, позволяют компенсировать низкую точность угловых элементов внешнего ориентирования.

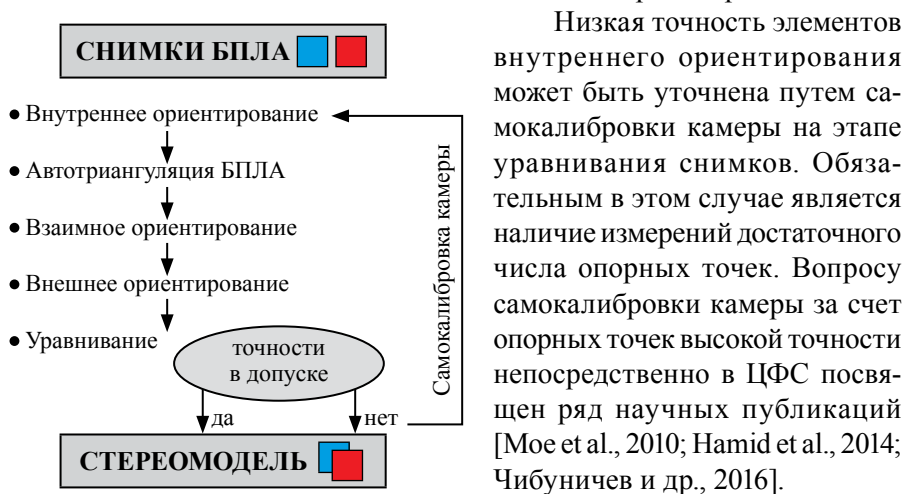


Рис. 15. Фрагмент схемы фотограмметрической обработки снимков с БПЛА

По окончании процедуры самокалибровки создается файл



с новыми параметрами камеры — уточненными значениями фокусного расстояния, координат главной точки и коэффициентов дисторсии. Выполнив внутреннее ориентирование снимков с учетом скорректированных параметров камеры, можно переходить к устранению ошибок взаимного ориентирования и окончательному уравниванию снимков в соответствии с заявленными допусками [Инструкция...,2002]. Уравненный блок снимков готов к построению ЦМР в соответствии со стандартной методикой.

## Материалы наземной стереосъемки

Методика фотограмметрической обработки материалов наземной стереосъемки для создания ЦМР в целом аналогична методике обработки данных аэросъемки. Наземные и аэроснимки получают в центральной проекции. Однако взаимное расположение осей в их системах координат на изображении существенно различаются. Этим обусловлены специфические приемы фотограмметрической обработки данных наземной стереосъемки (рис. 16).

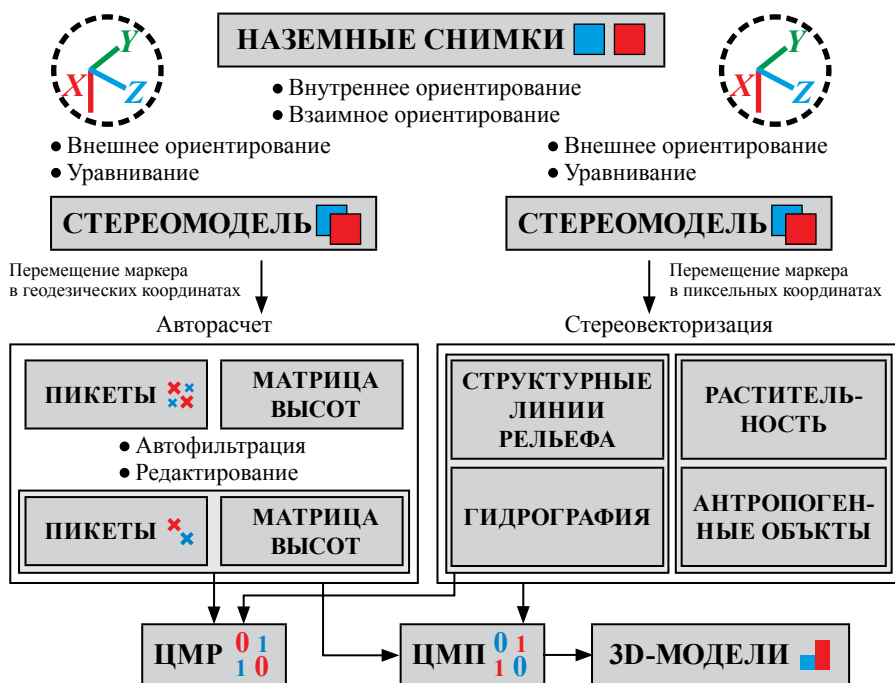


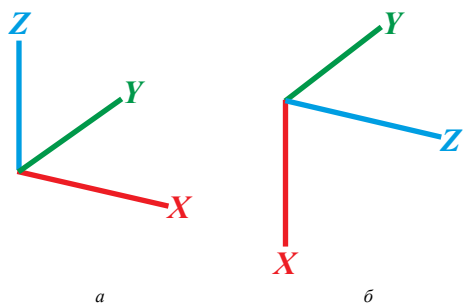
Рис. 16. Общая схема обработки данных наземной стереосъемки

В рамках исследования традиционная фототеодолитная съемка была заменена на наземную съемку малоформатной цифровой камерой (Canon 5D Mark III) с нормальноугольным объективом. Перед съемкой была выполнена калибровка камеры в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК). Таким образом были уточнены координаты главной точки снимков, величина фокусного расстояния камеры, а также коэффициенты дисторсии.

Таким образом, с одной стороны, решался вопрос оптимизации съемочного процесса, а с другой — увеличивалась производительность при обработке его результатов. В отличие от аналоговых снимков, получаемых с помощью фототеодолита и в связи с этим требующих дополнительных затрат на проявку и сканирование, цифровые снимки, полученные цифровой камерой, могут быть непосредственно использованы для обработки в ЦФС.

Для получения стереопары снимков камера должна быть установлена на двух станциях с известными координатами. На основе координат опорных точек в пространстве снимаемого объекта можно рассчитать длину базиса съемки. Точки съемки следует выбирать из соображений охвата на изображениях максимального количества опознаков с известными плановыми и высотными координатами. Процедуры внутреннего, взаимного и внешнего ориентирования наземных снимков осуществляются аналогично обработке аэроснимков.

Особенность технологии обработки изображений, полученных в результате наземной съемки, — разворот осей системы координат. Если при классической аэросъемке на наблюдателя перед стереомонитором будет направлена ось  $Z$ , то при наземной съемке на него будет направлена ось  $X$  (в случае правой системы координат) (рис. 17).



**Рис. 17. Направления координатных осей на изображениях:**

*a* — аэросъемка; *б* — наземная съемка

Для разворота осей координат следует скорректировать планово-высотные координаты опорных точек и заново выполнить уравнивание снимков стереопары: координаты  $X$  заменить на координаты  $Z$ , а координаты  $Z$  на координаты  $X$  с обратным знаком. На основе уравненной

стереопары с исправленными значениями координат опорных точек можно производить стереовекторизацию, а также автоматический расчет пикетов с последующей фильтрацией ошибочно измеренных точек. Для корректного импорта рассчитанных пикетов и структурных линий в геодезическую систему координат с правильным разворотом осей точки должны быть искусственно развернуты в пространстве функцией аффинного преобразования (с сохранением начала координат), матрица которого имеет следующий вид:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

На основе импортированных пикетов и проведенных структурных линий можно построить ЦМР, ЦМП и ортофотоизображение снимаемого объекта. Для наглядного представления результатов моделирования ЦМР экспортируется в формат .dem и впоследствии может быть текстурирована ортоизображением снимаемого объекта для получения его 3D-модели (рис. 18).

Сопоставление ЦМР, построенных по материалам наземной стереосъемки цифровыми камерами на разные даты (до и после взрывных работ в карьере), позволили рассчитать объем извлеченной породы. В соответствии с «Инструкцией по маркшейдерскому учету горных

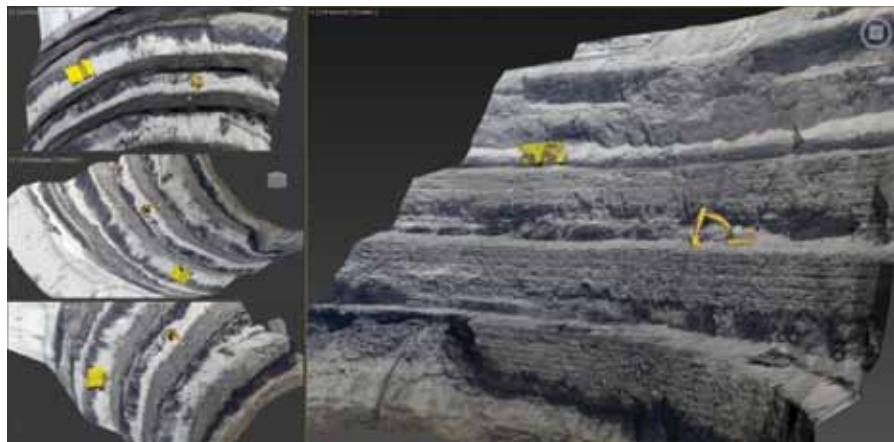


Рис. 18. 3D-модель карьера «Удачный»

пород при добыче полезных ископаемых открытым способом» [2003], при определении объема взорванных горных пород по маркшейдерской съемке допустимая погрешность при объемах от 45 до 2200 тыс. м<sup>3</sup> вычисляется по формуле

$$\sigma_{V_{\text{доп}}} = \frac{2200}{\sqrt{V}},$$

где  $V$  — объем взорванных горных пород, м<sup>3</sup>.

Если объем больше 2 200 тыс. м<sup>3</sup>, допустимую погрешность принимают равной 1,5%, если меньше — 45 тыс. м<sup>3</sup> в пределах 10%. Контрольные измерения традиционным способом объемной палетки подтвердили пригодность разработанной методики фотограмметрической обработки наземных снимков, полученных малоформатными цифровыми камерами с нормальноугольными объективами, для расчета объемов извлеченной горной породы. Погрешность расчета находится в пределах допуска (см. гл. 3, § 3.4).

Таким образом, малоформатные цифровые камеры с нормальноугольными объективами, прошедшие предварительную калибровку в лабораторных условиях, могут успешно использоваться для наземной стереосъемки. При наличии достаточного количества опорных точек и известном значении базиса фотографирования обработка полученных таким образом стереопар реализуется средствами ЦФС. Выходные продукты фотограмметрической обработки снимков, полученных в ходе наземной стереосъемки — оцифрованные в стереорежиме структурные линии, ЦМР, 3D-модели.

В отличие от уже известных технологий применения цифровых камер для наземной стереосъемки [Гельман, 2000; Книжников, 2004], которые представляют собой многоступенчатую обработку «ближних» и «дальних» стереопар в разных программных пакетах, предлагаемая методика может быть полностью реализована в единой среде ЦФС PHOTOMOD.

## **Оценка пригодности ЦМР для составления тематических карт**

Зависимость масштаба карт от пространственного разрешения снимков рассматривалась в главе 2 (§ 2.1). Настоящий параграф посвящен ЦМР, создаваемым на основе данных ДЗЗ. В процессе создания ЦМР по материалам ДЗЗ чрезвычайно важным представляется вопрос оценки их пригодности для составления тематических карт. Примеры

оценки пригодности построенных различными методами цифровых моделей рельефа в отечественной и зарубежной литературе выходят регулярно. С появлением глобальных моделей рельефа (ASTER DEM и SRTM), данные которых можно найти в открытом доступе Internet, такие исследования стали проводиться еще более активно.

Анализируя зарубежные публикации, затрагивающие вопросы определения пригодности ЦМР, построенных по материалам дистанционного зондирования, для создания и обновления топографических карт, удалось выявить два главных направления исследований. Первое направление касается возможностей использования материалов космической съемки, полученных сенсорами высокого и сверхвысокого пространственного разрешения в видимом диапазоне [Kakiuchi, 2003; Mizuta Y. et al., 2007]. За эталон в таких исследованиях принимаются ЦМР, полученные путем цифрования горизонталей с топографических карт сопоставимого масштаба. Второе направление ориентировано на оценку пригодности глобальных моделей рельефа (ASTER DEM и SRTM). Ряд авторов предлагает сравнивать эти модели с оцифрованными горизонталями топографических карт масштабов 1:25 000 и 1:50 000 [Bildirici et al., 2014; Karwel et al., 2008].

Узким местом первого направления является выбор эталонной модели для сравнения пригодности ЦМР. Топографическая карта сопоставимого масштаба при условии ее создания по материалам стереосъемки не может выступать в качестве эталона. Причина тому — субъективный вклад картографа в процессе генерализации.

Особенностью отечественной гипсометрической школы является то, что при рисовке горизонталей на топографических картах большее внимание уделяется не столько метрически верному отображению рельефа, сколько географическому правдоподобию, точности изображения и пластической выразительности его рисунка [Заруцкая, 1958; Сваткова, 1998]. Подобные требования к изображению рельефа даны и в соответствующих нормативных документах [Основные положения. . ., 1984].

Наиболее корректный способ контроля точности ЦМР — проведение выборочных измерений высот средствами высокоточных приемников глобального позиционирования [Christian et al., 2013]. Обеспечиваемая такими приемниками сантиметровая точность измерения абсолютных высот не имеет аналогов. Однако у такого метода есть существенный недостаток — необходимость полевых обследований, про-

ведение которых, в лучшем случае, характеризуется дополнительными денежными и трудозатратами, а в худшем случае (в труднодоступных районах или при неблагоприятных погодных условиях) — физически невозможно.

В данном случае рассматривается оценка пригодности ЦМР для составления тематических карт. Под оценкой пригодности подразумевается оценка сходимости ЦМР, построенных разными методами, с референсной моделью. Референсная модель должна быть более надежной, чем сопоставимые по масштабу топографические карты, и вместе с тем, не нуждаться в проведении каких-либо полевых обследований.

Для контроля пригодности ЦМР было выбрано два тестовых полигона:

южная часть Западно-Сибирской равнины в окрестностях города Новокузнецк;

предгорья Главного Кавказского хребта в Крымском районе Краснодарского края.

Характеристики этих участков представлены в табл. 4.

В качестве исходных данных для каждого тестового участка использовались:

ЦМР, построенные фотограмметрическим способом по стереопарам космических снимков высокого пространственного разрешения (см. табл. 4). Система координат: WGS 84. Проекция UTM. Обработка снимков и построение ЦМР реализованы в ЦФС PHOTOMOD 6.1;

ЦМР, построенные по оцифрованным горизонталям топографических карт масштаба 1:100 000 (сечение рельефа 20 м). Геопривязка и оцифровка горизонталей топографических карт осуществлялись в

Т а б л и ц а 4

**Характеристики тестовых полигонов и данных космической съемки**

Характеристики	Новокузнецк	Крымск
Максимальная высота, м	349	489
Минимальная высота, м	199	107
Перепад высот, м	150	382
Сенсор	WorldView-1	SPOT 5 HRG2
Разрешение, м	0,6	2,5
Система координат/Проекция	СК-42 /Гаусса–Крюгера 15 N	WGS 84 /UTM 37 N
Размер ячейки выходных ЦМР, м	10/50	10/50

ГИС-пакете ArcGIS 10 методом TopoToRaster. Система координат СК-42. Проекция Гаусса–Крюгера.

В качестве референсной модели для оценки пригодности указанных ЦМР использовались ЦМР, построенные по оцифрованным горизонталям топографических карт масштаба 1:25 000 (метод TopoToRaster).

Сопоставимость выбранных моделей обеспечена следующими условиями:

единый масштаб (1:100 000). 1:100 000 — это исходный масштаб топографических карт, горизонтالي которых были оцифрованы для получения одной из ЦМР;

единый размер ячейки ЦМР (10 м — в первом случае, 50 м — во втором случае). Согласно классическому исследованию Томислава Хенгла [Hengl, 2006], для создания топографических карт масштаба 1:100 000 целесообразно выбирать размер ячейки ЦМР в пределах от 10 до 50 м (в зависимости от сложности рельефа);

единая система координат и проекция (СК-42/ Гаусса–Крюгера). Топографические карты масштабов 1: 25 000 и 1: 100 000 составлены в системе координат СК-42/ Гаусса–Крюгера. Соответственно и ЦМР, построенные на их основе, будут в этой же системе координат. ЦМР, построенная фотограмметрическим способом на окрестности Крымска (WGS 84 /UTM 37 N), была пересчитана в систему координат СК-42 (проекция Гаусса–Крюгера).

единая система высот (нормальные высоты). Горизонтали топографических карт масштабов 1: 25 000 и 1: 100 000 проведены в соответствии с Балтийской системой нормальных высот, которые отсчитываются от квазигеоида. Аналогичная система отсчета высот характерна и для ЦМР, построенной фотограмметрическим способом на окрестности Новокузнецка. ЦМР, построенная фотограмметрическим способом на окрестности Крымска, получена в геодезической системе высот, отсчитываемой от эллипсоида.

Соотношение нормальных и геодезических высот описывается следующей функцией:

$$H^N = H - \zeta,$$

где  $H^N$  — нормальная высота;  $H$  — геодезическая высота;  $\zeta$  — аномалия высоты [Серапинас, 2012].

Для вычисления нормальных высот по геодезическим высотам необходимы гравиметрические карты или модели высот квазигеоида. В

рамках данного исследования геодезические высоты ЦМР, построенной фотограмметрическим способом на окрестности Крымска, была преобразованы в нормальные высоты средствами ЦФС PHOTOMOD с учетом модели геоида EGM96 (превышениями модели геоида над моделью квазигеоида решено пренебречь).

Сравнение ЦМР по каждому тестовому полигону производилось в ГИС-пакете ArcGIS 10 средствами калькулятора растров. В результате построены следующие матрицы разности высот (рис. 19, 20):

а) ЦМР, построенная по оцифрованным горизонталям карты масштаба 1:25 000, минус ЦМР, построенная по оцифрованным горизонталям карты масштаба 1:100 000 ( $ЦМР_{25т} - ЦМР_{100т}$ ) (размер ячейки 10 и 50 м соответственно);

б) ЦМР, построенная по оцифрованным горизонталям карты масштаба 1:25 000, минус ЦМР, полученная фотограмметрическим способом ( $ЦМР_{25т} - ЦМР_{ф}$ ) (размер ячейки 10 и 50 м соответственно).

Результаты статистической обработки представлены в табл. 5–7. Гистограммы распределения разностей высот (см. рис. 19,20).

Т а б л и ц а 5

**Статистические характеристики матриц разности высот**

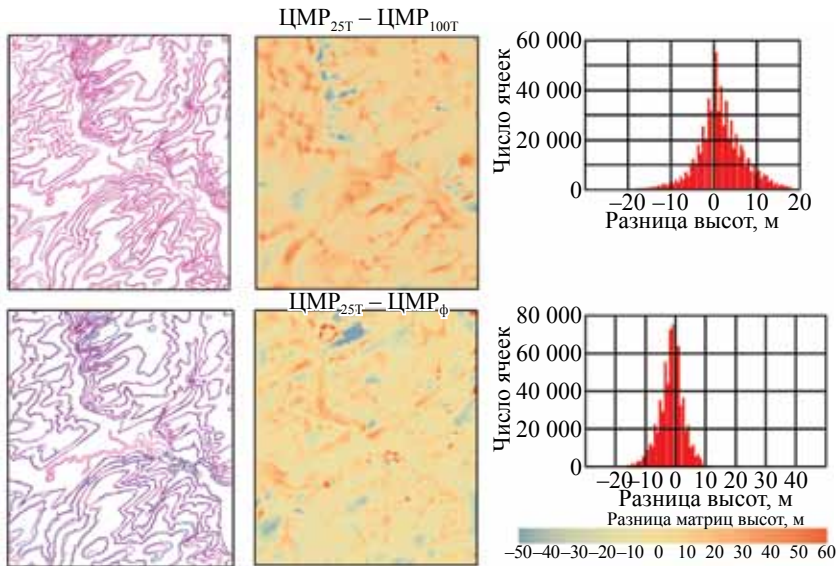
Размер ячейки, м	Матрица разности	Новокузнецк			Крымск		
		Среднее	СКО	LE90	Среднее	СКО	LE90
10	ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>100т</sub>	1,56	5,60	9,21	–2,55	9,87	16,24
10	ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>ф</sub>	–1,27	4,93	8,11	1,05	8,35	13,74
50	ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>100т</sub>	1,75	5,98	9,84	–2,53	11,29	18,57
50	ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>ф</sub>	–1,02	5,25	8,64	1,31	8,16	13,42

Т а б л и ц а 6

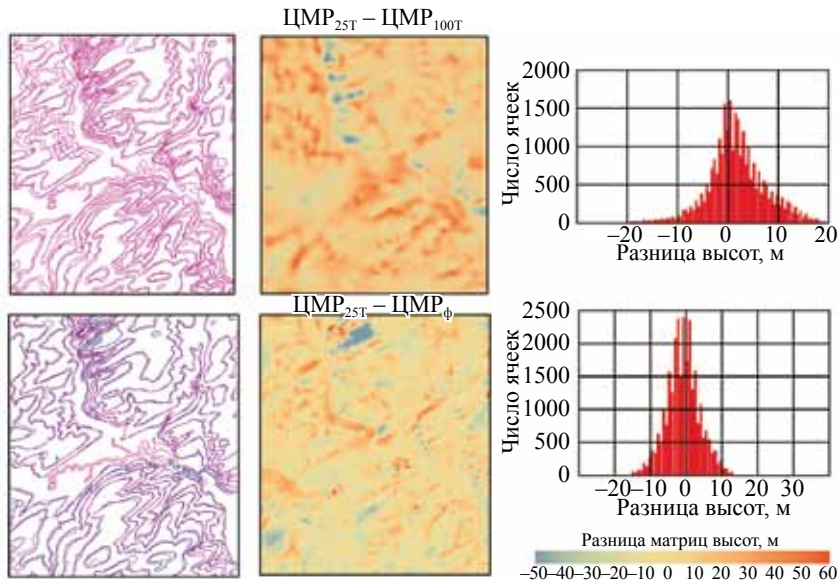
**Процент интервалов разницы высот  $\Delta h$ , приходящихся на  $\sigma$  распределения, Новокузнецк**

ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>100т</sub>			ЦМР <sub>25т</sub> – ЦМР <sub>ф</sub>		
$\sigma$	$\Delta h$ , м	%	$\sigma$	$\Delta h$ , м	%
7	15 ÷ 24	1,26	–	–	–
6	10 ÷ 15	5,74	6	6 ÷ 50	4,59
5	4 ÷ 10	19,41	5	1 ÷ 6	21,67
4	–1 ÷ 4	48,88	4	–4 ÷ 1	49,33
3	–7 ÷ –1	18,96	3	–9 ÷ –4	18,86
2	–12 ÷ –7	4,19	2	–14 ÷ –9	4,26
1	–34 ÷ –12	1,56	1	–34 ÷ –14	1,29





*a*

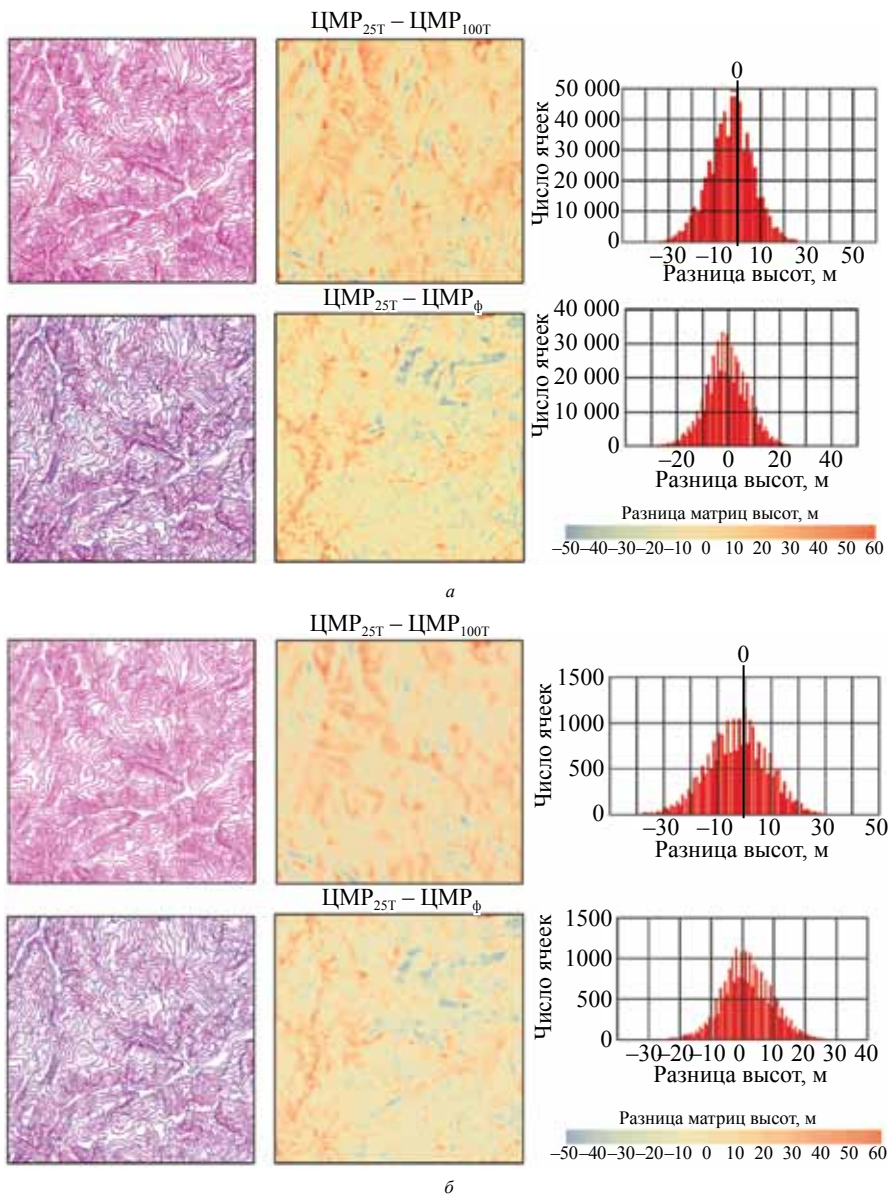


*б*

**Рис. 19. Матрицы и гистограммы распределения разницы высот (Новокузнецк):**

*a* — размер ячейки 10 м; *б* — размер ячейки 50 м;

— горизонталы, оцифрованные по топокарте масштаба 1 : 25 000; — горизонталы, оцифрованные по топокарте масштаба 1 : 100 000; — горизонталы, полученные фотограмметрическим способом



**Рис. 20. Матрицы и гистограммы распределения разницы высот (Крымск):**

*a* — размер ячейки 10 м; *b* — размер ячейки 50 м;

— горизонталы, оцифрованные по топокарте масштаба 1 : 25 000; — горизонталы, оцифрованные по топокарте масштаба 1 : 100 000; — горизонталы, полученные фотограмметрическим способом

**Процент интервалов разницы высот  $\Delta h$ , приходящихся на  $\sigma$  распределения,  
Крымск**

ЦМР <sub>25г</sub> – ЦМР <sub>100г</sub>			ЦМР <sub>25г</sub> – ЦМР <sub>ф</sub>		
$\sigma$	$\Delta h$ , м	%	$\sigma$	$\Delta h$ , м	%
7	22 ÷ 61	0,84	7	22 ÷ 49	0,76
6	12 ÷ 22	5,03	6	14 ÷ 22	5,63
5	2 ÷ 12	24,42	5	5 ÷ 14	23,94
4	-7 ÷ 2	40,54	4	-3 ÷ 5	40,15
3	-17 ÷ -7	22,14	3	-11 ÷ -3	23,33
2	-27 ÷ -17	6,25	2	-20 ÷ -11	5,21
1	-51 ÷ -27	0,78	1	-37 ÷ -20	0,98

Для расчета статистических показателей использовались следующие формулы:

среднее  $\bar{d} = \frac{\sum d}{N}$ , где  $d = H_1 - H_2$  (разница высот двух матриц в ячейке);  $N$  – число ячеек;

$$\text{среднеквадратическое отклонение (СКО)} \sigma = \sqrt{\frac{\sum (d - \bar{d})^2}{N}};$$

величина, которую с вероятностью 90% не превзойдет

$$\text{СКО (LE90)} = 1,645 \cdot \text{СКО} [\text{Титаров, 2008}].$$

Анализируя полученные результаты статистической обработки можно сделать следующие выводы:

Обе модели ЦМР<sub>ф</sub> и ЦМР<sub>100г</sub> пригодны для составления тематических карт масштаба 1:100 000, однако ЦМР, построенная фотограмметрическим способом, имеет лучшие показатели пригодности по расхождению высот с референсной моделью. На это указывают близкие к нулю значения среднего и меньшие (по сравнению с ЦМР<sub>100г</sub>) значения СКО матрицы ЦМР<sub>25г</sub> – ЦМР<sub>ф</sub> на всех тестовых участках.

По мере увеличения расчлененности рельефа точность всех моделей (ЦМР<sub>ф</sub>, ЦМР<sub>100г</sub>) снижается. Об этом свидетельствуют постепенно растущие значения СКО для ЦМР<sub>25г</sub> – ЦМР<sub>100г</sub>, ЦМР<sub>25г</sub> – ЦМР<sub>ф</sub> при переходе с равнинного участка (Новокузнецк) в предгорье (Крымск).

Наибольшие показатели расхождения высот всех ЦМР с референсной моделью характерны для участков со сложным рельефом: на хребтах

и в узких речных долинах. В этих местах проведенная картографом генерализация выражена наиболее заметно.

СКО матрицы ЦМР<sub>25т</sub> – ЦМР<sub>100т</sub> можно рассматривать как количественную оценку влияния генерализации рельефа на снижение точности определения абсолютных высот на топографических картах масштаба 1: 100 000.

СКО матрицы ЦМР<sub>25т</sub> – ЦМР<sub>100т</sub> соответствует точности проведения горизонталей (1/3 сечения рельефа или 6,67 м) только для равнинного участка (Новокузнецк), для предгорного участка (Крымск) СКО ЦМР<sub>25т</sub> – ЦМР<sub>100т</sub> больше допуска в 1,5–1,7 раза (при размере ячейки матрицы в 10 и 50 м соответственно). При этом, согласно нормативным документам [Основным положениям, 1984], на топографических картах масштаба 1:100 000 в горных районах допускается смещение горизонталей до половины основной высоты сечения. Соответственно, превышение допуска в 1,7 раза может быть вызвано агрегацией эффекта генерализации как на карте масштаба 1: 100 000, так и на эталонной карте масштаба 1: 25 000.

С увеличением размера ячейки исходных и эталонной ЦМР с 10 до 50 м показатели СКО у всех матриц разности, за исключением ЦМР<sub>25т</sub> – ЦМР<sub>100т</sub> для предгорного участка (Крымск), не претерпели существенных изменений (2–8%). У ЦМР<sub>25т</sub> – ЦМР<sub>100т</sub> (Крымск) при увеличении размера ячейки с 10 до 50 м значение СКО выросло на 13%. Это также указывает на негативное влияние ручного смещения горизонталей при генерализации топографических карт.

### **§ 2.3. Геоинформационный блок методики комплексного моделирования рельефа**

Геоинформационный блок методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа основан на реализации и уточнении уже известных алгоритмов геоинформационной обработки ЦМР для определения характеристик рельефа и решения различных географо-картографических задач.

#### **Моделирование характеристик рельефа**

Геоинформационные технологии, как известно, способствуют развитию геоинформационного картографирования — программно

управляемого создания и использования карт на основе ГИС и баз картографических данных [Лурье, 2008]. Цель геоинформационной обработки ЦМР — определение актуального состояния характеристик рельефа для решения различных географо-картографических задач.

Как уже было отмечено ранее, основная дифференциация этих задач коррелирует с классификацией характеристик рельефа. Четыре основные категории таких характеристик — это геометрические, морфометрические, гидрографические и топоклиматические характеристики рельефа [Li et al., 2005; Hengl et al., 2009].

В группу *геометрических характеристик* рельефа входят такие характеристики, как площадь реальной поверхности форм рельефа и объем между двумя поверхностями. Группа *морфометрических характеристик* рельефа включает в себя углы наклона, экспозицию склонов, плановую кривизну поверхности, профильную кривизну поверхности и другие поверхности, производные от ЦМР. К *гидрографическим характеристикам* рельефа относятся такие характеристики, как направление стока, линии стока, аккумуляция стока, речная сеть, водосборные бассейны и области затопления. Топоклиматические характеристики рельефа (характеристики солнечной радиации) включают пространственное распределение солнечной радиации на площади и в точке.

#### ***Геометрические характеристики рельефа***

Расчет геометрических характеристик рельефа подразумевает вычисление площади поверхности ЦМР и объема между двумя поверхностями. Формула для расчета площади наклонного треугольника  $S_{\Delta}$  выглядит следующим образом:

$$S_{\Delta} = \sqrt{P(P - D_1)(P - D_2)(P - D_3)}, \quad (2)$$

где  $D_i$  — длина стороны, противоположной вершине  $i$ ;  $P = \frac{1}{2}(D_1 + D_2 + D_3)$ ;

$$D_1 = \sqrt{(X_3 - X_2)^2 + (Y_3 - Y_2)^2 + (Z_3 - Z_2)^2};$$

$$D_2 = \sqrt{(X_3 - X_1)^2 + (Y_3 - Y_1)^2 + (Z_3 - Z_1)^2};$$

$$D_3 = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}.$$

Площадь поверхности всей ЦМР ( $S$ ) складывается из суммы площадей треугольников, входящих в ее состав:  $S = \sum_{i=1}^n S_{\Delta,i}$ , где  $N$  — общее число треугольников.

После расчета площадей двух наклонных треугольников объем между ними может быть посчитан по формуле (рис. 21, а):

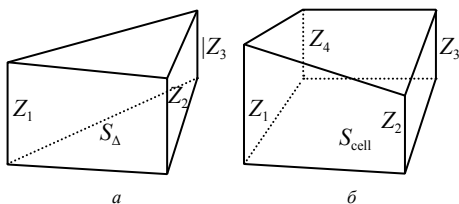
$$V_3 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} S_{\Delta}. \quad (3)$$

Если обе поверхности имеют форму грида, то объем тела между ними рассчитывается по формуле (рис. 21, б):

$$V_4 = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4}{4} S_{\text{cell}}, \quad (4)$$

где  $S_{\text{cell}}$  — площадь ячейки.

Общий объем складывается из суммы объемов, рассчитанных по формулам (3) и (4). Используя формулы (3) и (4), вычисляют объемы насыпи и выемки грунта, необходимые для проведения земляных работ:



**Рис. 21. Расчет объема:**

*a* — между треугольниками; *b* — между ячейками

$$V = V_{\text{ORIGINAL DEM}} - V_{\text{NEW DEM}}.$$

В том случае, если  $V > 0$  — образовалась выемка, если  $V <$

0 — насыпь [Li et al., 2005].

### *Морфометрические характеристики рельефа*

Использование ЦМР обеспечивает расчет разнообразных морфометрических характеристик рельефа – углов наклона, экспозиции и формы склонов, плановой и профильной кривизны поверхности.

Угол наклона — угол, образуемый направлением ската с горизонтальной плоскостью. Он выражается в градусах или в безразмерных величинах, равных тангенсам углов наклона, а также в процентах или промиллях.

Экспозиция склона — азимут проекции нормали склона на горизонтальную плоскость. Она выражается в градусах либо по 4, 8, 16 или 32 румбам. При этом экспозиция плоского склона с нулевой крутизной не определена. Существует большое количество формул и алгоритмов расчета углов наклона и экспозиций склонов. Все они основаны на методе скользящего окна с отметками высот в узлах регулярной сетки (рис. 22) [Dunn et al., 1998; Капралов и др., 2004; Li et al., 2005].

Профиль склона — величина радиуса кривизны нормально-го сечения склона в направлении линии наибольшего ската (поперечный профиль) или в перпендикулярном к нему направлении (продольный профиль). С точки зрения дифференциальной геометрии им будут соответствовать частные производные второго порядка от функции рельефа [Кошкарев, 1980].

$Z_5$	$Z_2$	$Z_6$
$Z_1$	$Z_0$	$Z_3$
$Z_8$	$Z_4$	$Z_7$

**Рис. 22.** Окно для расчета углов наклона и экспозиции склона

Согласно методу расчета углов наклона Эванса–Янга [Hengl et al., 2003] по направлениям запад-восток (WE) и юг-север (SN):

$$\text{Slope}_{\text{WE}} = \frac{(Z_7 + Z_3 + Z_6) - (Z_8 + Z_1 + Z_5)}{6d}; \quad (5)$$

$$\text{Slope}_{\text{SN}} = \frac{(Z_6 + Z_2 + Z_5) - (Z_7 + Z_4 + Z_8)}{6d}, \quad (6)$$

где  $Z_1 - Z_8$  — значения высот в скользящем окне;  $d$  — шаг сетки (см. рис. 22).

Тогда для центральной ячейки с отметкой высот  $Z_0$ :  
угол наклона:

$$\text{Slope} = \text{tg } \alpha = \sqrt{\text{Slope}_{\text{WE}}^2 + \text{Slope}_{\text{SN}}^2}, \quad (7)$$

экспозиция склона

$$\text{Aspect} = \text{tg } \beta = \frac{\text{Slope}_{\text{SN}}}{\text{Slope}_{\text{WE}}}. \quad (8)$$

Продолжением линии элементаризации земной поверхности следует считать систематику А.Н. Ласточкина, включающую характерные точки и структурные линии рельефа (в том числе линии перегиба продольного и поперечного профилей), а также элементарные поверхности — морфологические элементы, ограниченные морфоизографами (линиями с нулевыми значениями горизонтальной кривизны, отделяющими выпуклые, вогнутые и прямолинейные в плане элементы) и класси-

фицируемые по типам профиля склона и другим морфографическим признакам [Зинченко и др., 2001].

### *Топоклиматические характеристики рельефа*

Геоинформационные инструменты анализа солнечного излучения позволяют вычислять распределение солнечной радиации, локализованной как на площади ЦМР в целом, так и в отдельных ее ячейках. Механизм расчета основан на алгоритме полусферической видимости, разработанном и впоследствии улучшенном группой исследователей [Rich et al., 1994; Fu et al., 2000, 2002].

Общее количество солнечной радиации, поступающее на определенную территорию, принято называть суммарной солнечной радиацией или суммарным солнечным излучением. Вычисление прямой, рассеянной и суммарной радиации производится для каждой ячейки ЦМР и впоследствии экстраполируется на всю занимаемую ею площадь.

Суммарная солнечная радиация ( $Global_{TOT}$ ) вычисляется как сумма прямой ( $Dir_{TOT}$ ) и рассеянного ( $Dif_{TOT}$ ) излучения со всех секторов солнечного освещения:  $Global_{TOT} = Dir_{TOT} + Dif_{TOT}$

Общее количество прямой солнечной радиации ( $Dir_{TOT}$ ) в каждой ячейке ЦМР — это сумма прямой радиации ( $Dir_{\theta,\alpha}$ ), поступающей из всех секторов солнечного излучения:

$$Dir_{TOT} = \sum Dir_{\theta,\alpha}. \quad (9)$$

*Прямая радиация* из сектора солнечного освещения вычисляется с помощью следующего уравнения:

$$Dir_{\theta,\alpha} = S_{CONST} \cdot \beta^{m(\theta)} \cdot SunDur_{\theta,\alpha} \cdot SunGap_{\theta,\alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta,\alpha}), \quad (10)$$

где  $\theta$  — центроид угла зенита;  $\alpha$  — угол азимута;  $S_{CONST}$  — поток солнечной энергии за пределами атмосферы на среднем расстоянии от Земли до Солнца, так же известный как солнечная постоянная ( $1367 \text{ W/m}^2$ );  $\beta$  — прозрачность атмосферы (усредненная по всем длинам волн) для наикратчайшего пути в направлении зенита;  $m(\theta)$  — относительная длина оптического пути, определяемая как доля по отношению к длине пути зенита;  $SunDur_{\theta,\alpha}$  — продолжительность времени, представляющая сектор воздушного пространства (для большинства секторов она равняется дневному интервалу времени (например, месяц), умноженному на часовой интервал (например, полчаса). Для частичных



секторов (близких к горизонту), продолжительность вычисляется с использованием уравнений сферической геометрии;  $SunGap_{\theta,\alpha}$  — доля видимого воздушного пространства для сектора солнечного освещения;  $AngIn_{\theta,\alpha}$  — угол падения между центроидом сектора воздушного пространства и осью, перпендикулярной к поверхности.

Относительная длина оптического пути  $m(\theta)$  определяется по зениту и высоте Солнца над уровнем моря. Для углов зенита меньше  $80^\circ$  ее можно вычислить с помощью следующего уравнения:

$$m(\theta) = EXP(-0,000118 \cdot Elev - 1,638 \cdot 10^{-9} \cdot Elev^2) / \cos(\theta), \quad (11)$$

где  $\theta$  — угол зенита Солнца;  $Elev$  — высота Солнца над уровнем моря.

Влияние ориентации поверхности учитывается путем ее умножения на косинус угла падения. Угол падения ( $AngInSky_{\theta,\alpha}$ ) между пересеченной поверхностью и данным сектором воздушного пространства вычисляется с помощью следующего уравнения:

$$AngIn_{\theta,\alpha} = \arccos(\cos(\theta)\cos(G_z) + \sin(\theta)\sin(G_z)\cos(\alpha - G_a)), \quad (12)$$

где  $G_z$  — угол зенита поверхности (для угла зенита больше  $80^\circ$  важно преломление света);  $G_a$  — угол азимута поверхности.

*Рассеянная радиация* для каждого сектора воздушного пространства вычисляется по формуле

$$Dif_{\theta,\alpha} = R_{glb} \cdot P_{dif} \cdot Dur \cdot SkyGap_{\theta,\alpha} \cdot Weight_{\theta,\alpha} \cdot \cos(AngIn_{\theta,\alpha}), \quad (13)$$

где  $R_{glb}$  — суммарное нормальное излучение (см. уравнение 14 ниже);  $P_{dif}$  — доля совокупного рассеивающегося потока радиации (0,2 для очень ясного неба и 0,7 — для очень облачного неба);  $Dur$  — интервал времени;  $SkyGap_{\theta,\alpha}$  — доля видимого воздушного пространства для сектора воздушного пространства;  $Weight_{\theta,\alpha}$  — доля рассеянного излучения, исходящего из данного сектора воздушного пространства относительно всех секторов;  $AngIn_{\theta,\alpha}$  — угол падения между центроидом сектора воздушного пространства и поверхностью пересечения.

Суммарное нормальное излучение  $R_{glb}$  можно вычислить, суммируя значения прямого излучения, поступающего на Землю из каждого сектора (включая секторы с препятствиями), без коррекции угла падения. Впоследствии это значение нужно скорректировать с учетом доли прямого излучения, которая равняется  $1 - P_{dif}$ :

$$R_{glb} = (S_{CONST} \sum (\beta^{m(\theta)})) / (1 - P_{dif}). \quad (14)$$

Для универсальной модели рассеянного воздушного пространства  $Weight_{\theta,\alpha}$  вычисляется по следующей формуле:

$$Weight_{\theta,\alpha} = (\cos\theta_2 - \cos\theta_1) / Div_{azi}, \quad (15)$$

где  $\theta_1$  и  $\theta_2$  — ограничивающие углы зенита в секторе воздушного пространства;  $Div_{azi}$  — число азимутальных делений воздушного пространства.

Для стандартной модели пасмурного неба  $Weight_{\theta,\alpha}$  вычисляется по формуле

$$Weight_{\theta,\alpha} = (2\cos\theta_2 + \cos2\theta_2 - 2\cos\theta_1 - \cos2\theta_1) / 4 Div_{azi}. \quad (16)$$

*Общая рассеянная радиация* ( $Dif_{TOT}$ ) вычисляется как сумма рассеянного солнечного излучения ( $Dif$ ), поступающего из всех секторов воздушного пространства:

$$Dif_{TOT} = \sum Dif_{\theta,\alpha}. \quad (17)$$

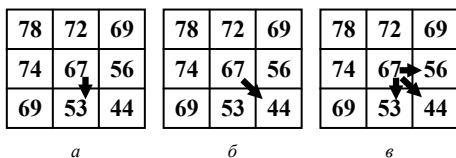
### *Гидрографические характеристики рельефа*

Одной из главных задач аналитической обработки ЦМР является расчет используемых для моделирования стока гидрографических характеристик. К их числу относят такие показатели, как общая водосборная площадь, площадь речного бассейна, комплексный топографический индекс, индекс силы потока.

Все они являются лишь вторичными параметрами, непосредственно извлекаемыми из модели стока — основной гидрографической производной ЦМР. Оставаясь объектом активной дискуссии в научном сообществе, модель стока формируется за счет таких элементарных характеристик, как водосборные бассейны, речная сеть, направление и аккумуляция стока.

*Направление стока.* Фундаментальным принципом определения направления стока является положение о его движении из точки с большей высотой в точку с меньшей высотой. Существует два подхода к расчету направления стока: методы однонаправленного и разнонаправленного стока. Согласно первому подходу, поток может быть сформирован только за счет движения жидкости или другой субстанции из единственной ячейки, непосредственно примыкающей к данной. В зависимости от того, сколько направлений учитывается при этом движении, четыре или восемь, формируются соответствующие вариации метода (рис. 23).

Согласно методу разнонаправленного стока, поток жидкости из данной ячейки осуществляется во все пограничные ячейки с меньшими абсолютными высотами. Соотношение количественных характеристик стока, распределяемых между ними, зависит от углов наклона земной поверхности и ширины самого потока:



**Рис. 23. Методы определения направления потока:**

*a* — однонаправленный по 4 направлениям; *б* — однонаправленный по 8 направлениям; *в* — разнонаправленный метод склонов

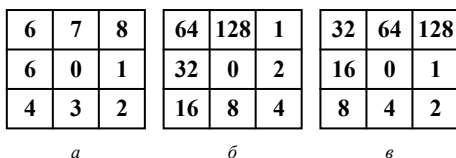
$$F_i = \frac{L_i \operatorname{tg} \alpha_i}{\sum_{i=1}^n L_i \operatorname{tg} \alpha} \quad (18)$$

где  $F_i$  — величина стока из данной в  $i$ -ю соседнюю ячейку;  $\alpha_i$  — угол наклона  $i$ -той соседней ячейки;  $L_i$  — ширина потока,  $L_i = (\sqrt{2}/4)d$  — для диагонального направления его движения,  $L_i = (1/2)d$  — для движения потока в ячейки, примыкающие к сторонам данной ячейки ( $d$  — интервал сетки грида).

Систематическая классификация алгоритмов вычисления направления стока базируется на комбинации преимуществ обоих подходов. В силу простоты и универсальности расчета наибольшее распространение в геоинформационных системах получил алгоритм D8 [O’Callaghan J. et al., 1984].

Основной принцип данного алгоритма заключается в том, что, вода может двигаться только в одном из восьми направлений — в сторону наибольшего уклона. В некоторых источниках уклон между ячейками предлагается измерять методом взвешенных расстояний — путем деления разницы определяемых для ячеек высот на расстояние между ними в горизонтальной плоскости.

Очевидно, что расстояние между соседними ячейками будет равно единице, а между ячейками, лежащими на диагонали  $\sqrt{2}$ . Для стандартного

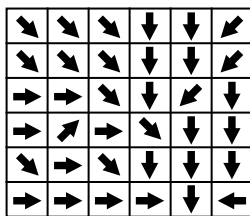


**Рис. 24. Системы кодировки направления стока:**

*a* — простая кодировка; *б* — кодировка Дженсона–Доминга; *в* — кодировка ArcInfo

78	72	68	73	60	48
75	68	56	50	46	50
70	55	45	40	39	47
65	57	53	26	30	26
67	60	48	23	18	20
75	55	45	12	10	12

*a*



*b*

2	2	2	4	4	8
2	2	2	4	4	8
1	1	2	4	8	4
1	128	1	2	4	4
2	1	2	4	4	4
1	1	1	1	4	16

*в*

Рис. 25. Сетка высот ЦМР (*a*), направления стока (*b*), кодировка стока (*в*)

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	2	7	5	4	0
0	1	0	20	0	1
0	0	1	0	22	2
0	2	3	7	35	3

*a*

0	0	0	0	0	0
0	1	1	2	2	0
0	2	7	5	4	0
0	1	0	20	0	1
0	0	1	0	22	2
0	2	3	7	35	3

*b*

Рис. 26. Кодировка аккумуляции стока:

*a* — стандартная; *b* — со свето-теневой отмывкой

скользящего окна размером  $3 \times 3$  каждое направление движения потока принято особым образом кодировать. Существует три основных типа кодировки: простая кодировка, кодировка Дженсона–Доминга и кодировка ArcInfo (рис. 24). Пример использования последней показан на рис. 25,

применительно к произвольно заданному распределению высот в сетке размером  $6 \times 6$  ячеек [Li et al., 2005].

*Линии стока и аккумуляция стока.* После определения направлений стока может быть рассчитана матрица аккумуляции (рис. 26). В этой матрице каждому элементу присваивается значение, равное числу стекающих в него ячеек. Области с наименьшими значениями абсолютных высот накапливают сток в большей степени, чем области с максимальными высотами.

Таким образом, ячейка, характеризующаяся минимальным значением  $Z$  10 собирает сток с максимально возможного для данной матрицы числа ячеек 35. Ячейки с наибольшими значениями аккумуляции формируют линии стока (чем больше параметр аккумуляции стока, тем темнее оттенок серого на рис. 26, б). Если в матрице аккумуляции ячейка характеризуется нулевым значением, значит ни одна из соседних ячеек в нее не стекает, а сама она является локальным максимумом [Li et al., 2005].

*Речная сеть и водосборные бассейны.* После расчета матрицы аккумуляции задача извлечения из нее линий стока становится тривиальной. Она заключается в выборе порога значений аккумуляции стока, которые

будут учитываться при формировании линий. На рис. 26 такой порог равен трем. Все ячейки, собирающие сток с меньшего числа элементов матрицы, не участвуют в проведении линий и показываются белым цветом. Остальные ячейки объединяются между собой и переводятся из растровой формы представления в векторную, становясь полноценными линиями стока. Совокупность линий стока образует речную сеть (рис. 27), степень детальности которой зависит от порога значений аккумуляции: чем ниже порог, тем больше линий стока, тем детальнее изображение речной сети, но вместе с тем — и выше вероятность ошибочного представления не существующих в реальности мелких водотоков. Опыт показывает, что первым идеальным приближением для расчета порога значений аккумуляции является ее среднее значение по всем ячейкам матрицы [Tang, 2000].

Другой, достаточно важной гидрографической характеристикой, извлекаемой из модели стока, является водосборный бассейн. Водосборный бассейн представляет собой, с одной стороны, часть земной поверхности, обращаяющей выпадающие на нее атмосферные осадки в форму элементарных потоков, а с другой — поверхность, образующуюся между водоразделами — линиями локальных максимумов, отличительными особенностями которых являются нулевые значения аккумуляции. Практика выделения водосборных бассейнов начинается с постепенной прорисовки линий стока, продолжается формированием древовидной структуры речной сети и заканчивается установлением для них верхних пределов высот [Freeman, 1991].

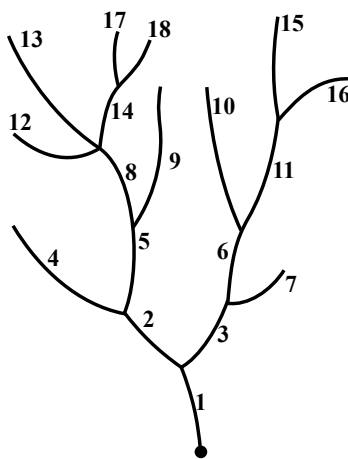


Рис. 27. Древовидная структура представления речной сети

## **Моделирование затопления территории в результате чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера**

Как особый метод моделирования областей затопления геоинформационная обработка ЦМР известна достаточно давно. Если не рассматривать гидродинамические особенности водного потока и уклон местности, суть ее заключается в увеличении высоты истинного рельефа на высоту затопления с последующим определением границ наводнения.

До появления ГИС-пакетов эта задача решалась вручную по топографическим картам, а границы затопления, как правило, совпадали с контурами горизонталей. Геоинформационные инструменты позволили улучшить эту методику за счет автоматизации некоторых операций. Теперь область затопления рассчитывается как разность цифровой модели искусственного рельефа (с учетом поднявшегося уровня воды) и цифровой модели истинного рельефа. Долгое время эти модели получали путем цифрования топографических карт. В настоящее время предпринята попытка развить методику геоинформационной обработки ЦМР для составления карт затопления территории.

Во-первых, в качестве исходных данных для моделирования областей затопления предлагается использовать не оцифрованные топографические карты, а ЦМР, построенные фотограмметрическим способом, а также данные об уровнях воды, полученные в стереорежиме. Во-вторых, для территорий со значительным уклоном местности, ЦМР предлагается разбивать на отдельные участки таким образом, чтобы в рамках каждого участка максимальная разница отметок уреза воды была меньше точности ЦМР по высоте. В-третьих, для оценки целесообразности такого разбиения и оценки точности моделирования областей затопления предлагается использовать два источника данных:

фактическую границу затопления, полученную на основе достоверных материалов на дату наводнения – снимков или карт;

границу затопления, полученную путем интерполяции высот на основе значений урезов воды, увеличенных на высоту ее подъема во время наводнения.

### ***Моделирование экологической опасности горных водохранилищ***

В моделировании областей затопления можно выделить два направления.

1. Проектирование искусственных водных объектов с учетом оценки их экологической опасности и возможных последствий техногенной чрезвычайной ситуации.

2. Моделирование областей затопления, вызванных наводнениями как чрезвычайной ситуацией природного характера.

Вначале рассмотрим теоретические аспекты проектирования искусственных водных объектов. Важный элемент проектирования водохранилища заключается в определении его технических параметров при обязательном учете природной и хозяйственной составляющих территории. Такой подход позволяет уточнить экологические и техногенные риски, выявить степень экологической опасности и в результате максимально использовать положительные и минимизировать отрицательные последствия строительства.

На рис. 28. показана общая схема водохранилища [Беркович, 2012]. Особенности воздействия водохранилищ на территорию в верхнем и нижнем бьефе можно проследить по табл. 8 и рис. 29 (цифры на схеме соответствуют номерам зон в табл. 8).

Воздействие водохранилищ на сельское хозяйство районов, прилегающих к реке в зоне подпора и в нижнем бьефе гидроузла, заключа-

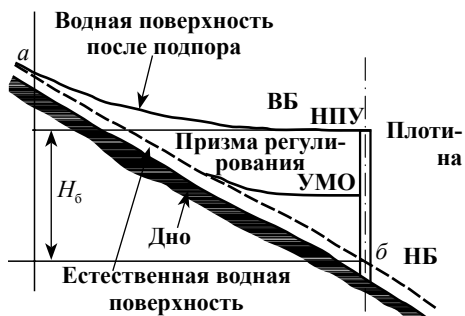


Рис. 28. Схема водохранилища:

НБ — нижний бьеф; ВБ — верхний бьеф;  $H_6$  — напор на плотине (статический подпор);  $a-b$  — длина зоны подпора; НПУ — нормальный подпорный уровень; УМО — уровень минимального объема

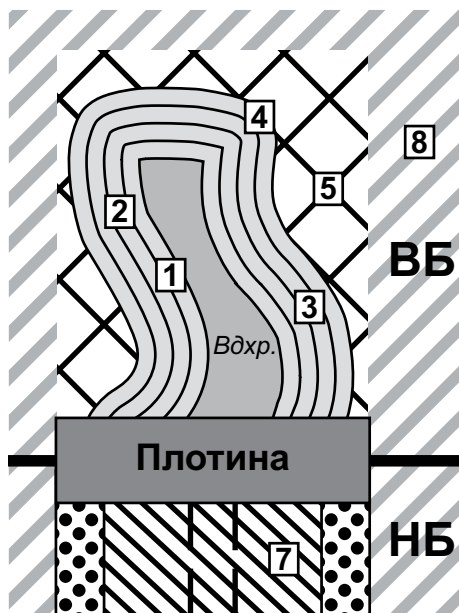


Рис. 29. Схема зон воздействия водохранилища на территорию

**Классификация зон воздействия водохранилищ на население и хозяйство**

Номер зоны	Зона	Примечание
<i>Верхний бьеф</i>		
1	Постоянного затопления	В пределах уреза воды в водохранилище при НПУ с учетом кривой подпора в межень
2	Периодического временного затопления	Между НПУ и линией уреза воды при прохождении паводков средней вероятностью повторения от 0,3% для железных дорог до 20% – для сельхоз угодий
3	Эпизодического временного затопления с меньшей вероятностью повторения	При обосновании отметки форсированного уровня водохранилища
4	Повышения уровня грунтовых вод и подтопления	Предельная глубина залегания уровня грунтовых вод: 1 м – для сельхоз угодий, 2 м — для сельских населенных пунктов, 3 м – для городов
5	Переформирования берегов водохранилищ	
<b>Нижний бьеф</b>		
6	Влияния многолетнего и сезонного регулирования стока	
7	Недельного и суточного регулирования стока	
8	Климатического влияния	

ется в изъятии сельскохозяйственных угодий, снижение их качества и условий землепользования. Наибольшее влияние на население оказывает переселение жителей из зон воздействия водохранилища и изменение социально-экономических условий их жизни.

Кроме решения важных хозяйственных задач, водохранилища вносят в природную и хозяйственную составляющие территории и ряд негативных изменений: затопление и подтопление земель, обрушение берегов; изменения микроклиматических условий и санитарно-гигиенической обстановки, нарушения условий воспроизводства и нагула рыб.

При прогнозировании особенностей проектируемых водохранилищ в первую очередь должно учитываться расположение водоемов в пределах географической зоны или высотного пояса. Среди факторов



размещения искусственных водоемов самым существенным является рельеф. Водоохранилище может быть создано в условиях как значительно, так и умеренно расчлененного рельефа в пределах низменностей, холмистых равнин, предгорий, плато, плоскогорий, горных долин и каньонов. Характер рельефа местности, где создается водоохранилище, определяет площади затопления земель на единицу объема и напора, морфологию и морфометрию водоохранилища, режим наполнения и возможности отраслевого использования.

В большинстве стран стремятся создать регулирующие водоохранилища в горах, где затопления сельскохозяйственных земель, населенных пунктов и коммуникаций менее значительны или отсутствуют вовсе. Горные водоохранилища характеризуются сравнительно небольшой площадью акватории и незначительным (десятки м<sup>2</sup>) затоплением земель. Для них характерны большие глубины (нередко более 100 м), слабое подтопление берегов и интенсивное заполнение наносами [Бабаджанян и др. 2010].

Серьезную опасность для населения, техносферы и природной среды представляют гидродинамические аварийные ситуации на водоохранилищах. Начальная фаза гидродинамической аварии — прорыв плотины. В результате чего возникает волна прорыва, образующаяся во фронте потока воды. Она характеризуется значительной высотой гребня и скоростью движения, обладает большой разрушительной силой. Высота волны прорыва и скорость ее распространения зависят от нескольких факторов: размера протока в теле плотины, разницы уровней воды в верхнем и нижнем бьефе, гидрологических и топографических условий русла реки и ее поймы. Скорость продвижения волны прорыва в горных и предгорных районах колеблется в пределах 80–100 км/ч. Высота волны находится в диапазоне от 2 до 12 м.

Основным следствием прорыва плотины при гидродинамических авариях принято считать катастрофическое затопление местности — гидродинамическое бедствие, являющееся результатом разрушения искусственной или естественной плотины. Оно заключается в стремительном затоплении волной прорыва нижерасположенной местности и возникновении наводнения. В рамках подтопленной территории принято выделять зону вероятного катастрофического затопления — зону, на которой ожидается или возможна гибель людей, сельскохозяйственных животных или растений, повреждение или уничтожение

материальных ценностей, а также ущерб окружающей природной среде [ГОСТ Р 22.0.03-95].

Существенное влияние на объем водохранилища и площадь его поверхности оказывает высота плотины. Она же обуславливает масштабы хозяйственного использования и ущерб инфраструктуре от возможного затопления. Методика геоинформационного моделирования экологической опасности горных водохранилищ основана на сценарии, показывающем затопление территории верхнего бьефа после искусственного увеличения высоты плотины. Кроме того, эта методика позволяет рассчитать последствия чрезвычайной ситуации, вызванной возможным прорывом плотины.

Моделирование затопления территории предложено реализовать средствами ГИС-пакетов. С их помощью на основе ЦМР, построенных фотограмметрическим способом, могут быть рассчитаны площади затопления и объемы воды в верхнем бьефе в результате увеличения высоты дамбы на стадии проектирования водохранилища. Количественные показатели объема воды в водохранилище при том или ином инженерном решении позволяют оценить масштабы последствий в случае возможного прорыва плотины.

Рассматривая в качестве одного из основных результатов от увеличения высоты дамбы возможное подтопление путей сообщения в верхнем бьефе водохранилища, очевидно, что при их проектировании следует разработать альтернативные маршруты. Для моделирования положения дорог необходимо учитывать три основных фактора: кратчайшее расстояние между связующими пунктами, наименьшие величины крутизны склонов и отсутствие пересечений с районом затопления.

Кроме того, средствами ГИС-пакетов может быть рассчитана зона катастрофического затопления местности в нижнем бьефе водохранилища в результате возможной чрезвычайной ситуации — прорыва плотины. При наличии современной и актуальной базы данных количественно можно оценить и другие последствия: число строений и площадь сельскохозяйственных земель, оказавшихся под водой.

#### ***Моделирование областей затопления, вызванных наводнениями***

Помимо чрезвычайных ситуаций, спровоцированных хозяйственной деятельностью человека, серьезные последствия для природы и общества вызывают стихийные бедствия, к числу которых в контексте

затопления территории в первую очередь относят наводнения. Это второй тип задач геоинформационного моделирования областей затопления.

Под наводнением, согласно ГОСТ 19179-73, принято понимать «затопление территории водой, которое представляет собой стихийное бедствие и может происходить в результате подъема уровня воды во время половодья или паводка, при заторе, зажоре, вследствие нагона в устье реки или прорыве гидротехнических сооружений».

К основным последствиям наводнений принято относить материальный ущерб и ущерб населению (табл. 9). Материальный ущерб может выражаться в площади затопленной территории (в т.ч. сельскохозяйственных угодий) и числе затопленных объектов инфраструктуры: жилых и нежилых домов, железных и автомобильных дорог, разрушенных мостов и пр. Ущерб населению подразумевает число погибших, пострадавших, оставшихся без крова и эвакуированных из района наводнения людей [Новаковский и др., 2013].

Геоинформационное моделирование областей затопления, вызванных наводнениями, предлагается провести на основе ЦМР, полученных в результате фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ. В зависимости от точности ЦМР обусловленные рельефом физико-гео-

Т а б л и ц а 9

**Классификация наводнений по распространению**

Класс	Распространение	Последствия	Повторяемость
Катастрофический	Системы речных долин. В зоне затопления более 70 % сельхозугодий	Огромный материальный ущерб. Гибель людей	100–200 лет
Очень опасный	Речные бассейны. В зоне затопления 50–70% сельхозугодий	Большой материальный ущерб. Массовая эвакуация населения	50–100 лет
Опасный	Небольшие площади в речных долинах. В зоне затопления 10–15% сельхозугодий	Ощутимый материальный ущерб. Частичная эвакуация населения	10–50 лет
Неопасный	Небольшие площади прибрежных территорий. В зоне затопления менее 10% сельхозугодий	Незначительный материальный ущерб. Привычный ритм жизни населения	5–10 лет

графические предпосылки наводнения, а также его последствия для населения и хозяйства можно оценить на разном пространственном уровне, с различной степенью подробности.

ЦМР, построенные по стереопарам космических снимков высокого пространственного разрешения (1–10 м), с размером ячейки 25×25 м и более и высотной точностью порядка 3–7 м, могут использоваться для создания морфометрических карт (углов наклона, экспозиции склонов) и гидрографических карт (гидрографической сети, водосборных бассейнов) масштаба 1: 50 000 и мельче.

Сами области затопления целесообразно моделировать на основе ЦМР, полученных по стереопарам аэроснимков или космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения (< 1 м). Это обусловлено тем, что высотная точность ЦМР, используемой для моделирования, должна быть не хуже, чем высота подъема воды в период наводнения.

В связи с этим в рамках проведенного исследования предложено уточнить и дополнить картографические и гидрологические данные, необходимые для моделирования наводнений и составления крупномасштабных карт областей затопления, путем ручной векторизации объектов гидрографической сети по урезам воды на основе стереопар снимков сверхвысокого пространственного разрешения.

Все известные алгоритмы определения границ областей затопления используют комбинацию геометрического и гидрологического подходов [Павлов и др., 2008]. Значительное количество работ посвящено гидродинамическому моделированию областей затопления, суть которого — решение в различном приближении системы уравнений речной гидравлики. Для параметризации и адаптации таких моделей необходимы не только данные о строении речной долины (ЦМР), но и ряд гидрологических показателей (коэффициенты шероховатости русла и долины реки, показатели расходов и уровней воды на гидрологических створах) [Борщ и др., 2013].

Как правило, такие показатели, получаемые с водопостов в ходе гидрометрических работ, хранятся в специализированных гидрологических базах данных. Плотность водопостов в зависимости от степени хозяйственного освоения территории может варьироваться от сотен метров до сотен километров. Соответственно, на отдельных участках рек существует проблема нехватки точных данных об уровнях воды.

Ряд исследователей решает эту проблему посредством удлинения коротких рядов наблюдений с помощью статистических моделей [Жоров и др., 2006].

Для сгущения данных об уровнях воды предложено использовать ручную векторизацию объектов гидрографической сети по стереопарам аэро- и космических снимков сверхвысокого ( $< 1$  м) пространственного разрешения, в том числе равновременных, средствами ЦФС. Минимально допустимая плотность стереоизмерения урезов воды составляет в плане 1 пиксел. Абсолютная высотная точность определения уровней воды составляет 2–3 пиксела. В метрическом отношении она соответствует единицам–десяткам сантиметров (для стереопар аэроснимков) и десяткам сантиметров–единицам метров (для стереопар космических снимков). Абсолютная высотная точность зависит от количества и точности опорных точек, используемых для уравнивания стереопары снимков. Относительная высотная точность измерения урезов воды оператором определяется как пространственное разрешение снимков, умноженное на отношение высоты съемки к базису съемки [Сечин, 2008]. Величина относительной точности, как правило, варьируется от десятков сантиметров до единиц метров. Для определения урезов на реках с небольшим колебанием уровня воды (десятки сантиметров) целесообразно использовать стереопары аэроснимков; на реках с большим колебанием уровня воды (единицы–десятки метров) — стереопары космических снимков.

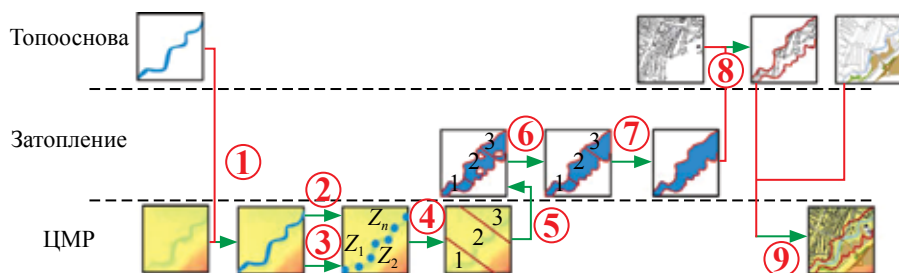
Имея в распоряжении ЦМР речной долины и оцифрованные по урезам воды границы реки можно приступить собственно к моделированию областей затопления. В рамках исследования оно ограничено использованием сугубо геометрического подхода — затопленными считаются территории: 1) высота которых меньше, чем высота уреза воды, увеличенная на величину подъема воды в реке; и 2) территории, которые не отделены от реки естественными или искусственными препятствиями, то есть связанные с ней.

Моделирование реализовано для рек двух типов: горных и равнинных. Для равнинных рек, которыми в рамках настоящей работы считаются реки с нулевым уклоном и одинаковым значением уреза воды в пределах области исследования, указанный подход выполняется полностью. Для моделирования областей затопления на горных реках в условиях сложных форм рельефа с большими уклонами и перепадами высот такая методика

не подходит. В этом случае ЦМР речной долины необходимо разбить на участки, для которых указанная методика будет эффективна. Возникает вопрос: на сколько участков следует разбить ЦМР?

В российской практике борьбы с чрезвычайными ситуациями однозначных ответов нет: «...при разработке расчетной схемы основным источником сведений о плотности, составе и строении гидрографической сети бассейна являются топографические карты, дополненные материалами крупномасштабных аэрофотосъемок. На основе анализа этих сведений бассейн реки разбивается на участки, на границах которых обозначаются постоянные створы. Участки определяются по усредненным гидравлическим и морфологическим характеристикам реки. За нулевой створ принимается ближайший к истоку реки (формированного потока). Первый створ выбирается на удалении не менее 4-х часового добегаания от нулевого створа» [Шойгу, 1998].

В связи с этим при разбиении ЦМР речной долины предлагается учитывать высотную точность ЦМР. Схема геоинформационного моделирования областей затопления, вызванных наводнением, показана на рис. 30. Авторскими следует считать первые 4 шага методики. Шаги 5–9 — реализация уже существующих алгоритмов.



**Рис. 30. Схема геоинформационного моделирования областей затопления:**

— исходные данные; — функции

### *Методика геоинформационного моделирования зон затопления*

1. На первом этапе мы фиксируем границу реки по урезам воды, используя для этого стереорежим ЦФС.

2. На втором этапе непрерывную границу реки преобразуем в набор дискретных отметок урезам воды.

3. На третьем этапе в автоматическом режиме назначаем высоту каждой отметке уреза воды.

4. На четвертом этапе автоматически группируем отметки урезов с диапазоном высот в пределах высотной точности ЦМР. В соответствии с этими группами разбиваем ЦМР на участки перпендикулярно руслу реки.

5. Для каждого участка ЦМР производится расчет зон затопления. Из числа отметок урезов воды выбираются две – с максимальным и минимальным значениями в пределах каждого участка. К среднему значению их высот прибавляется значение подъема уровня воды. Статистические данные о фактических уровнях воды берутся из официальных источников Росгидромета, МЧС и гидрологических баз данных гидропостов. Изолиния с результирующей высотой будет границей области затопления в пределах заданного участка.

6. В пределах каждого участка удаляются области локальных понижений, не имеющие с рекой общих границ.

7. Области затопления объединяются, рассчитываются общая площадь затопления и объем воды.

8. Производится расчет числа строений (и других объектов инфраструктуры), оказавшихся в зоне затопления.

9. На основе ЦМР, смоделированной границы затопления и имеющейся общегеографической основы, с учетом рассчитанного числа затопленных строений, площади затопления (объема воды) составляется карта затопления территории.

На карте могут показываться несколько границ затопления, рассчитанных для разных уровней воды в разное время. В зависимости от того, какие данные об уровнях воды – фактические или условные – используются для моделирования, это могут быть карты фактического или прогнозного затопления. В качестве общегеографической основы карты затопления предлагается использовать данные из открытых источников OpenStreetMap, актуализированные по результатам стереовекторизации и автоматизированного выделения строений и растительности на основе ЦМП.

Обоснованность дополненной авторскими предложениями методики геоинформационного моделирования областей затопления предлагается верифицировать, используя для сравнения с результатами моделирования два источника данных:

1) фактическую границу затопления, полученную на основе достоверных картографических материалов или данных ДЗЗ на дату

наводнения;

2) границу затопления, полученную путем интерполяции высот на основе значений урезов воды, увеличенных на высоту ее подъема во время наводнения.

Помимо визуальной оценки согласования границ, целесообразным представляется сравнение площадей затопления, общих объемов воды в пределах затопленной территории, а также числа затопленных строений.

Сначала рассмотрим процедуру верификации результатов моделирования по фактической границе затопления. В первую очередь необходимо обеспечить единообразие математической основы. Карты и/или снимки с достоверно подтвержденной фактической границей затопления получают правильную геопривязку — приводятся к масштабу и проекции карты, полученной в результате моделирования. После этого фактическая граница затопления оцифровывается, и производится расчет числа строений, попавших в зону фактического затопления. Площадь затопления рассчитывается в пределах фактической границы на основе ЦМР, построенной фотограмметрическим способом.

Процедура верификации результатов моделирования по границе затопления, полученной путем интерполяции высот, отличается особой спецификой. Опишем методику такой интерполяции. Начало ее практически полностью повторяет первый этап методики геоинформационного моделирования областей затопления: граница реки фиксируется в стереорежиме, непрерывная граница реки преобразуется в набор дискретных отметок урезов воды, значения высот автоматически присваиваются отметкам урезов воды. При этом ни ЦМР, ни набор отметок урезов воды на участке не разделяются. Далее величина подъема уровня воды в реке прибавляется к значениям высот всех точек. Область затопления представляет собой пересечение исходной ЦМР и поверхности, образуемой интерполяцией высот отметок урезов, увеличенных на величину подъема уровня воды. После многочисленных экспериментов с использованием различных методов и настроек интерполяции, стало ясно, что наилучшие результаты интерполяции демонстрируют методы обратно-взвешенных расстояний и кригинга. На целесообразность использования этих методов при оценке границы затопления указывают и другие исследователи [Максимович, 2012].

Преимуществами метода интерполяции, которые позволяют использовать его для верификации разработанной методики, можно



считать следующее:

а) нет необходимости разделять ЦМР и границу реки на отдельные участки, что сокращает время моделирования;

б) для интерполяции используется больший объем данных: не просто набор средних высот по отдельным участкам, а массив точечных объектов с высотами, рассчитанными целиком для всей реки. Большой объем данных априори повышает надежность результатов моделирования.

Число строений, попавших в область затопления (полученной методом интерполяции высот), рассчитывается простыми оверлейными операциями. Площадь затопления вычисляется по ЦМР в пределах полученной путем интерполяции области затопления.

Как показывают экспериментальные исследования, дополненная авторскими предложениями методика геоинформационного моделирования областей затопления характеризуется высокой степенью достоверности. На это указывают визуально похожие конфигурации границ областей затопления (при сравнении с фактической границей и границей, полученной путем интерполяции высот), близкие значения площади затопленной территории и числа строений, попавших в область затопления. Относительно показателей, рассчитанных по фактической границе, погрешность вычисления площадей заявленным методом составляет порядка 10–15%.

Верификация метода моделирования областей затопления по отдельным участкам относительно метода расчета границы затопления путем интерполяции высот выявила некоторые ограничения последнего (рис. 31). Во-первых, стандартными средствами ArcGIS граница



Рис. 31. Ограничение метода расчета области затопления путем интерполяции высот

затопления может быть проинтерполирована методом кригинга только в пределах области, ограниченной положением крайних точек реки с известными высотами. Авторский алгоритм моделирования границ затопления лишен этого недостатка (см. рис. 31). Во-вторых, в связи с разбиением ЦМР на участки для моделирования областей затопления по авторскому алгоритму требуется меньшее число отметок урезов воды с известными высотами.

В теоретическом отношении моделирование областей затопления, вызванных стихийным бедствием и спровоцированных человеком, имеют много общего. Подъем уровня воды в верхнем бьефе при проектировании водохранилища происходит так же, как и равномерное увеличение уровня воды в случае природного наводнения на равнинной реке. В свою очередь, механизм затопления территории из-за прорыва плотины сходен с динамическим подъемом воды в низовьях узкой горной реки. Это значит, что методика геоинформационного моделирования областей затопления может быть применима к проектированию водохранилищ и моделированию прорыва плотин.

При недостатке фактических данных об уровнях воды, необходимых для моделирования наводнений и составления крупномасштабных карт областей затопления, собрать их можно путем ручной векторизации объектов гидрографической сети по урезам воды на основе стереопар аэро- и космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе разновременных.

## **§ 2.4. Выводы**

1. Усовершенствованные методы фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ и геоинформационной обработки ЦМР позволили дополнить известные технологии геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа для решения различных географо-картографических задач.

Комплексность методики заключается в разнообразии: характеристик рельефа (гидрографических, морфометрических, топоклиматических, геометрических) и исследований, связанных с их определением; используемых типов данных ДЗЗ (классические аэроснимки, снимки с БПЛА, материалы классической и разновременной космической съемки, наземные изображения); критериев выбора снимков для ре-

шения географо-картографических задач (разрешение, время съемки, сезон и др.); используемых средств и алгоритмов обработки данных (фотограмметрические, геоинформационные и др.); составляемых тематических карт.

2. При соблюдении ряда требований, предъявляемых как к самим изображениям, так и к технологии их фотограмметрической обработки, на основе разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения возможно формирование стереомоделей и автоматизированное построение ЦМР.

3. Фотограмметрическая обработка данных наземной стереосъемки, полученных малоформатными цифровыми камерами с нормальноугольными объективами, характеризуется рядом особенностей, обусловленных необходимостью учета разворота осей системы координат. В отличие от существующих технологий применения цифровых камер для наземной стереосъемки, представляющих собой многоступенчатую обработку «ближних» и «дальних» стереопар в разных программных пакетах, авторский алгоритм может быть полностью реализован в единой среде ЦФС PHOTOMOD.

4. На основе «плотных» ЦМП с размером ячейки равным размеру пиксела изображений разработан алгоритм автоматизированного определения контуров строений и растительности. По сравнению с известными методиками анализа и классификации облаков точек, расчетные операции с регулярными ЦМП занимают меньше времени. В отличие от горизонталей, контуры, рассчитанные по авторской технологии, однозначны и содержат в себе более важную информацию об относительных, а не абсолютных высотах объектов. Алгоритм реализован штатными средствами ЦФС PHOTOMOD.

5. В результате сравнения сходимости ЦМР, построенных разными методами (по материалам ДЗЗ и топографическим картам масштаба 1: 100 000), с референсной моделью, полученной на основе оцифрованных горизонталей топокарт масштаба 1: 25 000, сделан вывод о пригодности обеих ЦМР для составления тематических карт масштаба 1: 100 000. Вместе с тем ЦМР, построенная фотограмметрическим способом, имеет лучшие показатели пригодности по расхождению высот с референсной моделью.

6. Недостаток данных об уровнях воды, необходимых для моделирования наводнений и составления крупномасштабных карт областей

затопления, предлагается восполнить путем векторизации объектов гидрографической сети по урезам воды на основе стереопар полученных в период межени аэро- и космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе разновременных. Для определения урезов на реках с небольшим колебанием уровня воды (десятки сантиметров) целесообразно использовать стереопары аэроснимков; на реках с большим колебанием уровня воды (единицы – десятки метров) – стереопары космических снимков.

В качестве критерия разбиения на участки ЦМР долин рек горного типа в условиях сложных форм рельефа с большими уклонами и перепадами высот для последующего моделирования областей затопления предлагается использовать величину падения реки, которая должна быть не больше высотной точности ЦМР.

7. Дополненный авторскими предложениями алгоритм геоинформационного моделирования областей затопления характеризуется высокой степенью достоверности. Погрешность вычисления площадей затопления при сравнении с картой дешифрирования областей затопления в период фактического наводнения составляет порядка 10–15%.

В отличие от алгоритмов расчета границы затопления путем интерполяции высот (реализованных стандартными средствами ArcGIS 10) дополненный авторскими предложениями алгоритм позволяет моделировать области затопления для территорий с большей площадью: за пределами области, ограниченной положением крайних точек реки с известными урезами воды. Для моделирования областей затопления по авторскому алгоритму требуется меньшее число отметок урезов воды.

## ГЛАВА 3

### **ОПЕРАТИВНОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬЕФА В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа и его характеристик расширяет сферу практического использования ЦФС. Традиционно применявшиеся для создания и обновления топографических карт и планов, ЦФС в тандеме с геоинформационными технологиями могут успешно использоваться в тематическом картографировании для оперативного решения широкого круга географо-картографических задач.

Все географо-картографические задачи условно разделены на четыре категории в соответствии с четырьмя основными группами характеристик рельефа, с которыми эти задачи связаны наиболее тесно. Это гидрографические, морфометрические, топоклиматические и геометрические задачи.

#### **§ 3.1. Гидрографические задачи**

##### *Определение последствий затопления территории в результате чрезвычайных ситуаций природного характера (на примере городов Крымск, Благовещенск, Бийск)*

В условиях обострения ситуации с наводнениями и другими чрезвычайными ситуациями природного характера в России и мире особую значимость приобретают обоснованность и своевременность принятия управленческих решений в отношении их оценки и прогнозирования, определения возможных негативных последствий с целью их предотвращения и минимизации. Для решения указанной задачи в полной мере может быть использована адаптированная методика геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа (рис. 32). Методика

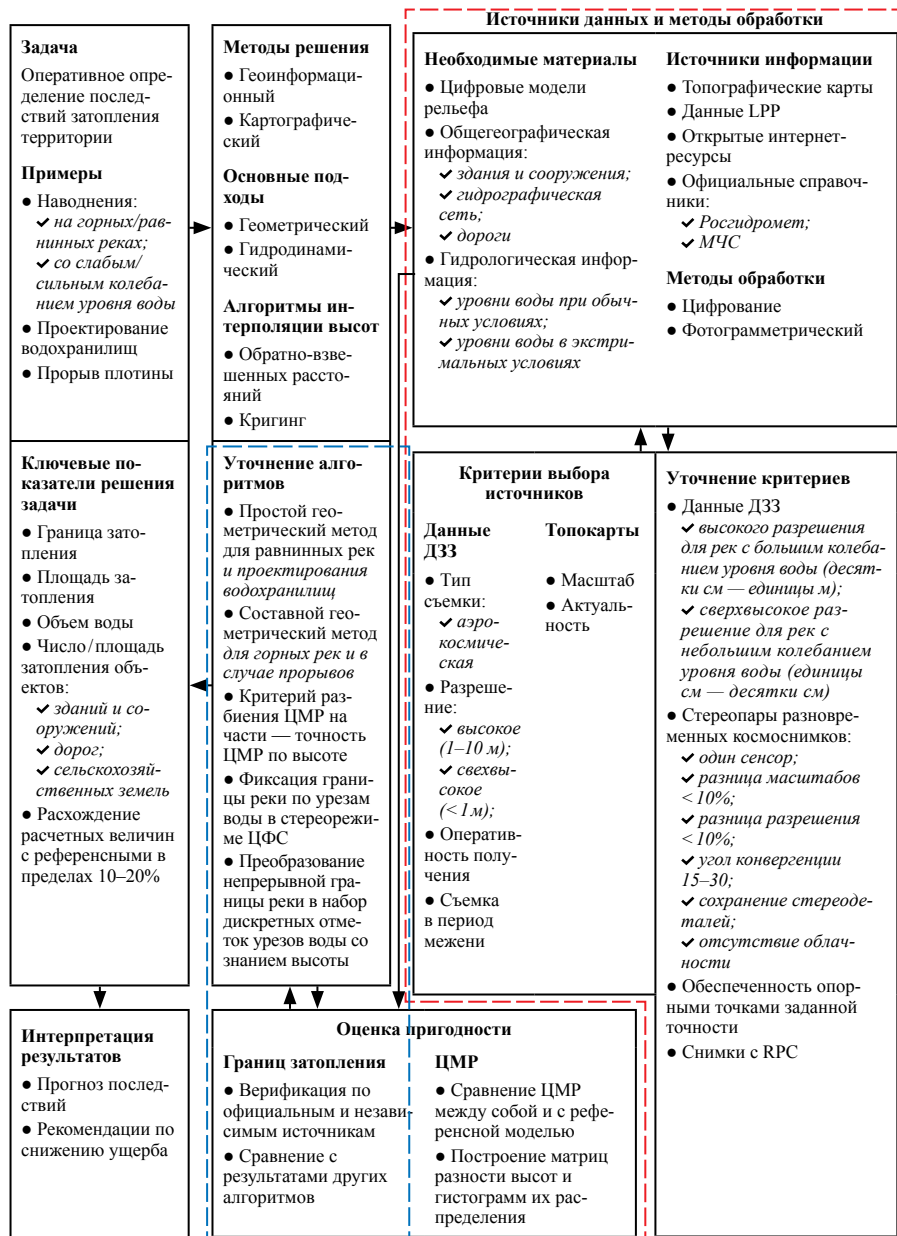


Рис. 32. Схема методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа для определения последствий затопления территории

такого моделирования опробована на примере нескольких наводнений: в Краснодарском крае в 2012 г., Амурской области в 2013 г. и Алтайском крае в 2014 г.

### *Наводнение в Крымске (Краснодарский край)*

В начале июля 2012 г. в Крымском районе Краснодарского края произошло наводнение, относящееся по своим последствиям к категории катастрофических. По сообщениям информационного портала Южного региона со ссылкой на официальные источники, наводнение в Крымском районе Краснодарского края в ночь с 6 на 7 июля 2012 г. унесло жизни 153 человек. Более 1000 человек обратились за медицинской помощью, из них 187 были госпитализированы в Крымскую городскую больницу. Общее число пострадавших от наводнения оценивается почти в 35 тыс. человек [<http://www.yuga.ru>].

По сведениям информационного агентства «РИА Новости» со ссылкой на официальный доклад Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), главной причиной наводнения в Крымском районе стали ливневые осадки. Объем стока в период паводка за 6–7 июля составил 38% годовой нормы. Кроме того, ситуацию усугубили антропогенные факторы — насыпи и забитые мусором русла для отвода воды. «Пропускная способность железнодорожного моста через реку Адагум перед городом Крымском оказалась недостаточной, чтобы пропустить большой объем воды, насыщенной карчем, в результате чего в треугольнике, образованном двумя железнодорожными насыпями начался подъем уровня воды, достигший 7,1 м, и образовалось искусственное водохранилище со значительным объемом воды. При дальнейшем поступлении воды по этим рекам произошло перетекание и прорывы значительной части аккумулированного стока в левобережную пойму и его быстрое перемещение в сторону города Крымска», - говорится в документе [<http://www.ria.ru>]. По мнению экспертов, существуют и другие причины трагедии: плотная застройка, заиленность русла р. Адагум, неэффективная работа служб по предупреждению населения, отсутствие гидродинамических моделей прохождения паводка и др. [Волосухин и др., 2012; Котляков и др., 2012].

Для Крымского района методику геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа решено реализовать на двух масштабных уровнях: среднемасштабном и крупномасштабном. Средне-

масштабная модель должна охватывать большую часть Крымского района, в т.ч. Неберджаевское водохранилище и все притоки реки Адагум, стекающие с северо-восточного склона Кавказского хребта. Крупномасштабная модель должна детально описывать территорию города Крымск.

Исходя из этих критериев с учетом требований оперативности, для решения поставленной задачи было выбрано два архивных набора данных ДЗЗ. Поскольку доступные из имеющихся в архивах классические стереопары космических снимков для указанной территории содержали крайне высокий процент облачности (60 % и более), выбор был сделан в пользу разновременных космических снимков, пригодных по своим свойствам для формирования стереопар.

Для создания ЦМР среднемасштабного уровня использованы разновременные космические снимки с углом конвергенции 29,5, с пространственным разрешением 2,5 м, обеспеченные метаданными с RPC-коэффициентами (RPC — rational polynomial coefficients). Снимки получены французским спутником SPOT 5 в июне–июле 2012 г.

Точность уравнивания стереопары, выполненного в ЦФС PHOTOMOD, характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 2,9 м и 3,2 м соответственно. Такой точности уравнивания достаточно для создания топографических карт на равнинные территории в масштабе 1: 50 000 и мельче [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построены плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 2,5 м. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 5,7 м (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопаре снимков SPOT 5 — 6,1 м.

Поскольку фактический подъем уровня воды в реке Адагум составил 7,1 м [<http://www.ria.ru>], предварительная оценка показателей точности говорит о том, что ЦМР, построенная по снимкам SPOT 5, не пригодна для детального моделирования затопления Крымска, однако, подходит для анализа обусловленных рельефом физико-географических предпосылок наводнения.

В связи с этим на основе среднемасштабной ЦМР с использованием стандартных алгоритмов ГИС-пакета ArcGIS были получены такие важные морфометрические и гидрографические характеристики территории, как углы наклона, экспозиция склонов, плановая и профильная кривизна поверхности, границы водосборных бассейнов и гидрографическая сеть.



Для оценки метода результаты автоматического моделирования речной сети сравнивались с положением рек, векторизованных в стереорежиме вручную. Сопоставляя между собой положение рек, полученных автоматическим путем и дешифрованных в стереорежиме, можно заключить, что результаты обеих технологий находятся в тесной и положительной корреляции, а линии рек в большинстве своем повторяют друг друга. Главным преимуществом процедуры моделирования, по сравнению с векторизацией в стереорежиме, стала автоматизация процесса и как следствие — меньшее время его выполнения.

Общегеографическая информация, полученная из открытых источников Internet (OpenStreetMap): контуры растительности, дороги, границы населенных пунктов, была актуализирована на основе стереомодели путем ручной векторизации. Положенные на общегеографическую основу результаты моделирования воплотились в соответствующие среднемасштабные тематические карты: высот, углов наклона и экспозиции склонов (Приложения 1–3), гидрографической сети (рис. 33) и водосборных бассейнов (рис. 34).

Средняя высота кавказских хребтов составляет в бассейне реки Адагум 390 м. На юге бассейн реки Адагум граничит с бассейнами небольших рек, впадающих в Черное море, на востоке — с бассейнами рек Псыж и Абин, на западе — с бассейнами рек Кудако и Гечепсин. Верхняя и средняя часть бассейна реки Адагум располагается на склонах Большого Кавказского хребта и в основном представляет собой невысокие холмистые гряды. Нижняя часть бассейна располагается на предгорной равнине, имеющей общий наклон на север. Высота устья над уровнем моря 10 м. Русло реки извилистое, слабо разветвленное, хорошо выраженное [Данилов-Данильян и др., 2013]. Длина реки Адагум около 100 км, площадь водосбора — порядка 330 км<sup>2</sup>. Большая часть реки (около 80%) имеет уклон 0–5 ‰, в верховьях уклон достигает 21–50 ‰.

Охват крупномасштабного уровня моделирования ограничен границами города Крымск. Для создания ЦМР крупномасштабного уровня использованы разновременные космические снимки с углом конвергенции 23,2, с пространственным разрешением 0,5 м, обеспеченные метаданными с RPC-коэффициентами. Снимки получены американским спутником WorldView-1 в мае–июне 2013 г. с нулевым процентом облачности и близкими характеристиками высоты Солнца во время съемки в 59,8 и 65,1.



Рис. 33. Карта гидрографической сети (Крымск, Краснодарский край)

Точность уравнивания снимков составила 1,4 м в плане и 1,6 м по высоте. В ЦФС PHOTOMOD в автоматическом режиме построены плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 0,5 м. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 2,7 м (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопаре — 1,1 м. В ходе предварительной оценки установлено, что такой точности достаточно для измерения урезов воды и детального моделирования областей затопления.

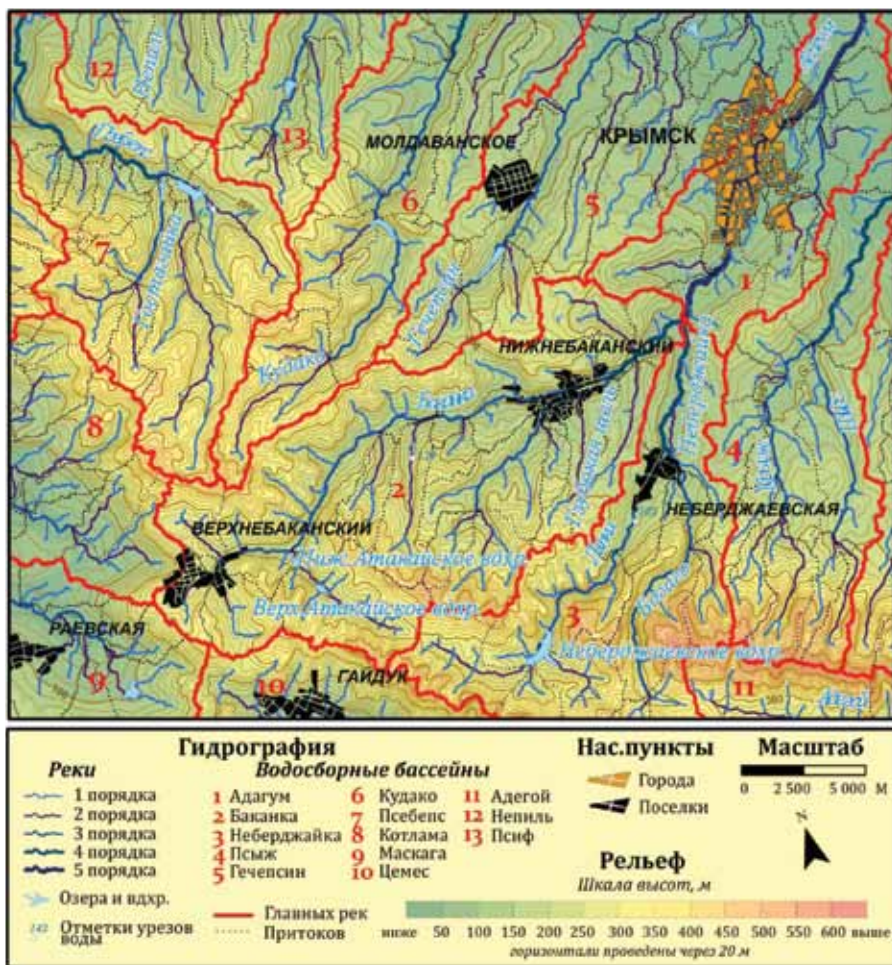


Рис. 34. Карта водосборных бассейнов (Крымск, Краснодарский край)

Для аппроксимации затопления территории использован уже известный алгоритм, основанный на геометрическом подходе к анализу рельефа, но дополненный авторскими разработками (см. главу 2). Поскольку Адагум — река горная, ЦМР города Крымск была разделена на несколько участков. Разбиение проходило таким образом, чтобы разница высот на урезах воды в пределах каждого участка была меньше высотной точности построенной ЦМР (2,7 м по СКО). Каждый участок получен путем сечения ЦМР плоскостями, перпендикулярными к направлению

течения реки Адагум. К среднему значению урезов воды  $((\min+\max)/2)$  на каждом участке добавлена высота прохождения волны (7,1 м), после чего смоделирована изолиния с их суммарным значением. Эта изолиния представляет собой границу области затопления в пределах каждого участка. Замкнутые области локальных понижений, не связанных с рекой, были исключены, а вычисленные для каждого участка области затопления объединены в единую область.

Для верификации результатов моделирования положение границы затопления, рассчитанной в соответствии с авторским алгоритмом, сравнивалось с двумя независимыми источниками: с фактической границей затопления, полученной из открытых материалов о наводнении, и с границей, смоделированной путем интерполяции высот методом кригинга.

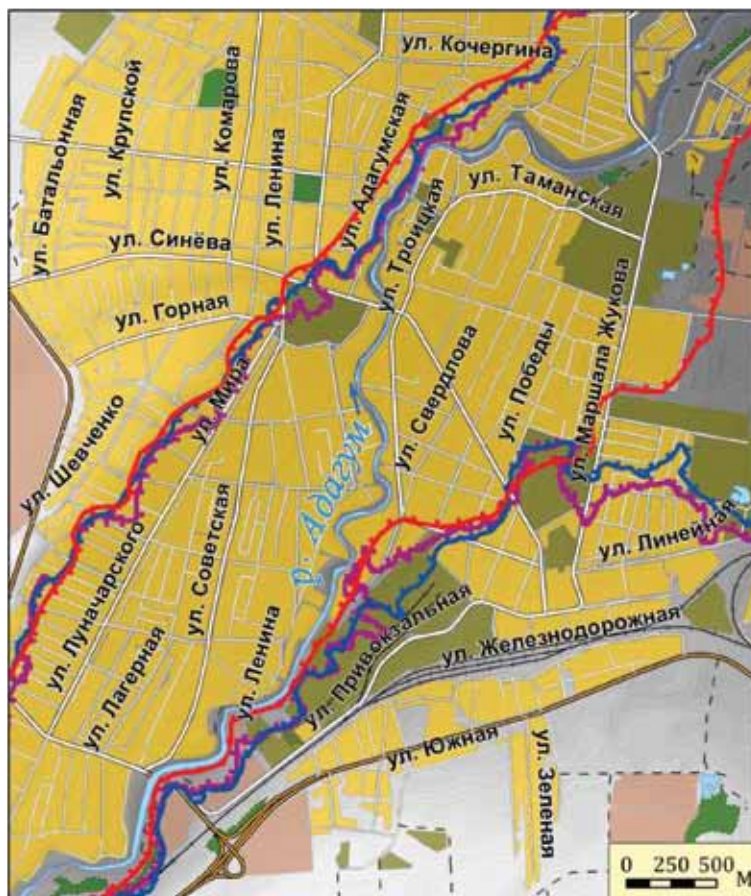
Помимо визуальной оценки их согласования между собой, целесообразным представляется сравнение фактической и рассчитанной площадей затопления, а также числа затопленных строений. Данные о фактической границе распространения наводнения взяты из открытых источников OpenStreetMap [<http://www.wiki.openstreetmap.org>].

На основе исходной ЦМР в границах фактической и смоделированной областей затопления рассчитаны соответствующие площади и объемы воды. Операции расчета проводились в модуле 3D-Analyst. Для приблизительной оценки материального ущерба оверлейными средствами ArcGIS 10 рассчитано число строений, оказавшихся в зоне затопления в зависимости от того, фактическая или смоделированная граница распространения наводнения использовалась для расчетов. В качестве общегеографической основы карты затопления взяты данные из открытых источников OpenStreetMap, актуализированные по результатам стереовекторизации и автоматизированного выделения строений и растительности на основе ЦМП [<http://www.wiki.openstreetmap.org>].

После наложения результатов моделирования на основу, генерализации и взаимного согласования элементов содержания создана крупномасштабная карта затопления Крымска (рис. 35). Масштаб оригинала — 1: 25 000.

По карте видно, что в результате наводнения под водой оказалось более 50% территории города общей площадью порядка 1000 га. При этом на юге больше всего пострадала левобережная, а на севере — правобережная часть Крымска. Положение рассчитанной по авторской





Гидрография	Дороги	Населенные пункты	Прочее
<ul style="list-style-type: none"> <li>Реки</li> <li>Озера</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Железные</li> <li>Шоссе</li> <li>Грунтовые</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Жилые кварталы</li> <li>Промзоны</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>С/х поля</li> <li>Древесная растительность</li> </ul>
<b>Высоты, м</b> 0 10 20 30 40 50 60			
<b>Граница затопления</b>	<b>Площадь, га</b>	<b>Затопл. строения</b>	
Автор методика	979	6 858	
Интерполяция	964	6 795	
Фактическая	865	6 730	

Рис. 35. Карта затопления Крымска

методике границы затопления на левом берегу реки Адагум практически полностью совпадает с его фактической границей и границей, рассчитанной методом кригинга. На правом берегу рассчитанный район затопления занимает несколько большую площадь, по сравнению с фактическим, а значит и объем воды, сконцентрированной на ней, больше фактического. Несовпадение границ можно объяснить меандрированием реки: в этом месте русло резко поворачивает на восток.

Что касается моделирования затопления путем интерполяции методом кригинга, полученные таким образом границы значительно коррелируют с границами затопления, рассчитанными по авторской методике. В связи с тем, что пределы интерполяции методом кригинга ограничены положением крайних точек реки, район сопоставления областей затопления, фактической и рассчитанной по авторской методике, был также ограничен этими границами.

Согласованность фактической и рассчитанной границ затопления достаточно велика и составляет 88 %. Она рассчитывается как частное от деления значений соответствующих площадей затопления (объемов воды или числа затопленных строений). Следует заметить, что в целях прогнозирования и предотвращения опасных последствий наводнения использование завышенных значений площадей затопления и числа строений, попавших в зону затопления, более целесообразно по сравнению с недооценкой этих показателей.

Среди мероприятий, способствующих снижению риска наводнения и катастрофических ущербов в Крымске, наиболее целесообразным признан вариант инженерной защиты территории, предусматривающий расчистку русла реки Адагум для пропуска паводка [Данилов-Данильян и др., 2013]. Граждане, проживающие в зоне риска, должны заблаговременно знать об угрозе затопления. Учитывать же саму опасность затопления территории необходимо уже на стадии разработки Генерального плана города и района [Волосухин и др., 2012].

### ***Наводнение в Благовещенске (Амурская область)***

В июне–сентябре 2013 г. в бассейне реки Амур сложилась напряженная ситуация. В условиях муссонного климата и активной циклональной деятельности среднее количество осадков, выпавшее за летний сезон 2013 г., более чем в 1,5 раза превысило среднегодовой показатель последнего десятилетия (2002–2012 гг.) [Цимеринов, 2013]. Ливневые

дожди, выпавшие в таком количестве, стали основной причиной повышения уровня воды в реке Амур и затопления значительной части прибрежной территории.

Задача оперативного определения последствий наводнения в Благовещенске потребовала адаптации методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа к физико-географическим особенностям территории исследования.

Благовещенск располагается на юго-западе Зейско-Буреинской равнины в месте впадения реки Зея в реку Амур. Преобладающий диапазон высот рельефа — от 0 до 300 м. Климат носит переходные черты от муссонного к континентальному. Половина годового количества осадков, как правило, выпадает в июле–августе. С сезонным распределением осадков связан режим рек, характеризующийся сильными разливами во время летних дождей. Среднегодовой расход воды на реке Амур — порядка 10 000 м<sup>3</sup>/с [Гвоздецкий, 1970].

Основными критериями при подборе снимков для решения поставленной задачи стали оперативность получения, широкий охват, высокая детальность (субметровое пространственное разрешение). Таким образом из архивов была выбрана классическая стереопара космических снимков, полученная американским спутником World-View-1 10 сентября 2011 г. с пространственным разрешением 0,6 м.

Уравнивание стереопары с использованием RPC-коэффициентов и 18 опорных точек обеспечило плановую и высотную точность уравнивания по СКО в 0,7 и 0,8 м соответственно. Такой точности уравнивания, согласно инструкции по фотограмметрическим работам, достаточно для создания топографических карт масштаба 1: 25 000 [Инструкция..., 2002].

Автоматическим способом по стереопаре снимков были построены плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 0,6 м. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 1,8 м (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопаре — 0,55 м. В результате предварительной оценки установлено, что такой точности достаточно для измерения урезов воды и детального моделирования областей затопления на реке Амур в районе Благовещенска.

Для моделирования затопления использован основанный на геометрическом подходе и уточненный автором алгоритм анализа рельефа (см. главу 2). Алгоритм реализован стандартными средствами

ГИС-пакета ArcGIS. Поскольку разница высот максимальной и минимальной отметок урезов воды на реке Амур в районе Благовещенска не превышает точности ЦМР, решено не разбивать ее на отдельные участки, а проводить моделирование для всей ЦМР целиком.

Статистические данные ежесуточных измерений уровня воды на гидропостах Благовещенска взяты из официальных источников Росгидромета по Дальневосточному федеральному округу, ГУ МЧС по Амурской области и электронной базы данных гидрологических расчетов [<http://www.dalgidromet.ru>; <http://www.28.mchs.gov.ru>; <http://www.hydrotec.ru>]. Согласно БД «Гидрорасчеты», абсолютная высота отметки нуля на гидропостах в районе Благовещенска составляет 119,88 и 119,74 м для рек Амур и Зея, соответственно [<http://www.hydrotec.ru>]. В связи с тем, что разница отметок высот на водопостах (0,14 м) меньше высотной точности используемой ЦМР (1,8 м), для дальнейшего моделирования решено использовать статистическую информацию только с водопоста на реке Амур.

На основе условных значений (6.0, 8.0, 10.0, 12.0 м) и фактических данных о ежесуточном изменении уровня воды в реке Амур смоделированы границы областей затопления. Условные значения не отражают фактической ситуации и служат для демонстрации возможной локализации зон затопления при очень опасном и катастрофическом наводнении. Фактические значения уровня воды в реке Амур (8,21; 8,00; 6,49; 5,08 м) соответствуют действительному развитию событий и полностью опираются на статистические данные их ежесуточных измерений на гидропосту Благовещенска 16, 24, 28 и 31 августа соответственно.

Помимо площадей затопления было рассчитано число строений, оказавшихся в зоне затопления при том или ином уровне воды в реке Амур. Поскольку на противоположном от Благовещенска берегу Амура уже располагается территория Китая, число затопленных строений установлено отдельно для российской и китайской территории.

Общегеографическая информация взята из открытых источников OpenStreetMap и актуализирована путем стереовекторизации и автоматического определения границ строений и растительности в ЦФС PHOTOMOD. После генерализации и взаимного согласования всех элементов путем наложения результатов моделирования на топографическую основу была создана серия разномасштабных карт наводнения в районе Благовещенска. На рис. 36 представлена карта наводнения в



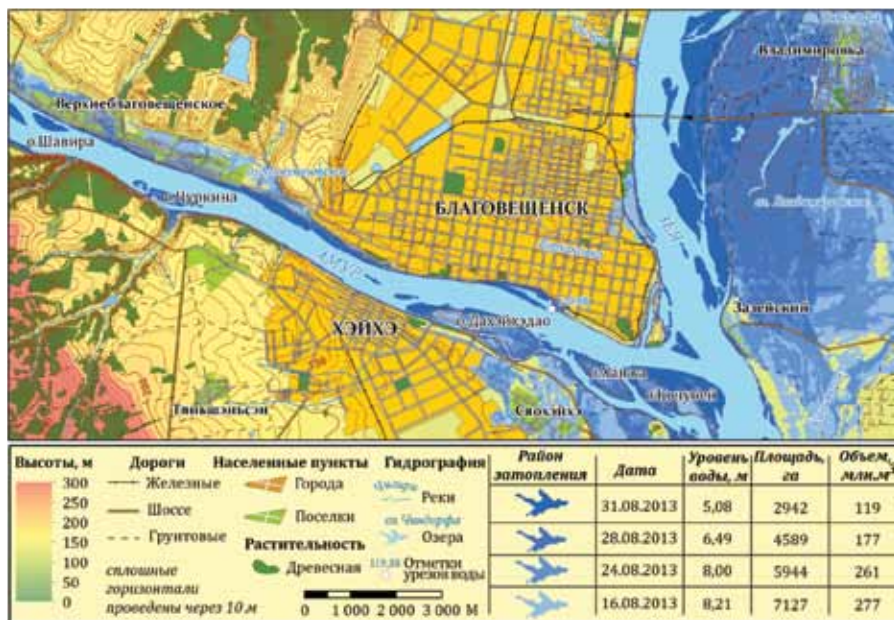


Рис. 36. Карта наводнения в окрестностях города Благовещенска

окрестностях города Благовещенск в период с 16 по 31 августа 2013 г. [Пермяков, 2014]. Масштаб оригинала — 1: 70 000.

По сведениям Росгидромета, на 16 августа пришелся пик уровня воды в Благовещенске, составивший 8,21 м относительно нуля водопоста на реке Амур. Затопленными полностью стали китайские острова Чуркина, Дахэйхэдао, Ханжа и Кочубей. Под водой оказалось более 140 домов на китайской и 450 на российской территории — практически все левобережье реки Зея, включая поселки Владимировка и Зазейский. Серьезно пострадала прибрежная часть поселков Верхнеблаговещенское и Сяохэнхэ, а также набережная Благовещенска и его портовая зона на реке Зея. Площадь затопления на 16 августа 2013 г. составила более 7000 га, а объем сконцентрированной в нем воды – более 270 млн м<sup>3</sup>. Начиная с 18 августа, уровень воды в реке Амур постепенно снижался, достигнув 31 августа 5,08 м. Вместе с этим стабилизировалась и обстановка в Благовещенском районе.

Для верификации результатов геоинформационного моделирования положение границы затопления, рассчитанной по авторской методике,

необходимо сопоставить с фактической границей затопления, а также с границей, полученной путем интерполяции высот методом кригинга (см. главу 2).

Фактическая граница затопления получена на 20 августа 2013 г. по данным космической съемки спутником EROS B [<http://press.scanex.ru>]. Карты сопоставления фактической и рассчитанных границ затопления окрестностей Благовещенска по состоянию на 20 августа 2013 г. показаны на рис. 37.

При общей согласованности контуров областей затопления по берегам Амура, четко прослеживается их несоответствие по берегам



Рис. 37. Границы затопления окрестностей Благовещенска 20 августа 2013 г.

Зеи. Площадь области затопления, рассчитанной по авторской методике, больше фактической площади затопления на величину порядка 20% — 1036 га против 801 га. Такая ситуация может быть вызвана как недостатком опорных точек на левом берегу реки Зея, так и ошибочными данными об уровне воды с гидропостов. Вместе с этим следует сказать, что площадь затопления и число затопленных строений, рассчитанных по авторской методике, ближе к фактическим значениям этих показателей, чем к показателям, полученным интерполяцией методом кригинга.

Как уже было отмечено ранее, для задач прогнозирования и предупреждения опасных последствий наводнений использование завышенных значений площадей затопления и числа затопленных строений представляется более целесообразным по сравнению с недооценкой этих показателей. Кроме того, на рис. 38 показана карта зон затопления в окрестностях города Благовещенск с условными значениями уровня воды во время возможного наводнения очень высокого или катастрофического класса опасности [Новаковский и др., 2013]. Масштаб ори-



Рис. 38. Карта условного наводнения катастрофического класса опасности в окрестностях города Благовещенск



гинала основной карты — 1: 25 000, масштаб оригинала карты-врезки — 1: 200 000.

В качестве ориентира для уровня воды при очень опасном наводнении было выбрано значение 10 м относительно нуля водопоста на реке Амур. В этом случае левобережье реки Зея будет полностью затоплено. Под водой окажутся более 500 китайских и 1500 российских жилых и нежилых домов, около 40 % территории Благовещенска и 15% территории Хэйхэ. Уровень воды 12 м условно соответствует наводнению катастрофического класса опасности. С его наступлением в зоне затопления будет более 1000 китайских и 2500 российских строений, около 60 % территории Благовещенска и 30% территории Хэйхэ.

Тезис о том, что для принятия управленческих решений двухмерных карт бывает недостаточно, уже обосновывался автором [Новаковский и др., 2013]. На рис. 39 представлены исходные данные и промежуточные результаты геоинформационного моделирования областей затопления, визуализированные в трехмерном пространстве приложения ArcScene 10.



**Рис. 39. Перспективная визуализация геоинформационного моделирования наводнения в окрестностях Благовещенска**

Верхний слой представляет собой ЦМР с полной общегеографической нагрузкой, включая подписи крупных населенных пунктов. Средний слой — ЦМР, текстурированная космическим снимком, дополненная трехмерными моделями зданий и областями затопления на 28 и 31 августа 2013 г. Нижний слой — текстурированная ЦМР с общегеографической нагрузкой в виде объектов транспортной сети и областями затопления на 16 и 24 августа 2013 г.

### *Наводнение в Бийске (Алтайский край)*

В мае–июне 2014 г. в Алтайском крае произошло наводнение, относящееся по своим последствиям к категории опасных. Причиной наводнения стали длительные дожди в предгорных районах Алтая. По предварительным оценкам суммарный ущерб от наводнения составил 4 млрд 482 млн руб., пострадало 38 619 человек, подтопленными оказались 2988 жилых домов. В ликвидации последствий приняло участие более 1100 человек и 422 единицы техники [<http://www.rg.ru>].

Бийск располагается на юго-западном склоне Бийско-Чумышской возвышенности на реке Бия, недалеко от места слияния ее с рекой Катунь. Перепад высот рельефа, в основном, в пределах 0–300 м. Климат континентальный. Основная масса осадков приходится на летние и осенние месяцы. По своему режиму река Бия относится к алтайскому типу. Для нее характерны: питание главным образом талыми снеговыми водами и летними дождями, длительное весенне-летнее половодье, объясняемое неодновременным таянием снежного покрова на разных высотах, и незначительный сток зимой. Средний годовой расход воды — 477 м<sup>3</sup>/с.

Методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа для оперативного определения последствий наводнения была адаптирована к физико-географическим особенностям окрестностей Бийска и в частности реки Бия. Основные критерии при подборе снимков аналогичны критериям, сформулированным для материалов ДЗЗ при моделировании областей затопления в Крымске и Благовещенске: оперативность, широкий охват, высокая детальность (субметровое пространственное разрешение), съемка в период межени. В связи с этим из архивов была выбрана классическая стереопара космических снимков, полученная американским спутником World-View-2 в мае 2014 г. с пространственным разрешением 0,5 м. Пространственная

привязка снимков, обеспечиваемая RPC-коэффициентами, уточнена опорными точками.

Среднеквадратические ошибки уравнивания составили 1,5 м в плане и 1,2 м по высоте. Такой точности уравнивания, согласно инструкции по фотограмметрическим работам, достаточно для создания топографических карт масштаба 1: 25 000 [Инструкция..., 2002]. На основе уравненной стереопары в автоматическом режиме были созданы плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 0,5 м. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 2,3 м (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопаре — 0,7 м оценена как достаточная для детального моделирования областей затопления в Бийске.

Моделирование наводнения реализовано средствами ГИС-пакета ArcGIS в соответствии с дополненным автором геометрическим подходом анализа ЦМР. Поскольку разница высот максимальной и минимальной отметок урезов воды на реке Бия в районе Бийска не превышает точности ЦМР, решено не разбивать ее на отдельные участки, а моделировать затопление сразу для всей ЦМР.

Статистические данные ежесуточных измерений уровня воды на гидропосту Бийска взяты с официального сайта муниципального образования (МО) и электронной базы данных гидрологических расчетов [<http://www.biysk22.ru/>; <http://www.hydrotec.ru/>]. Согласно базе данных (БД) «Гидрорасчеты» абсолютная высота отметки нуля на гидропосту реки Бия в районе Бийска составляет 162,68 м. Фактические значения превышения этого уровня воды на конец мая – начало июня 2014 г. в соответствии с данными ежесуточных измерений характеризуются следующими величинами: 4,16 м — 28 мая; 4,40 м — 29 мая; 5,66 м — 31 мая; 7,12 м — 2 июня; 5,92 м — 3 июня; 3,37 м — 6 июня. Границы областей затопления, полученные в соответствии с описанным ранее алгоритмом (см. главу 2), были отредактированы, рассчитано число строений, оказавшихся в зоне затопления при том или ином уровне воды в реке Бия.

В качестве общегеографической информации для визуализации результатов использованы данные из открытых источников OpenStreetMap, актуализированные путем стереовекторизации и автоматического определения границ строений и растительности в ЦФС PHOTOMOD. В результате согласования всех элементов содержания, как тематических,

так и общегеографических, создана серия разномасштабных карт наводнения в городе Бийск.

На рис. 40 и рис. 41 представлены карты наводнения в Бийске в период динамичного увеличения уровня воды в реке Бия с 28 мая по



Рис. 40. Динамика наводнения с 28.05 по 02.06.2014 г. (Бийск, Алтайский край)





Рис. 41. Динамика наводнения с 03.06 по 06.06.2014 г. (Бийск, Алтайский край)



2 июня 2014 г и ее постепенного снижения с 3 по 6 июня 2014 г. [Новиковский и др., 2015]. По официальным данным, пик уровня воды в городе составивший 7,12 м относительно нуля водопоста и пришелся на 2 июня 2014 г. Затопленным оказался левый берег реки Бия к югу от поселка Кожзавод, вдоль автомобильной дороги Р-368. На правом берегу под водой оказались садовые участки, примыкающие к микрорайону Зеленый Клин, и отдельные строения в самом микрорайоне. Общее их число в период пика наводнения составило 539 строений. Площадь затопления на 2 июня 2014 г. составила более 32 га, а объем сконцентрированной в нем воды — более 90 млн м<sup>3</sup>. Начиная с 3 июня, уровень воды в реке Бия постепенно снижался, достигнув 6 июня отметки 3,37 м. Вместе с этим стабилизировалась и обстановка в городе: на правом берегу в зоне затопления жилых домов не осталось.

Для более наглядного представления результатов моделирования ЦМП текстурирована ортофотопланом и слоем границы области затопления по состоянию на 2 июня 2014 г. (рис. 42). Таким образом была получена 3D-модель местности. С ее помощью гораздо удобнее принимать управленческие решения по борьбе с последствиями наводнения.

В связи с отсутствием официально подтвержденных данных о фактической границе наводнения для верификации рассчитанной об-



Рис. 42. Визуализация 3D-модели затопления г. Бийск

ласти затопления использовались два набора данных: результаты моделирования по авторскому алгоритму на основе более детальной съемки Бийска с БПЛА и результаты моделирования путем интерполяции высот методом кригинга (см. главу 2).

Дополнительная съемка Бийска была выполнена в апреле 2015 г. с БПЛА системы SuperCam. Съемка производилась малоформатной цифровой камерой SONY ILCE-6000 (фокусное расстояние 20 мм, размер матрицы 24 Мпиксел) с высоты порядка 500 м над поверхностью земли. Пространственное разрешение снимков — 7 см. Блок аэросъемки состоит из 1185 изображений, разбитых на 17 маршрутов. Установленный на борту двухчастотный GPS/IMU приемник позволил определить координаты центров проекции каждого снимка с точностью до 40 см (по СКО). Непрерывное время выполнения съемки составило четыре часа. Параметры внутреннего ориентирования камеры были уточнены путем ее самокалибровки с учетом имеющихся координат центров проекции и опорных точек на местности. Среднеквадратические ошибки уравнения на опорных точках составили 10 см в плане и 25 см по высоте.

Автоматическим способом на основе уравненного блока снимков построены плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 25 см. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 1,6 м (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопаре — 28 см.

Конфигурации границ затопления, полученных с использованием различных методик и материалов ДЗЗ по состоянию на 2 июня 2014 г., показаны на рис. 43. Сравнение площадей затопления и числа затопленных строений осуществлялось в пределах фиксированного участка, показанного на рис. 43 желтым прямоугольником.

Области затопления, смоделированные по авторскому алгоритму на основе материалов космосъемки и БПЛА, совпадают практически полностью. Сходимость площадей затопления (32,4 и 33,2 га) составляет 98 %, значения числа затопленных строений тесно коррелируют между собой: 539 и 551 строение соответственно. Конфигурация границы затопления, построенной путем интерполяции высот методом кригинга, серьезно отличается от границ, созданных по авторскому алгоритму, на правом берегу реки Бия, а на левом берегу — в целом соответствует им. Алгоритмические причины занижения площадей затопления при расчете методом кригинга обосновывались автором в главе 2. Число строений, попавших в зону затопления, рассчитанную по данным



Нас. пункты	Дороги	Гидрография	Граница затопления	Площадь, га	Затопл. строения
<ul style="list-style-type: none"> <li> Города</li> <li> Поселки</li> <li> Промзоны</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Железные</li> <li> Шоссе</li> <li> Грунтовые</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> Реки</li> <li> оз. Ковалевское</li> <li> Озера</li> <li> Отметки урезов воды</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li> По данным космосъемки</li> <li> По данным БПЛА</li> <li> Методом интерполяции</li> </ul>		
<b>Растительность</b> <ul style="list-style-type: none"> <li> Древесная</li> </ul>	<b>Высоты, м</b> 				

Рис. 43. Районы затопления окрестностей Бийска 02 июня 2014 г.

космосъемки (539 строений), значительно превышает число строений, попавших в зону затопления, смоделированную путем интерполяции высот методом кригинга (338 строения).

Для снижения риска наводнений в Бийске и их катастрофических последствий для населения представляется целесообразной заблаговременная организация инженерной защиты набережных путем возведения постоянных и временных противопаводковых сооружений.

***Определение последствий затопления территории в результате чрезвычайных ситуаций техногенного характера на Спандарянском водохранилище***

Оперативность принятия управленческих решений требуется не только во время чрезвычайных ситуаций природного характера. В силу активного участия человека под постоянной угрозой находится экологическая безопасность территорий в районах размещения объектов гидроэнергетики. Поддержание благоприятной экологической обстановки важно как на этапе планирования водохранилищ, так и в процессе их гидроэнергетической эксплуатации. При проектировании водохранилищ возможные прорывы плотины нуждаются в своевременном и обоснованном прогнозе развития ситуации, немаловажную роль в котором играет использование возможностей ГИС.

Методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа применительно к моделированию экологической опасности горных водохранилищ опробована на примере Спандарянского водохранилища в Армении.

Основные критерии при выборе снимков — оперативность получения, достаточно высокая детальность (метровое пространственное разрешение), минимальное количество необходимых для формирования стереомодели опорных точек на местности. Указанным критериям соответствуют данные архивной космической съемки с японского спутника ALOS (классическая стереопара изображений с RPC-коэффициентами, пространственное разрешение снимков — 2,5 м).

Фотограмметрическая обработка снимков реализована в ЦФС PHOTOMOD. Точность уравнивания стереопары характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 2,8 и 4,9 м, соответственно. Такой точности достаточно для построения топографических карт на горные территории в масштабе 1:25 000 с высотой сечения

рельефа 10 м [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построена плотная ЦМР с размером ячейки 2,5 м.

Спандарянское водохранилище, было построено в 1980 г. с целью переброски воды по подземному тоннелю в озеро Севан. Занимая площадь 1170 га, оно является вторым по площади водной поверхности водохранилищем Армении с общим объемом воды 257 млн м<sup>3</sup> [Бабаджанян и др., 2010]. По классификации Авакяна, Спандарянское водохранилище относится к горному типу искусственных водных объектов [Авакян, 1979]. Для него характерны большие значения глубины и сработки, незначительная площадь затопления, низкая степень переработки берегов и малый уровень фильтрации.

Поперечный профиль долины реки Воротан, на которой возведено водохранилище, имеет вид узкого каньона и совпадает с ее руслом. В таких условиях для создания большой емкости, удовлетворяющей потребностям переброски воды в озеро Севан, необходимо возведение высокой плотины. В результате была построена дамба длиной 315 м и высотой 83 м. [Бабаджанян и др., 2010].

Высота плотины оказывает решающее влияние на объем водохранилища и площадь его поверхности, обуславливает масштабы хозяйственного использования и ущерб инфраструктуре от возможного затопления. В связи с этим на примере Спандарянского водохранилища был проведен эксперимент, заключавшийся в моделировании районов затопления после искусственного увеличения высоты плотины на 10, 50 и 75 м.

Моделирование затопления территории реализовано средствами ГИС-пакета ArcGIS 10. С их помощью рассчитаны площади затопления территории и объемы воды в верхнем бьефе в результате постепенного увеличения высоты дамбы на стадии проектирования водохранилища. Результаты моделирования представлены на карте экологической опасности Спандарянского водохранилища (рис. 44) [Пермяков, 2014]. Районы затопления показаны способом изолиний. В зависимости от высоты плотины, обуславливающей уровень затопления, их цвет варьируется от темно-синего — для 93-метровой дамбы до синего и светло-синего — для 133 и 158-метровых плотин, соответственно. Фактическое положение водохранилища показано стандартным условным знаком голубого цвета.

Количественные показатели объема воды в водохранилище при том или ином инженерном решении позволяют оценить масштабы последствий в случае возможного прорыва плотины.

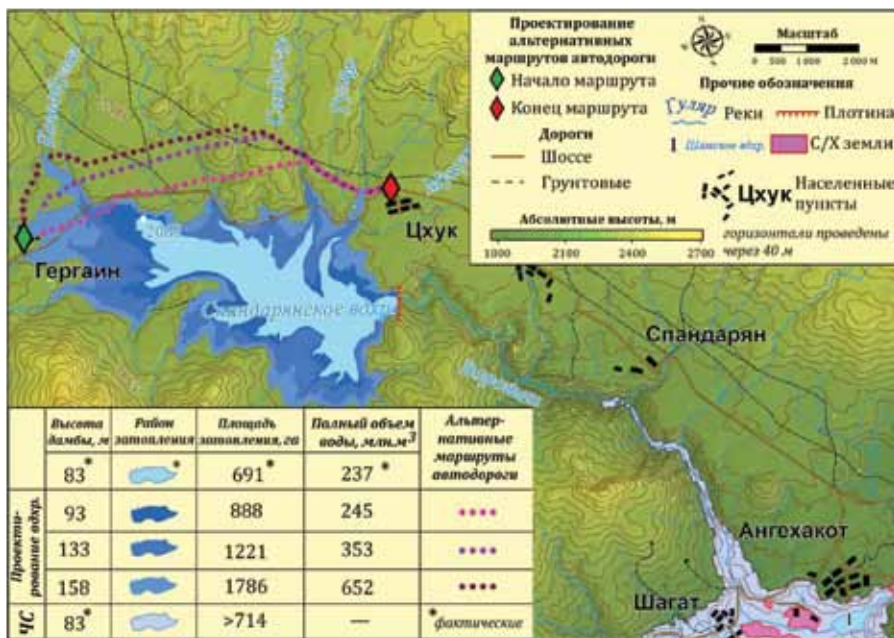


Рис. 44. Карта экологической опасности Спандарянского водохранилища

Рассматривая в качестве одного из основных результатов от увеличения высоты дамбы возможное подтопление автодороги в верхнем бьефе водохранилища на участке Цхук–Гергаин, очевидно, что при ее проектировании следовало разработать альтернативные маршруты. Для моделирования их положения учитывались три основных фактора: кратчайшее расстояние между связующими пунктами, наименьшие величины крутизны склонов и отсутствие пересечений с районом затопления. В зависимости от высоты плотины, цвет альтернативных маршрутов автодороги на карте варьируется от розового — для 93-метровой дамбы до фиолетового и лилового — для 133 и 158-метровых плотин, соответственно.

Кроме того, средствами ArcGIS рассчитана зона катастрофического затопления местности в результате возможной чрезвычайной ситуации — прорыва плотины. На участке между плотиной и селом Спандарян долина реки Воротан представляет собой узкий и глубокий каньон. Поэтому в этой части нижнего бьефа Спандарянского водохранилища территория не подвержена катастрофическому затоплению.



На участке между селом Спандарян и мостом через реку на трассе Шагат–Ангехако́т долина реки Воротан постепенно расширяется и переходит на открытое, относительно плоское пространство перед Шамским водохранилищем, образуя зону вероятного катастрофического затопления, в которую полностью попадает село Шагат с численностью населения, 300–500 человек, а также юго-западная часть села Ангехако́т с численностью населения 100–200 человек. При наличии современной и актуальной базы данных количественно появляется возможность оценить и другие последствия. Так, под водой могут оказаться более 150 огнестойких и 50 неогнестойких строений, участок дороги М 13 между Ангехако́том и Шагатом, а также сельскохозяйственные земли общей площадью более 61 га.

### **§ 3.2. Морфометрические задачи**

#### *Морфометрический фактор подверженности почв смыванию*

Морфометрические характеристики рельефа находят широкое применение для решения задач сельского хозяйства. При планировании мероприятий по отведению земель для сельскохозяйственного использования чрезвычайно важна оценка опасности почвенной эрозии и смывости почв. Основной фактор, влияющий на эрозию почв, их механический состав. Однако морфометрические условия также не следует недооценивать. В комплексе с качественными данными о типах почв и их свойствах морфометрические условия кладутся в основу интегрального показателя пригодности почв для использования в сельском хозяйстве.

На примере коммуны Вальдкирх (Швейцария) методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования морфометрических характеристик рельефа опробована применительно к моделированию морфометрического фактора смывания почвы и морфометрического фактора опасности почвенной эрозии. Область исследования располагается в пределах Швейцарского плоскогорья, на границе между швейцарскими кантонами Санкт-Галлен и Тургау. Перепад высот — порядка 270 м. Самая низкая точка (502 м) находится в долине реки Зоренбах, самая высокая — на холме к югу от Вальдкирха (775 м).

Около 60 % исследуемой территории занимают бурые лесные почвы и их различные подтипы. Бурые лесные почвы — это гумидно-

лесные почвы хорошо дренированных горных склонов или сильно расчлененных высоких равнин, формирующиеся в условиях промывного водного режима и богатого азотно-кальциевого биологического круговорота веществ. Их общей особенностью во всех горных районах мира является увеличение с высотой степени гумусности. На низменностях и в понижениях рельефа буроземов нет. У подножий склонов могут быть глеевые буроземы, переходящие в псевдоглеевые или болотные почвы.

В процентном отношении площадь подзолисто-бурых лесных глеевых почв составляет около 30 % всей площади рассматриваемого района. Они образуются под широколиственными лесами на плоских вершинах увалов и на вершинах плоских водораздельных пространств, сложенных делювиальными тяжелыми суглинками, древними озерными и озерно-аллювиальными глинами и суглинками, глинистым делювием и элюво-делювием плотных пород. Глеевые процессы в подзолисто-бурых лесных глеевых почвах развиваются благодаря периодическому переувлажнению, возникающему в условиях выпадения большого количества осадков, тяжелого механического состава почвообразующих пород и слабодренированного, выровненного рельефа.

Основные требования к выбору снимков для реализации методики — оперативность получения и достаточно высокая детальность. В связи с этим в качестве исходных данных использовались архивные аэрофотоснимки, полученные аналоговой камерой RC 30 (фокусное расстояние 153,5 мм) с пространственным разрешением 20 см.

Точность уравнивания блока снимков, выполненного в ЦФС РНОТОМОД, характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 20 и 25 см соответственно. Такой точности уравнивания достаточно для создания топографических карт на равнинные территории в масштабе 1: 2000 и мельче [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построены плотные ЦМП и ЦМР с размером ячейки 1 м. Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 67 см (по СКО). Относительная точность определения высот по стереопарам снимков — 29 см.

Основным морфометрическим фактором смыывания почвы являются углы наклона. При моделировании этого фактора для территории исследования использовались значения крутизны, расчет которых велся не сплошным образом, а по средним величинам для каждого водосборного бассейна. Водосбор является естественной территориальной единицей,



посредством которой можно значительно генерализовать особенности картографируемого явления без потери их содержательного смысла и географической локализации. Процедура осреднения углов наклона была осуществлена с помощью инструмента зональной статистики (Zonal Statistic) ГИС-пакета ArcGIS.

На основе естественных границ гистограммы распределения углов наклона в пределах водосборов были разделены на пять классов: слабосмытые (с углами наклона  $< 3,0^\circ$ ), среднесмытые ( $3,0-5,0^\circ$ ), весьма сильносмытые ( $5,0-7,0^\circ$ ), сильносмытые ( $7,0-9,0^\circ$ ) и очень сильносмытые ( $>9,0^\circ$ ). В процессе классификации учитывалась терминология и результаты исследований И.Д. Брауде и Г.П. Сурмача, касающиеся взаимосвязи между степенью смытости почв и крутизной склонов на примере серых лесных почв [Сурмач, 1992]. В рамках настоящего исследования структуру и механический состав серых лесных почв и бурых лесных почв Швейцарии в первом приближении решено считать сопоставимыми. В результате построена карта морфометрического фактора смывания почвы (рис. 45). Масштаб оригинала — 1: 20 000.

Создание общегеографической основы проводилось в стереорежиме ЦФС PHOTOMOD путем визуального дешифрирования и цифрования видимых объектов местности: контуров древесной, кустарниковой и луговой растительности, площадных и линейных объектов гидрографии, железных и автомобильных дорог, лесных троп, контуров зданий. По положению рек и изолиний рельефа можно проследить границы выделенных речных бассейнов. Поведение горизонталей дает визуальное представление о крутизне поверхности на том или ином участке исследуемой территории [Пермяков, 2014].

Отнесение почв в пределах водосборных бассейнов к тому или иному классу смытости зависело как от крутизны склонов, так и от площади водосборов. В этой связи их распределение по картографируемой территории может быть легко объяснено. Почвы с наибольшей степенью смытости расположены либо по бровкам надпойменных террас, характеризующимся значительными углами наклона, либо в пределах самой возвышенной юго-восточной части картографируемой территории. Для нее характерны максимальная в сравнении с другими окрестностями Вальдкирха крутизна склонов и большие по площади водосборные бассейны.

Для верификации методики использованы фактические границы земель сельскохозяйственного назначения, полученные для территории



Рис. 45. Карта морфометрического фактора смывания почвы (Вальдкирх, Швейцария)

исследования из открытых источников [geoport.ch]. Эти границы также включены в содержание карты морфометрического фактора подверженности почв смыванию. Положение границ сельскохозяйственных земель в целом соответствует морфометрическим ограничениям. В большей своей части они располагаются в пределах водосборных бассейнов со среднесмытыми или весьма среднесмытыми почвами с углами наклона от 3 до 7 °.

### *Морфометрический фактор опасности почвенной эрозии*

Морфометрический фактор опасности почвенной эрозии по сути своей является продолжением и закономерным развитием показателя смывости, зафиксированного на карте морфометрического фактора подверженности почв смыванию. Однако если на этой карте размеры водосборов лишь косвенным путем показывали смывость почв, преследуя в первую очередь цель упрощенной генерализации уклонов по естественным контурам; то на карте морфометрического фактора опасности почвенной эрозии они используются непосредственно.

Формула, предложенная Г.П. Сурмачом для выявления морфометрического фактора ( $K$ ) опасности эрозии серых лесных почв, задействует такие параметры, как угол наклона ( $S$ , в градусах) и длина склона ( $L$ , в метрах):  $K=L^{0.5}S^{1.3}$  [Сурмач, 1992]. Еще раз следует подчеркнуть, что в рамках настоящего исследования структуру и механический состав серых лесных почв и бурых лесных почв Швейцарии в первом приближении решено считать сопоставимыми.

Склон представляет собой составной элемент речного бассейна, опирающуюся на линию водораздела в верхней части и линию тальвега – в нижней части водосбора. Определение его длины применительно к каждому из выделенных ранее водосборных бассейнов стало ключевой задачей при подсчете коэффициента морфометрического фактора опасности почвенной эрозии. Ее решение стало возможным в результате замены показателя длины склона на эквивалентный ему параметр длины линии стока и использования технического инструментария гидрологического модуля ArcGIS ArcHydro.

Линия стока — линия, повторяющая движение твердого либо жидкого материала в соответствии с рельефом реальной поверхности. В отличие от параметра длины склона, нивелирующего реальный сток для пересеченной мелкими ложбинами поверхности, линия сто-

ка является более объективным показателем при оценке эрозионной опасности.

Используя инструмент ArcHydro «Трассирования линии стока» (Flow Path Tracing), на основе ЦМР, границ речных бассейнов и положения водотоков для каждого водосбора в полуавтоматизированном режиме были определены линии стока и посчитаны их длины. После этого атрибутивная таблица со значениями длины склонов и углами наклонов по водосборным бассейнам была экспортирована в MS Excel с целью непосредственного подсчета коэффициента морфометрического фактора опасности почвенной эрозии.

По завершении этой операции была произведена обратная процедура: таблица значений  $K$  по водосборам была импортирована в проект ArcGIS. На основе естественных границ гистограммы распределения морфометрического фактора все речные бассейны были разделены на пять классов эрозионной опасности: 1 класс ( $K > 3,0$ ); 2 класс (2,0 — 3,0); 3 класс (1,0 — 2,0); 4 класс (0,5 — 1,0) и 5 класс ( $< 0,5$ ). В процессе классификации учитывались результаты исследований А.Л. Иванова и М.С. Кузнецова, касающиеся выделения классов опасности эрозии почв в зависимости от значений морфометрического фактора опасности почвенной эрозии [Иванов и др., 2004]. В результате построена карта морфометрического фактора опасности почвенной эрозии (рис. 46) [Пермяков, 2014]. Масштаб оригинала — 1: 20 000.

Анализ построенной карты позволяет сделать следующие выводы. Классы эрозионной опасности, выделенные по водосборным бассейнам, в целом, согласуются с соответствующими контурами на карте морфометрического фактора подверженности почв смыванию. Все районы распространения очень сильноосмытых почв входят в состав территорий 1 класса эрозионной опасности. В свою очередь сильноосмытые и весьма сильноосмытые почвы в большинстве своем приурочены к районам 2 и 3 класса эрозионной опасности, соответственно.

Включение в один класс опасности почв с разной степенью смытости подчеркивает влияние длины линии стока (длины склона) на значение морфометрического фактора опасности почвенной эрозии. Однако это влияние не является подавляющим и ограничивается ролью углов наклона. В связи с этим в рамках одного класса опасности не встречается почв со степенью смытости, отличающихся между собой более, чем на одну градацию, и с крутизной склона, отличающейся более, чем на  $2^\circ$ .

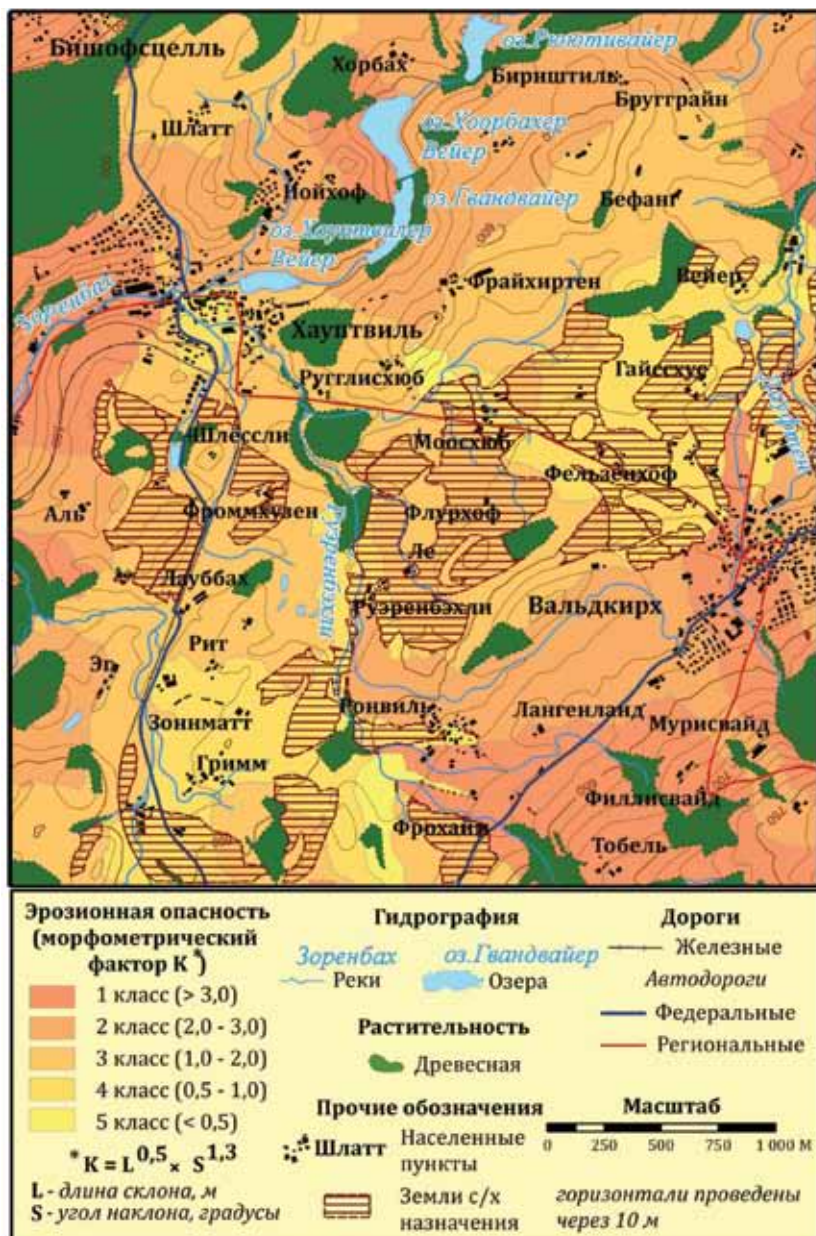


Рис. 46. Карта морфометрического фактора опасности почвенной эрозии (Вальдкирх, Швейцария)

Дополнительное ограничение влияния длины склона на значение геоморфологического фактора проявляется в значении степени, в которую возводятся обе его составляющие. Степень 1,3 для углов наклона больше степени 0,5 для длины склонов.

Верификация результатов моделирования с фактическими границами сельскохозяйственных земель в целом подтверждает указанные выводы. В пределах водосборов 1 и 2 класса эрозионной опасности нет земель сельскохозяйственного назначения.

На основе построенных карт (морфометрического фактора подверженности почв смыванию и опасности почвенной эрозии) можно оценить, в каких направлениях расширять земли сельскохозяйственного назначения целесообразно, а в каких – нет. Следует также заметить, что результаты морфометрического анализа носят рекомендательный характер и для более точного планирования размещения сельскохозяйственных земель требуют учета более подробной информации о механическом составе почвы – ключевом факторе, влияющем на эрозию.

## **Моделирование оптимального маршрута строительства магистральных газопроводов (на примере Армении и Краснодарского края)**

Учет морфометрических показателей играет важную роль при проектировании гражданских объектов. На протяжении последних 30 лет в России и странах Закавказья активно развивается газотранспортная отрасль. Результаты оценки современных тенденций в ее развитии указывают на то, что в ближайшем будущем следует ожидать всплеска активности в сфере строительства новых трубопроводных систем. Стоимость изысканий и сооружения подобных объектов чрезвычайно высока. В связи с этим уже на этапе планирования строительства газопровода государственные и частные инвесторы заинтересованы в оценке положения его оптимального маршрута. Общая схема методики показана на рис. 47.

### *Магистральный газопровод в Армении*

Методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа применительно к расчету оптимального маршрута строительства газопровода была опробована на примере Армении (провинции Сюник и Вайоцзор). С точки зрения физико-географического районирования, исследуемая территория входит в состав Джавахетско-Армянской провинции, расположенной на высоком нагорье





**Рис. 47. Схема методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа для определения оптимального маршрута строительства газопровода**

(1500–4100 м) и характеризуется высотной зональностью ландшафтов переднеазиатского типа, с господством горностепных и горнолуговых ландшафтов.

В настоящее время газ в Армению поступает по двум газопроводам: Моздок–Тбилиси–Ереван и Тебриз–Мегри. Первый из них, проходя по территории Грузии, характеризуется высоким уровнем аварийности и подверженности политической конъюнктуре. Второй — представляет собой ответвление в 140 км газопроводной системы Ирана и заканчивается в городе Мегри, на юге Армении. В условиях возрастающих потребностей стран Закавказья и в частности Армении в энергоносителях предлагается продолжить ветку иранского газопровода в центральную часть страны транзитом через провинции Сюник и Вайоцзор.

Существует два основных подхода к определению области поиска оптимального маршрута трассы газопровода — расчет коэффициента линии развития и определение области поиска по геодезической прямой [Рыльский, 2009]. Самых алгоритмов поиска еще больше. Рыльский выделяет из них шесть ключевых: Ли, Беллмана, ускоренного поиска, блочного поиска, анализа вариантов, стоимостного расстояния. Все они рассчитаны на детальное проектирование трассы строительства и поэтому учитывают большое количество факторов. Для предварительной оценки положения газопровода такой внушительный перечень параметров нецелесообразен.

Основные критерии при выборе снимков — широкий охват (газопровод–сооружение протяженное), оперативность получения, достаточно высокая детальность (метровое пространственное разрешение), минимальное количество необходимых для формирования стереомодели опорных точек на местности.

Указанным критериям соответствуют данные архивной космической съемки с японского спутника ALOS (классическая стереопара изображений с RPC-коэффициентами, пространственное разрешение снимков — 2,5 м).

Фотограмметрическая обработка снимков реализована в ЦФС РНОТОМОД. Точность уравнивания стереопары характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 2,8 и 4,9 м соответственно. Такой точности достаточно для построения топографических карт на горные территории в масштабе 1:25 000 с высотой сечения

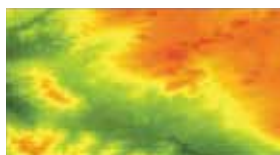


рельефа 10 м [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построены ЦМР с размером ячейки 2,5 и 25 м.

Под оптимальным маршрутом строительства газопровода понимается его кратчайший маршрут из точки А в точку В в условиях естественного состояния рельефа (т.е. без проведения дополнительных земляных работ) с учетом ряда ключевых требований СНиП «Магистральные газопроводы». Вместо нескольких десятков природных и антропогенных факторов, влияющих на положение трассы, предлагается учитывать только три параметра: 1) крутизну склонов; 2) пересечение территорий, на которых строительство запрещено (особо охраняемые природные территории (ООПТ)) или сопряжено с необходимостью проведения земляных работ в большом объеме (крупные площадные объекты гидрографии); 3) положение относительно населенных пунктов и дорог. Общая схема уточненного алгоритма показана на рис. 48. Особенности транспортировки газа, связанные с его физическими свойствами (температура, давление), необходимостью сооружения компрессорных станций, организации земляных работ, в рамках настоящего исследования не рассматриваются.

Как известно, строительство магистральных газопроводов I класса, условным диаметром 800–1000 мм, запрещено на расстоянии менее чем в 250 м от автомобильных дорог и населенных пунктов [СНиП 2.05.06-85]. С учетом этого ограничения вокруг данных объектов построены буферные зоны соответствующего размера. Используя известные инструменты расчета стоимостного направления (Cost Back Link) и стоимостного расстояния (Cost Distance), входящие в состав ГИС-пакета ArcGIS, на основе суммарной матрицы углов наклона, буферных зон вокруг шоссе и населенных пунктов, а также объектов гидрографии площадью более 1 мм<sup>2</sup> в масштабе карты (Спандарянского и Кечутского водохранилищ, озер Халаш и Залхагель), построены стоимостные поверхности расстояния и направления для начальной точки маршрута (рядом с селом Спандарян). Оптимальный маршрут газопровода рассчитан исходя из значений данных поверхностей с учетом положения конечной точки строительства, расположенной рядом с городом Джермук (инструмент Cost Path).

В отличие от методик автоматизированного трассирования трубопроводов [Рыльский, 2009; Каргашин и др., 2014], которые учитывают несколько десятков природных и антропогенных факторов и предна-



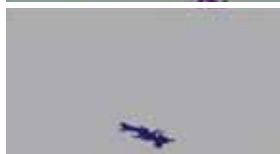
1 — загрузка ЦМР



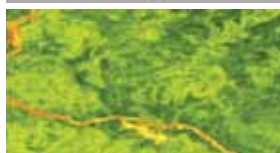
2 — расчет углов наклона



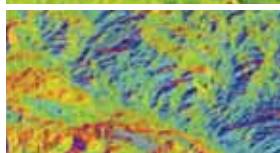
3 — построение буферных зон вокруг дорог и населенных пунктов



4 — выделение территорий в пределах которых строительство запрещено или осложнено



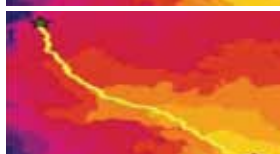
5 — построение суммарной матрицы ограничений (углы наклона + буферные зоны + запретные территории)



6 — построение матрицы стоимостного направления относительно начальной точки



7 — построение матрицы стоимостного расстояния относительно начальной точки



8 — расчет оптимального пути до конечной точки

**Рис. 48.** Схема моделирования оптимального маршрута строительства газопровода

значены для детального моделирования трасс трубопроводов в крупном масштабе, используемый алгоритм является более упрощенным (учитывает только три параметра), но вместе с тем работает быстрее.

Точности полученных результатов достаточно для составления карт 1: 25 000–1: 130 000 масштаба (по ЦМР с размером ячейки в 2,5 и 25 м, соответственно) на предпроектной стадии строительства газопровода. При этом чем мельче масштаб, тем меньше влияние фактора расстояния трубопровода до дорог и населенных пунктов. Результатом моделирования стала «Карта оптимального маршрута строительства магистрального газопровода (Джермук, Армения)» (рис. 49) [Новаковский, Пермяков и др., 2012]. Рельеф показан способом освещенных горизонталей. Линией желтого цвета показан маршрут, рассчитанный без учета ограничения на минимальное расстояние трубопровода от автомобильных дорог и населенных пунктов. Линией красного цвета — с учетом этого ограничения. По

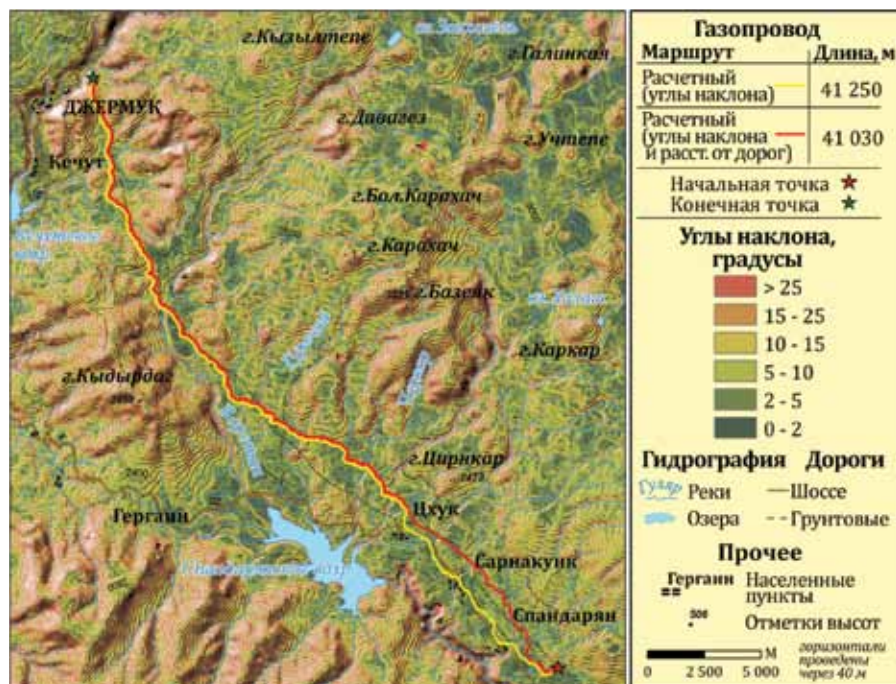


Рис. 49. Карта оптимального маршрута строительства магистрального газопровода (Джермук, Армения)

карте видно, что участки обоих маршрутов полностью совпадают в местах, удаленных от объектов инфраструктуры. Важная роль фактора буферных зон подчеркивается тем фактом, что длина второго маршрута меньше, чем длина первого.

### *Магистральный газопровод в Краснодарском крае*

Для верификации комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования оптимального положения трассы газопровода выбрана территория, через которую фактически проходит участок магистрального трубопровода. Речь идет об участке нефтепровода «Новороссийск-Тенгиз» (Каспийский трубопроводный консорциум) в пределах Крымского района Краснодарского края.

Крымский район входит в состав Северо-Черноморской провинции Большого Кавказа и по своим природным условиям относится к предгорным территориям. Здесь господствуют средиземноморские ландшафты, климат отличается мягкой зимой, достаточной увлажненностью и большим количеством ясных безоблачных дней. Низкогорный рельеф образовался на месте флишевой зоны западного Кавказа. Перепад высот рельефа, в основном, от 0 до 650 м. В рельефе преобладают пологие округлые формы. Значительные площади (до 20%) занимают леса крымского типа [Гвоздецкий, 1968].

В качестве исходных данных для моделирования использовалась стереопара разновременных снимков, полученных спутником SPOT 5 22.06 и 12.07.2012 г. с углом конвергенции в 29,5. Пространственное разрешение снимков 2,5 м, метаданные содержат RPC-коэффициенты. Небольшая разница во времени съемки (июнь-июль) и отсутствие облачности в целевой части снимков позволили сохранить все необходимые стереообразующие детали изображений. Указанные параметры съемки полностью соответствуют критериям, заявленным для решения поставленной задачи.

Точность уравнивания стереопары, выполненного в ЦФС РНОТОМОД, характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 2,9 и 3,2 м соответственно. Такой точности уравнивания достаточно для создания топографических карт на равнинные территории в масштабе 1: 50 000 и мельче [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построена ЦМР с размером ячейки 2,5 и 25 м.

В соответствии со СНиП 2.05.06-85 сооружение магистральных газопроводов 1 класса условным диаметром 800–1000 мм и менее запрещено на расстоянии менее чем в 250 м от автомобильных, железных дорог и населенных пунктов. С учетом этого вокруг дорог и населенных средствами ArcGIS построены буферные зоны соответствующего размера. Используя описанный выше алгоритм определения оптимального пути (см. рис. 48) построен маршрут трассы строительства магистрального газопровода между населенными пунктами Гайдук и Армянский.

Результатом моделирования стала «Карта оптимального маршрута строительства магистрального газопровода (Крымский район Краснодарского края)» (рис. 50) [Пермяков, 2014]. Верификация рассчитанных маршрутов с положением уже существующего трубопровода «Новороссийск–Тенгиз» подтвердила полную правомочность используемой методики. Она пригодна для составления карт среднего и мелкого масштаба на предпроектной стадии строительства. Маршрут действующего нефтепровода «Каспийский трубопроводный консорциум» (Новороссийск–Тенгиз) практически полностью повторяет маршрут, рассчитанный с учетом углов наклона и минимального расстояния трубопровода от шоссе, железных дорог и населенных пунктов.

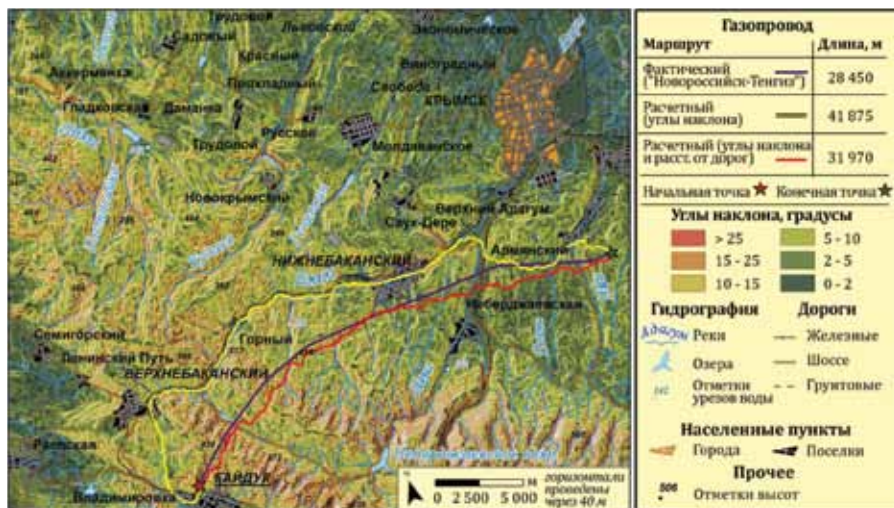


Рис. 50. Фрагмент карты оптимального маршрута строительства газопровода (Крымский район Краснодарского края)

### § 3.3. Топоклиматические задачи

#### *Моделирование распределения суммарной солнечной радиации для оценки потенциала солнечной энергетики Армении*

Помимо импорта углеводородного сырья, все возрастающие потребности стран Закавказья в энергоресурсах могут быть частично решены за счет использования возобновляемых источников энергии, в частности – энергии солнца. Армения обладает большим потенциалом солнечной энергетики, который к настоящему времени реализован недостаточным образом. По оценке Министерства энергетики и природных ресурсов республики Армения, среднегодовой объем потока солнечной энергии в стране на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности составляет 1720 кВт·ч, что больше аналогичного средневропейского показателя более, чем в 1,7 раза [<http://www.minenergy.am>]. На сегодняшний день солнечные тепловые модули установлены в Армении лишь фрагментарно, на крышах крупных образовательных и исследовательских центров в Ереване [<http://www.minenergy.am>]. Имеющиеся в открытом доступе расчетные данные о суммарной солнечной радиации из источников NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy) [<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>] и NREL (National Renewable Energy Lab) [<http://www.nrel.gov/rredc/>] для территории Армении носят весьма условный характер. Значения показателя суммарной солнечной радиации за год на горизонтальную поверхность осреднены в них достаточно грубо – по сетке 1°×1°. Для детальной оценки потенциала солнечной энергетики в Армении применительно к расчету суммарной солнечной радиации в провинциях Сюник и Вайоцзор предлагается использовать методику комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа.

Для решения поставленной задачи сформулированы основные критерии при выборе снимков — оперативность получения, достаточно высокая детальность (метровое пространственное разрешение), минимальное количество необходимых для формирования стереомодели опорных точек на местности, отсутствие облачности.

Указанным критериям соответствуют данные безоблачной архивной космической съемки с японского спутника ALOS (классическая стереопара изображений с RPC-коэффициентами, пространственное разрешение снимков — 2,5 м). Фотограмметрическая обработка снимков реализована в ЦФС PHOTOMOD. Точность уравнивания стереопары

характеризуется СКО планового и высотного положения опорных точек в 2,8 и 4,9 м соответственно. Такой точности достаточно для построения топографических карт на горные территории в масштабе 1:25 000 с высотой сечения рельефа 10 м [Инструкция..., 2002]. По стереопаре в автоматическом режиме построены ЦМР с размером ячейки 2,5 и 25 м.

Общее представление об обеспеченности территории солнечной радиацией дает карта экспозиции склонов. Принято считать, что склоны южной и восточной экспозиции получают больше солнечной энергии, чем склоны, ориентированные на север или запад. Однако это лишь первое приближение действительного распределения радиации. Фактически это функция от целого ряда топографических и климатических параметров: экспозиции склонов и углов наклона, отражательной способности местности и прозрачности атмосферы, высотного положения соседних ячеек и географической широты территории. Учесть все многообразие факторов, влияющих на распределение солнечной радиации, позволяет геоинформационная обработка ЦМР с помощью инструмента Area Solar Radiation ГИС-пакета ArcGIS.

После тестирования различных параметров указанного инструмента на отдельных участках ЦМР сделан вывод о том, что наибольшее влияние на результирующее значение суммарной солнечной радиации оказывают широта местности, рельеф, углы наклона и экспозиция склонов. Изменение радиационных параметров (прозрачность атмосферы, тип диффузной модели, число секторов карты неба) серьезным образом на значениях солнечной радиации не отражаются.

ЦМР с размером ячейки 25 м достаточно для расчета суммарной годовой солнечной радиации на среднемасштабном уровне и построения обзорной региональной карты суммарной солнечной радиации. По итогам вычислений классификация абсолютных значений суммарной годовой солнечной радиации проведена по четырем группам методом равных интервалов:  $< 1250$  кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $1250 - 1450$  кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $1450 - 1650$  кВт·ч/м<sup>2</sup>;  $> 1650$  кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Для выявления детального распределения солнечной радиации в течение года выбрано три точечных тестовых участка: населенные пункты Спандарян, Гергаин и Джермук. По данным, полученным в каждом из них с помощью функции точечной солнечной радиации (Points Solar Radiation), в графическом редакторе Adobe Illustrator построены графики ее годового хода по месяцам. В результате построена «Карта суммарной



солнечной радиации» (рис. 51) [Пермяков, 2014]. Оригинальный масштаб основной карты — 1 : 130 000, оригинальный масштаб карт-врезок на окрестности Спандяряна, Гергаина и Джермука — 1 :25 000. Показатели суммарной годовой солнечной радиации на крупномасштабных картах-врезках рассчитаны по ЦМР с размером ячейки 2,5 м.

Анализируя распределение суммарной солнечной радиации по территории исследования, можно сделать следующие выводы. Абсолютные годовые показатели дифференцируются незначительно. Большая их

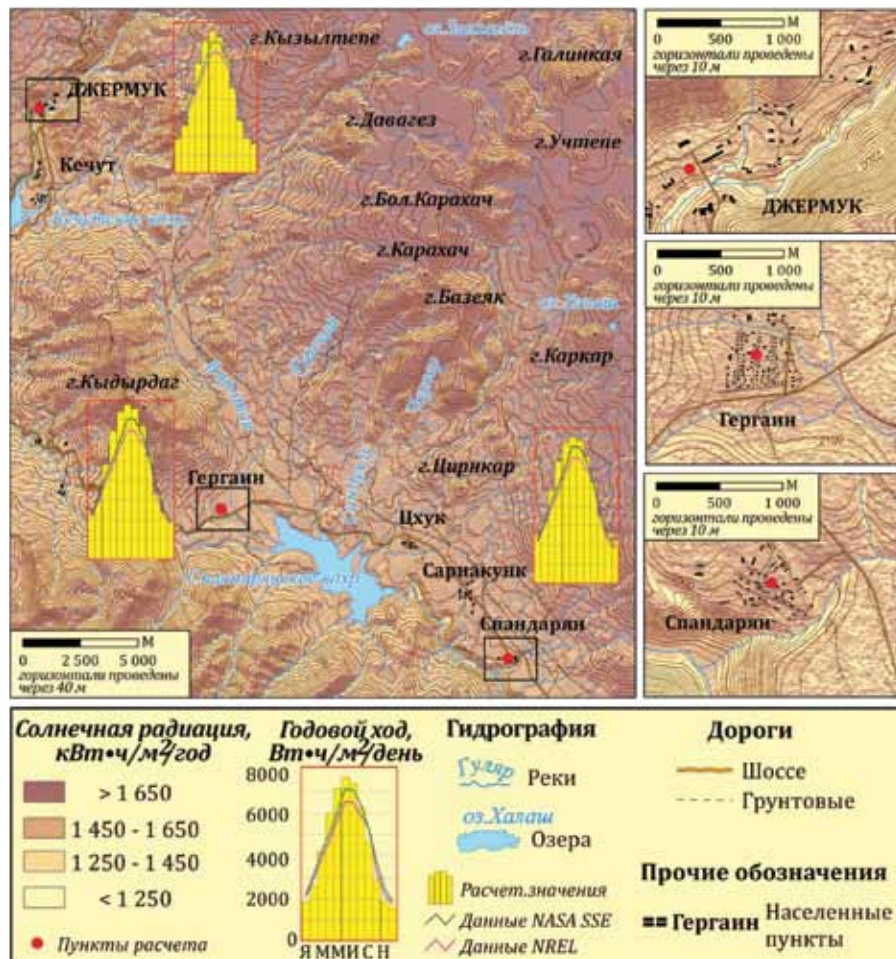


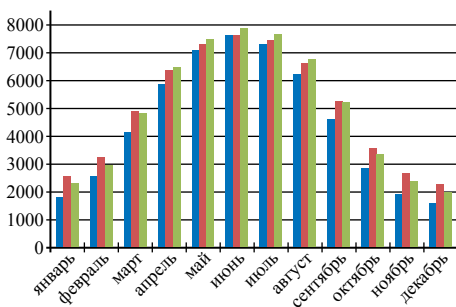
Рис. 51. Карта суммарной солнечной радиации (Джермука, Армения)



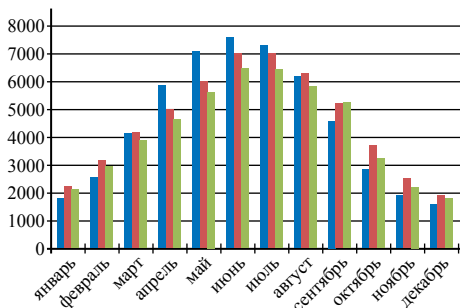
часть, порядка 90 %, находится в пределах 1200–1800 кВт·ч/м<sup>2</sup>/год. Очевидно, что максимальные значения суммарной солнечной радиации характерны для отрогов Сюникского хребта в северо-восточной части исследуемой территории, а минимальные — для долины реки Воротан.

Графики годового хода солнечной радиации характеризуются большей неоднородностью (рис. 52). В осенне-зимний период (октябрь–апрель) солнечная радиация тем больше, чем южнее находится пункт ее расчета. В Спандаряне значения инсоляции выше, чем в Гергаине, а в Гергаине выше, чем в Джермуке. В летний период ситуация несколько меняется. С мая по сентябрь распределение солнечной радиации в большей степени зависит от абсолютной высоты и открытости местности. Ее значения тем больше, чем выше лежит освещаемая солнцем поверхность и чем больше открытость окружающей ее местности. Соответственно Гергаин, лежащий на высоте порядка 2100 м получает летом больше солнечной радиации, чем Спандарян и Джермук, лежащие на высоте порядка 2000 м. А Спандарян за счет большей открытости местности получает больше радиации, чем Джермук.

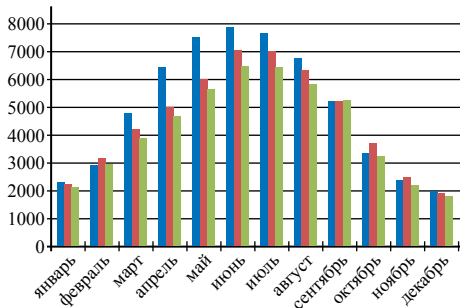
Для верификации методики использованы открытые источники NASA SSE и NREL. Графики расчетных значений годового хода инсоляции дополнены графиками, построенными на основе данных из этих источников (рис. 53). Анализ графиков и значений хода солнечной радиации по месяцам указывает на близость значений, полученных в результате использования методики комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа, и данных из открытых источников NASA SSE и NREL. Среднегодовые расхождения результатов методики с данными NASA SSE составляют порядка 5%, а с данными NREL – порядка 11%. Преимуществом авторского подхода является его достаточно высокая детализация. Для всех данных NASA SSE и NREL годовой ход суммарной солнечной радиации в Джермуке, Спандаряне и Гергаине характеризуется одинаковыми значениями, в



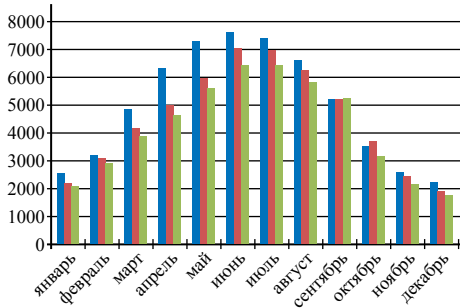
**Рис. 52. График годового хода расчетной солнечной радиации (Вт·ч/м<sup>2</sup>/день):**  
■ — Джермук; ■ — Спандарян; ■ — Гергаин



*a*



*b*



*v*

**Рис. 53. Годовой ход солнечной радиации (Вт·ч/м<sup>2</sup>/день):**

*a* — в Джермуке; *b* — в Гергаине; *v* — в Спандаряне;  
 ■ — расчет; ■ — NASA SSE; ■ — NREL

то время как авторский подход при подсчете инсоляции для каждого из населенных пунктов позволяет учитывать факторы, обусловленные их специфической локализацией и рельефом. Безусловно, предлагаемый подход не может в полной мере заменить традиционные актинометрические измерения, однако он может использоваться для предварительной оценки потенциала солнечной энергетики, более детальной, чем предлагается в открытых источниках.

Карта суммарной годовой солнечной радиации носит рекомендательный характер. Ее непосредственное использование в целях эффективного ведения сельского хозяйства, тепло- и энергоснабжении, а также в ряде других отраслей хозяйства невозможно без дополнительных специализированных данных: о почвах, о свойствах сельскохозяйственных культур, о технических особенностях солнечных батарей и прочих сведениях. Для создания обзорных карт суммарной солнечной радиации среднего масштаба достаточно ЦМР с размером ячейки 25 м, для более детального моделирования радиации на крупномасштабном уровне – целесообразно использовать ЦМР с размером ячейки 2,5 м.

## § 3.4. Геометрические задачи

### *Расчет объема извлеченной породы в алмазных карьерах Якутии*

Мониторинг открытой разработки карьеров и подсчет объемов породы, извлеченной из них в результате взрывных работ, относятся к числу ключевых задач, стоящих перед маркшейдерами компании «АЛРОСА» — одной из крупнейших в мире компаний по добыче алмазов. Расчет объемов между двумя поверхностями рельефа относится к числу задач, обусловленных его геометрическими характеристиками.

В условиях суровой зимы, свойственной полярным широтам Якутии, маркшейдеры заинтересованы в максимально эффективном автоматизированном решении расчетной задачи дистанционными методами с минимально возможным привлечением ручного труда. В связи с этим методика геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа применительно к расчету объемов извлеченной породы была опробована на примере алмазных карьеров «Удачный» и «Зарница».

Карьер «Удачный» — крупнейшее по объемам сырья и размерам рудного тела месторождение алмазов в России. Проектная глубина карьера 630 м [<https://www.alrosa.ru>].

Расчет объемов — достаточно распространенная задача, решаемая стандартными алгоритмами ГИС-пакетов и ЦФС (см. главу 2). По сути, ее решение не требует никаких дополнительных материалов, кроме ЦМР, построенных в результате фотограмметрической обработки данных ДЗЗ. Основные критерии при выборе снимков — актуальность (съемка должна быть выполнена непосредственно до и после взрывных работ), высокая детальность (сверхвысокое пространственное разрешение), оперативность (из-за частых взрывных работ объемы породы и ситуация в карьере меняются очень быстро), минимальная стоимость данных.

Таким образом, требования актуальности и оперативности подразумевают организацию новой съемки, а не выбор данных из архивных источников. Финансовые ограничения исключают возможность организации новой аэросъемки и космической съемки с субметровым разрешением. У поставщиков материалов ДЗЗ есть ограничения на минимальную площадь заказа, которая значительно превышает фактическую площадь карьера. БПЛА не выдерживают температуры ниже  $-30^{\circ}\text{C}$ , а значит, подходящее решение — это организация новой назем-

ной стереосъемки карьеров. Отсутствие у маркшейдеров на момент взрывных работ исправных фототеодолитов потребовало уточнения критериев и оставило единственный вариант – организацию наземной стереосъемки карьеров малоформатной цифровой камерой с нормальноугольным объективом.

Стереопара снимков карьера получена цифровой камерой Canon EOS 5D Mark III с нормальноугольным объективом и разрешением матрицы 22,1 Мпикс (рис. 54).

Камера была установлена на штативе над двумя станциями с известными плановыми координатами. На основе координат опорных точек в пространстве снимаемого объекта можно рассчитать длину базиса съемки. Точки съемки выбраны из соображений охвата на изображениях максимального количества опознаков с известными плановыми и высотными координатами.

Обработка стереопары реализована средствами ЦФС PHOTOMOD. Для формирования стереопары были выполнены обязательные процедуры: внутреннее, взаимное и внешнее ориентирование снимков стереопары. Перед съемкой камера прошла калибровку в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК). Таким образом были уточнены координаты главной точки снимков, величина фокусного расстояния камеры, а также коэффициенты дисторсии.

Взаимное ориентирование снимков выполнялось в несколько этапов. Сначала путем визуального сопоставления подобран параметр начального приближения изображений — взаимное перекрытие 95%. Затем путем ручных измерений установлен размер области поиска соответственной точки — 500 пикселей. В результате автоматического



**Рис. 54. Стереопара наземных снимков (карьер «Удачный», Якутия)**

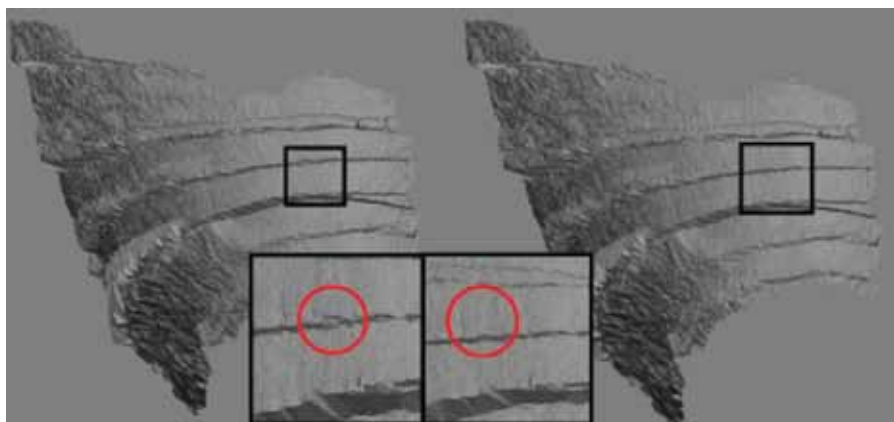
измерения равномерно по всем частям изображений идентифицировано 85 связующих точек.

Для внешнего ориентирования использованы координаты опорных точек, расположенных на разных горизонтах карьера. Особенностью технологии обработки изображений, полученных в результате наземной съемки, является разворот осей системы координат. Для разворота осей координат планово-высотные координаты опорных точек были скорректированы: координаты  $X$  заменены на координаты  $Z$ , а координаты  $Z$  — на координаты  $X$  с обратным знаком.

Уравнивание стереопары реализовано с учетом данных о базисе съемки. Точность уравнивания по среднему квадратическому отклонению (СКО) составила 15 мм в плане и 11 мм по высоте. Для того чтобы адаптировать движение маркера в такой системе координат, в PHOTOMOD активирована функция перемещения маркера не в геодезических, а в пиксельных координатах.

После этого в стереорежиме были отрисованы структурные линии — бровки карьера на различных горизонтах. Кроме того, периодически фиксируя положение маркера по координате  $Z$ , удалось с заданным шагом вручную провести ряд горизонталей. На основе уравненной стереопары произведен автоматический расчет пикетов (шаг сетки 1 м) с последующей фильтрацией ошибочно измеренных точек. Для корректного импорта рассчитанных пикетов и структурных линий в геодезическую систему координат с правильным разворотом осей точки были искусственно развернуты в пространстве функцией аффинного преобразования (с сохранением начала координат).

На основе правильно развернутых пикетов и структурных линий построены ЦМР (с размером ячейки 1 м), ортофотоизображение и 3D-модель карьера (рис. 55). Точность ЦМР при сравнении с высотами контрольных точек составила 11 см (по СКО). Площадь поверхности ЦМР составила 328 050 м<sup>2</sup>. Сопоставление ЦМР, полученных до и после взрывных работ в карьере «Удачный», позволило рассчитать объем извлеченной породы. Он составил 90 480 м<sup>3</sup>. В соответствии с «Инструкцией по маркшейдерскому учету горных пород при добыче полезных ископаемых открытым способом» [Инструкция, 2003], при определении объема взорванных горных пород по маркшейдерской съемке допустимая погрешность при объемах от 45 до 2200 тыс. м<sup>3</sup> вычисляется по



*a*

*б*

**Рис. 55. 3D-модель карьера «Удачный»:**

*a* — до взрывных работ; *б* — после взрывных работ

формуле:  $\sigma_{V_{\text{доп}}} = \frac{2200}{\sqrt{V}}$ , где  $V$  — объем взорванных горных пород, м<sup>3</sup>.

Соответственно, в нашем случае погрешность составит 7,31% или 6614 м<sup>3</sup>. Контрольные измерения объемов способом объемной палетки подтвердили пригодность разработанной методики. Погрешность расчета находится в пределах допуска.

По схожей методике была проведена съемка и фотограмметрическая обработка стереопары снимков на тестовый участок в карьере «Зарница» (рис. 56). Кимберлитовая трубка этого карьера – первое открытое в СССР коренное месторождение алмазов. В настоящее время карьер трубки работает с мощностью 1 млн т руды в год [<https://www.alrosa.ru>].



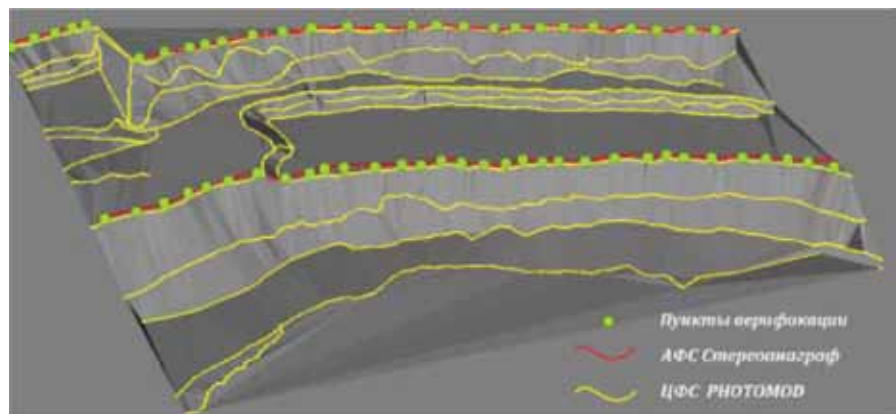
**Рис. 56. Стереопара наземных снимков (карьер «Зарница», Якутия)**

Точность уравнивания снимков стереопары по опорным точкам составила 1 мм в плане и 4 мм по высоте. Особенностью карьера на момент съемки стало наличие снежного покрова, который осложнил процесс автоматического измерения пикетов из-за низкого коэффициента корреляции между соседними пикселями изображения. В связи с этим для карьера «Зарница» в стереорежиме были отрисованы только структурные линии — бровки различных горизонтов, послужившие основой для создания ЦМР [Новаковский, Пермяков, 2014].

Для верификации результатов моделирования использовались структурные линии, оцифрованные с помощью аналитической фотограмметрической системы (АФС) «Стереонаграф» по стереопаре полученных фототеодолитом аналоговых снимков. Как видно из рис. 57, структурные линии практически полностью совпадают с бровками карьера, отрисованными в стереорежиме ЦФС PHOTOMOD.

Статистика расхождений структурных линий: минимум 10, 8 см; максимум 66,2 см; среднее 33,5 см; СКО 11,2 см. Расхождения рассчитаны для 59 пунктов путем вычисления расстояний между структурными линиями в 3D-пространстве.

Среднее значение расхождений структурных линий — 33,5 см позволяет сделать вывод о пригодности методики фотограмметрической обработки наземных снимков для создания 3D-моделей с точностью, достаточной для расчетов объемов извлеченной породы. При отсутствии



**Рис. 57. Структурные линии карьера «Зарница», полученные в АФС Стереонаграф и ЦФС PHOTOMOD**

снежного покрова в районах проведения съемки ожидаемая точность методики будет еще выше.

В результате исследования удалось найти современные альтернативы фототеодолитной съемке и аналитическим методам обработки ее результатов, традиционно использовавшимся при проведении маркшейдерских работ на карьерах компании «АЛРОСА». В настоящее время наметилась уверенная тенденция перехода от традиционной фототеодолитной наземной стереосъемки, аналоговых и аналитических методов обработки съемочных материалов к цифровым. Результатами фотограмметрической обработки стереопар наземных цифровых снимков могут быть автоматически рассчитанные облака точек, оцифрованные в стереорежиме структурные линии, ЦМР, 3D-модели.

### **§ 3.5. Выводы**

Усовершенствованная методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа позволяет в оперативном режиме составлять тематические карты различных характеристик рельефа. Методика опробована и использована для решения гидрографических, морфометрических, топоклиматических и геометрических задач на шести участках с различными физико-географическими условиями, в частности:

1) для решения гидрографических задач – на примере оперативного определения последствий наводнений в Крымске, Благовещенске и Бийске в 2012–2014 гг. Опробование методики и верификация ее результатов показали, что стереопары классических и одновременных космических снимков сверхвысокого разрешения могут успешно использоваться как для автоматического, так и для ручного измерения величин урезов воды при моделировании областей затопления и последствий наводнения. Основные результаты моделирования – число затопленных строений, границы и площади затопления территории. Для снижения риска наводнений и их катастрофических последствий для населения представляется целесообразной заблаговременная организация инженерной защиты набережных путем возведения постоянных и временных противопаводковых сооружений.

2) для решения морфометрической задачи по определению оптимального маршрута строительства магистральных газопроводов



(на примере Армении и Краснодарского края). Точности результатов моделирования, полученных на основе стереопар классических и современных снимков высокого разрешения, достаточно для составления карт 1:25000–1:130 000 масштаба необходимых на предпроектной стадии строительства. Методика основана на использовании трех лимитирующих факторов (углов наклона; пересечения территорий, на которых строительство запрещено или осложнено большим объемом земляных работ; ограничения на минимальное допустимое расстояние от трубопровода до дорог и населенных пунктов).

3) для определения морфометрических факторов эрозии почв (подверженности почвы смыванию и эрозионной опасности) на примере Швейцарии, в окрестностях города Вальдкирх. Известные эмпирические формулы Брауде и Сурмача, связывающие эрозию серых лесных почв с углами наклона и площадью водосборов, в целом, нашли свое подтверждение и для бурых лесных почв Швейцарии. Показатели смывости и эрозионной опасности почв, рассчитанные на основе результатов фотограмметрической обработки стереопар аэроснимков и осредненные по границам водосборных бассейнов, коррелируют с фактическими границами земель сельскохозяйственного назначения.

4) для расчета распределения суммарной солнечной радиации (на примере Армении). Расчет распределения суммарной солнечной радиации выполнен на основе результатов фотограмметрической обработки стереопары космических снимков высокого разрешения. При общей сопоставимости результатов моделирования с данными из открытых источников (NASA SSE, NREL) преимуществом авторского подхода является его бóльшая детализация и бóльшая пространственная дифференциация. Точечный расчет распределения солнечной радиации для населенных пунктов позволяет учитывать их специфическую локализацию и особенности рельефа.

5) для расчета объемов извлеченной породы на примере алмазных карьеров «Удачный» и «Зарница» в Якутии. Эксперимент показал, что технология фотограмметрической обработки наземных снимков, полученных малоформатными цифровыми камерами с нормальноугольными объективами, пригодна для создания ЦМР и 3D-моделей с точностью, достаточной для расчетов объемов извлеченной породы в соответствии с «Инструкцией по маркшейдерскому учету объемов горных пород при добыче полезных ископаемых открытым способом».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. ЦМР нашли широкое применение в научной и хозяйственной деятельности человека. Среди множества источников данных для создания ЦМР до недавнего времени лидирующие позиции занимали топографические карты. С 2000-х гг. на первый план вышли методы фотограмметрической обработки материалов ДЗЗ. Главные достоинства создания ЦМР фотограмметрическим методом: оперативность получения актуальных данных, автоматизация их обработки и высокая точность моделей.

2. Анализ мирового опыта совместного использования фотограмметрических и геоинформационных технологий в географо-картографических исследованиях [Li et al, 2005; Hengl et al, 2009] выявил существенные недостатки и ограничения известных методик. Во-первых, в тандеме геоинформационных и фотограмметрических технологий последние играют лишь второстепенную роль и предназначены исключительно для построения ЦМР. Во-вторых, недостаточно внимания уделяется возможностям фотограмметрической обработки разновременных космических снимков, снимков с БПЛА и наземных снимков, полученных цифровыми камерами. В-третьих, не определены четкие критерии выбора снимков для решения географо-картографических задач средствами фотограмметрических и геоинформационных технологий. В-четвертых, слабо освещены вопросы автоматизации построения ЦМР и создания общегеографической основы

3. В рамках единого геоинформационно-фотограмметрического цикла работ усовершенствованы методы моделирования актуального состояния рельефа и его характеристик (гидрографических, морфометрических, топоклиматических, геометрических).

4. Сформулированы критерии выбора разновременных космических снимков высокого и сверхвысокого пространственного разрешения, а также требования к методу уравнивания, числу и точности опорных точек, используемых в ходе фотограмметриче-

ской обработки снимков, для автоматизированного формирования стереомоделей.

5. Технология геоинформационного моделирования областей затопления по стереопарам космических снимков сверхвысокого пространственного разрешения, в том числе разновременных, опробована для анализа наводнений в Крымске, Благовещенске и Бийске в 2012–2014 гг.

6. Оптимизированные методы комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа опробованы для решения других географо-картографических задач: расчета суммарной солнечной радиации и определения оптимального маршрута газопровода (на примере Армении); определения морфометрических факторов эрозии почв (на примере Швейцарии); расчета объема извлеченной породы (на примере алмазных карьеров Якутии).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

### *Стандарты и нормативные правовые акты*

1. ГОСТ 19179-73. Гидрология суши. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. – 36 с.
2. ГОСТ Р 22.0.03-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Природные чрезвычайные ситуации. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1995. – 11 с.
3. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых карт и планов. М.: ЦНИИГАиК, 2002. – 49 с.
4. Основные положения по созданию и обновлению топографических карт масштабом 1: 10 000, 1: 25 000, 1: 50 000, 1: 100 000, 1: 200 000, 1: 500 000, 1: 1 000 000. М.: РИО ВТС, 1984. – 29 с.
5. Нормы и правила проектирования автомобильных дорог Федеративной Республики Германии. Научно-исследовательское общество по строительству дорог и транспорту. Утверждены Федеральным Министерством транспорта ФРГ 24.11.1995 г. (Перевод). – М.: Росавтодор, 1995. – 50 с.
6. РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учету объемов горных пород при добыче полезных ископаемых открытым способом. М.: Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2004. – 32 с.
7. СНиП 2.05.06-85. Магистральные трубопроводы. М.: Издательство стандартов, 2012. – 83 с.

### *Книги и статьи*

8. Авакян А.Б. Водохранилища мира. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
9. Анохин Г.И. Малый Кавказ. – М.: Физкультура и спорт, 1981. – 191 с.
10. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 419 с.
11. Асланян А.А., Багдасян А.Б., Валесян Л.А., Дульян С.М. Советский Союз. Географическое описание в 22 томах. Армения. – М.: Мысль, 1966 – 342 с.
12. Аристов М. Космический снимок или аэросъемка для картографирования в крупных масштабах. Что выбрать? / InternetGeo. 2011. №5. С. 11–20.

13. *Бабаджанян А.С., Хачатрян Г.М., Сардарян Н.М., Мелконян Г.Р.* Изучение и анализ катастроф с применением данных паспорта общины // Труды молодых ученых. 2010. №3. С. 11–13.
14. *Белонин М.Д., Жуков И.М.* Геометрические свойства поверхностей Алексеевского поднятия Куйбышевской области // Вопросы математической геологии. Л.: Наука, 1968. С. 194–207.
15. *Беркович К.М.* Русловые процессы на реках в сфере влияния водохранилищ. М.: Географический факультет МГУ, 2012. 163 с.
16. *Берлянт А.М.* Морфометрические исследования рельефа в СССР: состояние, проблемы, перспективы // Геоморфология. 1984. № 2. С. 15–20.
17. *Бэфани А.Н.* Основы теории ливневого стока. Одесса // Труды ОГМИ. Ч. 1. 1949. Вып. 4. С. 39–175.
18. *Большая советская энциклопедия* в 30 т. 3-е изд. –М.: Советская энциклопедия, 1969–1978.
19. *Борщ С.В., Самсонов Т.Е., Симонов Ю.А., Львовская Е.А.* Визуализация гидрологической обстановки в бассейнах крупных рек средствами ГИС-технологий // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2013. С. 47–62.
20. *Верещака Т.В.* Топографические карты: научные основы содержания. – М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2002. – 319 с.
21. *Верещака Т.В., Ковалева О.В.* Изображение рельефа на картах. Теория и методы (оформительский аспект). М.: Научный мир, 2016. – 184 с.
22. *Виноградов Н.В.* Карты и атласы / Под ред. М.С. Боднарского и М.П. Мурашова. – М., Л.: Изд-во Академии Наук СССР, 1941. – 191 с.
23. *Волков Н.М.* Принципы и методы картометрии. М.: Изд-во АН СССР, 1950. –327 с.
24. *Волосухин В.А., Щурский О.М.* Наводнения на Кубани. Проблемы и задачи // Гидротехника. 2012. №4. С. 6–9.
25. *Волчанская И.К.* Морфоструктурные закономерности размещения эндогенной минерализации. М.: Наука, 1981. –239 с.
26. *Гараевская Л.С., Малюсова Н.В.* Практическое пособие по картографии. – М.: Недра, 1976.
27. *Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И.* Физическая география СССР. – М.: Мысль, 1970. – 543 с.
28. *Гельман Р.Н.* Возможности использования обычных цифровых камер для наземной стереосъемки // Геодезия и картография. 2000. №4. С. 39–41.
29. *Геоинформатика.* Толковый словарь основных терминов / Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарева. – М.: ГИС-Ассоциация, 1999. – 204 с.
30. *Герасимов И.П.* Структурные черты рельефа земной поверхности территории СССР и их происхождение. М.: Изд-во АН СССР, 1959. - 100 с.

31. Горбунов С.В., Макеев Ю.Д., Малышев В.П. Анализ технологий прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2011. Т.1. №1. С. 43–53.
32. Горькавый И.Н. Разработка и исследование методики обработки и классификации трехмерных данных лазерного сканирования: Автореферат дисс. на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва., МИИГАиК. 2011.
33. Данилов-Данильян В.И., Болгов М.В. Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности территории Крымского района Краснодарского края. – М.: Институт водных проблем РАН. 2013. – 36 с.
34. Епихин А.В. Система космического мониторинга МЧС России / А.В. Епихин // Земля из космоса – наиболее эффективные решения. 2010. №1. С. 34–36.
35. Жуков В.Т., Сербенюк С.Н., Тикунов В.С. Математико-картографическое моделирование в географии. М.: Мысль, 1980 –224 с.
36. Жоров В.А., Дмитриев В.О., Постнова И.С., Яковченко С.Г. Планирование рисков наводнений с использованием ГИС-технологий // Ползуновский вестник. 2006. №2. С. 190–197.
37. Заруцкая И.П. Методы составления рельефа на гипсометрических картах. М.: Изд-во геодезической литературы, 1958. –126 с.
38. Звонкова Т.В. Прикладная геоморфология. – М.: Изд-во Высшей школы, 1970. – 272 с.
39. Зинченко А.Г., Ласточкин А.Н. Методика геоморфологического картографирования шельфа и континентального склона Российской Федерации / Под ред. Б.Г.Лопатина. – М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2001. – 38 с.
40. Золотарев Е.А., Нечелюстов С.Г., Харьковец Е.Г. Оценка возможности применения наземной цифровой стереофотограмметрической съемки в географических исследованиях // Вестник Московского университета. Серия 5: География. 2004. № 3. С. 15–19.
41. Иванов А.Л., Кузнецов М.С. Закономерности распространения эродированных серых лесных почв и овражной эрозии в угодьях Владимирского ополья и их рациональное использование // Эрозия почв и русловые процессы. 2004. Вып. 14. С. 63–75.
42. Изображения Земли из космоса: примеры применения: Научно-популярное издание – М.: ООО Инженерно-технологический центр «СКАНЭКС», 2005. – 100 с.
43. Иоффе А.И., Кожурин А.И. Активная тектоника и геоэкологическое районирование Московского региона // Бюл. МОИП, Отд. Геол. 1997. Т. 72. Вып. 5. С. 31–35.

44. *Калинин В.Г., Пьянков С.В.* О расчете морфометрических характеристик зоны переменного подпора на Камском водохранилище с применением ГИС-технологий // *Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов: материалы науч. конф.* Иркутск: Изд-во Ин-та географии Сиб. отд. РАН, 2005. С. 85–88.
45. *Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С.* и др. Основы геоинформатики: В 2 кн. Кн. 2: М.: Издательский центр «Академия», 2004. –480 с.
46. *Каргашин П.Е., Чепайкин В.А.* Геоинформационный анализ территории размещения объектов нефтегазовой отрасли // *Межотраслевой институт «Наука и образование».* 2014. №3. С. 101–104.
47. *Карионов Ю.И.* Оценка точности матрицы высот SRTM // *Геопрофи.* 2010. № 1. С. 48–51.
48. *Картоведение / Под ред. А.М.Берлянта – М.:Аспект Пресс, 2003. – 477 с.*
49. *Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В.* Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 336 с.
50. *Кобилев Т.А., Никулин Е.А., Суконцев О.В.* ГИС Национального центра управления в кризисных ситуациях МЧС России // *ArcReview.* 2009. №2. С. 9–12.
51. *Козлов Д.Н.* Цифровой ландшафтный анализ при крупномасштабном картографировании структур почвенного покрова. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Москва, МГУ имени М.В. Ломоносова, 2009. 26 с.
52. *Козлова А.Е.* Опыт анализа связей между неотектоническими структурами и интенсивностью эрозионного расчленения//*Геоморфология.* 1975. №3. С. 65–69.
53. *Кондратьев К.Я., Пивоварова З.И., Федорова М.П.* Радиационный режим наклонных поверхностей. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 215 с.
54. *Коновалов Н.Е.* Цифровое моделирование топографических условий местности для проектирования линейных сооружений // *Тр. ГипродорНИИ.* 1974. Вып. 8. С. 21–33.
55. *Костенко Н.П.* Геоморфология. М.: МГУ, 1999. 383 с.
56. *Котляков В.М., Лихачева Э.А., Десинов Л.В.* и др. Наводнение 6–7 июля 2012 года в г. Крымске // *Известия Российской академии наук. Серия географическая.* 2012. № 6. С. 80–88.
57. *Кошель С.М.* Теоретическое обоснование структуры и функций блока моделирования рельефа в ГИС: Дис. канд. геогр. наук: 25.00.35 / МГУ им. М.В. Ломоносова. –М., 2004. 119 с.
58. *Кошкарев А.В.* К автоматизации построения карт ориентации, формы и относительной освещенности склонов// *Изв. АН СССР.*

Дальневост.науч.центр, Тихоокеанский ин-т геогр. – Владивосток, 1980. – 30 с.

59. Кошкарев А.В. Рельеф как входной параметр математико-картографических моделей геосистем // Географическая картография в научных исследованиях и народнохозяйственной практике. –М.: МФ ГО СССР, 1982. С. 117–131.

60. Кошкарев А.В. Цифровое моделирование рельефа. – Морфология рельефа. – М.: Научный мир, 2004. – 184 с.

61. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. М.: Аспект Пресс, 2005. – 20 с.

62. Кравцова В.И., Чалова Е.Р. Возможности дешифрирования «случайных» стереопар космических снимков сверхвысокого разрешения (на примере дюнного рельефа Анапской пересыпи) // Геодезия и картография. 2014. № 9. С. 34–40.

63. Краснопевцев Б.В. Фотограмметрия. – М.: МИИГАиК, 2008. – 160 с.

64. Ласточкин А.Н. Морфодинамический анализ. Л.: Недра, 1987. –254 с.

65. Лобанов А.Н., Журкин И.Г. Автоматизация фотограмметрических процессов. М., 1980. –240 с.

66. Лукьянчикова О.Г., Васильчиков Ф.О., Ульянкина Л.К. Геоинформационная система гидрологического назначения в Самарской области // ArcReview. 2006. №1 (36). С. 10–11.

67. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков. – М.: КДУ, 2008. – 424 с.

68. Любков А.Н., Мартыненко А.И. Изготовление моделей рельефа местности с использованием фрезерных станков с программным управлением // Сб. научно-теоретических и производственных статей по геодезии, аэрофото-топографии и картографии НИИ ВТС. №12. М.:РИО ВТС, 1963.

69. Мазалова В.Ю., Пешкун А.А. «Построение стереопар с использованием данных стереосъемки с космического аппарата «Ресурс-П» №1» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тез. докл. 11 Всероссийской конференции на CD ROM. 2013.

70. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Малые водохранилища: экология и безопасность: монография. Пермь: Перм. Гос.нац.исслед.ун-т. 2012. – 256 с.

71. Макунина А.А. Физическая география СССР. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1985. – 296 с.

72. Матарзин Ю.М., Мацкевич И.К. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ // Вопросы формирования водохранилищ и их влияние на природу и хозяйство. Пермь, 1970. Вып. 1. С. 27–45.

73. Медведев А.А., Алексеенко Н.А., Курамагомедов Б.М. Возможности и ограничения использования БПЛА в географических исследованиях // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2016. Т. 60. № 5. С. 117–122.



74. Мещеряков Ю.А. Структурная геоморфология равнинных стран. М.: Наука, 1965. –390 с.
75. Мильков Ф.Н. Бассейн реки как парадинамическая ландшафтная система и вопросы природопользования // География и природные ресурсы. 1981. № 4. С. 11–18.
76. Мусин О.Р., Сербенюк С.Н. Цифровые модели «рельефа» континуальных и дискретных географических полей: Банки географических данных для тематического картографирования. М.: МГУ, 1987. С. 156–170.
77. Назаров А.С. Фотограмметрия. – М.: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
78. Николаевская Е.М. Морфометрические карты рельефа. М.: Изд-во МГУ, 1966. 30 с.
79. Никольский Д.Б. Уровни обработки радиолокационных данных // Геомастика. 2008. № 1. С. 25–36.
80. Новаковский Б.А. Фотограмметрия и дистанционные методы изучения Земли. М.: Издательство МГУ, 1997. –208 с.
81. Новаковский Б.А., Труфанов А.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые и электронные геоэкологические карты: получение и использование// Геоинформатика. 1997. Январь-февраль. С. 33–41.
82. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М.: Научный мир, 2003. – 64 с.
83. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Волкова И.С., Пермьяков Р.В. Геоинформационное обеспечение моделирования рельефа с использованием цифровых фотограмметрических станций // Геоинформатика. 2011. №4. С. 42–48.
84. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Пермьяков Р.В. Геоинформационное моделирование речных бассейнов с применением цифровой фотограмметрической системы PHOTOMOD // Геодезия и картография. 2012. № 1. С. 29–34.
85. Новаковский Б.А., Каргашин П.Е., Пермьяков Р.В. PHOTOMOD и тематическое картографирование // Геодезия и картография. 2012. № 10. С. 33–39.
86. Новаковский Б.А., Каргашин П.Е., Прасолова А.И., Пермьяков Р.В., Каргашина М.А. Геоинформационное моделирование экологической опасности горных водохранилищ // Экология и промышленность России. 2013. № 3. С. 22–31.
87. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Пермьяков Р.В. Геоинформационное моделирование наводнений с применением фотограмметрических технологий // Геодезия и картография. 2013. № 11. С. 35–39.
88. Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Пермьяков Р.В. Фотограмметрические технологии геоинформационного моделирования наводнений (на примере г. Крымск) // Геодезия и картография. 2014. №3. С. 37–42.
89. Новаковский Б.А., Пермьяков Р.В. Цифровая наземная стереосъемка: возможности и перспективы // Геодезия и картография. 2014. № 10. С. 37–41.
90. Новаковский Б.А., Колесникова О.Н., Прасолова А.И., Пермьяков Р.В. Геоинформационное моделирование наводнений по материалам космической

съемки (на примере г.Бийск, Алтайский край) // Геоинформатика 2015. № 1. С. 15–20.

91. *Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Пермяков Р.В.* Точность цифровых фотограмметрических моделей рельефа // Геодезия и картография. 2015. № 2. С. 40–48.

92. *Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации чрезвычайных ситуаций / Под общей ред. Шойгу С.К.* М.: Папирус, 1998. –404 с.

93. *Осинцева Н.В.* Геоморфологическое картографирование. Томск: Дельта-таплан, 2004. – 84 с.

94. *Павлов С.В., Павлов С.В., Галямов С.Р., Христовуло О.И., Заитов И.Н.* Паводковая ГИС Башкортостана // ArcReview. 2006. №4 (39). С. 5–10.

95. *Павлов С.В., Христовуло О.И., Шарафутдинов Р.Р.* Разработка геоинформационной модели речной сети с учетом картографической, гидрологической и морфометрической информации для определения границ зон затоплений при изменении уровня воды в водных объектах / Вестник УГАТУ. 2008. № 1(28). С. 18–27.

96. *Пермяков Р.В.* Применение геоинформационных технологий для решения географо-картографических задач (по материалам дистанционного зондирования) // Геоинформатика. 2014. №3. С. 10–17.

97. *Пешкун А.А.* Построение стереопар с использованием данных с космического аппарата «Канопус-В» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Тез. докл. 11 Всероссийской конференции на CD ROM. 2013.

98. *Пириев Р.Х.* О морфометрии, ее предмете и методе исследования // Вестник МГУ. Сер. географическая. 1985. № 3. С. 81–85.

99. *Погорелов А.В., Салпагаров А.Д., Киселев Е.Н., Куркина Е.В.* Геоинформационный метод в практике региональных физико-географических исследований. Тр. Тебердинского государственного заповедника. Кисловодск, 2007. Вып. 45. 200 с.

100. *Пьянков С.В., Шихов А.Н.* Опасные гидрометеорологические явления: режим, мониторинг, прогноз. Пермь, Перм. гос. нац. исслед. ун-т. 2014. – 296 с.

101. *Ранцман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. –171 с.

102. *Романова Е.Н.* Принцип расчета и картирования влажности почвы на морфометрической основе // Климат почвы. Л.: Гидрометеиздат, 1971. С. 39–51.

103. *Романова Е.Н.* Микроклиматическая изменчивость основных элементов климата. Л.: Гидрометеиздат, 1977. –279 с.

104. *Ротанова И.Н., Кошкарев А.В., Медведев А.А.* Использование материалов дистанционного зондирования Земли для цифрового моделирования рельефа в составе региональных инфраструктур пространственных данных // Вычислительные технологии. 2014. Т. 19, № 3. С. 38–47.

105. *Руководство по гидрологическим прогнозам*, 1989а. Вып.2. Краткосрочный прогноз расхода воды на реках. Л.: Гидрометеоиздат. 1989. –246 с.
106. *Рыльский И.А.* Влияние факторов географической среды на автоматизированное трассирование трубопроводов, М., Изд-во «МАКС-ПРЕСС», 2009. – 174 с.
107. *Садовничий В.А., Мусин О.Р., Новаковский Б.А.* Моделирование поверхности Фобоса //Избранные вопросы математики, механики и их приложений. М.: МГУ, 1999. С. 411–437.
108. *Салищев К.А.* Картоведение. –М.: Изд-во Моск. ун-та, 1982. –440 с.
109. *Самсонов Т.Е.* Алгоритм автоматизированного изображения рельефа способом штрихов крутизны // Вестник Моск. ун-та. 2008 №3. С. 49–54.
110. *Сваткова Т.Г.* Русская гипсометрическая школа // Тематическое картографирование: традиции и перспективы (к 90-летию проф. И.П.Заруцкой). – М., 1998.
111. *Серापинас Б.Б.* Основы спутникового позиционирования. М.: Географический факультет МГУ, 2012. –75 с.
112. *Сербенюк С.Н.* Картография и геоинформатика – их взаимодействие. М.: МГУ , 1990. –153 с.
113. *Сечин А.Ю.* Современные тенденции развития фотограмметрических систем // Пространственные данные. 2008. № 3.
114. *Симонов Ю.Г.* Морфометрический анализ рельефа. Москва - Смоленск: Изд-во СГУ, 1998. –272 с.
115. *Симонов Ю.Г., Симонова Т.Ю.* Речной бассейн и бассейновая организация географической оболочки // Эрозия почв и русловые процессы. 2004. Вып. 14. С. 7–34.
116. *Симонов Ю.Г., Новаковский Б.А., Тульская Н.И.* Эколого-геоморфологическое картографирование Московской области –М.: Научный мир, 2005. –96 с.
117. *Скворцов А.В.* Геоинформатика. Томск: Изд-во Том. ун-та, 2006. – 326 с.
118. *Советский энциклопедический словарь.* М.: Советская энциклопедия, 1981. –1600 с.
119. *Спиридонов А.И.* Основы общей методики полевых геоморфологических исследований и геоморфологического картографирования. М., 1970
120. *Спиридонов А.И.* Геоморфологическое картографирование. М.: Изд-во МГУ, 1975. –183 с.
121. *Сурмач Г.П.* Рельефообразование, формирование лесостепи, современная эрозия и противоэрозийные мероприятия. Волгоград: Агропромиздат, 1992. – 175 с.
122. *Тикунов В.С.* Моделирование в картографии. М.: Изд-во МГУ, 1997. – 405 с.

123. *Уфимцев Г.Ф.* Тектонический анализ рельефа (на примере Востока СССР). Новосибирск: Наука, 1984. –183 с.
124. *Философов В.П.* Краткое руководство по морфометрическому методу поисков тектонических структур. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1960.
125. *Флоринский И.В.* Теория и приложения математико-картографического моделирования рельефа: Автореферат дисс. на соискание ученой степени доктора технических наук. Москва. МИИГАиК. 2010.
126. *Хортон Р.Е.* Эрозионное развитие рек и водосборных бассейнов. М.: Изд-во иностранной литературы, 1948. – 158 с.
127. *Хромых В.В., Хромых О.В.* Цифровые модели рельефа. Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 178 с.
128. *Цифровая стереоскопическая модель местности: экспериментальные исследования* / Под ред. Ю.Ф. Книжникова. М.: Научный мир, 2004. – 244 с.
129. *Ченцов В.Н.* Морфометрические показатели на геоморфологической карте мелкого масштаба // Тр. Ин-та географии. Вып. 39 (Проблемы геоморфологии). М.-Л., Изд-во АН СССР, –1948.
130. *Червяков В.А.* Концепция поля в приложении к геоморфологическим картам // Геоморфология. №2. 1984. С. 57–62.
131. *Чибуничев А.Г., Курков В.М., Говоров А.В., Смирнов А.В., Михалин В.А.* Исследование точности фототриангуляции с использованием различных методов лабораторной и полевой калибровки // Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». № 2. 2016. С. 42–47.
132. *Шавнина Ю.Н., Пьянков С.В., Михайлов А.В., Немтин Г.Н., Соболева Е.Б.* Анализ системы водоподпорных гидротехнических сооружений с использованием геоинформационных технологий. Пермь, 2011. – 208 с.
133. *Шарапов Р.В., Афанасьева О.В., Лякин Г.А.* Некоторые аспекты применения ГИС в чрезвычайных ситуациях // Успехи современного естествознания. 2004. №7. С. 110–112.
134. *Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Сосунов И.В.* Применение ГИС-технологий для прогнозирования паводковой опасности. // Технологии гражданской безопасности. 2003. №1–2. С. 62–68.
135. *Шахраманьян М.А., Епихин А.В., Щербенко Е.В., Дорошенко С.Г., Резников В.М.* Методы тематической обработки космических снимков при мониторинге природных чрезвычайных ситуаций. // Технологии гражданской безопасности. 2004. №4. С. 8–39.
136. *Яковченко С.Г., Жоров В.А., Постнова И.С.* Создание и использование цифровых моделей рельефа в гидрологических и геоморфологических исследованиях. Кемерово: Изд-во ИУУ СО РАН, 2004. –92 с.
137. *Ackermann F.* Airborne Laser Scanning-present Statues and Future Expectations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54(2-3), 1999. – P. 64–67.

138. *Awrangzeb M., Lu Guojun, Fraser C.S.* Automatic building extraction from lidar data covering complex urban scenes. The International Archives of ISPRS, Zurich, Switzerland, 2014. P. 25–32.

139. *Barber C.P., Shortridge A.M.* Light Detection and Ranging (LiDAR) – Derived Elevation Data for Surface Hydrology Applications, Institute of Water Research, Michigan State University, 2004.

140. *Bell J.C., Thompson J.A., Butler C.A., McSweeney K.* Modeling soil genesis from a landscape perspective // Trans. 15th World Congr. Soil Sci., Acapulco, July 1994, V. 6a. Mexico: TSSS, 1994. P. 179–195.

141. *Bishop T.F. A., Minasny B.* Digital Soil-Terrain Modelling: The Predictive Potential and Uncertainty. In: Grunwald. S. (Ed.), Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics. CRC Press, Boca Raton, Florida, 2005. –P. 185–213.

142. *Bolstad, P.V. and T.M. Lillesand.* Improved landcover classification in northern Wisconsin using Landsat thematic mapper, soils, and terrain data, Forest Science 38, 1992. –P. 5–20.

143. *Burrough P.A.* Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford: Clarendon Press, 1986. - 193 p.

144. *Burrough P.A., Wesseling R., Sluiter D., Karssenber, K. de Jong and M. van der Meer.* Virtual landscapes, interactive models for learning about geographical change. 4th International Conference on Environmental Modelling, Problems, Prospects and Research Needs. Banff, Alberta, Canada. - 2000.

145. *Burt T.P., Butcher D.P.* Topographic controls of soil moisture distributions // J. Soil Sci. 1985. - V. 36. - № 3. - P. 469–486.

146. *Catlow D.R.* The multi-disciplinary applications of DEMs. *Auto-Carto London*, 1986. –P. 447–454.

147. *Chorowicz J., Breard J.-Y., Guillande R. et al.* Dip and strike measured systematically on digitized three-dimensional geological maps // Photogramm. Eng. Rem. Sens. 1991. - V. 57. - № 4. -P. 431–436.

148. *Christian O. A., Beiping W., Ziggah Y.* Assessing Vertical Accuracy of SRTM Ver 4.1 and ASTER GDEM Ver 2 Using Differential GPS Measurements – Case Study in Ondo State Nigeria. International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 4, Issue 12, December-2013. –P. 523–531.

149. *De Floriani L. and Magillo P.* Visibility algorithms on triangulated digital terrain models. International Journal of Geographical Information Systems, 8(1), 1994. P. 13–42.

150. *Dikau R.* Case studies in the development of derived geomorphic maps // Geol. Jahr. -1988. V. A104. - P. 329–338.

151. *Dunn M., Hickey R.* The effect of slope algorithms on slope estimates within a GIS. - Cartography (Austral.). - 1998. - 27. - № 1

152. *Eckert M.* Die Kartenwissenschaft. Forschungen und Grundlagen zu einer Kartographie als Wissenschaft. Berlin Leipzig: Walter de Gruyter & Co, Bd. 1, 1921, 880 p.
153. *Evans I.S.* General geomorphometry, derivations of altitude, and descriptive statistics // Spatial Analysis in Geomorphology. L.: Methuen, 1972. - P. 17–90.
154. *Farr T.G., Hensley S., Rodriguez E. et al.* The shuttle radar topography mission // CEOS SAR Workshop. Toulouse 26-29 Oct. 1999. Noordwijk, 2000. P. 361–363
155. *Freeman T.G.* Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. Computers & Geosciences, 17(3), 1991. P. 413–422.
156. *Fu, P.* 2000. A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA.
157. *Fu, P., and P. M. Rich.* 2000. The Solar Analyst 1.0 Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
158. *Fu, P., and P. M. Rich.* 2002. «A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry.» Computers and Electronics in Agriculture 37:25–35.
159. *Guzzetti F.* Landslide hazard and risk assessment. PhD dissertation. Bonn, Germany, - 2005.
160. *Hamid N., Ahmad A.* Calibration of high resolution digital camera based on different photogrammetric methods. Earth and Environmental Science, 2014 (18). P. 1–6.
161. *Hernandez Encinas L., S. Hoya White, A. Martin del Rey and G. Rodriguez Sanchez.* Modeling forest fire spread using hexagonal cellular automata. Applied Mathematical Modeling 31(60, 2006). – P. 1213–1227.
162. *Hengl T., Gruber S., Shrestha D.P.* Digital Terrain Analysis in ILWIS, 2003.
163. *Hengl T.*, Finding the right pixel size. Computers and Geosciences, 2006. 32(9): 1283–1298.
164. *Hengl, T., Reuter, H.I.* (eds) 2009. Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in Soil Science, vol. 33, Elsevier, 772 p.
165. *Hirshmuller H.* Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information, Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. CVPR 2005. IEEE Computer Society Conference, Vol. 2, P. 807–814.
166. *Hodgson M.E., Jensen J., Raber G., Tullis J., Davis B.A. Thompson G. and Schuckman K.* An Elevation of LiDAR-Derived Elevation and Terrain Slope in Leaf-off Conditions. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71 (7), 2005. – P. 817–823.
167. *Imhof E.* Cartographic Relief Presentation. California, ESRI Press, Redlands, 2007.

168. *Johansson M.* Analysis of digital elevation data for palaeosurfaces in south-western Sweden // *Geomorphology* 1999. - V. 26. - № 4. - P. 279–295.
169. *Kakiuchi. H., M. Onaka, M. Asai, F. Itoh,* 2003. “Topographic Mapping at Scale of 1:25,000 Using SPOT 5 Satellite Imagery”. Pasco Corporation, 2-8-10, Higashiyama, Meguro-ku, Tokyo, 153-0043, Japan and DMS Corporation Ltd., 14-25-205, Higashihoncho, Higashikurume-shi, Tokyo, 203-0014, Japan.
170. *Karwel A.K., Ewiak I.*, Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, P. 169–172.
171. *Kennelly P.J., Kimerling A.J.* Modifications of Tanakas’s Illuminated Contour Method. *Cartography and Geographic Information Science*. Vol 28. №2, 2001. P. 111–123.
172. *Kennelly P.J., Kimerling A.J.* GIS Applications to Historical Cartographic Methods to Improve the Understanding and Visualization of Contours. *Journal of Geoscience Education/* 50(4), 2002. – P. 428–436.
173. *King D., Bourennane H., Isambert M., Macaire J.J.* Relationship of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon to DEM attributes in a gently sloping area // *Geoderma*. 1999. -V. 89.-№ 1-2. -P. 95–111.
174. *Kirkby M.J., Chorley R.J.* Throughflow, overland flow and erosion // *Bull. Int. Assoc. Sei. Hydrol.* 1967. - V. 12. -№ 3. - P. 5–21.
175. *Levner I., Bulitko V., Li L., Lee G., Greiner R.* Automated feature extraction for object recognition. *Proc. Image and Vision Computing New Zealand Conference*, 2003, P. 653–655.
176. *Li Z.L. and Zhu, Q.* *Digital Elevation Models*. Wuhan University Press, Wuhan, China. - 2000.
177. *Li Z.L., Zhu Q., Gold C.* *Digital Terrain Modeling. Principles and Methodology*. CRC Press, 2005. - 318 p.
178. *Lohr U.* *Digital Elevation Models by Laser Scanning*. *Photogrammetric Record*, 16(91), 1998. – P. 105–109.
179. *Martz L.W., de Jong E.* CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // *Comput. Geosci.* 1988. - V. 14. -№ 5. - P. 627–640.
180. *Maune D.F., Huff L.C., and Guenther G.C.* DEM user applications. *Digital Elevation Model Techniques and Applications: The DEM User Manual*, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, 2001. - P. 367–394.
181. *Miller C. and LaFlamme R.* The digital terrain model — theory and applications. *Photogrammetric Engineering*, 24, 1958. – P. 433–442.
182. *Mitasova H., Mitas L., Brown W.M., Gerdes D.P., Kosinovsky I., Baker T.* Modeling spatially and temporally distributed phenomena: New methods and tools

for GRASS GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 9(4), 1995. – P. 433–446.

183. *Mizuta, Y., Sasagawa, A., Koido, K., Urabe, B., and Tanaka, H.*, 2007. Validation on application of ALOS/PRISM to topographical mapping. *Journal of the Geographical Survey Institute*, 111, P. 119–124.

184. MMSI. A White Paper in LiDAR Mapping, Mosaic Mapping Systems Inc. 2001.

185. *Moe D., Sampath A., Christopherson J., Benson M.* Self calibration of small and medium format digital cameras. *The International Archives of ISPRS*. Vienna, 2010. P. 395–399.

186. *Moore R.F., Simpson C.J.* Image analysis a new aid in morphotectonic studies // *Proc. 17th Int. Symp. Remote Sensing Envir., Ann Arbor, 9-13 May 1983, V. 3.* - Ann Arbor. *Envir. Res. Inst. Michigan*, 1983. - P. 991–1002.

187. *Moore I.D., Gessler P.E., Nielsen G.A., Peterson G.A.* Soil attribute prediction using terrain analysis // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1993. - V. 57. - № 2. - P. 443–452.

188. *Nikolakopoulos, K. G.; Kamaratakis, E. K; Chrysoulakis, N.* SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 2006. Vol. 27.

189. *O'Callaghan J.F. and Mark D.M.* The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28(4), 1984. – P. 323–344.

190. *Odeh I.O.A., Chittleborough D.J., McBratney A.B.* Elucidation of soil-landform interrelationships by canonical ordination analysis // *Geoderma*. 1991. - V. 49. - № 1-2. - P. 1–32.

191. *Onorati G., Poscolieri M., Ventura R. et al.* The digital elevation model of Italy for geo-morphology and structural geology//*Catena*. 1992.-V. 19.-№2.-P. 147–178.

192. *Pennock D.J., Zebarth B.J., de Jong E.* Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada // *Geoderma*. 1987. - V. 40. - № 3-4. - P. 297–315.

193. *Petrie, G. and Kennie T.* (Eds.). An introduction to terrain modeling: applications and terminology. In: *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering: A Short Course*. University of Glasgow. 1987.

194. *Petrie G. and Kennie T.* *Terrain Modelling in Surveying and Civil Engineering*. Whittles Publishing, Caithness, England. 1990.

195. *Pike R.J., Evans I., Hengl T.* *Geomorphometry: A Brief Guide*. In: *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications*, Hengl, T. and Hannes I. Reuter (eds.), Series Developments. 2008.

196. *Quinn P.F., Beven K.J., Chevallier P., Planchon O.* The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models // *Hydrol. Process*. 1991. - V. 5. - № 1 - P. 59–80.



197. *Rana S. and Morley J.* Optimising Visibility Analysis Using Topographic Features on the Terrain. Working Paper 44, CASA of University College, London. – 2002.
198. *Rich, P. M., R. Dubayah, W. A. Hetrick, and S. C. Saving.* 1994. “Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, 524–529.
199. *Rich, P. M., and P. Fu.* 2000. Topoclimatic Habitat Models. Proceedings of the Fourth International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling.
200. *Riedmann M., Haynes M.* Developments in Satellite Radar Interferometry for Monitoring Pipelines and Oil & Gas Infrastructure, ROGTEC journal (Russian Oil & Gas Technology), June 2005, 79 p.
201. *Roberts R.* Using new methods in highway location. Photogrammetric Engineering, 23, 1958. - P. 563–569.
202. *Robinson A.H., Thrower J.W.* A new method for terrain representation. Geographical Review 47(4), 1957. - P. 507–520.
203. *Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley,* 2005, An assessment of the SRTM topographic products, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 p.
204. *Schowengerdt R.A., Glass C.E.* Digitally processed topographic data for regional tectonic evaluations // Geol. Soc. Am. Bull. 1983. - V. 94. - № 4. - P. 549–556.
205. *Syed S., Dare P., Jones S.* Automatic classification of land cover features with high resolution imagery and lidar data: an object-oriented approach. Proceedings of SSC2005. Melbourne, 2005. P. 512–522.
206. *Speight J.G.* A parametric approach to landform regions // Progress in Geomorphology. -L.: Inst. British Geographers, 1974. P. 213–230.
207. *Strahler A.N.* Quantitative slope analysis // Geol. Soc. Am. Bull. 1956. - V. 67. - № 5. -P. 571–596.
208. *Tagil S., Jenness J.* GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje, Turkey. Journal of Applied Sciences 8(6), 2008. – P. 910–921.
209. *Tanaka K.* The orthographic relief method of representing hill features on a topographic map. Geographical Journal 79(3), 1932. -P. 213–219.
210. *Tang G.A.* A research on the Accuracy of Digital Elevation Models. Science Press, Beijing. – 2000.
211. *Troeh F.R.* Landform parameters correlated to soil drainage // Soil Sci. Soc. Am. Proc. -1964. V. 28. - № 6. - P. 808–812.
212. *Wang J.J., Robinson G.J. and White K.* Generating viewsheds without using sightlines. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 66(1), 2000. – P. 87–90.
213. *Wigmosta M.* The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model / M.Wigmosta, B.Nijssen, P.Storck // Mathematical Models of Small Watershed

Hydrology and Applications. 2002. P. 7–42.

214. *Wood J.* The geomorphologic characterization of Digital Elevation Models, 2001.

215. *Yoeli P.* Topographic relief depiction by hachures with computer and plotter // *Cartographic J.* 1985. Vol. 22. P. 111–124.

216. *Zhao Q.A.* A snowment runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM / Q.Zhao, Z.Liu, B.Qin, Z.Weil, S.Fang // *Hydrology and Earth Systems sciences (HESS)*, 2009. Vol.13 (10). P. 1897–1906.

### *Электронные ресурсы*

217. *База данных NASA Surface meteorology and Solar Energy.* URL:<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

218. *Борщ С.В., Асарин А.Е., Болгов М.В., Полунин А.Я.* Наводнения. URL: [http://downloads.igce.ru/publications/metodi\\_ocenki/03.pdf](http://downloads.igce.ru/publications/metodi_ocenki/03.pdf).

219. *Геопортал Швейцарии.* URL:<http://www.geoportal.ch/map>.

220. *Кадничанский С.А.* Сравнительный анализ эффективности применения цифровой аэрофотосъемки и космической съемки для целей создания и обновления топографических и специальных карт. URL:<http://www.geokosmos.ru/contacts/press/article05-2009.php>.

221. *Михайлов А. П., Чибуничев А. Г.* Лекции по фотограмметрии. [Электронный ресурс]. URL:<http://www.racurs.ru/wiki>.

222. *Официальный сайт Национальной лаборатории возобновляемой энергии США.* URL: <http://www.nrel.gov/tredc/>.

223. *Официальный ресурс для скачивания данных SRTM.* URL:[http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/).

224. *Официальный сайт АО «Фирма «Ракурс»»* URL:<http://www.racurs.ru>.

225. *Официальный сайт ИТЦ «СканЭкс».* Пресс-центр URL:<http://press.scanex.ru/index.php/tvradio/item/4080-pavodok-amur>.

226. *Официальный сайт компании «Совзонд».* URL:<http://www.sovzond.ru>.

227. *Официальный сайт информационного портала Южного региона* URL: <http://www.yuga.ru/news/268954/>.

228. *Официальный сайт информационного агентства «РИА Новости»* URL: <http://ria.ru/natural/20120802/715222210.html>.

229. *Официальный сайт Департамента Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды по Дальневосточному федеральному округу.* URL: <http://www.dalgidromet.ru/dvugms/dvugms-news/page/2/>.

230. *Официальный сайт Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий по Амурской области.* URL: [http://www.28.mchs.gov.ru/news/?PAGEN\\_8=226&PAGEN\\_6=13](http://www.28.mchs.gov.ru/news/?PAGEN_8=226&PAGEN_6=13).

231. *Официальный сайт НПО «Гидротехнологии».* База данных «Гидро-

расчеты». URL: <http://www.hydrotec.ru/Программныепродукты/Базыгидрологическихданных/tabid/71/Default.aspx>.

232. *Официальный сайт «Российской газеты»*. URL: <http://www.rg.ru/2014/07/03/reg-sibfo/altai.html>.

233. *Официальный сайт муниципального образования город Бийск*. URL: <http://www.bysk22.ru/about/info/news>.

234. *Официальный сайт АК «АЛРОСА»*. <http://www.alrosa.ru/corporate-structure/удачнинский-гок/>.

235. *Сечин А.Ю.* Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер. URL: <http://www.racurs.ru/?page=448>.

236. *Титаров П.С.* Характеристики точности СЕ и LE. URL: <http://www.racurs.ru/index.php?page=169>.

237. *Цимеринов Е.* Климат атмосферных осадков («Наводнение на Дальнем Востоке. Лето 2013 года»). URL: <http://meteoweb.ru/2013/phen081.php>.

238. *Al Samari B.A., Ayub M., Al Yami S.M.* Optimum Route of Pipeline using ArcGIS. URL: <http://www.saudigis.org/FCKFiles/File/SaudiGISArchive>.

239. *Bildirici O., Ustun A., Ulugtekin N. et al.* Comparison of SRTM and 25K topographic maps in Turkey. URL: <http://www.tujk2009.selcuk.edu.tr/~aabbak/pubs/8.pdf>.

240. *Hug C., Krzystek P., Fuchs W.* Advanced lidar data processing with lastools. URL: <http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm2/papers/240.pdf>.

241. *OpenStreetMap*. Свободная вики-карта мира. URL: [http://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Наводнение\\_в\\_Крымске](http://wiki.openstreetmap.org/wiki/RU:Наводнение_в_Крымске).

242. *Podobnikar Tomaz.* Methods for visual quality assessment of a digital terrain model, S.A.P.I.E.N.S. 2.2 | 2009, URL: <http://sapiens.revues.org/738>.

243. *Supporting GIS professionals with the most comprehensive 3D terrain data for more efficient analyses.* URL: <https://www.intermap.com/en-us/databases/nextmap.aspx>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

### Карта рельефа (Крымск, Краснодарский край)



## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Углы наклона (Крымск, Краснодарский край)





## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Экспозиция склонов (Крымск, Краснодарский край)



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие авторов .....	3
Введение .....	6
<b>ГЛАВА 1</b>	
<b>Особенности создания цифровых моделей рельефа по материалам дистанционного зондирования земли и их использование в географо-картографических исследованиях</b>	
§ 1.1. Определение цифровой модели рельефа (ЦМР).....	9
§ 1.2. Способы построения и визуализации ЦМР .....	12
§ 1.3. Источники данных для создания ЦМР .....	15
§ 1.4. Фотограмметрическое моделирование рельефа.....	23
§ 1.5. Использование ЦМР в географо-картографических исследованиях .....	27
§ 1.6. Выводы.....	33
<b>ГЛАВА 2</b>	
<b>Методика комплексного геоинформационно-фотограмметрического моделирования рельефа и его характеристик</b>	
§ 2.1. Общая схема методики .....	37
§ 2.2. Фотограмметрический блок методики комплексного моделирования рельефа.....	47
§ 2.3. Геоинформационный блок методики комплексного моделирования рельефа.....	76
§ 2.4. Выводы.....	98
<b>ГЛАВА 3</b>	
<b>Оперативное картографирование характеристик рельефа в географических исследованиях</b>	
§ 3.1. Гидрографические задачи .....	101
§ 3.2. Морфометрические задачи.....	127
§ 3.3. Топоклиматические задачи .....	142
§ 3.4. Геометрические задачи .....	147
§ 3.5. Выводы.....	152
Заключение .....	154
Список литературы .....	156
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	174

*Учебное издание*

**Богуслав Августович Новаковский**

**Роман Викторович Пермяков**

**КОМПЛЕКСНОЕ**

**ГЕОИНФОРМАЦИОННО-ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЕ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА**

*Редактор Е.А. Евтеева*

*Оригинал-макет Б.В. Кузнецов*

*Графика А.Ю. Боков*

Подписано в печать 05.02.2019. Гарнитура Таймс  
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая  
Объем 11,0 усл. печ. л. Заказ № 5

Издательство МИИГАиК  
105064, Москва, Гороховский пер., 4

Отпечатано в типографии МИИГАиК