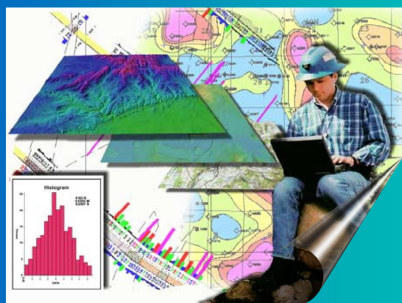




**С.В. Смолич
К.С. Смолич
Б.А. Просекин**



***Современное
маркшейдерское
искусство***

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Забайкальский государственный университет»

С. В. Смолич
К. С. Смолич
Б. А. Просекин

СОВРЕМЕННОЕ МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ИСКУССТВО

Учебное пособие

Чита
Забайкальский государственный университет
2018

УДК 622.1(075)

ББК 33.12я7

С 512

Рекомендовано к изданию учебно-методическим советом
Забайкальского государственного университета

Рецензенты

Д. Д. Шестернев, канд. геол.-минерал. наук, гл. геолог,
Забайкальский трест инженерно-строительных изысканий,
г. Чита

Д. Л. Авгулевич, канд. геол.-минерал. наук, гл. специалист
по инженерным изысканиям, АО «ПитерГОРпроект»,
г. Санкт-Петербург

Смолич, Сергей Вениаминович

С 512

Современное маркшейдерское искусство : учеб.
пособие / С. В. Смолич, К. С. Смолич, Б. А. Просекин ;
Забайкал. гос. ун-т. – Чита : ЗабГУ, 2018. – 191 с.

ISBN 978-5-9293-2208-2

В издании рассматриваются общие понятия дисциплины, методы маркшейдерских исследований, используемые приборы и оборудование, порядок их поверки, а также изложены теоретические основы и приведены примеры практического использования маркшейдерских работ при подземной и открытой разработке месторождений полезных ископаемых.

В основу учебного пособия положены учебные программы курсов «Дистанционные методы зондирования Земли» и «АСУ маркшейдерско-геологического обеспечения». Предназначено для студентов направлений 21.05.02, 21.05.03 и 21.05.04 *Горное дело горно-геологического профиля*.

УДК 622.1(075)

ББК 33.12я7

ISBN 978-5-9293-2208-2

© Забайкальский государственный
университет, 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Краткие исторические сведения	7
Глава 2. Маркшейдерское дело в XXI веке	18
2.1. Особенность работы маркшейдера	18
2.2. О лицензировании маркшейдерской деятельности	21
Глава 3. Возрождение фотограмметрии в горном деле	24
3.1. Немного истории	24
3.2. Аналог или цифра?	28
3.3. Где выход?	34
Глава 4. Применение фотокамер премиум класса в фотограмметрии	50
4.1. Цифровые фотограмметрические системы	54
4.2. Анализ 3D-модели поверхностей горных выработок	54
4.3. Планирование полевых работ	55
4.4. Рекомендуемые настройки камеры	60
4.5. Фотосъёмка	61
4.6. Калибровка фотокамеры	62
4.7. Постобработка	68
Глава 5. Практические примеры использования фотограмметрии в горном деле	73
5.1. Использование приложения BlastMetriX 3D и Shape MetriX 3D	73
5.2. Проектирование буровзрывных работ в модуле BlastMetriX 3D	77
5.3. Постобработка съёмок в программе 3DM-Analyst	86
5.4. Геоструктурное картирование	95
Глава 6. Автоматизированные системы управления геолого-маркшейдерских служб горного предприятия	104
6.1. Классификация геоинформационных систем	104
6.1.1. История развития информационных систем	106
6.1.2. Классификация ГИС	107
6.1.3. Подсистемы ГИС	109

6.2. Модели данных, используемых в ГИС	110
6.2.1. Растровая модель данных	110
6.2.2. Векторная модель данных	113
6.2.3. Векторные топологические объекты	116
6.2.4. Достоинства и недостатки растровой и векторной модели данных	117
6.3. Хранение информации	118
6.3.1. Типы баз данных	119
6.4. Ввод данных	121
6.4.1. Устройства ввода данных	121
6.4.2. Процедура оцифровки графической информации	123
6.5. Цифровые модели	130
6.5.1. Цифровые модели поверхностей	130
6.5.2. Геологические и горно-технологические модели	132
6.6. Планирование и проектирование горных работ ...	137
6.6.1. Горный способ добычи	138
6.6.2. Скважинное подземное выщелачивание	141
6.6.3. Сравнительная характеристика имеющихся в мире геоинформационных систем для горных предприятий	144
Глава. 7. Системы координат, применяемые в РФ	158
7.1. Системы координат, применяемые в маркшейдерском деле	161
7.2. Определение координат с помощью ГНСС-измерений	169
Глава. 8. Применение современных маркшейдерских приборов и программного обеспечения	177
8.1. Практика использования маркшейдерских приборов	177
8.2. Особенности применения современного программного обеспечения	180
Заключение	183
Глоссарий	184
Библиографический список	188

Введение

Маркшейдерское дело (маркшейдерия) – это область горной науки и техники, которая включает совокупность методов, способов и средств, применяемых при разведке месторождений полезных ископаемых, проектировании, строительстве и эксплуатации горных предприятий и других, связанных с ними объектов. О маркшейдерии до сих пор часто говорят, как об искусстве. Дело в том, что понятие «маркшейдерское дело», или «маркшейдерия», произошло от нем. *Markscheidenkunst* – «марки устанавливать искусство», или в русской транскрипции – «искусство устанавливать границы».

В предлагаемом учебном пособии сделана попытка изложить в доступной форме необходимый перечень базисных положений маркшейдерии с точки зрения понимания методов измерений при использовании современной приборной базы и программного обеспечения. На основании этих представлений у студентов должно сложиться системное понимание основ некоторых маркшейдерских дисциплин и особенностей методов практической реализации при использовании современного геодезического и маркшейдерского оборудования, подкреплённого компьютерными программами с внедрением интеллектуальных методов обработки данных измерений на местности и построения по ним трёхмерных моделей месторождения и горных выработок (3D-моделей).

В основу учебного издания, предназначенного для студентов горно-геологических специальностей вузов, положены курсы лекций, читаемые в Забайкальском государственном университе-

те студентам направления «Горное дело». Горный инженер должен хорошо разбираться в горно-геологической документации, уметь читать топографические карты и планы, разрабатывать и реализовывать проекты разработки месторождений полезных ископаемых.

В книге не только рассмотрены теоретические основы маркшейдерских работ и измерений, но и приведены примеры практического опыта выполнения работ, связанного с различными видами маркшейдерского обеспечения горно-геологических работ.

Учитывая возросшие современные требования к информационным технологиям (мониторинг различных явлений, происходящих как на поверхности Земли, так и в её недрах), авторы полагают, что издание будет полезно инженерно-техническому персоналу, чья работа требует выполнения различных маркшейдерско-геодезических измерений на местности и использования горной маркшейдерской документации.

ГЛАВА 1

Краткие исторические сведения

Маркшейдерия – одна из наиболее сложных специальностей горного дела. Возникла одновременно с горным делом. Задачи, связанные с измерениями в рудниках, решались в глубокой древности. Ещё в XIV–XIV вв. до н. э. в Египте строили на плоскости уменьшенные масштабные изображения горных выработок.

Герон Александрийский (предположительно I в. до н. э.) (см. см. рис. 1.1) впервые в своем труде «О диоптре» описал способ подземной съёмки и её ориентирования при помощи 2 отвесов. И предложил формулу вычисления площади треугольника [20].

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)},$$

где p – полупериметр треугольника $p = (a + b + c)/2$;

a, b, c – стороны треугольника.

Диоптра, изобретённая Героном, была прообразом современного теодолита (см. рис. 1.2).

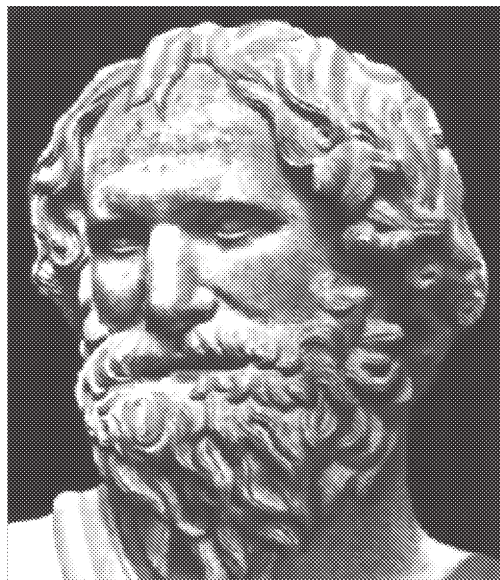


Рис. 1.1. Герон Александрийский

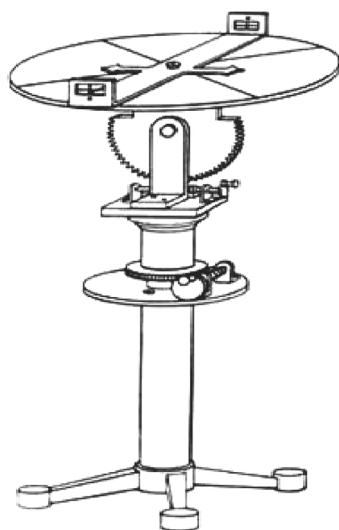


Рис. 1.2. Диоптра. Прибор для измерения угловых величин на местности

The diagram shows a geometric network of points and lines. Points F, G, H, K form a top boundary. Points E, B, N, M, L form a bottom boundary. A contour line passes through points B and D. A dashed line connects E and N. A solid line connects B and D. Angles α and β are indicated at points E and D respectively.

Главный труд Агриколы – «*De re metallica*» (русское название «О горном деле и металлургии в 12 книгах»), законченный в 1550 г. и опубликованный в 1556 г. [1]. Пятая книга его посвящена маркшейдерским приборам и съёмкам, проводимым в те

времена на рудниках (см. рис. 1.5). На рисунке маркшейдер из подобию треугольников решает задачу сбойки штольни с вертикальным шахтным стволом. Определяя расстояние между встречными выработками и их направление, он тем самым обеспечивает безопасную работу горнорабочих. Одновременно маркшейдер следит, чтобы горные выработки не вышли за контур горного отвода, который устанавливается на поверхности земли бергмейстером.



Рис. 1.4. Георг Агрикола



Рис. 1.5. Сбойка штольни и шахты (гравюра из книги Георга Агриколы)

Интересно то, что углы в 15–16-м вв. маркшейдеры не измеряли, а отмечали на специальных кругах и полукругах с навощенными кольцами (см. рис. 1.6–1.7).

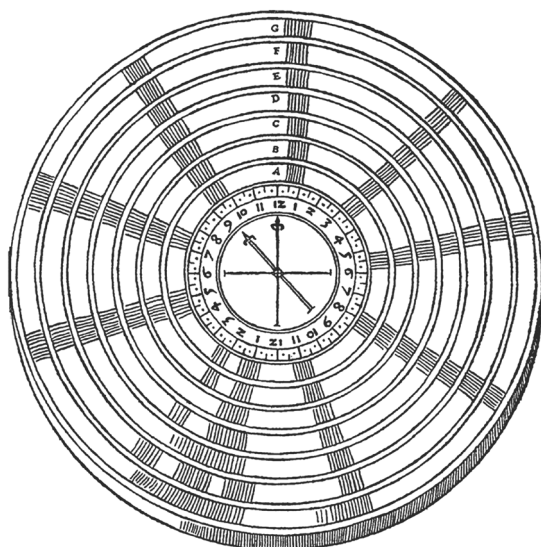


Рис. 1.6. Измерительный круг с 7 навошенными кольцами
(гравюра из книги Георга Агриколы)

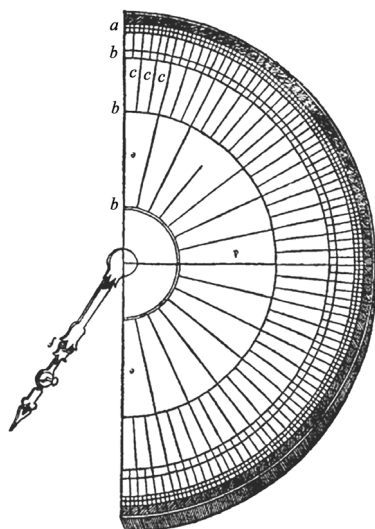


Рис. 1.7. Навошенное полукольцо на полукруге
(гравюра из книги Георга Агриколы)

Дело в том, что направления в горных выработках показывали и измеряли при помощи перекрещивающихся шнуров и угол измерялся вдавливанием шнура в восковые кольца измерительного круга или полукруга. При этом центр измерительного прибора, устанавливался в точке пересечения шнуров (см. рис. 1.8). Измеренный таким способом угол позже в камеральных условиях переносился на карту (план) горных выработок.

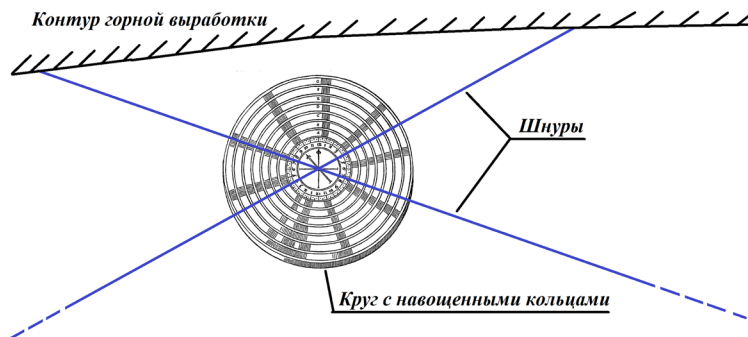


Рис. 1.8. Измерение горизонтальных углов навощенным кольцом

Вертикальные углы измерялись с помощью полукруга с отвесом (см. рис. 1.9).

Первые печатные сведения о маркшейдерском деле в России относятся к временам царствования Петра I. Вот что, например, говорилось в первом русском горном законодательстве, составленном в 1734–1737 гг. В. Н. Татищевым, разработанном по предписанию именной инструкции 1734 г., в котором были отражены вопросы маркшейдерского дела [7]:

1. Иметь плоские разрезные чертежи каждой рудокопи с указанием на них условий залегания и всех особенностей рудника.
2. Пополнять и исправлять общие карты данного округа по правилам, изложенным в особой инструкции Академии наук, куда и должны представляться копии готовых карт целого уезда или провинции.

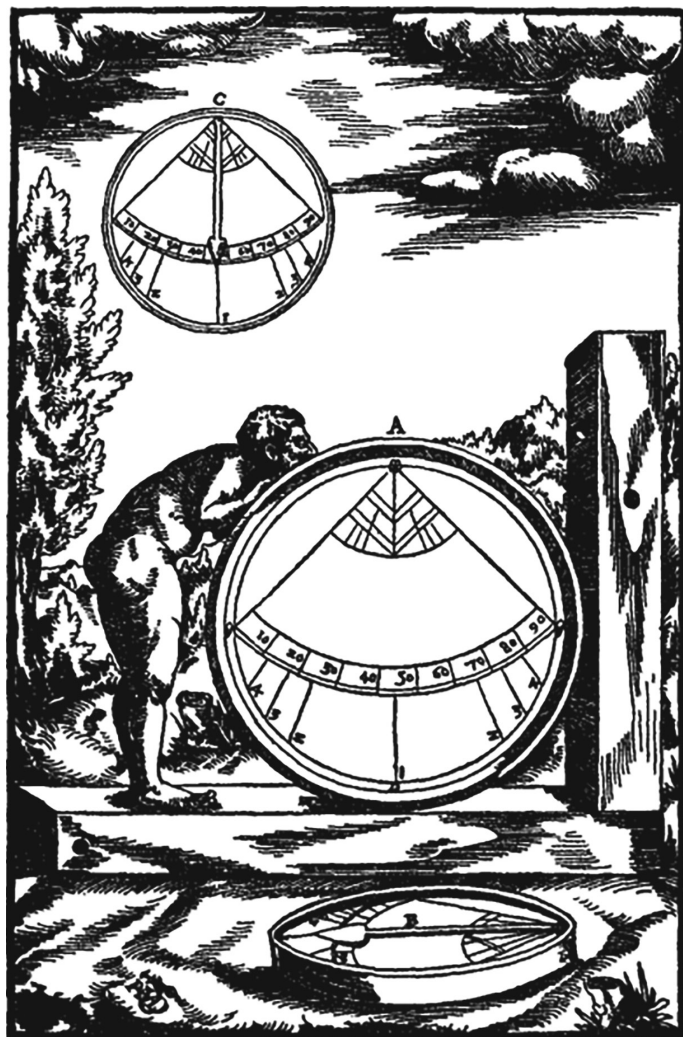


Рис. 1.9. Полукруг с отвесом
для измерения вертикальных углов наклона
(гравюра из книги Георга Агриколы)

В 1763 г. М. В. Ломоносовым была издана книга «Об измерении рудников» – первая в нашей стране работа, в которой об-

стоятельно излагались все вопросы маркшейдерского дела того времени. Эта книга стала частью его капитального сочинения «Первые основания металлургии или рудных дел» [13]. Ломоносовым впервые был описан способ буссольной съёмки подземных горных выработок, применяемый и поныне (см. рис. 1.10).

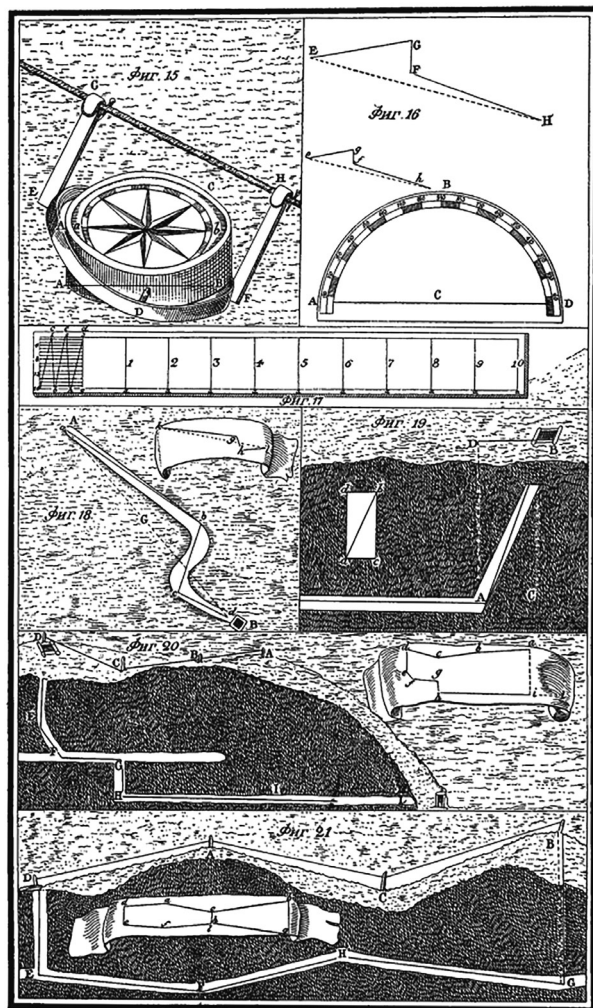


Рис. 1.10. Буссольная съёмка (гравюра из 5-й книги М. В. Ломоносова)

В 1847 г. профессор Петербургского горного института П. А. Олышев опубликовал книгу «Маркшейдерское искусство», где впервые предложил использовать для подземных съёмок горный теодолит, заложил основы горно-геометрического представления горных работ.

В 1903 г. опубликовано первое «Практическое руководство Маркшейдерского искусства» О. Братгунга (см. рис. 1.11).

Начало XX столетия характеризуется возникновением новой науки Горной геометрии, основоположниками которой по праву считаются П. М. Леонтовский, В. И. Бауман, П. К. Соболевский.

По предложениям I Всероссийского маркшейдерского съезда (1921 г.) началась планомерная подготовка горных инженеров – маркшейдеров. Были организованы маркшейдерские специальности: 1921 г. – в Ленинградском; 1925 г. – в Днепропетровском; 1929 г. – в Свердловском горных институтах; в Томском и Новочеркасском политехнических институтах [3; 14].



Рис. 1.11. Титульный лист «Практического руководства маркшейдерского искусства» О. Братгунга с предисловием Г. А. Тиме

Вопросы для самоконтроля

1. Когда появились первые сведения о маркшейдерском деле?
2. Когда и где начали готовить первых маркшейдеров в России?
3. Назовите первый труд, где дано описание маркшейдерских съёмок?
4. Каким первым документом регламентировались работы маркшейдера в Российской империи?
5. Роль В. М. Ломоносова в развитии маркшейдерии.
6. Когда и кем был разработан первый горнозаводской устав?
7. Кто является основоположником науки «Горная геометрия»?

Рекомендуемая литература

1. Агрикола Г. О горном деле и металлургии в двенадцати книгах (главах) / под ред. С. В. Шухардина. 2-е изд. М.: Недра, 1986. 294 с.
2. Букринский В. А., Певзнер М. Е., Попов В. Н., Яковлев П. В. История маркшейдерии: учеб. пособие для вузов / под ред. М. Е. Певзнера. М.: Горная книга, 2007. 291 с.
3. Заводской устав Татищева // Горный журнал. 1831. Кн. 1. С. 1–22; Кн. 2. С. 174–197; Кн. 3. С. 332–349; Кн. 5. С. 163–179; Кн. 6. С. 331–344; Кн. 7. С. 1–14; Кн. 8. С. 145–157; Кн. 9. С. 315–328; Кн. 10. С. 1–16.
4. Ломоносов Михаил Васильевич. Полное собр. соч. Т. 5. Труды по минералогии, металлургии и горному делу. 1744–1763 гг. М.; Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1954. 757 с.
5. Маркшейдерская энциклопедия / гл. ред. Л. А. Пучков. М.: Мир горной книги, 2006. 605 с.
6. По страницам сочинения Герона Александрийского «О диоптре» // Квант. 2010. № 3. С. 23–25.

ГЛАВА 2

Маркшейдерское дело в XXI веке

2.1. Особенности работы маркшейдера

На первый взгляд работа маркшейдера достаточно проста – это выставление точек, ограничивающих контуры каких-либо будущих строящихся объектов, располагаемых на земной поверхности или под землей, и съёмка любых объектов, расположенных на земной поверхности или под землёй, с последующим изображением их на карте или плане. Для всего этого достаточно уметь измерять углы и расстояния. Но за этой простотой и кроется вся сложность данной профессии. Например, для решения простой задачи измерения расстояния между двумя точками на местности маркшейдер для себя сначала должен решить, какое расстояние необходимо измерить – наклонное вертикальное или горизонтальное, т. е. выбрать способ измерения. Далее маркшейдеру необходимо выбрать приборы для измерения соответствующего расстояния. Но различные приборы обладают разными погрешностями измерения, и тут маркшейдер задаётся ещё одним вопросом, а с какой точностью необходимо получить конечный результат измерения длины линии. Поэтому ему необходимо выбрать ещё и методику измерения расстояния. Необходимо отметить, что способ, методика измерения и необходимый прибор или комплекс приборов могут быть разными в зависимости от условий измерения и характеристик окружающей среды. Чтобы ответить на эти вроде простые вопросы, маркшейдер должен хорошо разбираться в смежных науках: географии, геологии, физике, оптике, математике и даже в метеорологии, – так как все измерения

выполняются в воздушной среде на разных высотах (атмосферном давлении) при разной температуре и освещённости. Только ответив на все ранее поставленные вопросы, можно переходить непосредственно к измерениям. Ведь расстояние можно измерять рулеткой, лентой, проволокой; оптическими, радио- и квантовыми дальномерами; сканерными системами; угловыми засечками; с помощью стереоскопической съёмки, выполненной с беспилотника, самолёта или спутника; и спутниковых навигационных приборов.

На маркшейдере лежит ещё и громадная ответственность за выполненную работу. Ведь если он неправильно вынесет границы будущего объекта или с ошибками выполнит съёмки, все дальнейшие работы на объекте будут выполнены неправильно. А если это ещё и так называемые «опасные объекты» – горные предприятия, гидросооружения, атомные электростанции и т. п., последствия таких неправильно выполненных работ могут быть катастрофическими.

Ошибка в работе маркшейдера может привести не только к потере материальных ресурсов, но и повлечь за собой и людские жертвы. Вот почему, например, добычу полезных ископаемых разрешают только тем предприятиям и организациям, где в штате есть высококвалифицированный маркшейдер, имеющий государственную лицензию на производство маркшейдерских работ.

Всё это требует от маркшейдера глубоких фундаментальных знаний в различных отраслях производств, а не только в области своей специальности. В силу специфики своей специальности маркшейдер фактически руководит работой всего производства. На горных предприятиях есть даже специальная книга «геолого-маркшейдерских предписаний», куда маркшейдер записывает свои замечания и указания, и все службы предприятия обязаны их выполнять. Почему же вроде как обычному маркшейдеру даются такие полномочия? Объясняется это тоже очень просто. Маркшейдер выполняет все измерения на горном предприятии и точно знает, где, в какой момент находится фронт работ и его состояние. Например, как далеко ведутся горные работы от каких-либо опасных объектов: карстовые полости, крупные тектонические разломы и т. п. Поэтому именно он обязан предупредить все службы об опасных проявлениях в окружающем пространстве, чтобы избе-

жать аварийных ситуаций. А это очень сложная и ответственная работа, требующая не только большого объема знаний, но особого характера и склада ума. Работа, требующая не только большого объема различных расчетов, но и умения анализировать возникающие ситуации, предвидеть и прогнозировать их появление.

Специфичность профессии маркшейдера заключается ещё и в том, что он должен владеть знаниями обо всех видах производств. Он должен

разбираться в технологиях:

- подземной разработки месторождений полезных ископаемых;

- всех видов открытой разработки;

- строительства промышленных и гражданских объектов;

- поиска и разведки месторождений полезных ископаемых;

уметь:

- определять и анализировать причины подвижки земной поверхности и объектов, расположенных на ней;

- работать с применением большого числа различных измерительных приборов: теодолитов, гиротеодолитов, нивелиров, тахеометров, сканеров, фотокамер и фототеодолитов, GPS-аппаратурой.

Большая часть этих приборов имеют электронную начинку, с встроенным специальным программным обеспечением. Кажется, а чего тут сложного? Сейчас почти все телефоны снабжены GPS-модулями. Но мало кто знает, что координата местоположения, даже профессиональными приборами, определяется с точностью всего лишь ± 5 м, а высота не точнее ± 13 м. Для бытовых нужд это вполне достаточно, маркшейдеру же измерения необходимо выполнять с точностью до сантиметров и даже миллиметров. А для этого надо помнить, что все измерения производятся в воздушном криволинейном пространстве, пронизанном магнитными и гравитационными полями, ведь Земля не плоскость и даже не шар. Это требует значительного уровня знаний поведения этих сред. Иными словами, маркшейдеру требуются глубокие знания в области физики, геофизики, оптики, фотографии, сферической геометрии, математики, статистики, информатики и ещё многих технических и фундаментальных наук.

Однако мало выполнить измерения, полученные результаты необходимо преобразовать в удобную для понимания форму,

а для этого надо все измерения, выполненные в пространстве, привести к плоскости проекции и изобразить на бумаге – построить план или карту. Сегодня вся эта работа выполняется с применением персональных компьютеров и требует умения работать с большим количеством программного обеспечения.

На самом деле маркшейдер – это тот же геодезист, но обладающий значительными знаниями технологий в смежных отраслях различных производств: горном деле, геологии, строительстве и т. п.

В чем ещё особенность данной специальности? Дело в том, что, хотя существуют различные инструкции и ГОСТ, определяющие правила проведения различных измерений, все измерения маркшейдером производятся каждый раз на другом участке земли или при других условиях, ведь природная среда не постоянна. Поэтому, прежде чем выполнять измерения, маркшейдер должен выполнить предрасчёт своих будущих измерений, чтобы правильно выбрать приборы и методы измерения. Иначе работа может быть выполнена не на должном уровне и не с той степенью точности. Фактически маркшейдер перед каждым видом работ должен составить проект выполнения этих работ с оценкой их точности.

2.2. О лицензировании маркшейдерской деятельности

Работа маркшейдера регламентируется не только инструкциями РД 07-603-03 «Инструкция по производству маркшейдерских работ», РД 07-408-01 «Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр» и т. п. [3; 9; 21–23], но и постановлениями Правительства РФ, например: «О лицензировании производства маркшейдерских работ», постановление Правительства РФ от 28.03.2012 г. № 257, «О единых государственных системах координат», постановление Правительства РФ от 28 декабря 2012 № 1463 [17].

Чем вызвано такое отношение к данной профессии? Маркшейдер, работая на предприятии и подчиняясь непосредственно главному инженеру, несёт и государственную ответственность. Дело в том, что все работы, выполняемые на горном предпри-

ятии, направляются и фиксируются непосредственно маркшейдером. Он выполняет разбивочные работы – т. е. указывает направление и объёмы выполнения большинства работ, которые должны полностью соответствовать проекту производства горных работ на данном предприятии. В процессе их выполнения маркшейдер обязан проверять правильность выполнения данных работ, фиксировать все отклонения от проекта производства работ, браковать их и даже имеет право остановить работы при возникновении опасной (чрезвычайной) ситуации. На каждом горном предприятии имеется книга геолого-маркшейдерских замечаний, в которой маркшейдер обязан фиксировать все отмеченные недостатки в производстве работ, а мастера и начальники участков обязаны их исправить. Маркшейдер обязан постоянно следить за состоянием ведения горных работ. Он должен заранее предупредить всё руководство предприятия о начале работ на особо опасных участках, которые сам же должен найти и указать. А так как все измерения на горном предприятии выполняет непосредственно маркшейдер, то и отчётность перед различными государственными органами приходится заполнять ему. Фактически маркшейдер руководит горным производством наравне с главным инженером и директором горного предприятия.

Всё это накладывает на маркшейдера особый статус. А именно – работа по добыче полезных ископаемых разрешается только тем предприятиям, которые в своём штате имеют высококвалифицированного маркшейдера, имеющего высшее образование, стаж работы не менее 2 лет и лицензию на ведение маркшейдерских работ, выданную Госгортехнадзором (с мая 2004 г. носит название Ростехнадзор) [18].

Всё это объясняется очень просто. Ошибки, допущенные маркшейдером в его работе, могут привести не только к материальным и финансовым потерям, но и к людским жертвам, если произойдёт авария, связанная с неправильным ведением горных работ.

Маркшейдер имеет право вести и предпринимательскую деятельность в области своей профессии. При наличии стажа работы на горном предприятии не менее 5 лет он может получить персональную лицензию на ведение маркшейдерских работ и выполнять их по отдельным договорам с различными предприятиями.

Поэтому маркшейдеры должны владеть большим объёмом знаний, обладать твёрдым требовательным характером, умением управлять большим коллективом людей, независимо от их ранга и статуса.

Вопросы для самоконтроля

1. Какими нормативными документами регламентируется работа маркшейдера в РФ?
2. В чём специфика работы маркшейдера на горном предприятии?
3. Почему работа маркшейдера считается лицензируемой?
4. В каком случае лицензия на ведение маркшейдерских работ выдаётся предприятию, а в каком лично маркшейдеру?
5. Имеет ли право горное предприятие вести горные работы, если у него нет лицензии на ведение маркшейдерских работ?
6. Какими качествами должен обладать горный инженер – маркшейдер?

Рекомендуемая литература

1. О внесении изменений в «Инструкцию по топографической съёмке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000» и 1:500»: письмо Главного управления геодезии и картографии от 11.11.87 № 1-1075. М.: ГУГК СССР, 1987. 8 с.
2. О единых государственных системах координат / Постановление правительства РФ от 28.12.2012. № 1463.
3. О лицензировании производства маркшейдерских работ: Постановление Правительства РФ от 28.03.2012. № 257.
4. РД 07-408-01. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр. М.: Госгортехнадзор России, 2001. 7 с.
5. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ. М.: Госгортехнадзор России, 2004. 60 с.
6. РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учёту объёмов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом. М.: Госгортехнадзор России, 2003. 13 с.

ГЛАВА 3

Возрождение фотограмметрии в горном деле

На границе XX и XXI вв. работы на горных предприятиях, выполняемые с помощью фотограмметрического оборудования, начали приходить в упадок. Это было вызвано тем, что специализированное оборудование имело значительную стоимость и требовало значительное увеличение штата высококвалифицированных работников. Такое оборудование могли позволить себе только крупные предприятия. Кроме того, к этому времени стали появляться лазерные сканирующие системы, от которых все ожидали значительного ускорения съёмочных работ.

3.1. Немного истории

Фотограмметрия возникла из практических потребностей человечества. В 1852 г. французский топограф, инженер-майор Aime Laussedat (Эме Лосседа) впервые выполнил фотосъёмку местности с целью получения топографической карты местности. А в 1858–1859 гг. им была предложена конструкция фототеодолита. Хотя сами методы определения размеров различных объектов были разработаны ещё до появления фотографии в XV–XVI вв. Некоторые упоминания о геометрических преобразованиях перспективного изображения имеются в работах Leonardo da Vinci (Леонардо да Винчи, 1500 г.) и немецкого астронома и математика J. Kepler (И. Кеплер, 1611 г.).

Бурное развитие фотограмметрии началось в начале 1920-х гг., когда в Германии был создан автокартограф, первый механический стереофотограмметрический прибор, использующий особенности стереоскопического зрения (см. рис. 3.1).

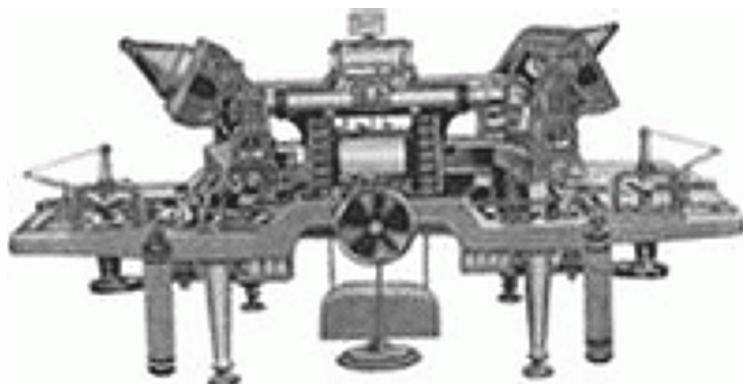


Рис. 3.1. Один из первых автокартографов

В СССР для аэрофотосъёмки широко использовались фотокамеры *Carl Zeiss RMK 15/23*, разработанные всемирно известной немецкой фирмой *Carl Zeiss Jena* (ГДР) с форматом кадра 230×230 мм и фокусным расстоянием объектива 153 мм (см. рис. 3.2).

Последние 10 лет 20-го столетия начали развиваться цифровые технологии, и в области фотограмметрии наметился временный застой, который выражался в основном в переводе накопленной архивной плёночной (аналоговой) информации в цифровые форматы. Перевод осуществлялся на специальных фотограмметрических сканерах с разрешением 15 мкм, соответствующим точности стереокомпараторов для обработки аэрофотоснимков (см. рис. 3.3). В результате сканирования получали цифровое изображение размером 15000×15000 пикселей, т. е. 225 мегапикселей. Постараемся запомнить эти цифры, ибо именно они определяют необходимую точность исходных материалов для выполнения качественной аэрофотосъёмки и получения по ним ортофотоплана.



Рис. 3.2. Аэрофотокамера Carl Zeiss RMK 15/23,
установленная в самолёте



Рис. 3.3. Фотограмметрический сканер

В 1960 г. начали появляться первые 3D сканеры, а в 1998 г. был создан первый наземный лазерный сканер (НЛС) *Cyra-2400* (см. рис. 3.4). Сканер имел внушительные размеры и весил около 40 кг. На рис. 3.5 показана работа с этим сканером.



Рис. 3.4. Первый наземный лазерный сканер *Cyra-2400*, 1998 г.

Предполагалось, что сканирование поверхности полностью заменит фотографирование, однако практика показала, что увеличение дальности и плотности снимаемых точек увеличивает не только объём информации, но одновременно и объём так называемой постобработки – камеральных работ. Сканер для решения некоторых задач даёт большое количество излишней информации, и маркшейдеру и геодезисту приходится её удалять и часто в ручном режиме. В разговорной терминологии иногда говорят «косить траву». Вызывает нарекание и стандартная сетка сканирования, так как снимаются как бы произвольные точки, а не те, которые нужно.



Рис. 3.5. Работа с наземным лазерным сканером *Cyra-2400*

Мы не склонны отвергать современные методы сканирования, так как любой из методов съёмки часто подходит для решения строго определённых задач, но замечания, приведенные выше, повлекли к новому витку развития фотограмметрических методов с применением уже цифровых технологий.

3.2. Аналог или цифра?

Позволим себе заметить, что отличий между цифровой и аналоговой фотографией, как ни странно, с точки зрения фотограмметрии, очень мало. Это связано с тем, что в аналоговой и цифровой фотографии основу составляют так называемые светочувствительные ячейки. В аналоговой фотографии ячейки это частицы галогенидов серебра, а в цифровой – светочувствительные пиксели. При экспонировании свет, попадая на такую ячейку, делает её засветку – окисляет серебро (происходит фото-

химический распад галогенидов серебра, проходящий в микрокристаллах фотографической эмульсии) и оно становится темнее. В цифровой фотографии пиксель вырабатывает электрический импульс, соизмеримый с количеством попавшего света. И в том и в другом случае размер ячейки определяет чёткость контуров изображения, но не гарантирует его качество. Слишком мелкие ячейки (низко чувствительные фотоплёнки и матрицы с большим количеством пикселей – мегапикселей) плохо снимают затемнённые участки объекта и требуют длительных выдержек при съёмке. Это обусловлено тем, что на маленькую ячейку попадает мало света и в эмульсии плёнки плохо идут фотохимические процессы, а пиксель матрицы вырабатывает слабый электрический импульс, и его трудно отличить от шумовых процессов, которые всегда присутствуют в электрических цепях.

Напомним ещё, что цвет при цифровой и аналоговой обработке образуется обычно смешением 3 цветов – синего-*B*, красного-*R* и зелёного-*G*, поэтому при цветной съёмке размер пикселя не равен размеру ячейки, а качество снимка на аналоговой фотоплёнке всегда будет ниже, чем на чёрно-белой, так как цветная фотоплёнка состоит из 3 слоёв фотоэмульсии. Ячейка цифровой матрицы как минимум состоит из 4 пикселей: синего, красного и 2 зелёных. Существуют и другие структуры матриц. Сама матрица монохромна, а цвета получают, пропуская свет через цветные светофильтры (см. рис. 3.6).

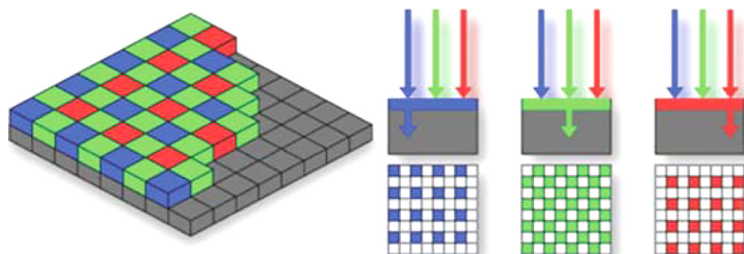


Рис. 3.6. Структура цветной ПЗС-матрицы

Цветное изображение получают для целой ячейки путём интерполяции электрических сигналов по методу Байера. Это связано с тем, что и человеческий глаз, и фотоэлементы матри-

цы по-разному реагируют на разные цветовые спектры. Поэтому разрешение цветного изображения падает, как правило, в 2 раза. Чтобы избежать укрупнения ячейки в профессиональных камерах для аэрофотосъемки, часто используют отдельные три и более матрицы (см. рис. 3.7–3.8).

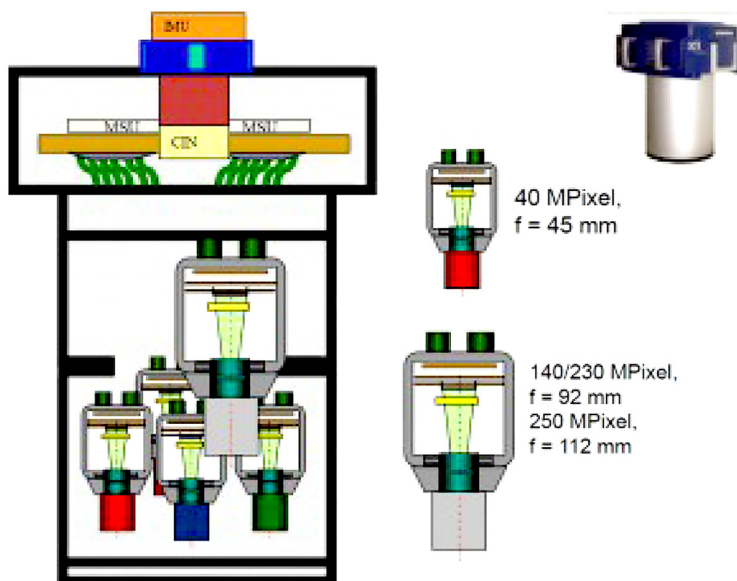


Рис. 3.7. Внутренняя структура аэрофотокамеры DMC II

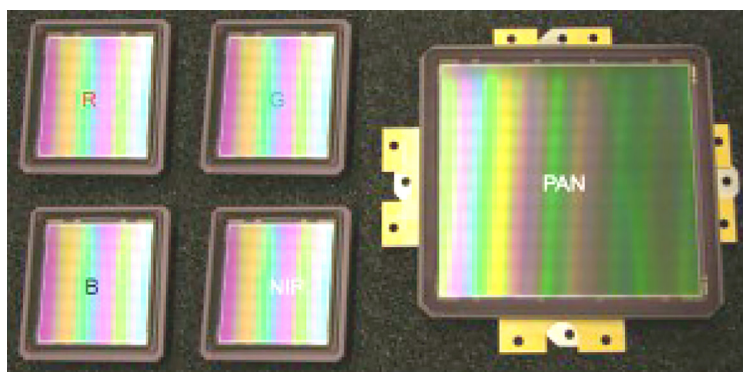
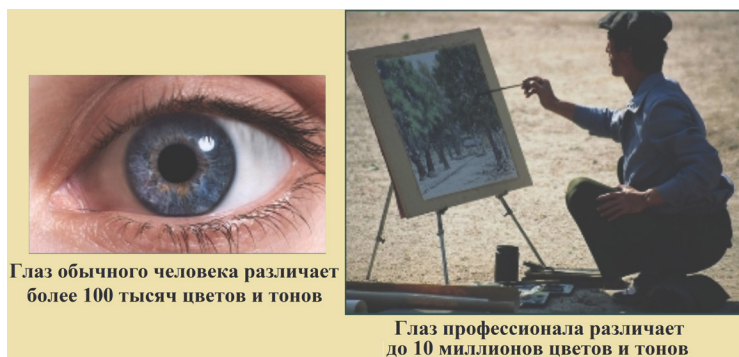


Рис. 3.8. Сенсоры, устанавливаемые в аэрофотокамеру DMC II

Количество матриц может быть и больше, как отмечалось ранее, для получения качественного фотоснимка с необходимой точностью изображения контуров земной поверхности требуется цифровая матрица с разрешением не менее 225 мегапикселей.

Хорошо известно и высказывание среди фотографов, что снимки на фотоплёнке выглядят более живыми. Это истинная правда. Фотохимические процессы более чувствительны к количеству поступившего на ячейку света, так как они проходят на молекулярном и ионном уровнях. В цифровой же фотографии за градацию полутонов отвечает специальный 14-битный А/Д-конвертер, обеспечивающий всего 16384 градации чёрно-белого. Увеличению битности конвертера пока мешают шумовые процессы электрических цепей. Напомним, что человеческий глаз может различать около 150 основных цветов, а глаз профессионала до 10–15 тыс. цветов, до 100 оттенков по цветовому фону и до 500 оттенков серого. По яркости глаз тоже может различать до 150 градаций (см. рис. 3.9).



Глаз обычного человека различает более 100 тысяч цветов и тонов

Глаз профессионала различает до 10 миллионов цветов и тонов

Рис. 3.9. Глаз человека и профессионального художника

При определённых условиях глаз человека отличает действительно несколько миллионов цветовых валентностей (цветов и оттенков). Например, великие художники Рафаэль и Леонардо да Винчи в своих картинах использовали до 3–4 млн цветовых тонов (см. рис. 3.10).



Рис. 3.10. Художники Рафаэль и Леонардо да Винчи

Поэтому 16384 градаций яркости, которые передают цифровые матрицы, это ничтожно мало по сравнению с возможностью человеческого глаза. Но этого хватает, чтобы уверенно воспринимать цветовую информацию об исследуемом объекте. Так как человеческий глаз не сразу может воспринимать эти несколько миллионов цветовых комбинаций, он подстраивается к условиям освещения окружающей среды. Этим и объясняется, что фотография, сделанная старым плёночным фотоаппаратом, более приятна для рассмотрения (она передаёт больше градаций яркости и оттенков), а современная цифровая выглядит красивой картинкой. Но не надо думать, что на цифровой фотоаппарат нельзя сделать качественное фото. Всё зависит от профессионализма и знаний о принципах и возможностях различных методов фиксации объекта.

Сложнее дело обстоит ещё с воспроизведением фотографий на жидкокристаллических мониторах, на которых мы привыкли рассматривать фотографии и, в конечном итоге, выполнять фотограмметрические работы. Хотя производители и указывают на своих изделиях цветопередачу в 16,2 млн или 16,7 млн количества цветов, на самом деле рядовые мониторы воспроизводят только 262 тысячи цветов, а остальные получают специальными

искусственными приёмами. На рис. 3.11 показан треугольник воспроизведения цветов жидко-кристаллическим монитором (ж/к-монитор) по сравнению с цветами, которые может воспринимать человеческий глаз.



Рис. 3.11. Треугольник воспроизведения цветов ж/к-монитором

Это вызвано тем, что и ж/к-мониторы, и матрицы фотоаппаратов используют для получения различных цветов всего 3 цвета – красный, зелёный и синий, так называемый режим цветопередачи *RGB* – 24 бита. Только профессиональное оборудование и программное обеспечение позволяет работать с полным объёмом цветовой информации. К сожалению, такое оборудование и программы стоят совсем других денег. Всё это указывает на необходимость более серьёзного подхода к проблеме использования фотограмметрических методов в маркшейдерском деле и использованием современных технологий.

Выходит, методы прошлого XX в., когда маркшейдер или геодезист рассматривал чёрно-белые фотографии на стереокомпараторе, не ушли в прошлое? Давайте разберёмся по порядку.

3.3. Где выход?

Сейчас на полях интернета полно объявлений, что какая-либо фирма быстро и качественно выполнит аэрогеодезические съёмки с беспилотного аппарата с получением топографического плана. Да действительно, за 100–150 тыс. р. можно купить неплохой вертолёт с установленной на него приличной видеокамерой и выполнять аэрофотосъёмку. Но гарантию выполнения качества такой работы никто не даст.

Начнём с фотокамеры. Если внимательно посмотреть на её характеристики, то станет понятно, что на широко распространённых в продаже вертолётах установлены бытовые фотокамеры, продаваемые в каждом магазине и снабжённые для удобства значительным оптическим зумом (трансфокатором). Но вспомним основные понятия из школьной оптики (см. рис. 3.12).

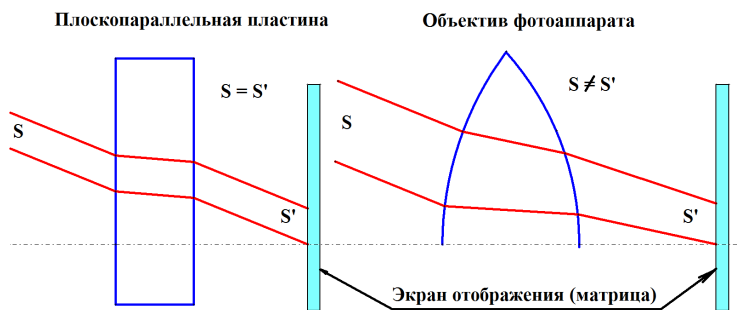


Рис. 3.12. Прохождение лучей света через плоскопараллельную пластину и объектив фотоаппарата

Так как плоскости у линзы фотоаппарата не параллельны, на экране отображения происходит искажение расстояний, измеряемых от оптической оси объектива. Иными словами, на фотографии мы видим только подобие реального объекта. Величина искажений переменная и увеличивается по направлению от оптической оси объектива к периферии. В объективах современных фотоаппаратов, снабжённых оптическими зумами, таких линз может быть до десятка и более (см. рис. 3.13–3.14).

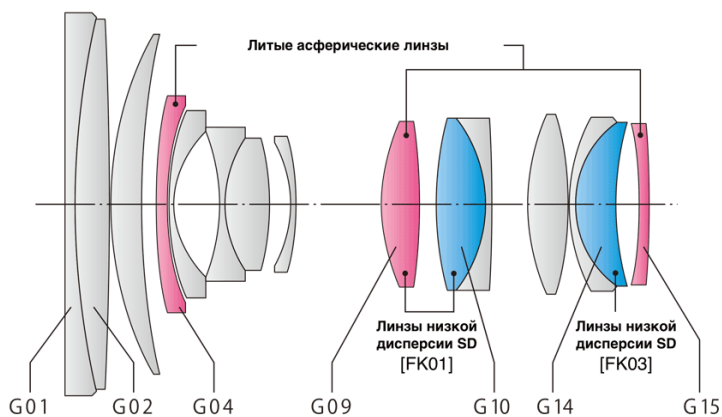


Рис. 3.13. Схема расположения линз современного фотоаппарата

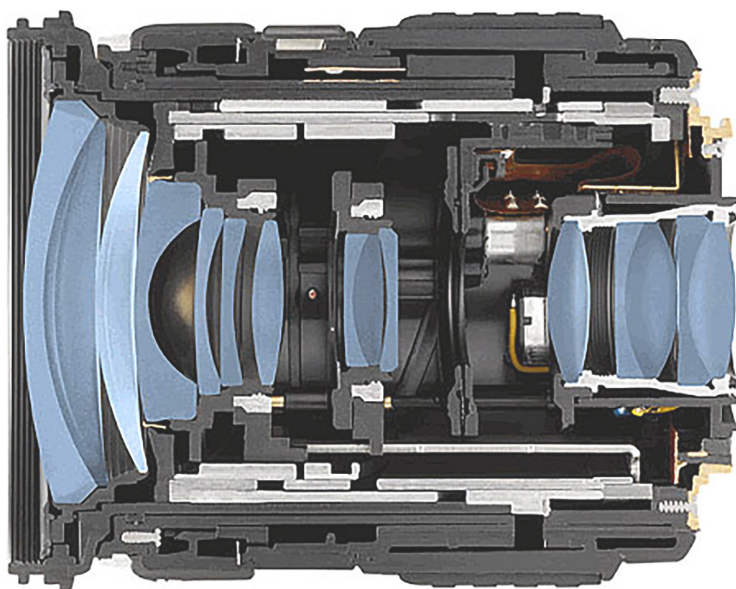


Рис. 3.14. Объектив современного фотоаппарата

Вот почему для серьезной съёмки не стоит применять фотоаппараты бытового уровня. И не зря в профессиональной фотограмметрии для обработки используется только центральная часть снимка, где-то 1/3 его площади.

Для фотограмметрической съёмки должны использоваться профессиональные фотоаппараты типа зеркальных со сменными объективами, имеющими постоянное фокусное расстояние и минимальное количество оптических линз. Стоимость такого оборудования, как правило, начинается от 200 тыс. р. за фотоаппарат и столько же за один объектив. Мы специально использовали сочетание слов «типа зеркальных», так как сегодня, к большому сожалению, эта грань начинает стираться и современные зеркальные фотоаппараты могут нести начинку бытового уровня. На рис. 3.15 представлена классическая схема зеркального фотоаппарата.

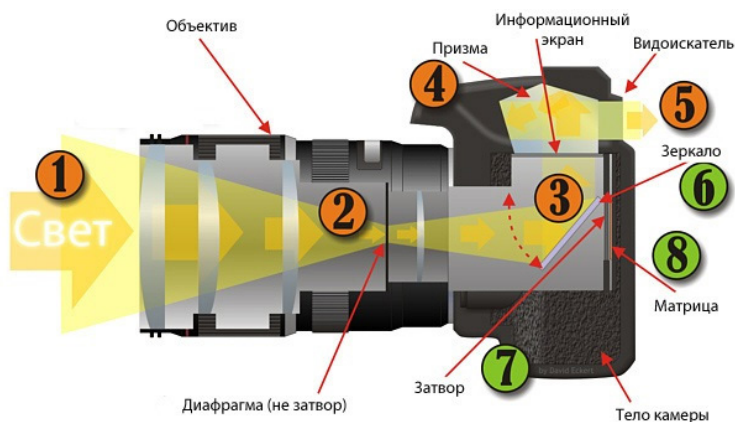


Рис. 3.15. Схема фотоаппарата зеркального типа

Как видно из схемы, объектив имеет постоянное фокусное расстояние с малым количеством линз, приводящих к минимальным искажениям изображения. Фокусировка на объект производится по реальному изображению, проецируемому непосредственно в видоискатель при помощи поворотного зеркала. В бытовых камерах такое зеркало отсутствует и настройку осуществляют по изображению, выводимому на жидкокристалличес-

ский дисплей, получаемому непосредственно от электрического сигнала матрицы. Кроме того, и это очень важно, классические зеркальные фотоаппараты имеют внутри полноформатную размером 35 мм, а не урезанную матрицу, что так же сказывается на качестве передачи полутонов на изображении.

Ещё серьёзным препятствием использования в фотограмметрии современных, может быть и хороших, фотоаппаратов бытового уровня служит то, что все современные фотоаппараты имеют встроенный препроцессор, который выполняет коррекцию всех полученных искажений светового потока, проходящего через сложную систему линз объектива. Да, на выходе мы получаем красивую, иногда даже очень красивую, но картинку. Всё дело в том, что, не зная алгоритмов таких исправлений, мы не можем гарантировать собственно качество получаемого изображения. Приведём для примера характеристики одной из таких рекламируемых камер для аэрофотосъёмки с использованием дрона.

Фотокамера *GoPro HERO5 Black* (см. рис. 3.16). Вот что написано в её характеристиках:

- Камера позволяет получать материалы аэрофотосъёмки значительно легче с меньшими затратами, по сравнению с габаритными камерами.
- Возможность непрерывной съёмки.
- Разрешение снимков 12 мегапикселей, наибольшее разрешение видео *UHD 4K*.
- Частота кадров достигает 240 кадр. /с.
- Маркеры *Hi-Light*.
- Шумоподаватель.
- Форматы снимков *RAW* и *WDR*.
- Стереозвук.
- Геолокация *GPS*.
- Имеется возможность менять углы съёмки в диапазоне от узких до сверх широких.
- Устройство оснащено режимом «прямые линии», производящим коррекцию искажения от линз – «рыбий глаз».
- Минимальная стоимость камеры 32 тыс. р.



Рис. 3.16. Фотокамера GoPro HERO5 Black,
установленная на геликоптере

Две предпоследние характеристики говорят о наличии зума с большим количеством, в том числе подвижных линз, и программной обработки искажений вносимой линзами объектива типа «рыбий глаз».

Для сравнения напомним основные требования, предъявляемые к фотокамерам, используемым при наземных и воздушных съёмках:

- Параметры фотографической системы должны быть защищены от изменяющихся условий полёта, в частности температуры воздуха и давления, что может приводить к искажениям фотоизображения.
- Освещённость и контраст объектов фотографирования при съёмке с воздуха могут изменяться в довольно широком диапазоне, что предъявляет повышенные требования к характеристикам оптической системы камеры.
- Особенностью съёмки с воздуха является постоянство фокусировки и независимость её от высоты фотографирования; иными словами, оптическая система аэрофотоаппарата должна быть всегда настроена на бесконечность.
- Фотокамеры для аэрофотосъёмки должны обеспечивать резкость и высокое качество изображения, возможность получения снимков через короткие промежутки времени.

- Особенности требования предъявляются к оптической системе фотоаппарата, в которой все aberrации должны быть сведены к минимуму.

Из сказанного видно, что предлагаемая фотокамера *GoPro HERO5 Black* не удовлетворяет ни одному требованию фотокамер, предназначенных для аэрофотосъёмки или наземной съёмки. В качестве примера приведём некоторые модели профессиональных цифровых фотокамер для аэрофотосъёмки (см. табл. 3.1, рис. 3.17–3.18).



Рис. 3.17. Фотокамера *Leica ADS100, Leica Geosystems*

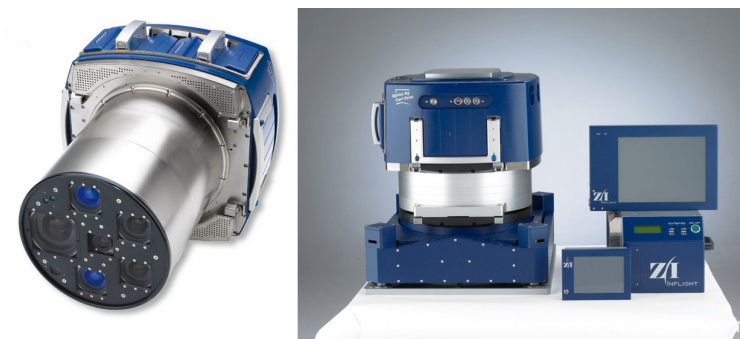


Рис. 3.18. Фотокамера DMC lie 250, Hexagon AB (Швеция)

Таблица 3.1

Технические характеристики цифровых систем и фотокамер

Фирма-производитель	<i>Hexagon AB (Швеция)</i>		<i>UltraCam/ Microsoft</i>	<i>IGI mbH (Германия)</i>
Название модели	<i>DMC lie 250</i>	<i>ADS 100</i>	<i>UltraCam Eagle</i>	<i>Quattro DigiCAM</i>
Тип камеры	Кадровая камера	Сканерный авиационный сенсор	Кадровая камера со сменной системой объективов	Кадровая модульная камера
Число объективов	5	1	8 (4 <i>PAN</i> + 3 <i>RGB</i> + 1 <i>NIR</i>)	4
Фокусное расстояние (для результирующего кадра), мм	112 (<i>PAN</i>); 45 (<i>MS</i>)	62.5	Система объективов 1: 80 (<i>PAN</i>). 27 (<i>MS</i>) Система объективов 2: 210 (<i>PAN</i>). 70 (<i>MS</i>)	80, 100, 150, 210, 300
Размер пиксела, мкм	5.6 (<i>PAN</i>); 7.2 (<i>MS</i>)	5	5.2 (<i>PAN</i>)	6

Углы поля зрения вдоль/поперёк маршрута	38,6° / 45,5° (PAN); 54,2° / 52° (MS)	- / 65,2°-77,3° в зависимости от направления линеек вперед, назад или в надир	46°/66° (Система объективов 1) 20°/28° (Система объективов 2)	Для одного модуля: 27°/36° (80 мм); 23°/30° (100 мм); 15°/20° (150 мм); 11°/15° (210 мм); 8°/10° (300 мм)
Число пикселей результирующего кадра вдоль/поперёк маршрута	14656 × 17216 (PAN); 6846 × 6096 (MS)	Определяется длиной маршрута /20000	13080×20010 (PAN); 4360×6670 (MS)	12750 × 18500
Наименьшее значение пиксела на местности (GSD), см	PAN: 2.5 (500 м) MS: 8 (500 м)	3 (при скорости 220 км/ч) 10 (при скорости 650 км/ч)	Система объективов 1: 3.25/6.25 (500 м/1000 м) Система объективов 2: 2.5 (1000 м)	—
Спектральные диапазоны	PAN, RGB, NIR	RGB, NIR	PAN, RGB, NIR	RGB
Формат изображения	8, 12, 14 или 16 бит TIFF, возможность дополнительного JPEG сжатия	TIFF	JPEG, TIFF (8 или 16 бит)	TIFF, JPEG, DNG (8 или 16 бит)
Ёмкость бортовой памяти. Тб	2.6	2.4	3.3	2
Вес. кг	68, включая накопитель	100–120 (общий вес системы)	75–80 (включая компьютер и накопитель)	37,7 (включая компьютер и накопитель)

Обратим внимание на формат записи изображения фотокамерами в табл. 3.1. Профессиональные камеры ведут запись в 16- и даже в 8-битном режиме. Ранее мы указывали, что и часто применяемый режим 24 бит *RGB* не позволяет правильно передать полутона цветов на фотографии. Почему так происходит? Вспомним старые аналоговые (плёночные) фотокамеры. Ведь аэрофотосъёмку вели не на цветную плёнку, а на чёрно-белую. Всё объясняется очень просто.

Для построения топографического плана, сейчас его принято называть ортофотоплан земной поверхности, не требуется цветное изображение, для этой цели можно использовать чёрно-белое. Главное, чтобы фотография имела большое количество градаций тонов. Тогда можно более детально и точно нарисовать контуры различных объектов и интерполировать горизонтالي рельефа. Это хорошо показано на рис. 3.17 и 3.18. Основным является монохромный сенсор 250 мегапикселей с фокусным расстоянием 112 мм. Так как многие камеры имеют несколько различных сенсоров, при обработке изображения часто используют спектрональные снимки (*RGB* – цветной; *NIR* – инфракрасный), позволяющие более качественно передавать цветовые полутона и выполнять дешифрирование (см. рис. 3.19). В результате такой съёмки получают высококачественные цифровые 3D модели рельефа (см. рис. 3.20).

Сказанное выше указывает на то, что для выполнения качественной аэрофотосъёмки необходимо применять только специальные спектрональные цифровые профессиональные фотокамеры. Всё это полностью относится и к выполнению наземной фотограмметрической фотосъёмки. Кроме этого, для получения профессиональных топографических планов необходимо не только профессиональное, но и сертифицированное в государственном геодезическом надзоре оборудование и программное обеспечение. Требования ко всем этим элементам представлены в ГКИНП (ГНТА)-02-036-02 «Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов» [5].



Рис. 3.19. Пример *RGB*- и *NIR*-изображений при спектрональной съёмке

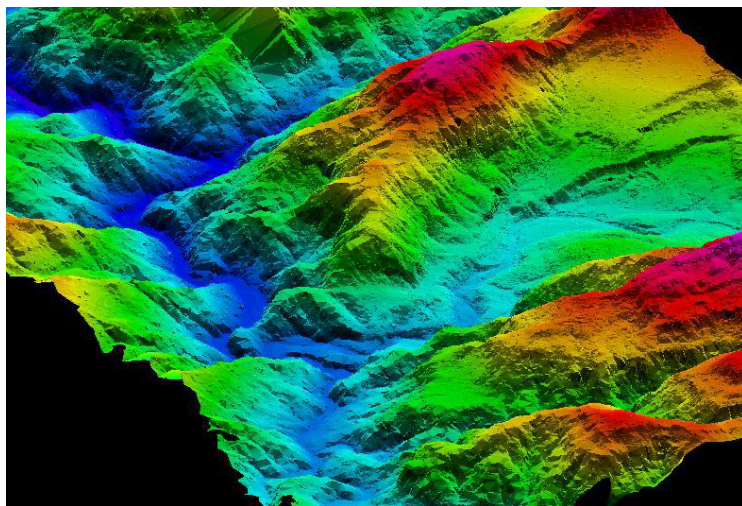


Рис. 3.20. Цифровая модель рельефа, полученная по данным спектрональной аэрофотосъёмки

Чтобы сказанное выше стало понятнее, приведём несколько простых расчётов (см. рис. 3.21).

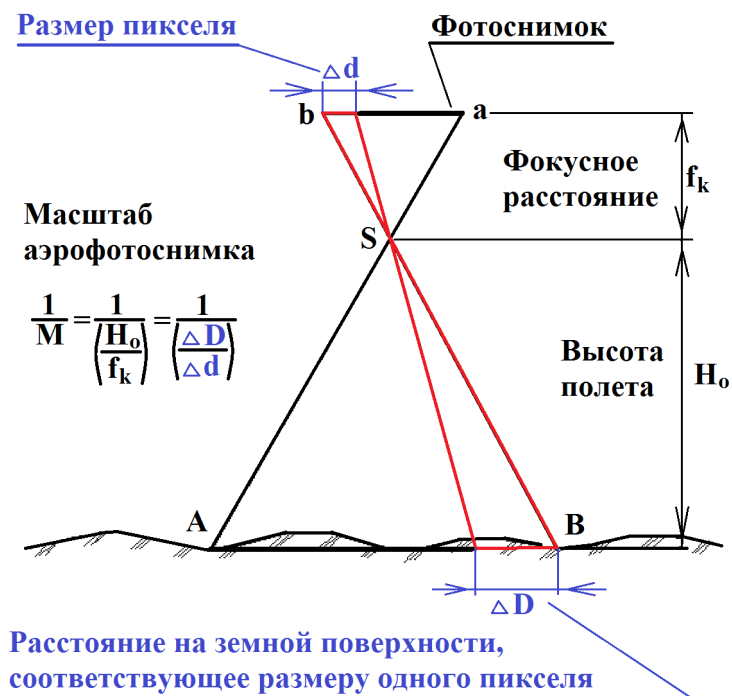


Рис. 3.21. Масштаб фотоснимка
и точность изображения контуров земной поверхности

Согласно геометрическим соотношениям в треугольниках (см. рис. 3.21) приведём формулу необходимого размера пикселя от размера погрешности изображения контуров земной поверхности.

Предположим, что в результате аэрофотосъёмки или наземной фотограмметрической съёмки необходимо получить план местности масштаба 1:2000, наиболее часто применяемого в маркшейдерской практике. Согласно требованиям по точности карт и планов, точность построения топографических и горных планов не должна быть меньше 0,1 мм в масштабе плана,

что соответствует предельной погрешности измерений на местности ± 20 см. Зная, что предельная погрешность равна утроенной среднеквадратической погрешности, получим необходимую среднеквадратическую погрешность измерения на местности $\Delta D < \pm 0,07$ м, при масштабе съёмки 1:2000. Поэтому (3.1)

$$\Delta d = (f_k / H_o) \cdot \Delta D, \quad (3.1)$$

где Δd – размер пикселя, м;

f_k – фокусное расстояние объектива, м;

H_o – высота полета самолёта или расстояние от фотокамеры до снимаемого объекта, м;

ΔD – максимальная погрешность съёмки участка местности, м.

Приняв, наиболее стандартные условия съёмки:

- Погрешность топографического плана 0,2 м, при среднеквадратической $\Delta D = 0,07$ м.

- Высота полёта (расстояние фотографирования 1000–3000 м)
 $H_o = 2000$ м.

- Фокусное расстояние объектива фотокамеры $f_k = 100$ мм.

Мы получим $\Delta d = 0,0000035$ м или 35 мкм. Какой фотоаппарат нам подойдёт для такой съёмки? Если взять профессиональную зеркальную камеру с полноформатной матрицей 36×24 мм, эквивалентной 35 мм плёнки, то матрица по высоте должна иметь $24 \text{ мм} / 0,0035 \text{ мм} = 6857$ пикселя по высоте и $36 \text{ мм} / 0,0035 \text{ мм} = 10286$ пикселей по длине кадра, что соответствует матрице с 7 мегапикселями в чёрно-белом световом спектре. Если фотографии необходимо получать в цвете, то понадобится матрица как минимум на 282 мегапикселя, так как количество пикселей по одной стороне необходимо удвоить. Такие матрицы если и изготавливаются, то только для профессиональных цифровых фотограмметрических фотокамер.

Попробуем подойти к этому же вопросу с другой стороны. Так как профессиональные цифровые фотограмметрические фотокамеры изготавливаются по принципу эквивалента аналоговых фотокамер, воспользуемся их характеристиками (см. табл. 3.2) [8; 28].

Таблица 3.2

**Технические характеристики топографических аналоговых
аэрофотоаппаратов (АФА)**

<i>Тип АФА</i>	<i>Фокусное расстояние, мм</i>	<i>Разрешающая способность, м⁻¹</i>	<i>Диапазон выдержек, с</i>
ТЭС-5	50	15	1/70–1/850
ТЭС-5М	72	25	1/70–1/850
ТЭС-70С	70	15	1/50–1/440
ТЭС-ЮМ	100	33	1/70–1/700
ТЭ-140М	140	20	1/30–1/240
Т АФА-10	100	18	1/70–1/1000
ТЭ-200М	200	20	1/40–1/240
ТЭ-35	350	35	1/70–1/700
ТАФА-20	200	35	1/70–1/1000

Важной характеристикой здесь является разрешающая способность аэрофотоснимка, которая характеризуется числом раздельно воспроизводимых чёрных линий в 1 мм при таком же белом интервале между ними. Например, если АФА имеет разрешающую способность 25 мм⁻¹, это означает, что в 1 мм изображения может быть различимо 25 чёрных линий и 25 белых (50 лн. / 1 мм), размер каждой из которых составит 20 мкм. Согласно табл. 3.2, аналоговые АФА имеют разрешения от 30 лн./1 мм до 70 лн./1 мм при размере одной линии от 30 до 14 мкм. Теперь становится понятно, почему фотограмметрические сканеры для оцифровки аналоговых аэрофотоснимков имеют разрешение не ниже 15 мкм.

При размерах полноформатной матрицы 36×24 мм мы получаем: 24 мм / 0,0015 мм = 1600 пикселя по высоте и 36 мм / 0,015 мм = 2400 пикселей по длине кадра в оттенках серого и 3200×4800 пикселей в цвете, или цветную матрицу на 16 мегапикселей. Такие фотоаппараты сегодня вполне можно найти на рынке фототоваров профессионального уровня. Они имеют полноформатные цветные матрицы, разрешением начиная с 16,2 мегапикселя и более, чаще 20,2–24,3 мегапикселя. И сменные объективы с фокусным расстоянием от 14 до 1200 мм.

Теперь оценим возможности таких фотоаппаратов для использования в фотограмметрии. Воспользуемся формулой на рис. 3.21, переписанной в виде (3.2):

$$f_k = (H_o / \Delta D) \cdot d, \quad (3.2)$$

где f_k – фокусное расстояние объектива, м;

H_o – высота полёта самолёта или расстояние от фотокамеры до снимаемого объекта, м;

Δd – размер пикселя, м;

ΔD – максимальная погрешность съёмки участка местности, м.

Приведём примерный расчёт для одного из таких фотоаппаратов. Зеркальный фотоаппарат премиум *Canon EOS-1D X Mark II* (см. рис. 3.22):

- Полнокадровая матрица 35,9×23,9 мм.
- Разрешение матрицы 20,2 мегапикселя.
- Разрешение снимка 5472×3648 пикселя.
- Сменные объективы с фокусным расстоянием 14÷1200 мм.
- Размер цветовой ячейки на матрице Δd , принят не более 15 мкм.



Рис. 3.22. Фотоаппарат *Canon EOS-1D X Mark II* с полноформатной матрицей и сменными объективами

В табл. 3.3 приведён расчёт выбора фокусного расстояния объектива в зависимости от заданной высоты полёта (максимального расстояния до объекта съёмки) и требуемого масштаба ортоплана, гарантирующего точность его построения.

Необходимо отметить, что выполнение качественной съёмки требует внимательного подхода к выбору оборудования и параметров воздушной или наземной съёмки.

Таблица 3.3

**Минимальные фокусные расстояния объектива
от высоты полета (расстояния) и необходимого масштаба съёмки**

<i>Масштаб карты/ Максимальная высота полёта, м</i>	<i>1:500</i>	<i>1:1000</i>	<i>1:2000</i>	<i>1:5000</i>
50	45	22	11*	5*
100	90	45	22	9*
200	180	90	44	18
300	270	135	68	27
400	360	180	88	36
500	450	225	112	45
750	675	338	169	68
1000	900	450	220	90
1500	1350*	675	338	135
2000	1800*	900	450	180
3000	2700*	1350*	675	270

* жирным выделены области с фокусными расстояниями объективов не выпускаемых промышленностью.

Для общего понимания конструкции современных фотоаппаратов приведем ещё одно сравнение по размеру диагонали матрицы (см. табл. 3.4).

Таблица 3.4

Размеры матриц различных фотоаппаратов

<i>Формат матрицы или дюймы диагонали</i>	<i>Физический размер, мм</i>	<i>Пример устройства</i>
<i>FF (FullFrame), полный кадр</i>	36×24	Дорогие профессиональные фотокамеры. <i>Canon, Nikon, Sony, Leica</i>
<i>APS-C</i>	23,5×15,6	Зеркалки широкого ценового диапазона <i>Nikon, Canon, Sony</i>
<i>APS-C</i>	22,3×14,9	Зеркалки широкого ценового диапазона <i>Canon, Sony</i> , продвинутые беззеркалки

4/3" или <i>Micro 4/3</i>	17,3×13,0	Беззеркалки широкого ценового диапазона <i>Panasonic, Olympus</i>
1"	12,8×9,6	Беззеркалки <i>Nikon, Samsung</i> и продвинутые компактные фотоаппараты
1/2,3"	6,16×4,62	Подавляющее большинство мыльниц
1/3"	4,69×3,52	Фотокамеры смартфонов

Из табл. 3.3 и 3.4 видно, что использование фотоаппаратов, не относящихся к премиум классу, матрицы которых имеют кроп-фактор отличный от 1,0 (кроп-фактор показывает, во сколько раз диагональ данной матрицы отличается по размеру от полноформатной), потребует соответствующего уменьшения высоты полёта или увеличения фокусного расстояния объектива.

Вопросы для самоконтроля

1. Чем отличается аналоговая и цифровая съёмки?
2. Чем похожи аналоговая и цифровая съёмки?
3. С точки зрения фотограмметрии, какая фотография качественнее – чёрно белая или цветная?
4. Какой размер матрицы рекомендуется для съёмки объектов?
5. Как связаны размер пикселя и фокусное расстояние объектива фотокамеры?
6. Можно ли снимать объекты на бытовые камеры?
7. Можно ли в фотограмметрии применять зум-объективы?

Рекомендуемая литература

1. Зинченко О. Н. Цифровые камеры для топографической аэрофотосъёмки. Обзор моделей. М.: Ракурс, 2013. 14 с. [офиц. сайт] [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru> (дата обращения: 20.09.2018).
2. УРАЛГЕОИНФОРМ [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.ugi.ru/kartograficheskie_uslugi/aerofotosemka/ (дата обращения: 15.06.2018).

ГЛАВА 4

Применение фотокамер премиум класса в фотограмметрии

В настоящее время в горном деле фотограмметрия стала активно применяться для 3D-анализа структуры горных пород. Рассмотрим это в следующей последовательности:

- Принципы фотограмметрии.
- Типы проектов.
- Примеры использования.
- Настройки камеры.
- Ориентация.
- Конвергентные модели.

Напомним, что фотограмметрия сегодня – это наука об использовании 2D-изображений для точного преобразования измерений на двух или более фотоснимках в 3D-объект. Для построения по снимку 3D-модели необходимо восстановить информацию о пространственных координатах, которая была потеряна при получении плоского изображения в процессе фотографирования.

Изображения на фотографии только двумерные. Если рассматривать плоскую 2D-модель объекта, то расположение любой точки изображения может описываться только двумя координатами (X, Y). Расположение любой точки в реальном мире описывается тремя координатами: X, Y, Z (широта, долгота, высота) и т. п. Реальный мир трёхмерен.

Важной характеристикой для выполнения фотограмметрических работ является, как отмечалось выше, размер пикселя на местности ΔD , который определяет погрешность аэрофото- или наземной фотосъёмки (4.1):

$$\Delta D = (H_o / f_k) \cdot \Delta d, \quad (4.1)$$

где f_k – фокусное расстояние объектива, м;

H_o – высота полёта самолёта или расстояние от фотокамеры до снимаемого объекта, м;

Δd – размер пикселя матрицы фотоаппарата, м;

ΔD – размер пикселя на местности (погрешность детализации местности), м.

Точность отрисовки контуров на земной поверхности $\sigma_{отм.}$ зависит от точности полученного изображения σ_{pix} и размера пикселя на местности ΔD , а точность определения высотной отметки (глубины) ещё зависит от разрешения фотокамеры (4.2–4.3)

$$\sigma_{плана} = \sigma_{pix} \cdot \Delta D, \quad (4.2)$$

$$\sigma_{отм.} = (H_o / b) \sigma_{плана}, \quad (4.3)$$

где σ_{pix} – точность фотоизображения, м;

H_o – высота полёта самолёта или расстояние от фотокамеры до снимаемого объекта, м;

b – базовое расстояние фотографирования, м;

ΔD – размер пикселя на местности (погрешность детализации местности), м;

$\sigma_{плана}$ – точность отрисовки контуров на земной поверхности, м;

$\sigma_{отм.}$ – точность определения высотной отметки, м.

Точность фотоизображения σ_{pix} может принимать значения:

- 0,5 – качество съёмки удовлетворительное;
- 0,3 – наиболее часто встречаемое в практике съёмок;
- 0,05 – наилучшее значение, когда хорошо наблюдаются контрольные цели.

Взаимосвязь между точностью изображения σ_{pix} , контурной точностью $\sigma_{плана}$, точностью глубины $\sigma_{отм.}$ и отношением расстояния съёмки к величине базы съёмки H_o/b можно увидеть, посмотрев на «эллипс погрешностей», который формируется, когда мы соотносим местоположение точки на каждом изображении с точностью изображения (см. рис. 4.1).

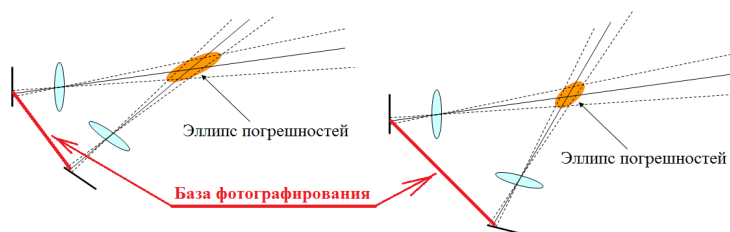


Рис. 4.1. Зависимость погрешности определения глубины (координаты Z) от величины базового расстояния стереосъёмки

Увеличение базового расстояния стереосъёмки, при одинаковом расстоянии до снимаемого объекта, делает эллипс погрешностей более круглым, улучшая точность определения глубины (координаты Z).

На рис. 4.2–4.3 приведены ожидаемые среднеквадратические погрешности (с вероятностью $P = 0,68$, одна σ) определения точек координат снимаемого объекта в зависимости от расстояния съёмки и фокусного расстояния объектива для фотоаппаратов с полноформатной матрицей и сравнение с профессиональными камерами.

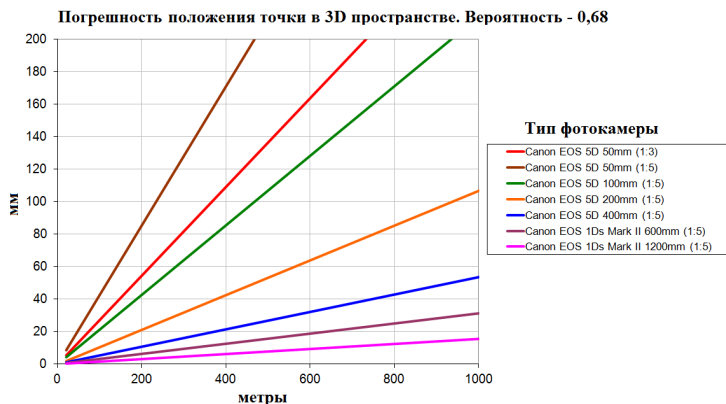


Рис. 4.2. Среднеквадратические погрешности определения координат точек снимаемого объекта в зависимости от расстояния съёмки и фокусного расстояния объектива

Погрешность положения точки в 3D пространстве. Вероятность - 0,68

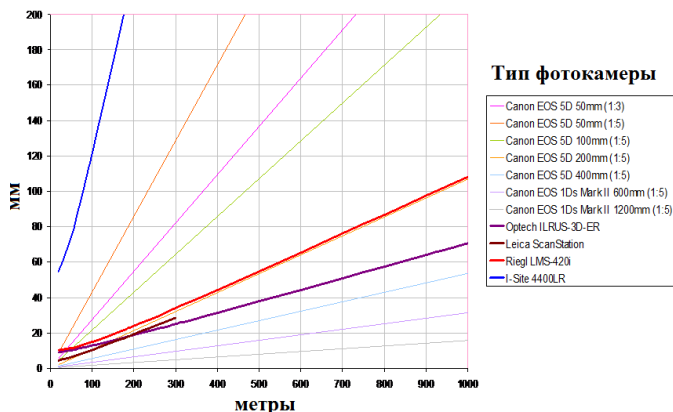


Рис. 4.3. Сравнение среднеквадратических погрешностей определения координат точек снимаемого объекта для профессиональных аэрофотокамер и фотоаппаратов премиум класса

Для выполнения качественной фотограмметрической съемки горных объектов необходимо учитывать ещё ряд условий. Например:

- Снимаемая поверхность должна быть хорошо текстурирована (сопоставление изображений не работает на безликих гладких и одноцветных поверхностях), хотя естественные поверхности горных пород обычно достаточно текстурированы.
- Каждая точка объекта должна быть видна на обоих снимках без эффектов затемнения. Лучше иметь дополнительные изображения с других точек съемки, выполненные с не очень большим промежутком времени.
- Снимаемый объект должен выглядеть одинаково на каждом изображении (фотографии), без различия, например, теней, полученных при утреннем и дневном солнце. Но это важно только при автоматическом режиме постобработки снимков. В случае их ручной обработки изменение яркости или цвета с большим количеством различных теней не имеет такого значения. При ручном режиме обработки фотоснимков тени не мешают сопоставлению потому, что тени выглядят иначе по отношению к снимаемому объекту.

4.1. Цифровые фотограмметрические системы

Цифровые фотограмметрические системы сегодня полностью компьютеризированы, и многие задачи постобработки фотоснимков позволяют выполнять в автоматическом режиме. Их программное обеспечение уже в полном объёме использует принципы искусственного интеллекта.

Профессиональные цифровые фотограмметрические системы, предназначенные для работы с современными цифровыми камерами, позволяют:

- автоматически определять отношения между положениями камеры (относительная ориентация) просто путём проверки изображений;
- автоматически генерировать данные 3d-поверхности из изображений;
- обрабатывать большой объём данных векторной оцифровки до 4 млрд точек снимаемого объекта;
- предполагать возможность работы оператора при ручном вводе;
- имеют встроенные процедуры калибровки цифровой камеры.

4.2. Анализ 3D-модели поверхностей горных выработок

Анализ цифровых 3D-моделей местности или поверхностей горных выработок выполняется в следующей последовательности:

- а) калибровка камеры в пространстве:
 - Выполнение калибровки внутренней ориентации камеры.
 - Определение внешней ориентации (положение и направление камеры в точках съёмки) для любого количества изображений одновременно.
 - Оценивание точности съёмки опорных точек (до 80000:1).
 - Объединение нескольких изображений снимаемого объекта с высоким разрешением в одну генерируемую модель;
- б) анализ 3D-модели:
 - Создание, редактирование и объединение цифровых моделей поверхности.

- Оцифровка векторных данных с использованием режима одиночного изображения, стерео 2D-режима или 3D-режима.
- Анализ данных – объёмные вычисления, распознавание деталей снимаемого объекта и т. д.
- Экспорт данных в виде 3D-изображений, в другие программы (*DXF* и т. д);
- с) генератор цифровой модели местности:
- Создание суммарной цифровой модели местности и 3D-модели изображений в пакетном режиме.

Процесс кратко показан на схеме (см. рис. 4.4).

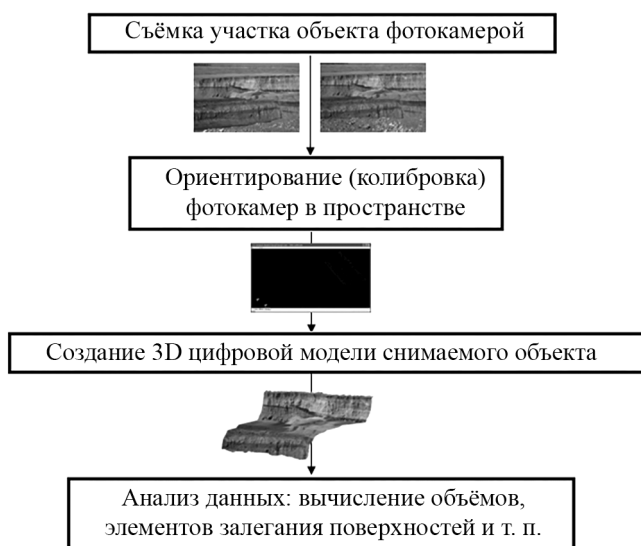


Рис. 4.4. Схема фотограмметрической съёмки участка борта карьера

4.3. Планирование полевых работ

Планирование работ по выполнению фотограмметрической съёмки начинают с постановки задачи и методов её обеспечения:

- Каждая опорная точка должна быть видна из двух мест съёмки. Опорные точки представляют собой установленные на местности (поверхности снимаемого объекта) хорошо видимые

марки на объекте съёмки. Опорные точки должны иметь известные координаты в какой-либо системе координат и в дальнейшем используются для калибровки и внешней ориентировки фотокамер.

- Желательно, чтобы данные съёмки могли быть привязаны в желаемой системе координат.

- Необходимо опробовать как минимум три места положения фотокамер, с которых будут видны опорные точки.

При подготовке проекта фотограмметрической съёмки должен быть выбран один из трёх способов съёмки.

В полевой практике фотограмметрической съёмки используют три способа съёмки объектов: традиционный, радиальный и полигональный (см. рис. 4.5, 4.6 и 4.7).

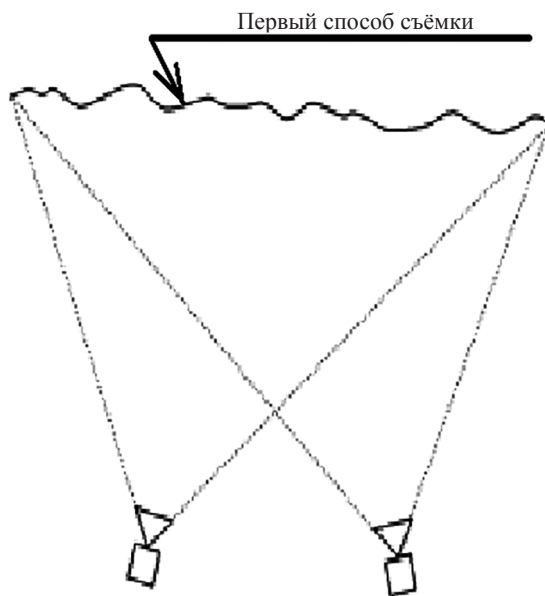


Рис. 4.5. Традиционный способ съёмки

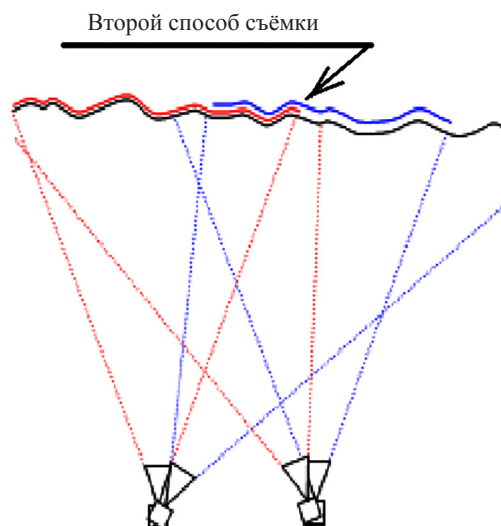


Рис. 4.6. Радиальный способ съёмки

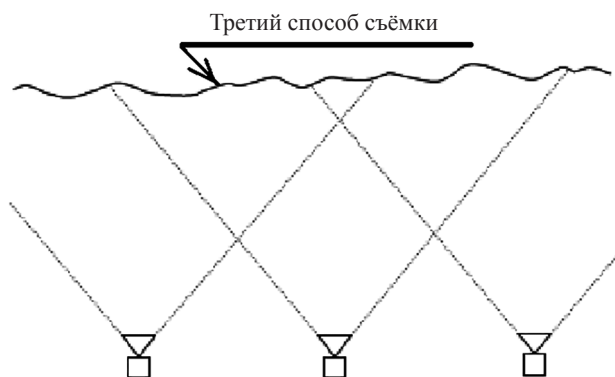


Рис. 4.7. Полигональный (маршрутный) способ съёмки

Первый способ (см. рис. 4.5)

Делают пару фотографий одной и той же области, с двух разных мест (базовых точек установки фотокамер).

Плюсы:

- Концептуальная простота.

- Гибкость – точность глубины может быть легко отрегулирована путём изменения базового расстояния, может использоваться с объективами любого фокусного расстояния и на любом расстоянии.

Минусы:

- Каждая модель должна быть полностью контролируемой (по крайней мере должны быть три опорные точки с известным их местоположением – и желательно известно положение камер).
- Способ обладает слабым контролем качества построения цифровой модели местности из-за низкого уровня избыточности, так как для каждой модели используется очень мало контрольных точек от общего количества требуемых.

Второй способ (см. рис. 4.6)

Выполняют серию фотографий, перекрывающих соседние снимки не менее чем на 10 %, захваченных с каждой камеры, как правило, издали с объективом с длинным фокусным расстоянием.

Плюсы:

- Даёт возможность хорошо ориентировать цифровую модель снимаемого объекта с очень небольшим количеством опорных точек (минимум – это одна опорная точка плюс две камеры или три опорные точки для всего проекта, независимо от того, сколько изображений используется).
- Съёмка выполняется очень быстро вращающейся камерой для захвата значительных областей объекта, что позволяет эффективно захватывать большие области.
- Изображения могут быть объединены (и рассматриваются как независимые модели в 3D анализе), позволяя получать изображения с очень высоким разрешением даже на более простых камерах.

Третий способ (см. рис. 4.7)

Выполняют серию параллельных фотографий, перекрывающих друг друга не менее чем на 60 %. (Съёмка может быть организована в несколько рядов, с поперечным перекрытием не менее чем на 25 %. По аналогии с аэрофотосъёмкой).

Плюсы:

- Даёт точную внешнюю ориентацию будущей цифровой модели с очень небольшим количеством опорных точек (минимум одной опорной точки для каждого пяти снимков, как правило, более чем достаточно).

- Идеально подходит для аэрофотосъёмки.

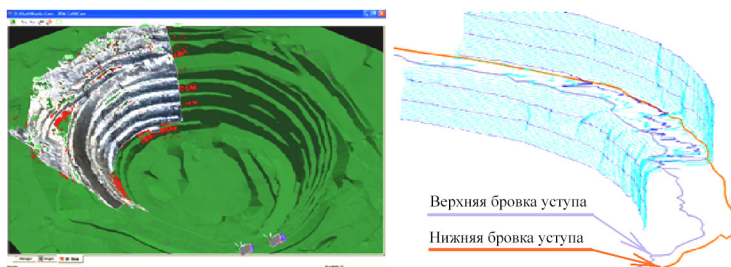
Минусы:

- База определяется полем обзора и фокусным расстоянием объектива (лучше всего применять объективы с короткими фокусными расстояниями).

Приведём один из примеров для камеры *Canon EOS-1Ds Mark III*:

- *Canon EOS-1Ds Mark III* полноформатная 36×24 мм зеркальная фотокамера с сенсором 21.1 мегапикселей.
- Объектив: 135 мм.
- Площадь объекта съёмки: 500 м×300 м.
- Количество фотоснимков: 27 с каждой станции.
- Количество станций: 2.
- Расстояние до борта карьера: 700 м.
- Размер пикселя по земле: 3 см.
- Количество опорных точек: 7 (по верхней кромке борта карьера).
- Точность съёмки: $\sigma_x = 0,14$ м, $\sigma_y = 0,08$ м, $\sigma_z = 0,04$ м
- Время, затраченное на съёмку (без установки опорных точек): ~ 30 мин (оценка).
- Время, затраченное на постобработку: 1 ч 38 мин (из них 8 мин пользовательского времени). Остальное время программа работала в автоматическом режиме.

Цифровая модель борта карьера была представлена 9,5 миллионами точек (см. рис. 4.8).



Цифровая модель уступов представлена контурными линиями:
сечением 1 м – светло-синие; 5 м – тёмно-синие

Рис. 4.8. Цифровая модель участка карьера, снятая радиальным способом

4.4. Рекомендуемые настройки камеры

Объектив

Для фотосъёмки необходимо использовать простые объективы без зума. Объектив, с неправильно установленным зумом, может сильно снизить точность получаемой цифровой модели. В крайнем случае следует использовать крайние положения зума, чтобы точно знать значения фокусного расстояния (обычно это означает, что можно использовать только минимальное и максимальное масштабирование).

Фокусное расстояние

Фокусное расстояние объектива должно соответствовать необходимой точности съёмки.

Для работы на открытом воздухе, как правило, фокусировка объектива должна быть установлена на бесконечность с достаточной глубиной резкости, чтобы сохранить все элементы снимка резкими.

Обычно рекомендуется использовать функцию автофокусировки, но она должна оставаться неизменной между снимками на одной и той же станции. В сложных случаях следует перейти на ручной режим фокусировки.

Диафрагма (апертура)

Величина диафрагмы обычно оказывает небольшое влияние на точность цифровой модели. Однако следует, чтобы величина диафрагмы не противоречила точности съёмки. Меньшее отверстие диафрагмы увеличивают глубину резкости, но слишком маленькое больше преломляет световой поток и размывает изображение.

Настройка чувствительности матрицы (ISO)

В отличие от плёнки сенсор матрицы фактически имеет постоянную чувствительность (скорость реакции). Более высокая чувствительность имитируется увеличением усиления сигнала, которое приводит к усилению шума. Это плохо скажется на конечном изображении. Поэтому следует использовать настройку самой низкой чувствительности, поддерживаемую вашей камерой. Рекомендуется чувствительность установить в соответствии с $ISO = 100$.

Время экспозиции

Значение диафрагмы, настройка чувствительности ISO и время экспозиции влияют на качество снимка.

В яркий солнечный день, используя диафрагму $f/8$ и $ISO = 100$, время экспозиции следует установить от $1/200$ до $1/250$ с.

В пасмурные дни, когда скорость затвора должна быть медленнее $1/200$ -й секунды, обязательно используйте штатив. Также следует использовать дистанционный спуск затвора (чтобы уменьшить движение камеры при нажатии кнопки) и опции блокировки зеркала на зеркальных фотокамерах (чтобы уменьшить вибрацию).

4.5. Фотосъёмка

Осветительные приборы

Изменения в освещении между изображениями создают проблемы с совпадением изображений. Конечно, программное обеспечение может компенсировать значительную разницу в яркости между изображениями, но изменение местоположения источника света изменяет форму теней, что может вызвать трудности при сопоставлении. Поэтому не используйте встроенную вспышку камеры.

Движение

Если объект перемещается между изображениями, он может быть неправильно идентифицирован и сопоставлен в каждом изображении, но поскольку он перемещён, его местоположение будет определено неправильно.

Плоские объекты

При неправильном выборе точек съёмки может возникать засветка изображений, особенно влияют горизонтальные объекты, такие как рельсы ограждения или строительные леса.

Ориентация фотокамеры

Внутренняя ориентация определяется калибровкой камеры (параметры внутри камеры: фокусное расстояние, смещение главной точки, искажения в линзах и т. д.). Все снимки в отдельной сессии, как правило, имеют одинаковую внутреннюю ориентацию.

Внешняя ориентация – параметры положения камеры в пространстве: положение (x , y , z) и ориентация (омега, фи, каппа). Каждое изображение в проекте будет иметь уникальную внешнюю ориентацию.

4.6. Калибровка фотокамеры

Фотограмметрическая калибровка цифровых съёмочных камер выполняется с целью определения значений элементов внутреннего ориентирования съёмочных камер, включая параметры фотограмметрической дисторсии объектива съёмочной камеры. Иными словами, в координаты объекта, измеренные на снимке, необходимо ввести поправки Δx и Δy , компенсирующие дисторсию объектива фотокамеры. Эти поправки чаще описывают уравнениями Брауна (4.4–4.6):

$$\Delta x = x(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2x^2)p_1 + 2xyp_2; \quad (4.4)$$

$$\Delta y = y(r^2 k_1 + r^4 k_2 + r^6 k_3) + (r^2 + 2y^2)p_2 + 2xyp_1; \quad (4.5)$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (4.6)$$

где Δx , Δy – поправки в координаты снимка за дисторсию фотообъектива;

x_0, y_0 – координаты центральной точки снимка;

x, y – координаты точек снимка;

k_1, k_2, k_3 – коэффициенты радиальной дисторсии;

p_1, p_2 – коэффициенты тангенциальной дисторсии.

В главе 3 рис 3.12 мы уже показывали, что свет, проходя прямо через линзы объектива к датчику изображения, претерпевает преломление и тем больше, чем луч находится дальше от оптической оси объектива. Поэтому фактическое изображение может значительно отличаться от идеального. Для устранения всех искажений, которые происходят в объективе фотоаппарата, каждый фотоаппарат должен быть откалиброван. Для фотоаппаратов, используемых в фотограмметрической съёмке, должны быть определены следующие параметры:

- Смещение главной точки: ΔX_p и ΔY_p (компенсирует оптический центр объектива, не совпадающий с центром датчика изображения).

- Радиальные искажения (радиальная дисторсия) объектива: k_1, k_2, k_3 .

- Децентрализованное искажение (тангенциальная дисторсия): p_1, p_2 (компенсирует смещение элементов объектива друг с другом).

- Масштабирующие факторы: B_1 и B_2 (компенсирует дифференциальное масштабирование по осям X и Y и неперпендикулярность осей изображения).

Калибровку цифровых фотокамер выполняют по снимкам пространственного тест-объекта (см. рис. 4.9). Тест-объект представляет собой пространственное поле маркированных точек, координаты которых известны (см. рис. 4.10). Пространственный тест-объект может быть смонтирован в прямоугольном помещении размерами от $2,5 \div 5,0$ м по осям X и Y , а по оси Z – от $6,0 \div 10,0$ м. На откалиброванную камеру выдаётся специальный сертификат. Типичные отклонения после калибровки фотокамеры составляют от 0,1 до 0,2 пикселей.

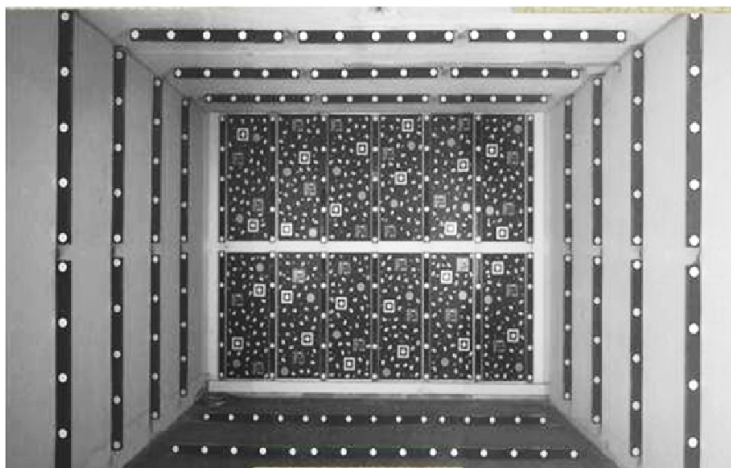


Рис. 4.9. Фотоснимок пространственного тест-объекта

Некоторые современные программные средства позволяют выполнять такую калибровку в процессе фотограмметрической съёмки. Например:

- 3DM Analyst фирмы *Adam technology, Suite 3, 41 Belmont Avenue Belmont, Western Australia, 6104 Australia.*
- PhotoScan фирмы *Agisoft LLC 11 Degtyarniy per., St. Petersburg, Russia, 191144.*

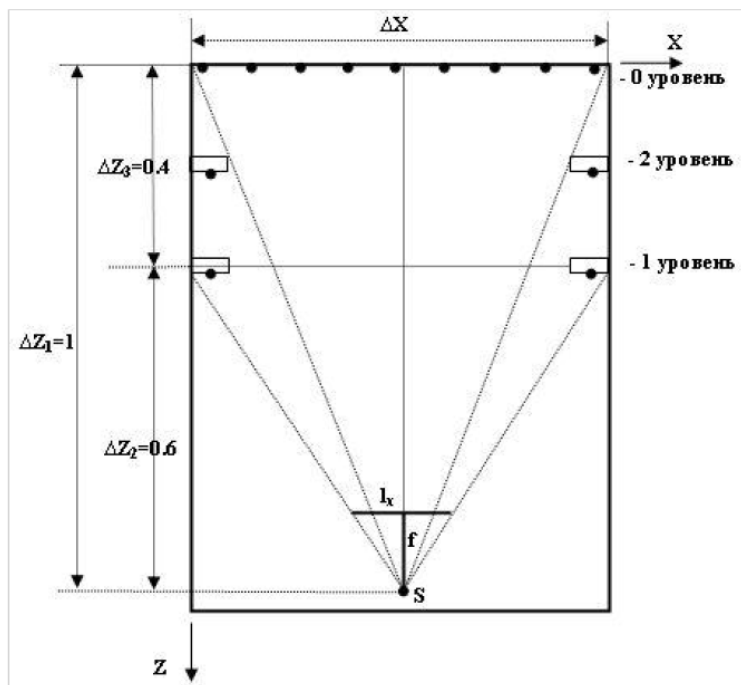


Рис. 4.10. Пространственный тест-объект

Однако для этого приходится добавлять количество опорных точек по крайней мере от трёх до восьми на снимок, но лучше 18 и более. Если опорных точек на снимаемом объекте будет не менее 6, программы могут выполнить оценку точности калибровки. Точность калибровки можно увеличить и за счёт увеличения числа снимков, сделанных с нескольких базовых точек (см. рис. 4.11). Все эти замечания необходимо учитывать при составлении проекта фотограмметрической съёмки.

Качественный результат может быть получен только при правильном конфигурировании расположения точек съёмки, куда устанавливаются камеры, и 3-мерным расположением опорных съёмочных точек на поверхности снимаемого объекта, т. е. опорные точки не должны располагаться на одной линии.

Для правильного масштабирования создаваемой цифровой 3D модели следует использовать известные расстояния между ба-

зовыми станциями съёмки (где устанавливаются фотокамеры) либо между опорными точками, расположенными на снимаемом объекте. Также для этого могут использоваться шкаловые рейки. Исчерпывающие данные о положении базовых или опорных точек (их координаты X , Y , H) позволяют построить цифровую 3D-модель в координатах реальной системы координат.

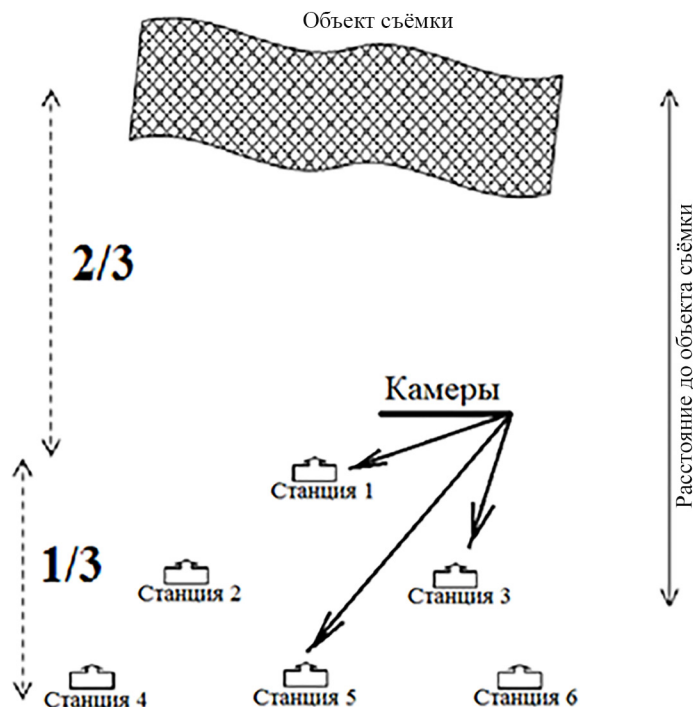


Рис. 4.11. Наилучшее расположение фотокамер по отношению к снимаемому объекту

Если нет возможности откалибровать фотокамеру на специальном тест-объекте, то следует воспользоваться плоским тест-объектом. В качестве плоского тест-объекта может быть использована программа *Lens*, фирмы *Agisoft LLC 11 Degtyarniy per., St. Petersburg, Russia, 191144*.

В качестве плоского тест-объекта используется сетка прямоугольных квадратов, выводимая на ж/к-монитор компьютера, в виде шахматной доски. При фотографировании на снимке должна быть видна только тестовая сетка квадратов (см. рис. 4.12).

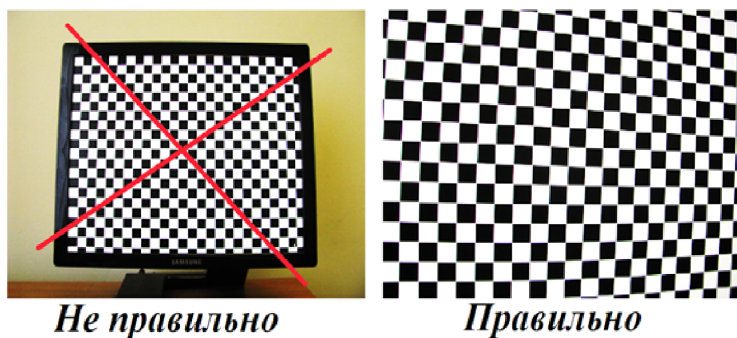


Рис. 4.12. Плоский тест-объект, выводимый на экран ж/к-монитора

Плоский тест-объект фотографируется исследуемой фотокамерой не менее чем с трёх точек (см. рис. 4.13) и при фотографировании следует соблюдать некоторые правила

Плоский тест-объект на экране ж/к-монитора

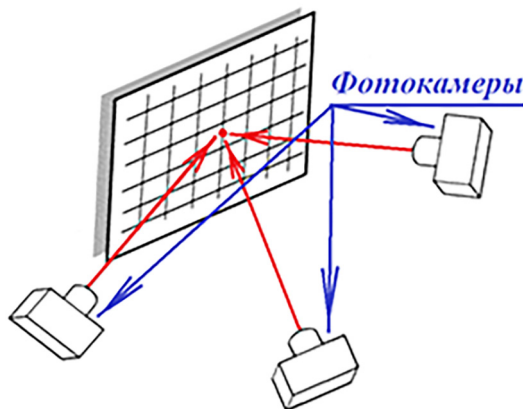


Рис. 4.13. Фотографирование плоского тест-объекта

Правила калибровки с помощью программы Lens

Для того чтобы сделать снимок шаблона калибровки, необходимо после запуска программы *Lens*:

1. Выбрать в меню «Инструменты» «Показать команду шахматной доски», чтобы отобразить шаблон калибровки или нажать соответствующую иконку в панели инструментов.

2. С различных ракурсов сделать серию фотографий отображаемого калибровочного рисунка с помощью исследуемой камеры в соответствии с указаниями, приведенными ниже. Минимальное количество фотографий для одного объектива – 3.

3. Щёлкнуть в любом месте шаблона калибровки или нажать кнопку *Escape*, чтобы вернуться к программе.

4. Загрузить отснятые фотографии на компьютер.

При фотографировании калибровочного рисунка необходимо выполнять следующие указания:

- Убедиться, что фокусное расстояние остается постоянным на протяжении всего сеанса (в случае зум-объективов особенно!).

- Избегать бликов на фотографиях. При необходимости переместить источники света.

- Предпочтительно, чтобы вся область фотографий была покрыта шаблоном калибровки. Переместить фотокамеру ближе к ж/к-экрану, если это необходимо.

Чтобы загрузить фотографии шаблона калибровки:

1. Выберите команду «Добавить фотографии...» в меню «Сервис» или нажмите иконку на панели инструментов.

2. В диалоговом окне «Открыть» перейдите к папке, содержащей фотографии, и выберите файлы для обработки. Затем нажмите кнопку «Открыть».

3. Выбранные фотографии появятся на панели «Фотографии».

Если вы загрузили некоторые нежелательные фотографии, их можно легко удалить в любое время.

Калибровка объектива камеры

1. Захватите и загрузите фотографии шаблона калибровки, если вы ещё этого не сделали.

2. Выберите команду *Calibrate...* в меню *Tools*.

3. В диалоговом окне «Калибровка» выберите нужные параметры калибровки. Нажмите ОК, когда закончите.

4. Появится диалоговое окно выполнения, отображающее текущий статус обработки. Для отмены обработки нажмите кнопку «Отмена».

5. Результаты калибровки появятся в окне отчёта.

Следующие параметры калибровки оцениваются во время калибровки и распечатываются в окне отчёта:

- f_x – горизонтальный размер матрицы, в пикселях;
- f_y – вертикальный размер матрицы, в пикселях;
- c_x – X координата главной точки;
- c_y – Y-координата главной точки;
- K_1, K_2, K_3, P_1, P_2 – радиальные и тангенциальные коэффициенты дисторсии объектива в модели Брауна.

4.7. Постобработка

Камеральная обработка фотограмметрической съёмки (пост-обработка) может выполняться как традиционными методами вручную, так и современными.

Традиционные методы:

Бинокулярный метод (см. рис. 4.14–4.15).



Рис. 4.14. Бинокулярный метод обработки



Рис. 4.15. Бинокулярный метод обработки

Зеркальный метод, использующий свойства поляризации света (см. рис. 4.16–4.17).



Рис. 4.16. Зеркальные стереомониторы *Planar* и *StereoPixel*

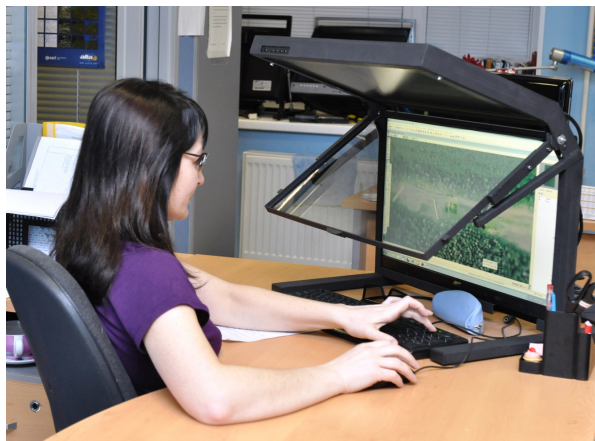


Рис. 4.17. Работа со стереоснимками на поляризационном мониторе

Кроме перечисленных методов вывода стереоизображения на монитор, используются методы: затворных очков, **интерлей-сный метод** (через строчный), **анаглифический метод** вывода информации.

Мы не будем приводить подробные примеры вывода стереоизображения на экран методами, перечисленными выше, так как все они предполагают обработку стереоизображений в ручном режиме.

Большой интерес, с нашей точки зрения, сегодня представляют методы, использующие некоторые прообразы искусственного интеллекта; методы, выполняющие большую часть работы в автоматическом режиме; например, такие программы, как *Trimble UASMaster*, *PHOTOMOD* фирмы Ракурс, *PhotoScan* и другие [15; 24; 26; 27].

Для получения 3D-модели местности, например, в программе *PhotoScan* достаточно выполнить 4 действия:

- Загрузить фотоснимки местности.
- Выравнить фотоснимки.
- Сформировать облако точек.
- Построить цифровую 3D-модель.

Правда, в этом случае мы получим не масштабированную модель в условной системе координат. При этом программа может обрабатывать до 300 снимков одновременно.

Для получения действительно реальной цифровой 3D-модели местности следует выполнить более тонкие настройки процесса постобработки: ввести координаты опорных точек и отметить их на снимках; ввести данные цифровой фотокамеры и её объектива (см. рис. 4.18). Построенная цифровая 3D-модель местности в дальнейшем может быть передана в другие программы для построения горизонталей и топографического ортофотоплана (см. рис. 4.19).

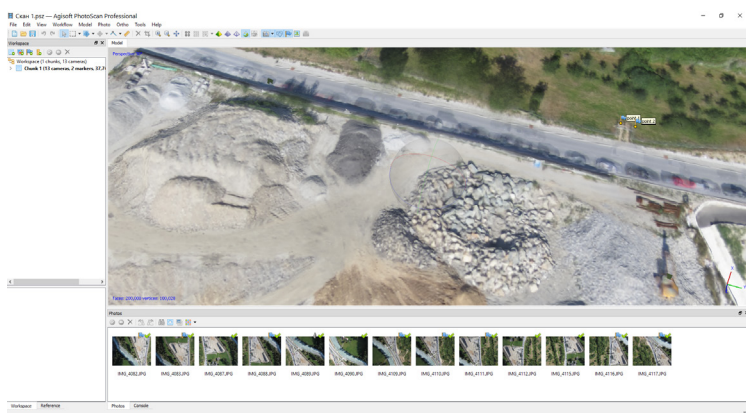


Рис. 4.18. Построение цифровой 3D-модели местности в программе PhotoScan

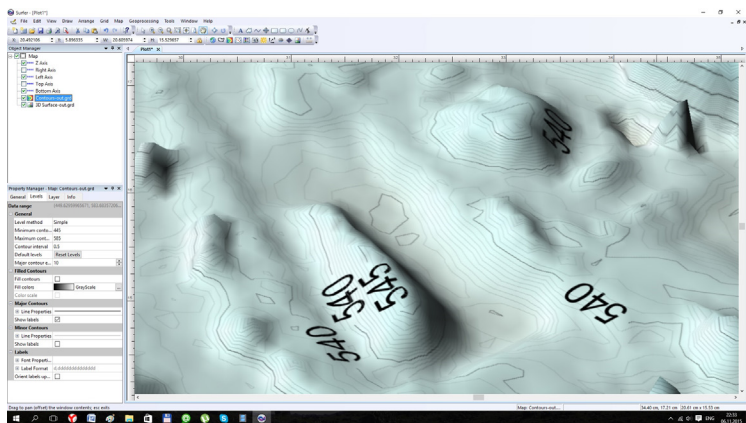


Рис. 4.19. Построение горизонталей участка местности в программе Surfer

В данном пособии мы не будем подробно рассматривать работу в этих программах, отправляя читателя непосредственно к инструкциям и руководствам по работе с ними.

Вопросы для самоконтроля

1. Какой размер пикселя должен быть у цифровой камеры?
2. Как вычислить погрешность фотограмметрической съёмки для конкретного фотоаппарата?
3. От чего зависит точность отрисовки контуров местности?
4. От чего зависит точность определения отметки местности?
5. Каков порядок выполнения фотограмметрической съёмки?
6. Порядок планирования полевых работ?
7. Какие способы фотограмметрической съёмки существуют?
8. Как должна быть настроена фотокамера для выполнения фотограмметрической съёмки?
9. Что такое дисторсия объектива?
10. Для чего выполняется калибровка фотокамеры?

Рекомендуемая литература

1. Новоселов В. Г. Использование модуля PHOTOMOD Mosaic для построения качественных ортофотопланов. М.: Ракурс, 2005 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 20.07.2018).
2. Рекомендации по контролю точности на различных этапах фотограмметрической обработки в системе PHOTOMOD. Служба технической поддержки. М.: Ракурс, 2013 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 7.09.2018).
3. Сечин А. Ю. Новая технология построения «плотных» моделей рельефа и эффективное использование возможностей параллельных вычислений в версии 5.1 системы PHOTOMOD. М.: Ракурс, 2011 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 25.06.2018).
4. Сечин А. Ю. Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер. М.: Ракурс, 2008 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 10.07.2018).

ГЛАВА 5

Практические примеры использования фотограмметрии в горном деле

5.1. Использование приложения *BlastMetriX 3D* и *Shape MetriX 3D*

Программное обеспечение *BlastMetriX 3D* и *Shape MetriX 3D* разработано компанией *3GSM GmbH, Plüddemanngasse 77, 8010 Graz, Austria* и предназначено для компьютерной обработки фотограмметрических съёмок и проектирования горных работ [30].

Модуль *Shape MetriX 3D* представляет собой простую в использовании систему для получения поверхностей с трёхмерными изображениями. Для сбора данных используется стандартная цифровая камера, которая откалибрована программным обеспечением *3GSM*. При этом интересующий нас участок местности должен быть сфотографирован хотя бы с двух базовых точек.

Программное обеспечение позволяет получить цифровую характеристику горных пород, включая геометрические элементы их залегания и геологическое картографирование их структуры.

Особенности программного модуля (см. рис. 5.1):

- Воспроизводимые условия состояния горного массива.
- Отсутствие проблем с доступом на опасные участки борта карьера или груди забоя.
- Измерение положения (координат X , Y , H), расстояний, площадей.
- Построение сечений (поперечные сечения) и профилей.
- Измерение элементов залегания видимой структуры горных пород (угла падения и дирекционного угла простирания).

- Горно-геологическая оценка участка.
- Измерение блочности (меж трещинного расстояния).
- Построение диаграмм трещиноватости на стереографической сетке Болдырева.
- Выделение и классификация типов трещин.
- Статистика пространственного распределения разрывов сплошности горных пород.
- Выделение линий контуров.
- Моделирование трещиноватости.
- Экспорт данных в другие программы (*CSV, DXF, OBJ*).

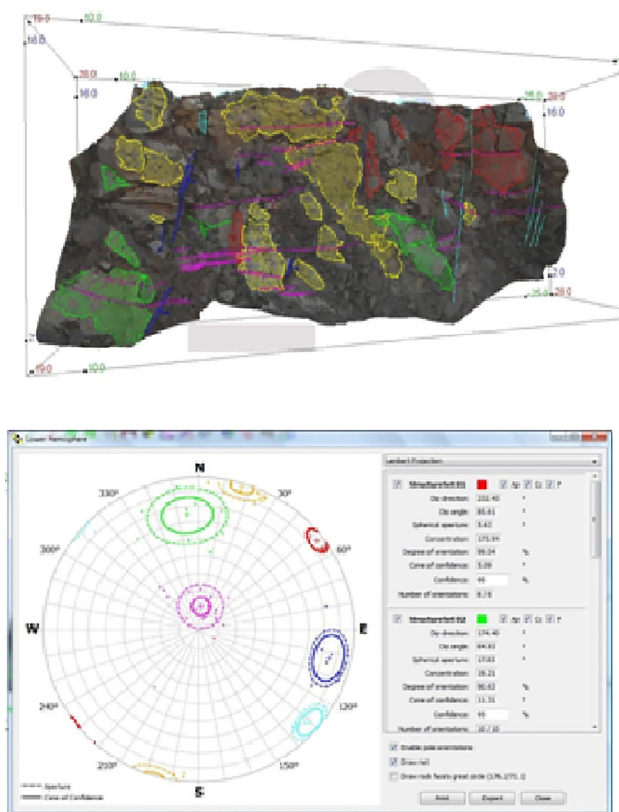


Рис. 5.1. Выделение трещиноватости на поверхности горной выработки и построение стереографической проекции

Основные преимущества программы:

- Бесконтактное измерение на расстоянии (фотографирование).
- Повышенная безопасность труда.
- Возможность измерений в недоступных областях.
- Получение комплексной, реалистичной документации.
- Воспроизводимые условия состояния горного массива.
- Улучшенная характеристика свойств горного массива.

На рис. 5.2–5.4 показаны структурирование трещиноватости (определение блочности горного массива), построение поперечного сечения горной выработки и последовательности её проходки.

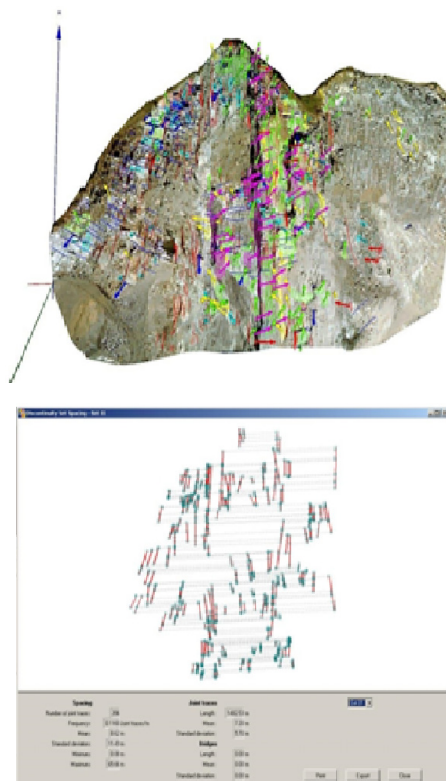


Рис. 5.2. Определение блочности горного массива

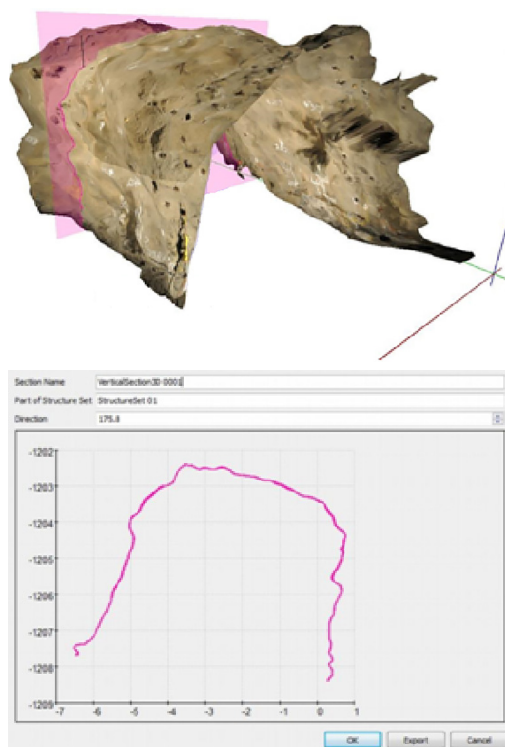


Рис. 5.3. Построение поперечного профиля горной выработки



Рис. 5.4. Последовательность проходки горной выработки

5.2. Проектирование буровзрывных работ в модуле *BlastMetriX 3D*

Модуль *BlastMetriX 3D* представляет собой простую в использовании систему для проектирования буровзрывных работ карьерных уступов на основе трёхмерных изображений (цифровых 3D-моделей).

После установки и настройки полевых маркеров выполняют фотосъёмку по крайней мере с двух базовых точек с использованием предварительно откалиброванной цифровой зеркальной камеры.

Из серии фотографий строят трёхмерное изображение поверхности, которое генерируется специально созданным программным обеспечением. Результатом такой обработки фотоснимков является метрическое трёхмерное изображение (цифровая 3D-модель борта карьера).

Используя данный программный комплекс, строят геометрию запланированной взрывной сети и оптимизируют её с учётом фактической геометрии уступа и его структурных особенностей. Всё это подтверждается интегральным вычислением реальной минимальной нагрузки (линии минимального сопротивления).

Конечные результаты проекта представляются в виде планов и профильных участков бурения и заряжания скважин с исчерпывающей документацией.

Особенности программного модуля BlastMetriX 3D

- Повышает безопасность работы (бесконтактные измерения).
- Позволяет оптимизировать проектирование, а затем повышать эффективность взрывов.
- Снижает издержки производства.
- Обеспечивает воспроизводимую документацию (сохранение доказательств) уровня качества методом измерения по изображениям.
- Позволяет включать геологические оценки структурированности горного массива при проектировании взрыва.
- Обеспечивает существенные уменьшения разлёта горных пород и сейсмического воздействия.
- Эффективно применяется на предприятиях из-за его простоты использования.

Результаты использования

При выполнении проектирования взрыва с *BlastMetriX3D* сразу доступны следующие параметры:

- Основная геометрия поверхности уступа, подготавливаемого к взрыву: высота, ширина или наклон.
- Предлагаемые параметры относительно среднего наклона скважины.
- Профиль и площадь перед буровой скважиной.
- Минимальные нагрузки вдоль ствола скважины.
- Полная информация в цветовой кодировке на всей поверхности взрываемого уступа.
- Масштабный проект бурения скважин.
- 3D-изображение уступа карьера, подготавливаемого к взрыву.

Порядок выполнения работ:

1. Расстановка опорных марок и фотографирование (см. рис. 5.5–5.6).
2. Создание 3D-изображений (см. рис. 5.7–5.8).
3. Проектирование взрыва.



Рис. 5.5. Комплект оборудования и установка опорных марок



Рис. 5.6. Фотографирование борта карьера

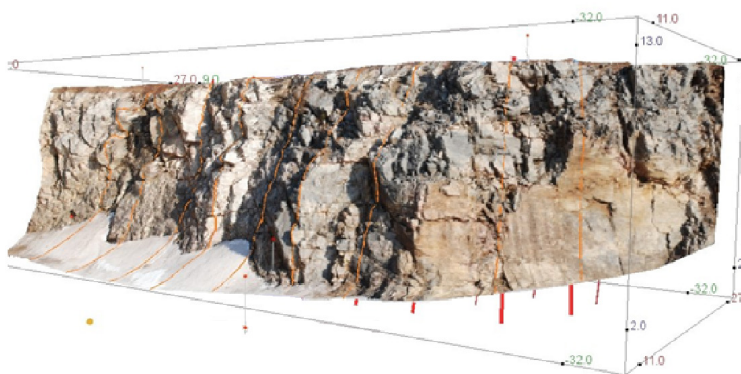


Рис. 5.7. Создание 3D-изображения с линиями структурных ослаблений

Проектирование взрыва выполняют в соответствии с выделенными зонами прочностных характеристик горного массива. Наиболее слабые участки окрашены красным, а более прочные окрашены фиолетовым цветом. На основании прочностных данных уступа находят линии наименьшего сопротивления и получа-

ют карту расположения буровзрывных скважин и их параметры, такие как глубина бурения, наклон, расположение устья. Каждая скважина индивидуально адаптируется в соответствии с профилем, диаграммой минимальной нагрузки (см. рис. 5.9–5.11).

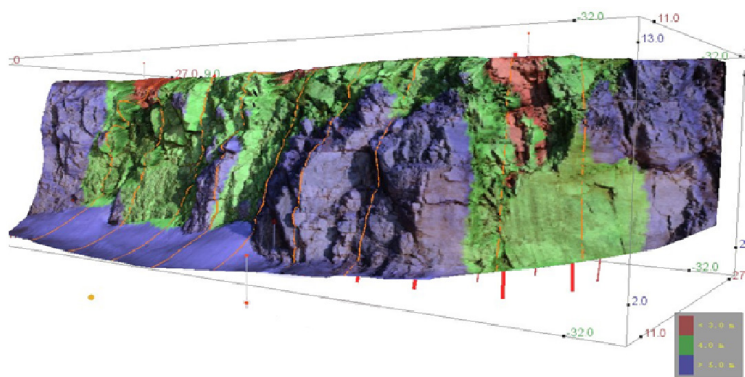


Рис. 5.8. Создание 3D-изображения с цветовым отображением прочностных характеристик горных пород

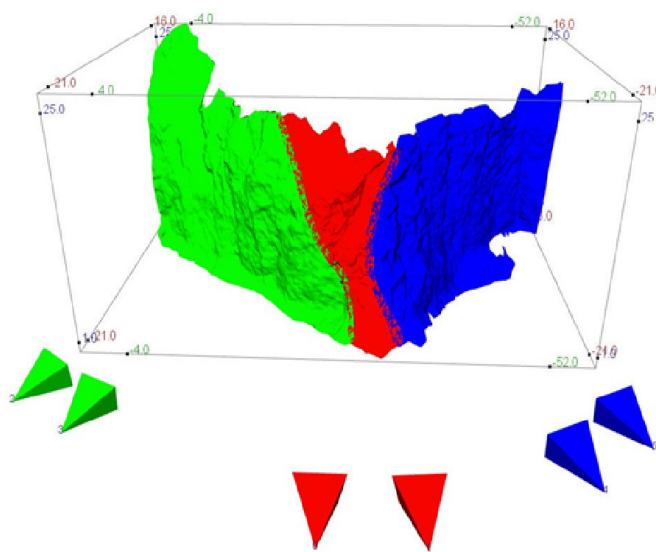


Рис. 5.9. Определение линий наименьшего сопротивления

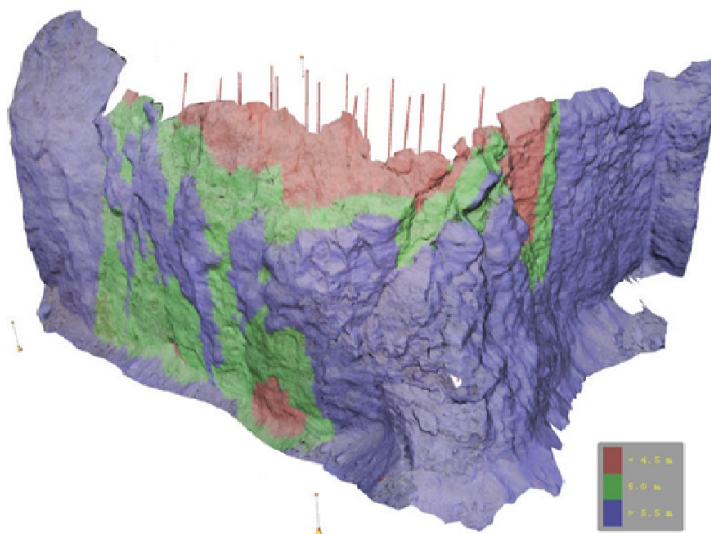


Рис. 5.10. 3D-модель расположения буровзрывных скважин

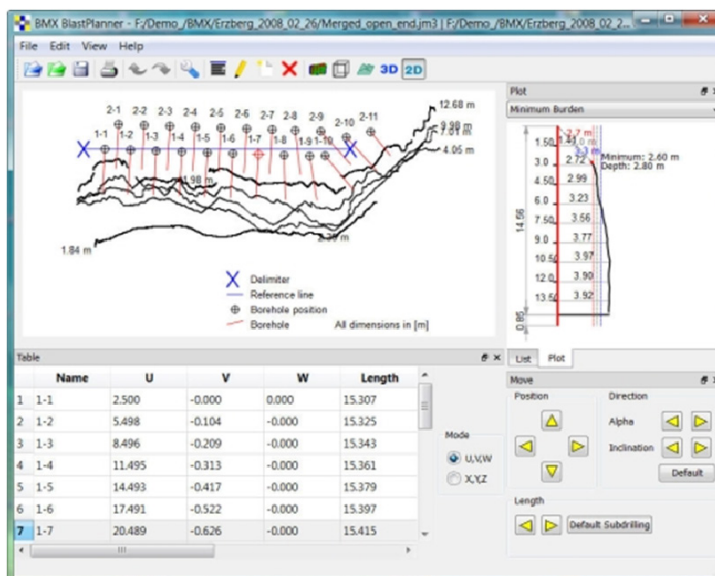


Рис. 5.11. Карта расположения буровзрывных скважин и их параметры

На следующих рисунках приведён пример проекта массового взрыва и оценка его эффективности (см. рис. 5.12–5.18).

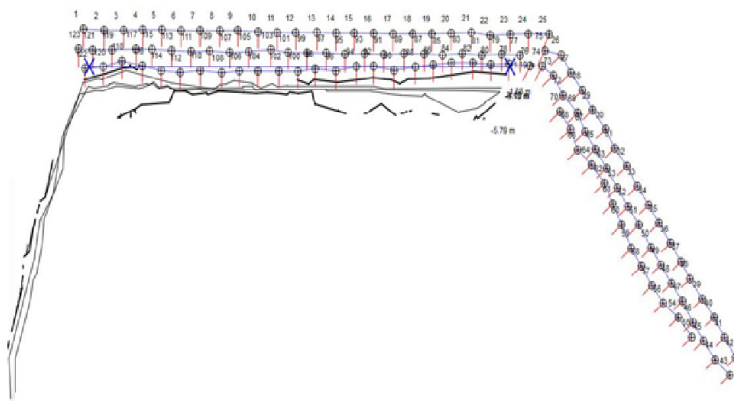


Рис. 5.12. Карта расположения буровзрывных скважин массового взрыва

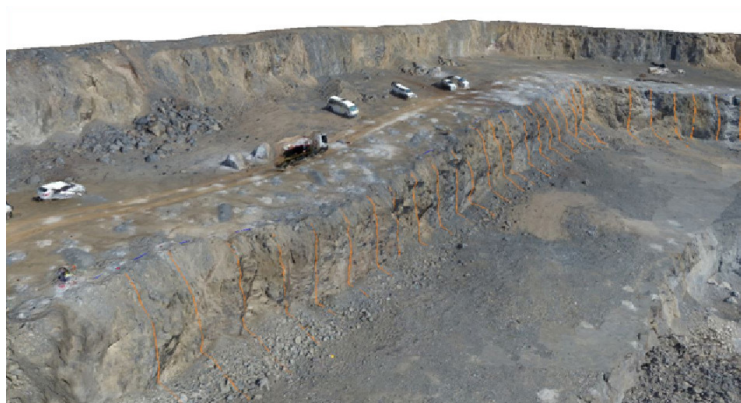


Рис. 5.13. 3D-модель расположения профилей буровзрывных скважин

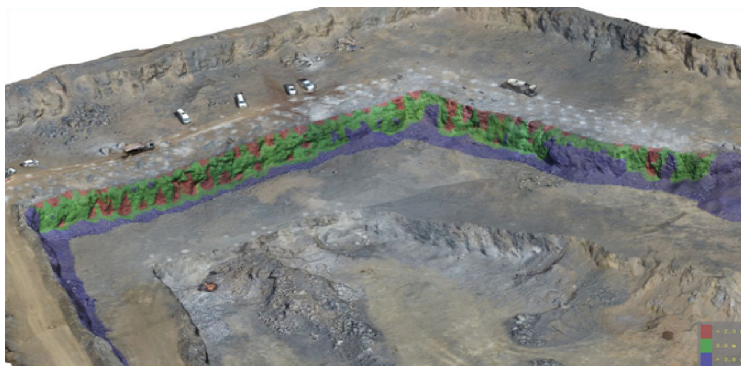


Рис. 5.14. 3D-модель визуализации реальной нагрузки по профилям буровзрывных скважин

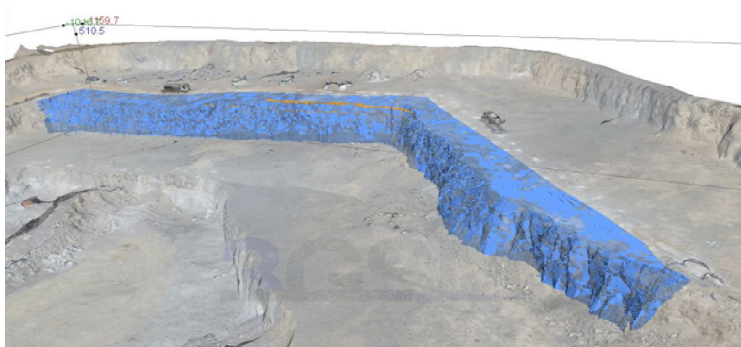


Рис. 5.15. 3D-модель подсчёта ожидаемых объёмов взорванной горной массы



Рис. 5.16. 3D-модель участка горных работ после взрыва

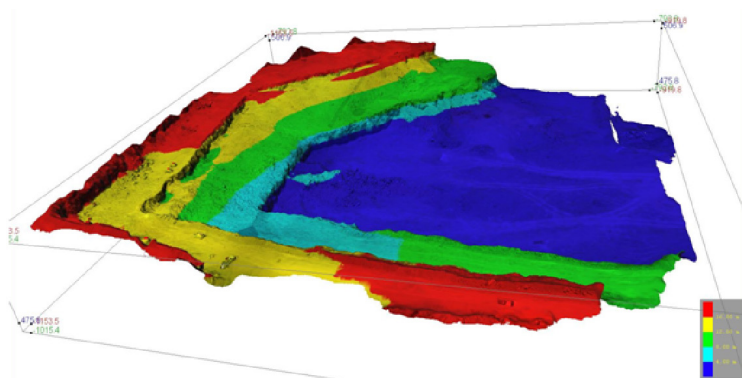


Рис. 5.17. 3D-модель оценки эффективности взрыва

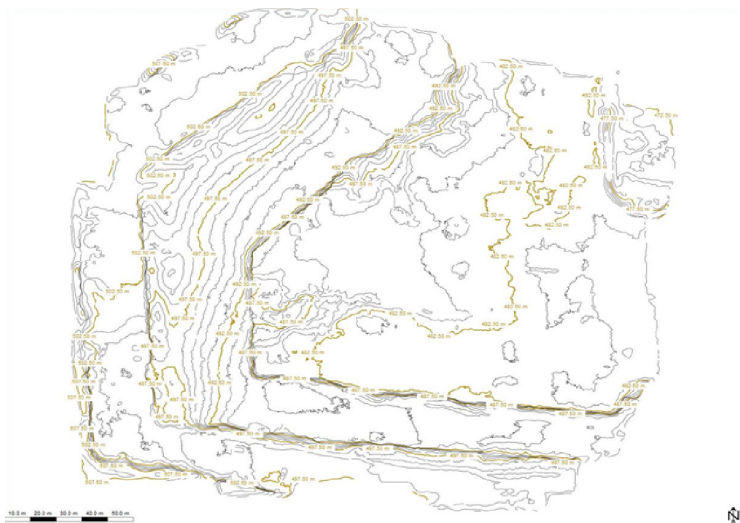


Рис. 5.18. План участка карьера после взрыва

Данное программное обеспечение позволяет обрабатывать и съёмки, выполненные с использование беспилотных аппаратов включая трудно доступные участки (см. рис. 5.19–5.20).

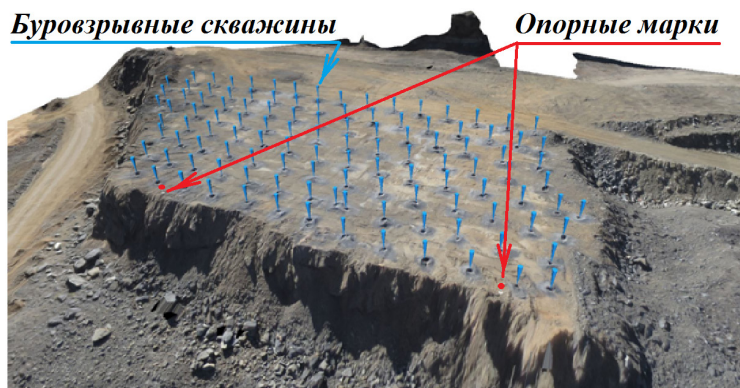


Рис. 5.19. 3D-модель исполнительной съёмки
расположения буровзрывных скважин

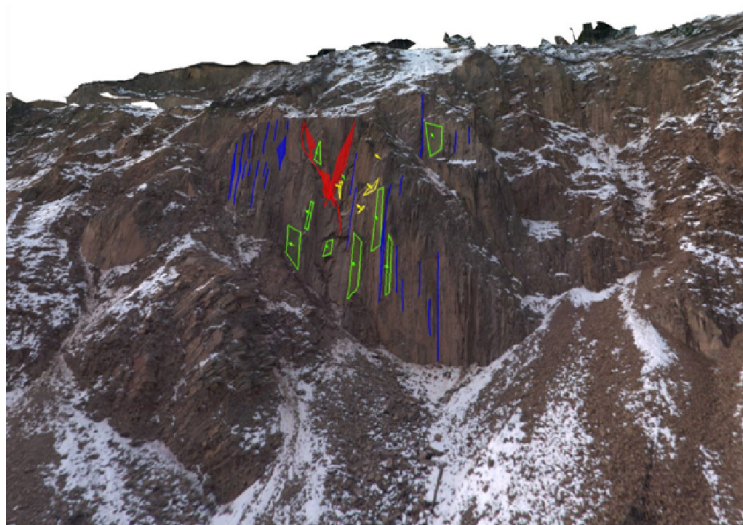


Рис. 5.20. 3D-модель тектонической нарушенности горного массива

5.3. Постобработка съёмок в программе 3DM-Analyst

Программа *3DM-Analyst* представляет собой набор специализированных программных инструментов, предназначенных для обработки 3D пространственных измерений горных объектов путём анализа изображений, сделанных с помощью карманных цифровых камер. Программа разработана фирмой *ADAM Technology, Suite 3, 41 Belmont Avenue, Belmont, Western Australia 6104, Post: P.O. Box 283, Cloverdale, Western Australia* [29].

Полученные 3-мерные данные затем могут быть просмотрены и отредактированы стандартными системами стереовидения, например: *Stereographics Crystal Eyes* или *Z Screen*, и даже при использовании недорогого анаглифа.

Система самостоятельно выполняет калибровку камеры и вычисляет элементы внешней ориентации, чтобы позволить ей создавать эпиполярные изображения, которые затем можно просматривать в стереоприборах. Эпиполярные изображения затем используются для создания 3D-мерной цифровой модели рельефа. Полученные данные также могут быть экспортированы для

Программу *3DM-Analyst* можно настроить для достижения требуемой точности. Обычно точки поверхности измеряются с точностью приблизительно 1/4000-й величины измеряемого объекта.

Для обеспечения наилучшего стереоэффекта общее эмпирическое правило состоит в том, что расстояние между камерами составляет около $1/20$ расстояния, на котором пересекаются лучи камеры (плоскость пересечения) (см. рис. 5.21).



Полученные изображения загружаются в программу 3DM Analyst (рис. 5.22).

На обоих фотоснимках отмечают одни и те же опорные и контрольные точки (см. рис. 5.23). В качестве контрольных точек могут быть использованы любые точечные объекты снимка, хорошо визуализированные на снимках. Большее количество выделенных контрольных точек позволяет с большей точностью определить элементы внешней ориентации положения камеры, положение проекционного центра камеры в пространстве (X , Y , Z) и 3 углов поворота, описывающих ориентацию (направление оси камеры).

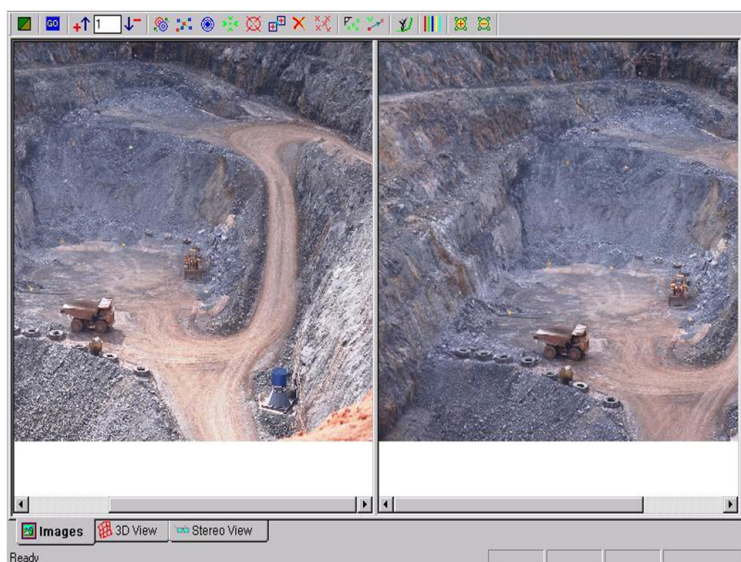


Рис. 5.22. Загрузка стереопар в программу 3DM-Analyst

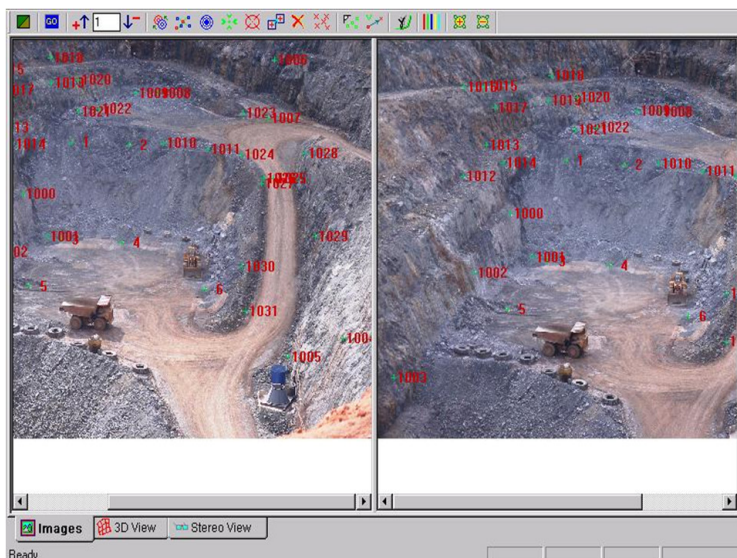


Рис. 5.23. Выделение опорных точек

После эппиплярного пересчёта, который выравнивает изображения для удобства просмотра стерео, вычисляются функциональные точки. Эти функциональные точки затем используются для создания точек цифровой модели рельефа (3D- модели) (см. рис. 5.24).

Правильная ориентация камеры гарантирует, что генерируемые 3D-данные цифровой модели находятся в указанной нами системе координат.

По опорным и функциональным точкам цифровой точечной модели объекта программа в автоматическом режиме строит цифровую модель триангуляции Делоне, создавая треугольники с наиболее равными углами, избегая создания остроугольных треугольников (см. рис. 5.25).

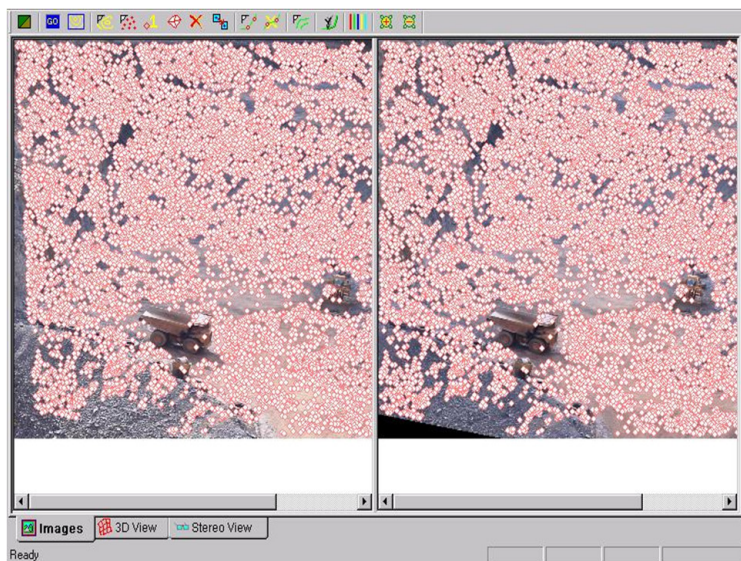


Рис. 5.24. Построение цифровой точечной модели объекта

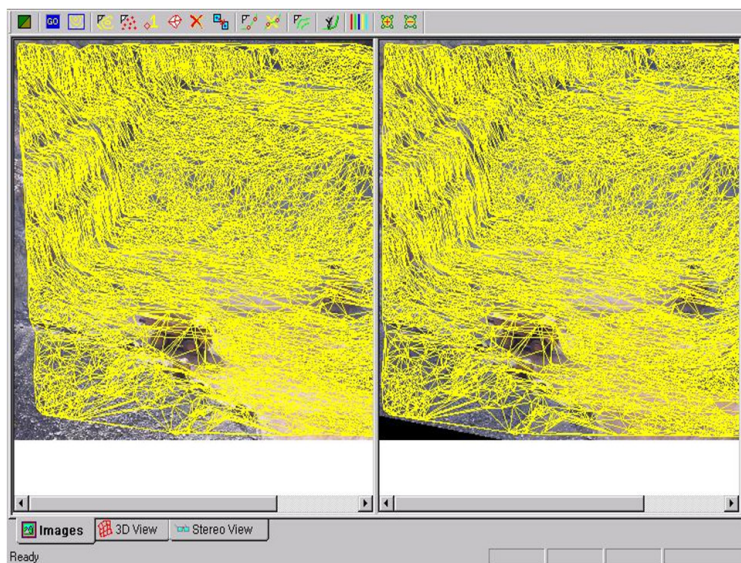


Рис. 5.25. Построение триангуляции Делоне

Трёхмерная триангуляционная сеть используется для интерполяции и построения горизонталей рельефа (см. рис. 5.26).

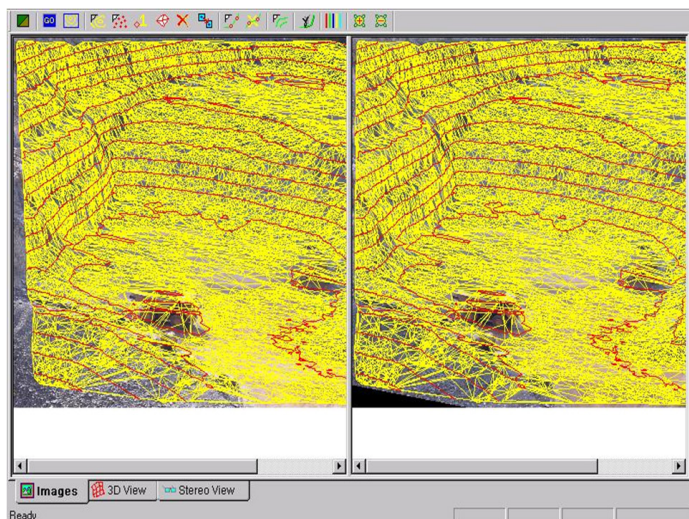


Рис. 5.26. Построение горизонталей рельефа

Трёхмерный вид модели с наложением текстур, взятых с фотографии, может рассматриваться с использованием процедуры 3D-вращения (см. рис. 5.27–5.30).

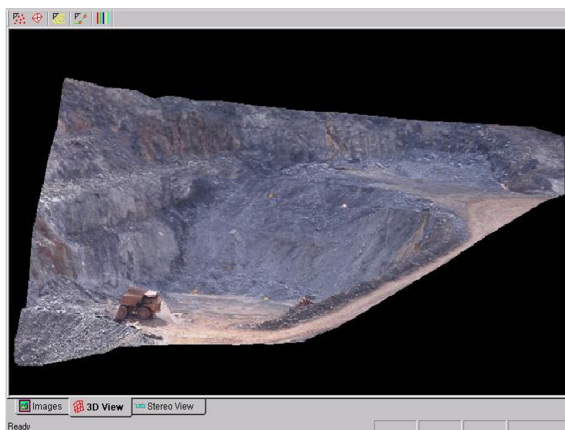


Рис. 5.27. Трёхмерное вращение объекта



Рис. 5.28. Трёхмерное вращение объекта

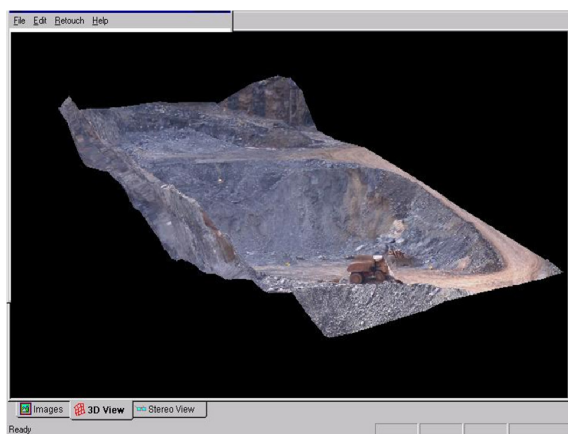


Рис. 5.29. Трёхмерное вращение объекта

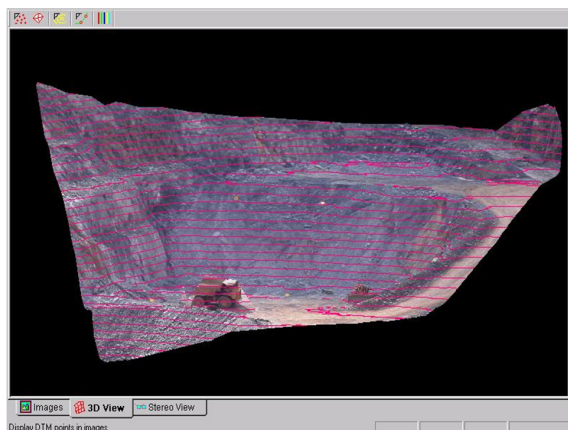


Рис. 5.30. Цифровая 3D модель объекта с наложением текстуры и горизонталей

Полученные 3D-данные могут быть экспортированы в форматы *.dxf и *.maf для использования в других пакетах программного обеспечения (см. рис. 5.31).



Рис. 5.31. Экспорт 3D-данных в другие программы

Просмотр объектов в 3D делает получение 3D-данных простым и точным. При использовании стереосистемы оператор может просматривать объект в 3D, накладывать точки и треугольники цифровой точечной модели в 3D, управлять курсором в 3D пространстве с помощью мыши, добавляя и удаляя точки по желанию. При этом позиция точки в 3D-модели отображается в виде значений координат X, Y и Z в правом нижнем углу окна. Однако программный комплекс позволяет для решения этих задач воспользоваться анаглифическими очками (красный фильтр – левый глаз, синий фильтр – правый глаз) без приобретения специального дорогостоящего оборудования (см. рис. 5.32).

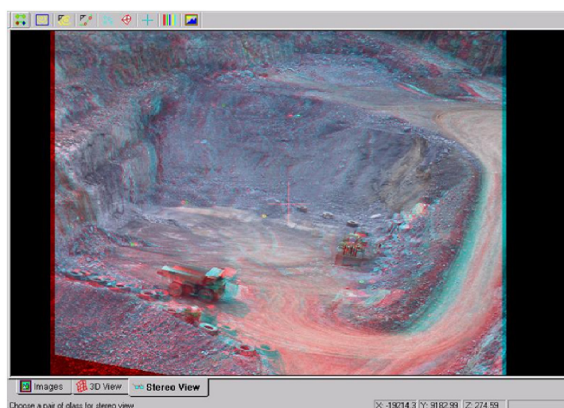


Рис. 5.32. Работа с 3D-моделью в анаглифических очках

Программный комплекс *3DM Analyst* позволяет достаточно быстро эффективно выполнять:

- Измерения на 3D-модели отснятого объекта.
- Определение объёмов выемки и подсчёта запасов.
- Активное сопровождение геодезических и маркшейдерских работ.
- Инженерное картографирование и измерение различных объектов.
- Проводить автоматизированные съёмки и картографирование подземных горных выработок.

5.4. Геоструктурное картирование

Для выполнения геологического структурного картирования выполняют крупномасштабную съёмку участка борта карьера с двух базовых точек. В программу *3DM Analyst* загружают пару стереоснимков (см. рис. 5.33). Отмечают на них опорные точки, ранее закреплённые на снимаемом участке (см. рис. 5.34–5.35), и строят цифровую 3D-модель данного участка (см. рис. 5.36).

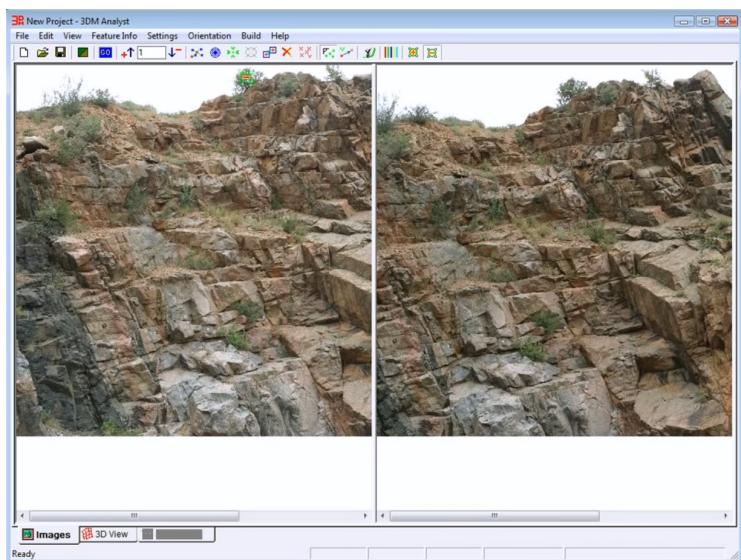


Рис. 5.33. Загрузка в программу стереопары снимков

На основе цифровой 3D-модели участка отрисовывают геологические структуры массива горных пород (см. рис. 5.37), классифицируя их по типам образования (см. рис. 5.38), и строят стереографическую диаграмму трещиноватости (см. рис. 5.39).

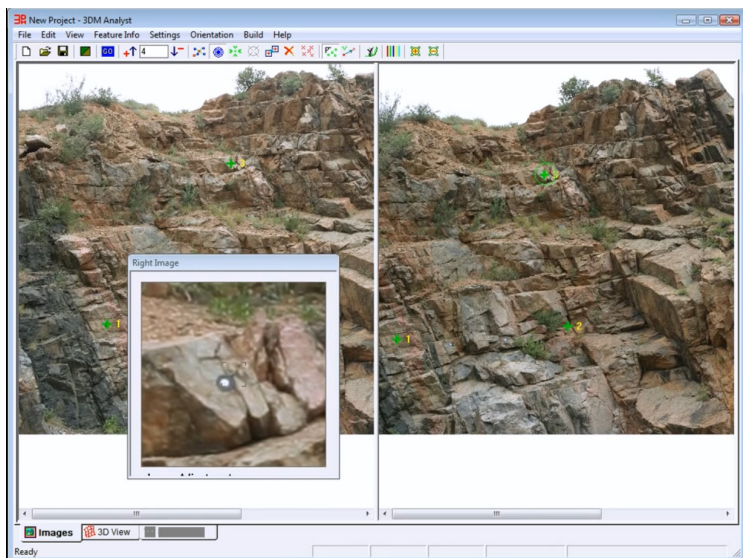


Рис. 5.34. Выделение опорных точек на первом снимке

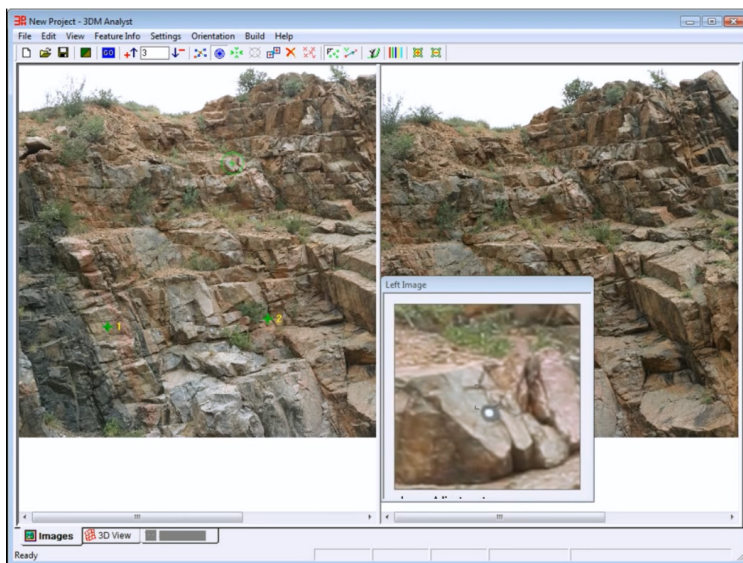


Рис. 5.35. Выделение опорных точек на втором снимке

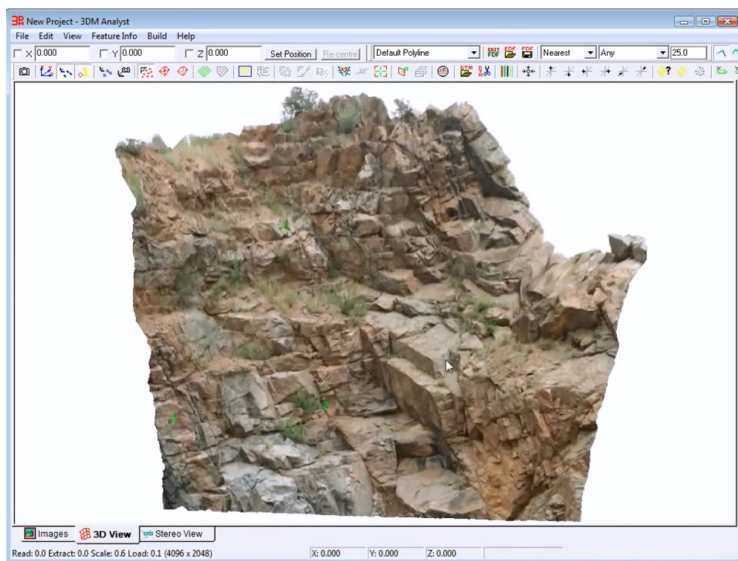


Рис. 5.36. Построение цифровой 3D-модели отснятого участка

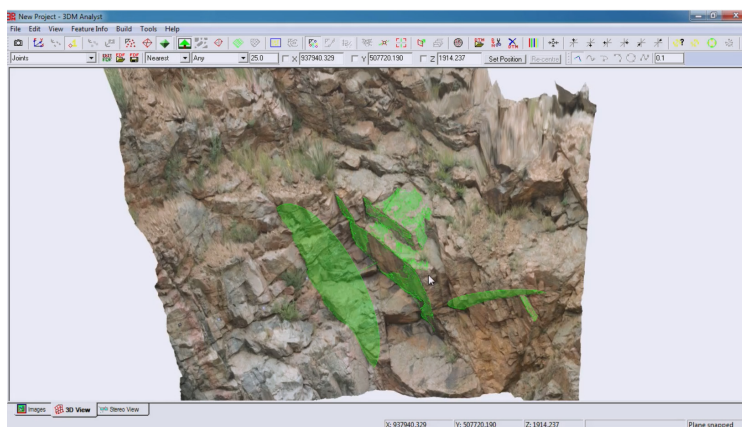


Рис. 5.37. Построение плоскостей трещиноватости горного массива

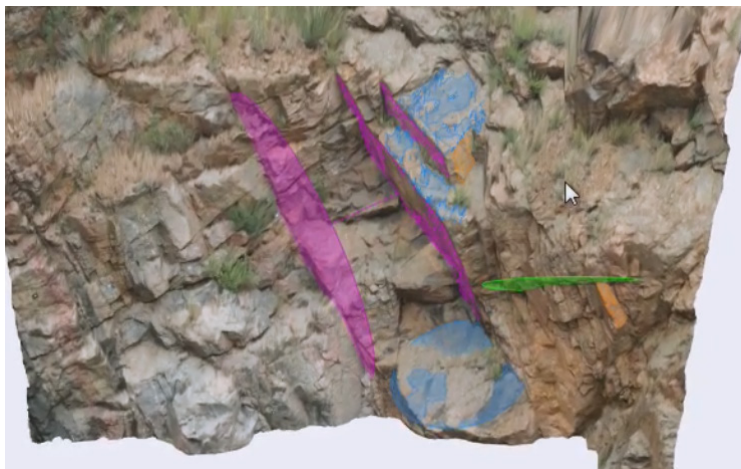


Рис. 5.38. Классификация трещин по типу их образования
(с применением цветовой окраски)

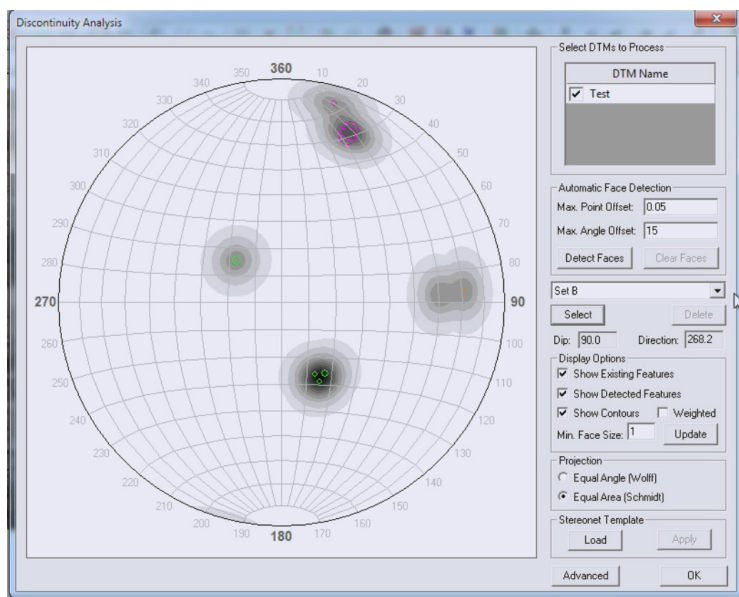


Рис. 5.39. Отражение трещиноватости горных пород
на стереографической проекции

Для съёмок в подземных горных выработках применяют зеркальный фотоаппарат премиум класса, имеющий полноформатную матрицу *Canon EOS 5D Mark II* с короткофокусным объективом 20 мм и мощные светодиодные осветительные системы (см. рис. 5.40).



Рис. 5.40. Фотограмметрическое оборудование для подземных съёмок

Перед выполнением съёмки на стенке горной выработки отмечают опорные точки, расстояние между которыми измеряется для последующего масштабирования снимка и определения элементов внешней ориентации фотокамеры (см. рис. 5.41–5.42).



Рис. 5.41. Разметка опорных точек на стенке горной выработки



Рис. 5.42. Опорные точки на стереомодели

Далее строят цифровую 3D-модель горной выработки (см. рис. 5.43) и начинают выполнять анализ геологических структур (см. рис. 5.44–5.47).

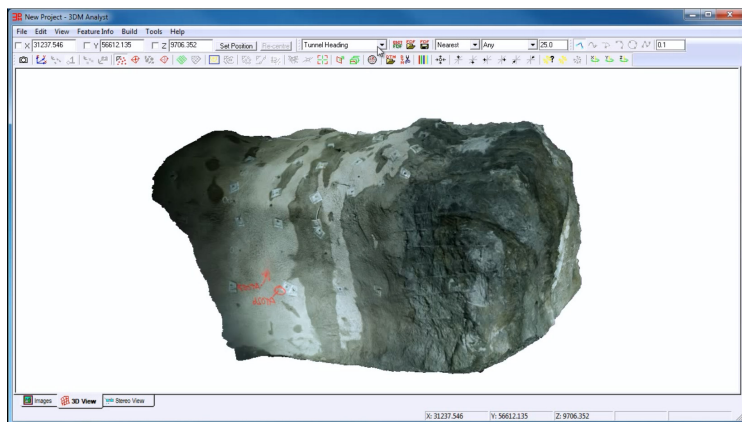


Рис. 5.43. 3D-модель горной выработки

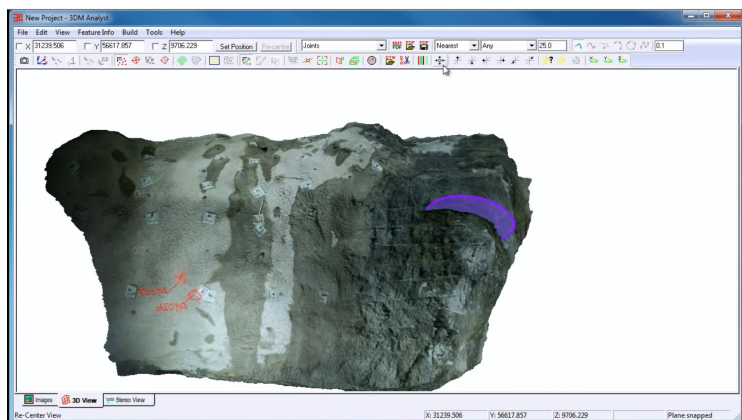


Рис. 5.44. Выделение продольных трещин

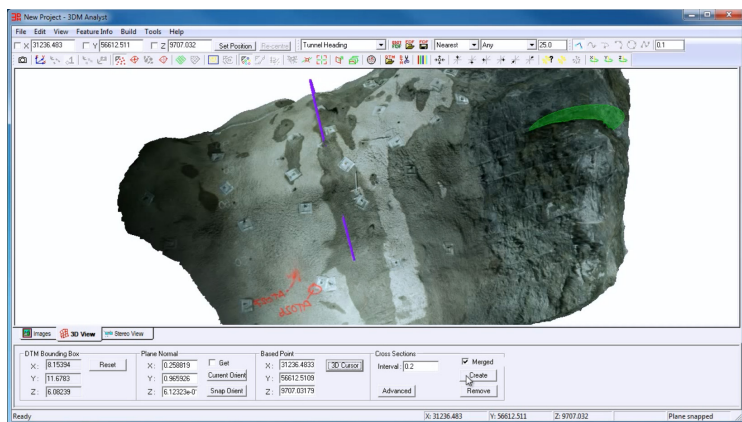


Рис. 5.45. Выделение поперечных трещин

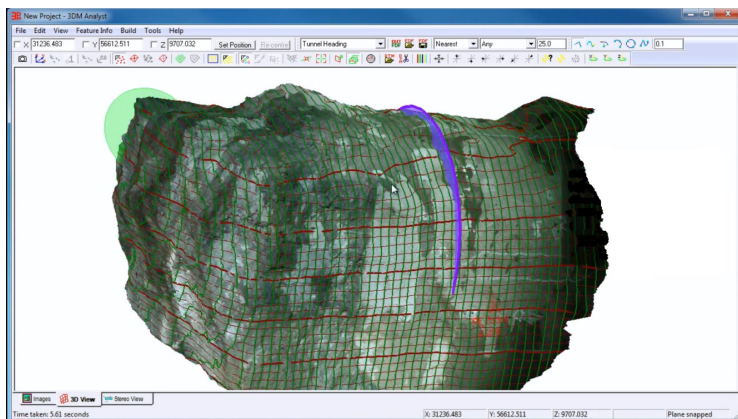


Рис. 5.46. Изогипсы поверхности горной выработки

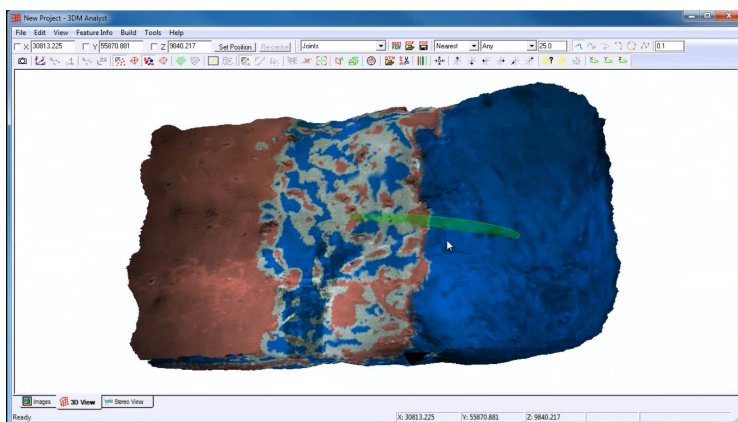


Рис. 5.47. Выделение прочностных особенностей горного массива на 3D-модели

Вопросы для самоконтроля

1. Какое программное обеспечение применяют для геокартирования горных выработок?
2. Какова последовательность выполнения фотограмметрических съёмок при проектировании буровзрывных работ?

3. Сколько опорных точек необходимо иметь при фотосъёмке?
4. Как оценивают эффективность взрывных работ?
5. Для чего применяют программу 3DM Analyst?
6. Что собой представляет цифровая точечная модель?
7. Что такое геоструктурное картирование?
8. Какие объективы следует применять при выполнении подземной фотосъёмки?

Рекомендуемая литература

1. ADAM Technology [офиц. сайт] [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.adamtech.com.au/3dm/analyst.html/> (дата обращения: 25.06.2018).
2. 3GSM GmbH [офиц. сайт] [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.3gsm.at/services/blastmetrix3d/> (дата обращения: 25.06.2018).

ГЛАВА 6

Автоматизированные системы управления геолого-маркшейдерских служб горного предприятия

Развитие компьютерных технологий и внедрение в практику работы геолого-маркшейдерских служб шахт и карьеров цифровых инструментов и приборов (электронных тахеометров, лазерных сканеров) служит мощным толчком к применению на горных предприятиях геоинформационных систем хранения, обработки и анализа данных, получаемых на всех стадиях развития горного производства. Возникает необходимость по преобразованию бумажных видов горно-графической документации в цифровой вид. Наличие возможности у геолого-маркшейдерских служб по созданию объёмных 3-мерных объектов горной инфраструктуры, включая объекты, отражающие форму и качество полезного ископаемого, положение горных работ их пополнение в реальном времени, позволяет производственным технологическим службам внедрять эффективные методы управления производственным процессом.

Использование на горных предприятиях геоинформационных систем позволяет вывести процессы разведки полезных ископаемых, проектирования, планирования и управления на уровень, отвечающий требованиям цифровой экономики.

6.1. Классификация геоинформационных систем

Геоинформационные системы (ГИС) являются одним из видов общераспространённых информационных систем в различных областях науки, образования, производства, и управле-

ния. Имея общие принципы сбора, хранения, обработки и анализа имеющейся информации, геоинформационные системы выполняют задачи по получению дополнительной информации об окружающем нас мире, используя пространственные данные различных географических объектов и природных явлений. Использование данных о положении объектов в пространстве является отличительной особенностью геоинформационных систем от других видов информационных систем.

В настоящее время в геоинформационные системы интегрированы данные других информационных систем, либо функциональные возможности ГИС интегрируются в информационные системы различного назначения. Это говорит об изменении общей информационной среды, о начале перехода к так называемой цифровой экономике.

Геоинформационные системы и связанные с ними геоинформационные технологии позволяют повысить эффективность:

- в образовательном процессе;
- в принятии решений на производстве и управлении;
- эффективность снижения рисков аварий;
- в ликвидации чрезвычайных ситуаций;
- в логистике доставки грузов, оптимизации транспортных потоков.

Геоинформационные системы предназначены для хранения географических данных, их анализа и отображения в удобной для пользователя форме [2]. В прикладных геоинформационных системах, которые применяются в горном деле, визуализация объектов геологической и технологической информации является одним из основных функциональных возможностей программных продуктов. В этом случае пространственные данные, отображаемые в виде моделей горных выработок, рудных тел, объектов технологии, используются для систем управления (диспетчеризации) горными работами, систем мониторинга за горным давлением и сдвижением пород, планированием и проектированием. На рис. 6.1 представлена связь картографической информации с атрибутивной (название выделенного объекта, координаты его местоположения, другие характеристики).

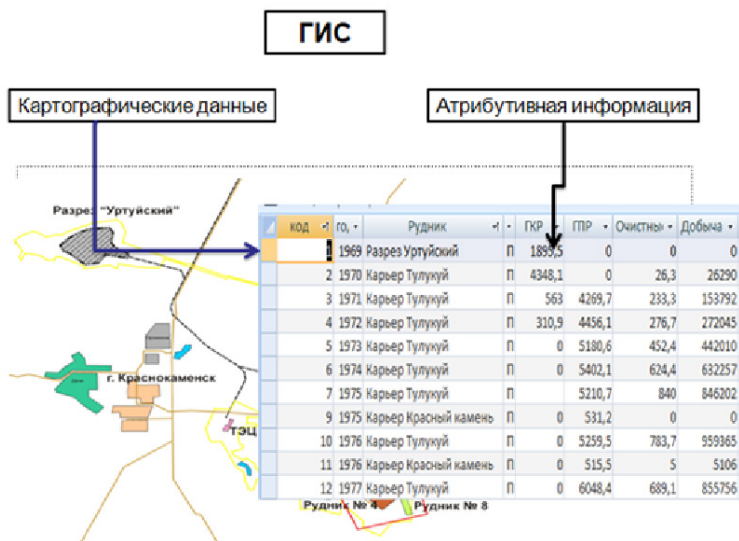


Рис. 6.1. Связь картографической информации с атрибутивной

6.1.1. История развития информационных систем

Развитие технологии ввода, хранения и анализа цифровой информации послужило толчком к созданию геоинформационных систем. Первыми опытами обработки пространственной информации были разработки в 60-х гг. XX вв. в области использования земельных ресурсов Канады. Этот период (1950–1970) включал в себя проведение исследований в пограничных областях знания, эмпирический опыт, первые опытные проекты по созданию геоинформационных систем. В этот же период, впервые для ввода графических данных, было создано сканирующее устройство.

Период 1970–1980 гг. характерен появлением крупных географических информационных систем, включением в данный процесс государственных институтов. Сделан главный шаг, при вводе атрибутивной информации появился признак пространства (координаты, административная единица и т. д.).

В период 1980–1990 гг. началось широкое коммерческое использование геоинформационных систем, связанное увеличением числа программ и внедрением персональных компьютеров. Круг

решаемых задач с использованием геоинформационных систем существенно раздвигается. Появляются возможности использования данных зондирования и навигации спутниковых систем.

С 1990 г. и по сегодняшний день продолжается интенсивное развитие геоинформационных систем. Совершенствуются методы и способы хранения информации. Визуализация картографической информации приобретает вид моделей и используется в различных областях знаний, исследований, управлении и решении производственных задач, используется для анализа рисков и ликвидации аварий службами МЧС и т. д. Развитие систем коммуникации позволяет использовать данные различных геоинформационных систем в любой точке земли.

6.1.2. Классификация ГИС

Большое разнообразие различных геоинформационных систем, интеграция функциональных возможностей и смежных задач из одних систем в другие не позволяет однозначно классифицировать существующие ГИС. Тем не менее возможна следующая классификация:

1. По функциональным возможностям:

А. Полнофункциональные ГИС общего назначения.

В. Специализированные ГИС – для какой-либо области использования.

С. Информационно-справочные.

К специализированным ГИС можно отнести системы автоматизированного планирования, проектирования и оценки запасов полезного ископаемого, используемые производственными службами горных предприятий и геологических партий.

Информационно-справочные геоинформационные системы достаточно прочно вошли в жизнь человека в мобильных приложениях для телефонов и планшетов.

2. По архитектурному строению:

А. Закрытые системы – не имеющие возможности по расширению собственного функционала пользователями системы. К такому виду систем относится большинство программных продуктов в области геологии и горного дела. Изменение и дополнительные функциональные возможности, разработка дополнительных модулей производится разработчиками системы, на основании запросов производственных служб предприятия.

В. Открытые системы – предусматривают адаптацию программного продукта под требования пользователя. Наличие таких возможностей позволяет пользователю значительно увеличить функционал системы.

3. По способу организации пространственных данных:

А. Векторные – картографические данные представлены в координатной привязке в локальной или государственной системе координат.

В. Растровые – объекты представлены растровыми изображениями

С. Гибридные – совместное использование растровых изображений и векторной графики (см. рис. 6.2).

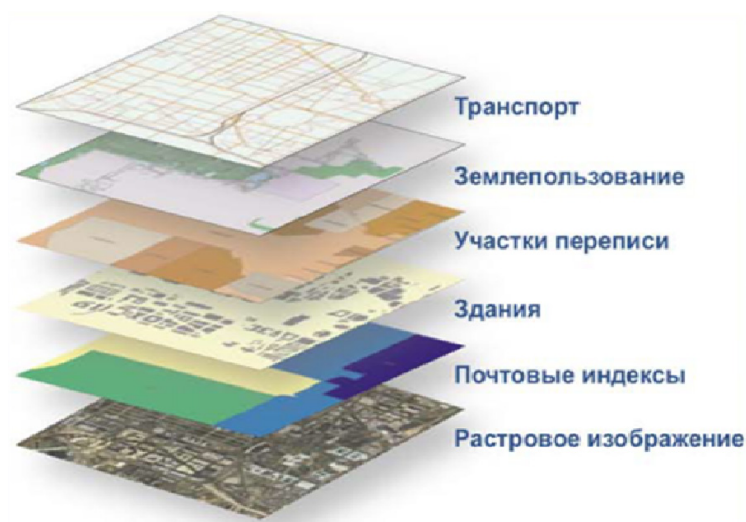


Рис. 6.2. Использование различных типов данных в ГИС

4. По представляемой проблематике:

А. Экологические и природопользовательские.

В. Инженерные.

С. Отраслевые (лесные и водные ресурсы, туристические и т. д.).

Д. Инвентаризационные (кадастровые).

5. По пространственному или территориальному охвату:

А. Глобальные – предназначенные для решения вопросов на планетарном уровне.

В. Общенациональные – направленные на решение задач государственного уровня.

С. Региональные – для получения и анализа информации областей, республик.

Д. Локальные – используемые на уровне городских поселений и районов.

6.1.3. Подсистемы ГИС

Как и любая информационная система, ГИС состоит из набора подсистем, осуществляющих ввод, обработку, хранение, анализ и вывод информации (см. рис. 6.3).

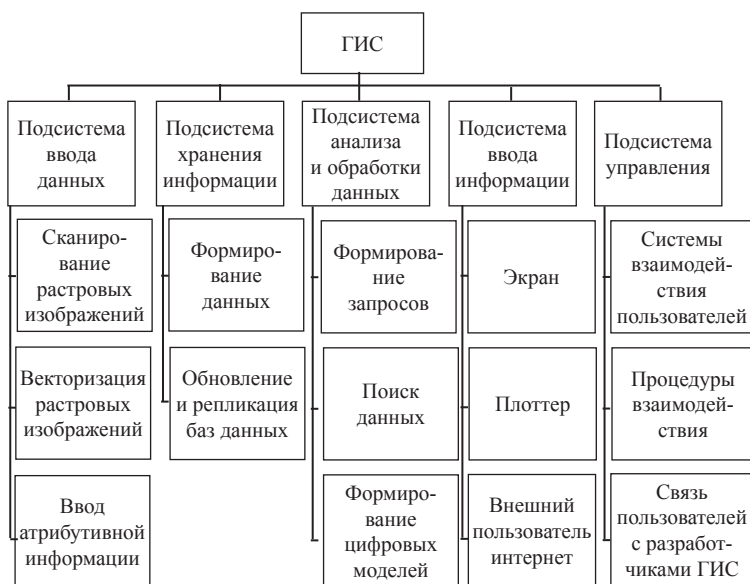


Рис. 6.3. Подсистемы ГИС

1. Подсистема сбора и ввода информации служит для предварительной обработки данных картографической информации, её преобразования в нужный формат для ввода в базы хранения данных.

2. Подсистема хранения информации определяет тип и формат хранения данных, частоту обновления и копирования (репликации) баз данных.

3. Подсистема анализа и обработки данных выполняет задачи формирования запросов и анализа статистических параметров исследуемых массивов информации. В ГИС системах геологии и горного производства устанавливает закономерности в пространственном распределении качественных параметров полезного ископаемого, моделирует форму и изменчивость рудных тел.

4. Подсистема вывода информации определяет, каким способом пользователь получает готовую информацию. Это может быть экран компьютера, мобильного устройства, бумажный носитель, на который выводится информация с помощью принтера либо плоттера.

5. Подсистема управления – очень важный компонент успешного использования ГИС на крупных горных предприятиях. Здесь важна организационная роль, которую выполняет отдельное подразделение (группа) предприятия по сопровождению программного продукта, модификации и созданию дополнительных модулей ГИС, на основе взаимодействия с разработчиками геоинформационных систем. Взаимодействие пользователей ГИС происходит на основе процедур (документов), разрабатываемых группой поддержки системы.

6.2. Модели данных, используемых в ГИС

6.2.1. Растровая модель данных

Растровая модель данных – это цифровое представление пространственных объектов посредством ячеек (пикселей) с присвоением им определённых значений атрибутивной информации. В растровой модели реальное изображение плоских объектов разбивается на определённое число ячеек регулярной сетки (см. рис. 6.4).

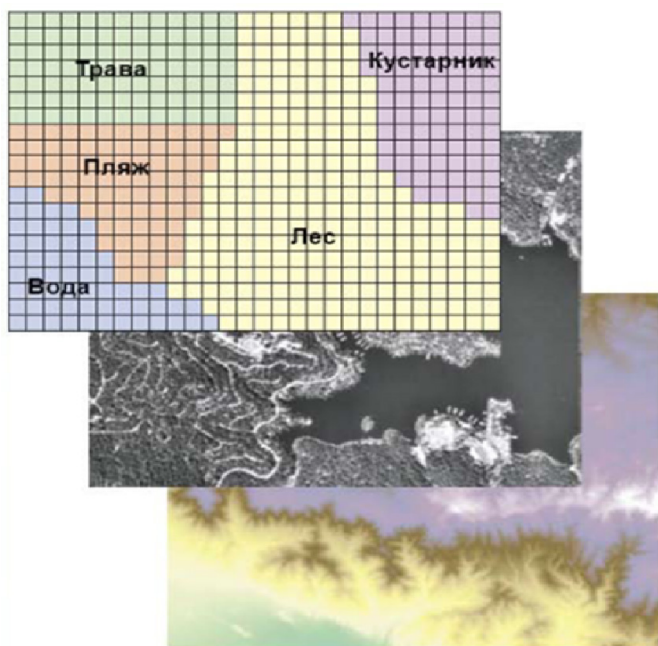


Рис. 6.4. Представление реальной поверхности в растровой модели данных

Пиксели (сокращение от английского словосочетания *picture element-pixel*) обычно представляют квадраты или прямоугольники. Положение пикселя определяется номером их столбца и строки (см. рис. 6.5).

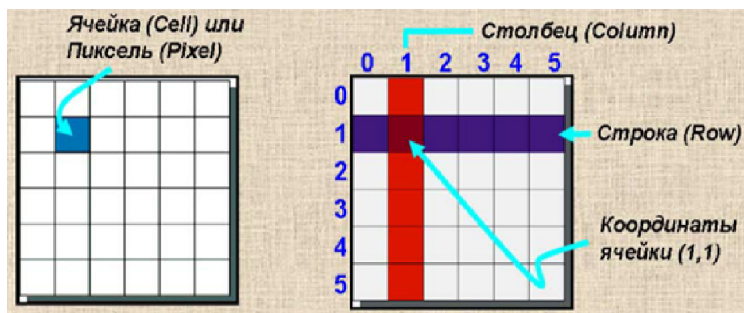


Рис. 6.5. Обозначение ячейки, её координаты

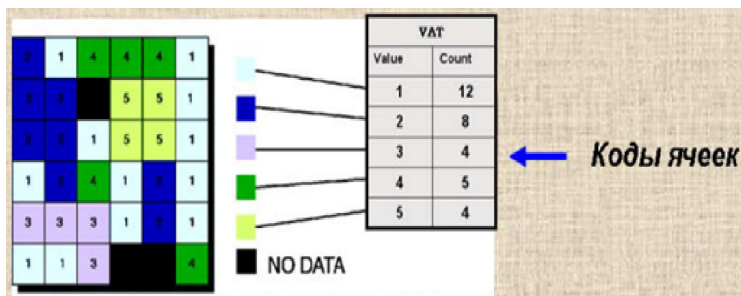


Рис. 6.6. Присвоение атрибутивной информации. Способ 1

Второй способ связывает ячейку модели с базой данных (см. рис. 6.7). Этот подход позволяет связать растровую модель с другими внешними базами данных.

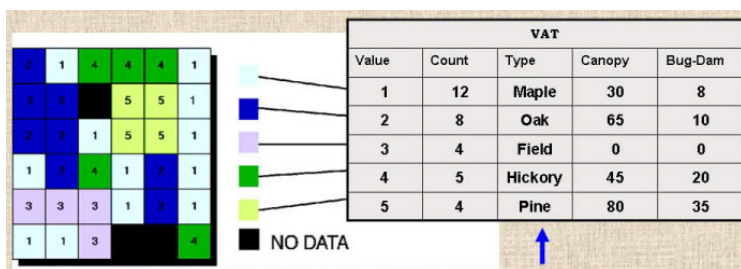


Рис. 6.7. Присвоение атрибутивной информации. Способ 2

При создании тематических растровых моделей карт, используемых для отображения данных землепользования, растительности, гидрогеологии и т. д., создаётся двумерный массив данных с атрибутом отдельной темы. Таким образом, создаются слои (покрытия).

Растровая модель оптимальна для объектов с непрерывными свойствами. Для растровых моделей есть несколько характеристик: разрешение, значение, ориентация, зона, положение.

Разрешение – минимальный размер участка поверхности, соответствующий одному пикселю. Разрешение измеряется в количестве пикселей в одном дюйме изображения, происходит от сокращения (*dot s per inch-dpi*). В ГИС обычно используется разрешение в пределах 100–400 dpi.

Значение – элемент растровой модели, имеющей одно значение, оно может быть цифровым (целое, десятичное) или буквенным. Для улучшения качества растровой модели ряд систем может присваивать одной ячейке несколько значений с указанием их пространственной доли в ячейке.

Положение – определяется значением координат ячейки (номер строки, номер столбца).

Ориентация – угол между направлением на север и положением колонок растра.

Зона – объединение соседних ячеек растра с одинаковыми значениями. Зоной выделяются площадные объекты (геологические тела, элементы гидрографии, типы растительности и т. д.).

6.2.2. Векторная модель данных

Векторная модель данных представляет точечные, линейные, полигональные объекты данных набором пар координат (см. рис. 6.8). В большинстве геоинформационных систем применяются плоские 2D-модели. В ГИС, применяемых в области горного дела и геологии, в основном применяется трёхмерное кодирование.

В векторной модели *точечные объекты* представлены парой координат.

Линейные объекты – связанная последовательность пар координат вершин и узлов.

Полигональные объекты – замкнутая последовательность соединённых линий.

Сложные криволинейные объекты представляются набором большого количества связанных линий (см. рис. 6.9). Чем на большее количество сегментов разбит криволинейный объект, тем точнее описывается его форма. Таким образом, данный вид объектов в векторном представлении имеет приближённое соответствие графических объектов.



Рис. 6.8. Векторное представление данных

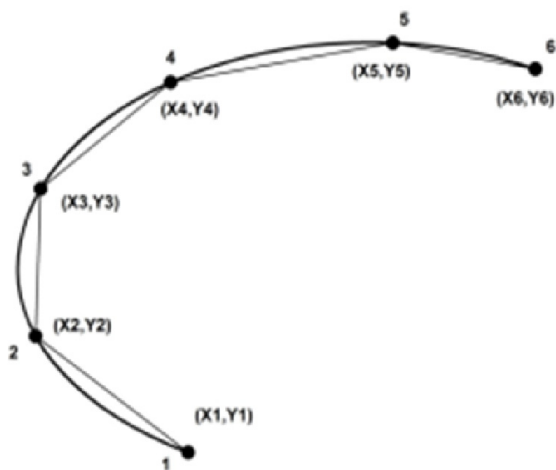


Рис. 6.9. Представление криволинейного объекта набором линейных отрезков

Атрибутивная информация связывается с векторными примитивами в виде точек, линий, полигонов через идентификаторы.

Связь точечных примитивов и атрибутивной информации представлена на (см. рис. 6.10).

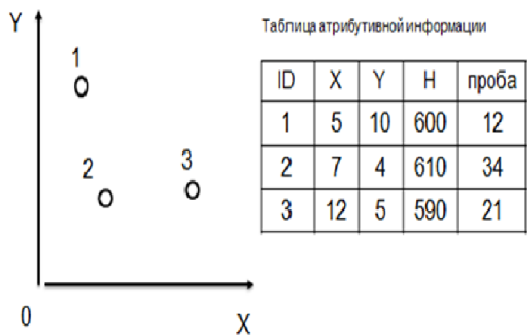


Рис. 6.10. Представление точечных объектов

Линейные примитивы (полилинии) в векторной модели не имеют толщин, могут быть представлены отдельными отрезками, ломаной линией, объединением нескольких линий, имеющих точки пересечения. Отображение линейных объектов представлено на рис. 6.11.

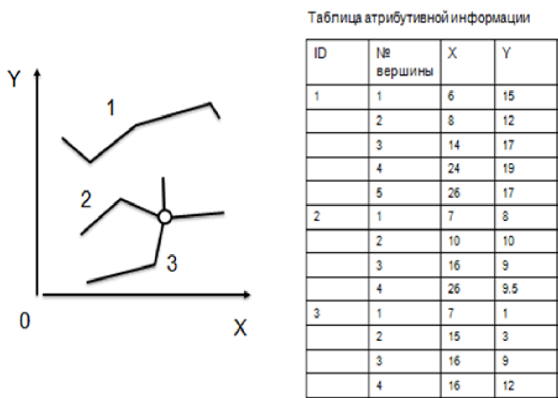


Рис. 6.11. Представление линейных объектов

Полигоны представляют собой пространственные плоские двумерные объекты. Связь атрибутивной информации с объектами типа полигон представлена на рис. 6.12.

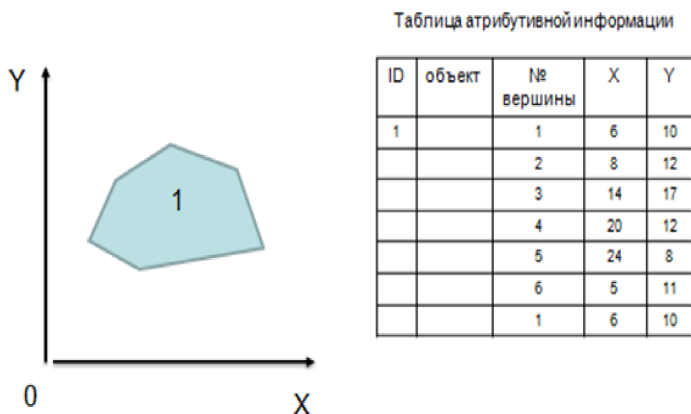


Рис. 6.12. Представление площадных объектов в растровой модели

6.2.3. Векторные топологические объекты

Существует два представления моделей векторных данных: нетопологические и топологические.

Векторные нетопологические модели представляют собой объекты, которые не связаны между собой. Такой вид растровых моделей ещё называют спагетти. В случае имеющейся общей границы между объектами, при изменении границ или перемещении соседнего объекта, общая граница может перестать существовать.

Векторные топологические модели описывают как геометрию объектов, так и их взаимное положение. Элементами структуры топологических векторных моделей являются следующие примитивы: вершина, узел, сегмент, полилиния (дуга), полигон (см. рис. 6.13). Полигон может иметь внутри себя «дыру».

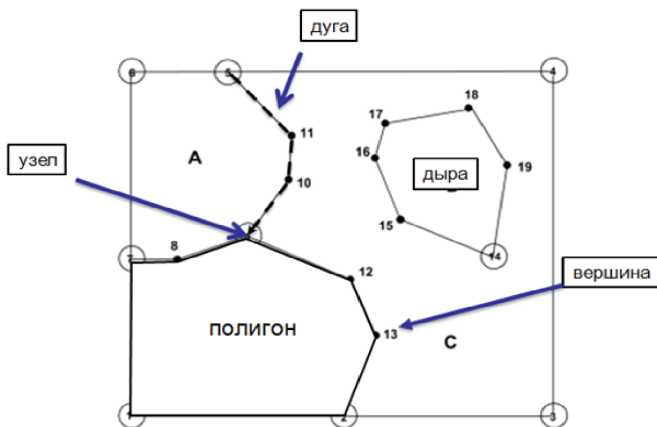


Рис. 6.13. Определение пространственных взаимосвязей

6.2.4. Достоинства и недостатки растровой и векторной модели данных

Предназначение растровых моделей и их основное преимущество – это возможность отображать непрерывные поверхности. Таким образом, если векторная модель данных даёт информацию о том, где расположен объект, то растровая – о том, что расположено в какой-либо точке.

Точность представления данных растровой модели зависит от размера ячеек, тогда как в векторной модели используются физические величины координат примитивов (точки, вершины, узлы).

Пространственные 3D горно-геологические объекты идеально подходят для отображения и анализа информации в векторной модели представления сложных объектов.

Цифровые снимки поверхности земли для целей зондирования и мониторинга широко используются в растровых моделях данных. На основе пространственных распределений данных, используя методы наложения информации, имеется возможность статистического анализа информации, её визуализации для целей дальнейших исследований, например в области наблюдений за состоянием окружающей среды.

Основными недостатками растровой модели являются:

- большой объём занимаемой памяти;
- трудоёмкие операции редактирования объектов модели;
- ограниченный набор форматов для вывода информации на печатное устройство.

К недостаткам растровой модели можно отнести невозможность отображения плавных переходов свойств объектов. В последнее время геоинформационные системы зачастую используют оба типа представления моделей данных.

6.3. Хранение информации

Хранение информации в геоинформационных системах организовано в виде организованного набора взаимосвязанных файлов, иначе говоря, базы данных (БД), организация и управление которой осуществляется системами управления базами данных СУБД [6; 12; 25].

Описательные свойства пространственных объектов являются атрибутивной информацией, которая в геоинформационных системах хранится в базах данных, как правило, в виде таблиц. Строки таблицы соответствуют названиям объектов, а колонки свойствам объектов.

Для ускорения процесса поиска нужных записей используют так называемую индексацию данных в БД. Индекс базы данных аналогичен предметному указателю в книге (см. рис. 6.14).

Предметный указатель, в котором ключевые слова расположены в алфавитном порядке, позволяет сразу же перейти к нужной странице. Индексы позволяют избежать последовательного перебора записей для поиска нужных записей в БД. Индексы могут быть простыми и составными.

Структура базы данных зависит от вида используемой модели данных, атрибутивной информации, системы управления данными. Основные требования к базе данных следующие:

- достоверность;
- точность представления пространственных данных;
- простота и лёгкость обновления данных;
- доступность для пользователя.

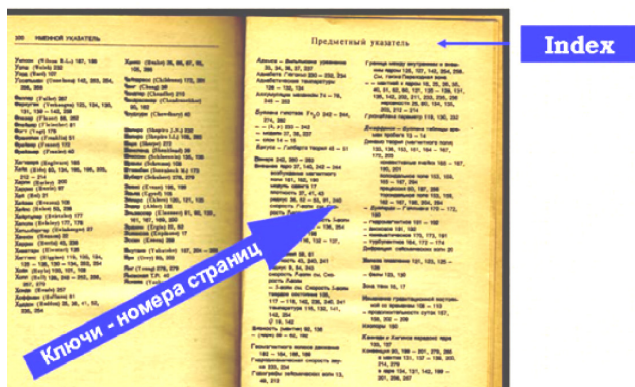


Рис. 6.14. Индекс – предметный указатель

Система управления базами данных содержит в своём составе ядро, которое управляет данными в оперативной и внешней памяти. СУБД осуществляет журнализацию изменений, резервное копирование и восстановление данных после сбоев. Процессор языка программирования и сервисные программы по обслуживанию базы данных – неотъемлемые части системы управления базы данных (СУБД).

6.3.1. Типы баз данных

Иерархическая БД – представляет собой упорядоченный набор записей в древовидной вертикальной многоуровневой форме. У главного объекта может быть несколько подчинённых на нижних уровнях. Такая ступенчатая организация затрудняет поиск данных из-за необходимости последовательно проходить несколько уровней предшествующих записей.

Сетевые БД – подобны иерархическим, но у них есть возможность дополнительно восстанавливать к вертикальным связям горизонтальные. Поиск данных в этом случае зависит от физической организации структуры БД, что является её недостатком.

Реляционные БД – наиболее распространённый тип баз данных. Организация данных в этом случае происходит в виде набора простых двумерных таблиц с записями данных. Строки таблицы – записи атрибутивных данных. Каждая колонка содержит

неповторяющиеся записи в таблице. Одинаковые строки в таблице отсутствуют. Колонки содержат данные одного типа (числовой, символьный). Связывание или объединение таблиц осуществляется через уникальные (неповторяющиеся) записи в колонках таблицы, которые называются ключами. Отношения между таблицами данных могут характеризоваться следующими связями данных: один к одному, один ко многим или многие к одному, многие ко многим (см. рис. 6.15).

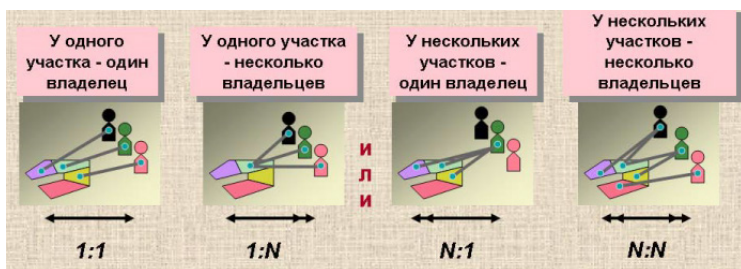


Рис. 6.15. Соотношения между таблицами данных

Объектно-ориентированная БД – база данных в виде моделей объектов.

По способу доступа – делятся на базы данных с локальным доступом и базы данных с удаленным или сетевым доступом.

Локальные базы данных и система их управления находятся на одном компьютере, например *Microsoft Access*.

Базы данных с удалённым доступом организуются по принципу файл-сервер или клиент-сервер.

В случае организации БД по принципу файл-сервер на одной из машин (центральной) в сети хранится совместно используемая база данных. Файлы базы данных на основании запросов передаются на компьютеры пользователей данной сети, где и производится их обработка. Пользователи могут создавать свои локальные базы данных. Недостатком такой организации является снижение производительности системы в случае обращения пользователей к одной и той же информации.

Клиент-серверные системы помимо хранения централизованной базы данных обеспечивают и выполнение основного

объёма обработки данных. Для извлечения и передачи данных применяется структурированный язык запросов (*SQL-Structured Query Language*).

Преимуществами клиент-серверной системы является высокая надёжность, улучшенная производительность и безопасность. Примеры таких систем – *Oracle, Firebird/Interbase, MS SQL Server*.

6.4. Ввод данных

6.4.1. Устройства ввода данных

Ввод данных в геоинформационные системы осуществляется различными способами: с помощью специальных устройств преобразования изображений (дигитайзеры, сканеры); графических устройств (мышь, перо, курсор); устройств ввода атрибутивной информации (клавиатура); аппаратных средств съёмки объектов (GPS-приёмники, лазерные сканеры, электронные тахеометры).

Дигитайзеры применялись на ранних стадиях развития геоинформационных систем. В этом случае бумажную основу закрепляли на планшете и специальным устройством (типа мыши) обводили контуры изображения с периодической регистрацией координат линий и точек.

Сегодня перевод графических объектов осуществляется по растровому изображению, полученному с помощью сканера. Имеются несколько типов сканеров: ручной, планшетный, барабанный, рулонный.

Применение на горных предприятиях геоинформационных систем, прежде всего, начинается с перевода бумажных форм документации в цифровой вид, созданием баз данных опробования запасов полезного ископаемого.

Геолого-маркшейдерская документация выполнена на «твёрдой основе», что требует применения большеформатных планшетных сканеров (см. рис. 6.16).



Рис. 6.16. Большеформатный планшетный сканер

Для сканирования документации на мягкой основе используются рулонные сканеры (см. рис. 6.17).



Рис. 6.17. Рулонный широкоформатный сканер

Атрибутивная информация баз данных опробования, выполненная в табличной бумажной форме, вводится в БД с помощью клавиатуры.

6.4.2. Процедура оцифровки графической информации

Процесс перевода горно-графической маркшейдерской и геологической документации в цифровой вид называется векторизацией. Векторизация растровых изображений, полученных с помощью сканера, осуществляется тремя способами.

Ручной способ – применяется при обработке изображений плохого качества, либо сложных объектов на растре.

Автоматический способ – существенно сокращает время на процесс векторизации. Используется в основном при обработке растров с разреженным расположением объектов с чёткими границами. Обязательной процедурой в этом случае является проверка и корректировка полученного результата автоматической векторизации.

Полуавтоматический способ – наиболее применим для целей векторизации горно-графической документации. В этом случае оператор непосредственно контролирует процесс и в случае необходимости осуществляет необходимую корректуру объектов.

Примерами программ обработки векторизации растровых изображений могут служить программы *Map Edit*, *Easy Trase*, приложения к *Autocad*.

Оцифровка и векторизация растровых изображений производится в несколько этапов и изображена на рис. 6.18.



Рис. 6.18. Этапы процесса векторизации

Сканирование горно-графической документации осуществляется с точностью 0,1 мм. Для соблюдения этого требования достаточно выполнять сканирование с разрешением в 300 dpi.

Хорошее качество исходных растров крайне важно для успешной векторизации, но, как правило, рабочие планшеты имеют различные дефекты, затёртости, размытости, склейку линий. Во время сканирования необходимо подобрать оптимальные значения яркости и контрастности сканирования. Не стоит полагаться на параметры, устанавливаемые автоматически. Может оказаться удобным несколько завязать уровни яркости и контрастности, так как программы автоматической векторизации легко справляются с пропусками и разрывами, но «не любит» заливок и «слипшихся» линий. Как правило, единожды подобранные уровни оптимальны для целой серии исходных материалов.

Обязательным условием сканирования является включение в растр узлов пересечения линий координатной сетки, которые используются для привязки растров к существующей системе координат на предприятии.

Рассмотрим процесс векторизации на примере отечественного продукта – *Easy Trace*. На рынке присутствуют как профессиональные платные, так и свободно распространяемые версии данного ПО. Применяемые методы обработки растров и способы векторизации во многом схожи с другими аналогичными векторизаторами.

Пакет *Easy Trace* позволяет производить оцифровку растровых изображений в ручном, автоматическом либо полуавтоматическом режиме.

6.4.2.1. Улучшение качества сканированных изображений

Успешная и качественная векторизация начинается с процесса сканирования и подготовки растровой подложки. Сканирование может производиться как в монохромном (чёрно-белом) виде, так и в цветном изображении. Разрешение 300–400 dpi, устанавливаемое при сканировании бумажных копий, вполне достаточно для качественной векторизации.

В дальнейшем с помощью инструментов пакета *Easy Trace* изображения (растры) необходимо преобразовать в монохромный (чёрно-белый) вид. Векторизация по чёрно-белой подложке выполняется значительно быстрее и удобнее. Однако это далеко

не всегда возможно, поскольку исходный материал в большинстве случаев – цветное изображение. Инструмент бинаризации как раз и предназначен для выделения чёрно-белых (монохромных) растров из цветных (см. рис. 6. 19).

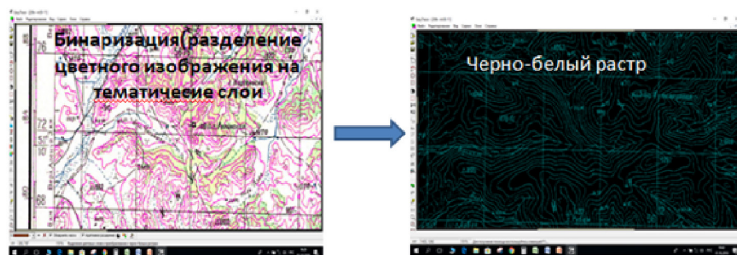


Рис. 6.19. Работа с инструментом бинаризации

Выделяемые растры называются тематическими слоями (например, слои гидрографии, дорог, лесов, рельефа и т. д.) (см. рис. 6.20).

Фильтрация растров – обязательная операция, предшествующая векторизации. Трассировщики весьма болезненно относятся к кавернам в линиях и могут «цепляться» за посторонний мусор при поиске продолжений в местах, где линии разорваны. Для растров разной степени (и вида) зашумлённости оптимальными будут свои параметры фильтрации. Подбираются они экспериментально. Масочная фильтрация может существенно улучшить форму растровых линий после сканирования или операций цветоделения. «Лучшая форма» означает меньшее количество выступов, каверн, «слипаний» и разрывов в линиях (см. рис. 6.21).

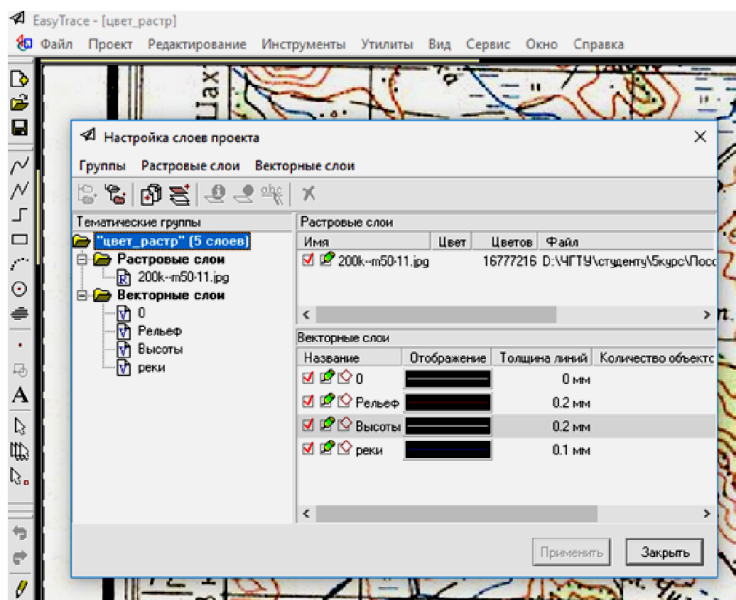


Рис. 6.20. Разделение информационных элементов по слоям

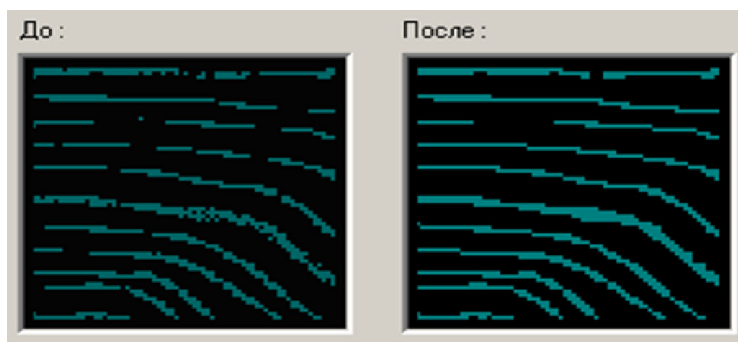


Рис. 6.21. Масочная фильтрация

Векторные линии, полученные из «хороших» растровых, могут вообще не требовать правки. Даже после автоматической векторизации. «Плохие», напротив, могут свести к нулю достоинства полуавтоматической трассировки. Масочная фильтра-

ция – обязательный этап подготовки растра к автоматической векторизации. В ряде случаев применение масочных фильтров позволяет сделать пригодным для обработки «автоматом», казалось бы, совершенно безнадёжный материал.

6.4.2.2. Регистрация растра в существующей системе координат

Следующим этапом подготовки растрового материала к оцифровке является привязка (регистрация) растра к существующей системе координат на горном предприятии. Одновременно с привязкой происходит процесс корректировки (растяжения-сжатия) и подгонки растрового изображения к линиям сетки координат. Имеются несколько способов привязки растра. Оптимальным выбором будет вариант по регулярной сетке координат (см. рис. 6.22).

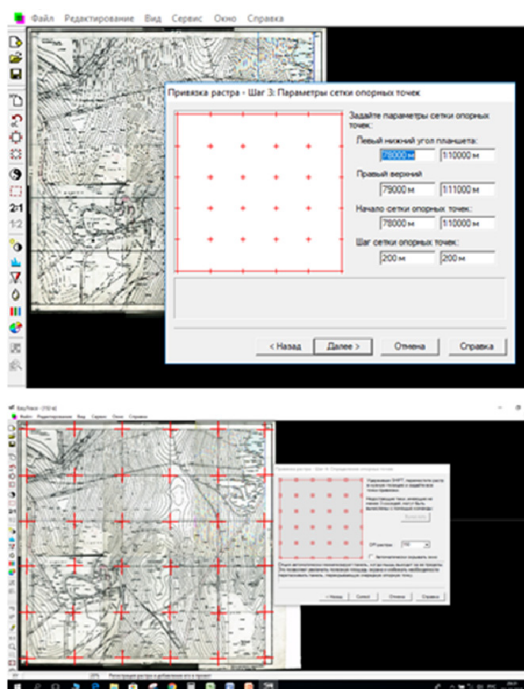


Рис. 6.22. Привязка растра к существующей системе координат

В этом случае растр выравнивается относительно поля проекта с помощью кусочно-проективного преобразования каждой ячейки, образованной линиями сетки. Ячейка растягивается за углы так, чтобы каждый угол попал в заданное линиями пересечения идеальной сетки положение. Этот процесс позволяет максимально устранить и погрешности при сканировании, и искажения исходного горно-графического материала.

6.4.2.3. Процесс векторизации

Перед началом процесса векторизации необходимо предусмотреть возможность разделения цифровой информации на различные слои, выбрать тип условных знаков и линий, используемых в дальнейшем для обозначения объектов. Для создания атрибутивной информации в данном пакете предусматривается внесение данных во внешнюю БД.

Источником атрибутивных данных могут служить как разнообразные подписи на исходном растре, так и специфические типы линий, условные символы и заливки полигональных объектов. База данных проекта *Easy Trace* состоит из набора атрибутивных таблиц, хранящихся в виде отдельных файлов классического формата DBF. Атрибутивная таблица состоит из набора записей заданной структуры. Фактически запись – это строка атрибутивной таблицы. С каждым векторным объектом связывается своя запись. В свою очередь запись представляет собой набор полей для хранения данных различного типа. Каждое поле записи содержит отдельный атрибут объекта. Например, для слоя «здания» в таблице линий введены характеристики материалов, из которых изготовлены сами объекты (см. рис. 6.23).

Сам процесс векторизации заключается в выборе соответствующих инструментов для оцифровки кривых линий, ортогональных линий, ломаных линий, точечных линий, прямоугольников, окружностей и заштрихованных областей. Результатом всех действий по векторизации будет созданный векторный файл в подходящих для большинства ГИС форматах (см. рис. 6. 24).

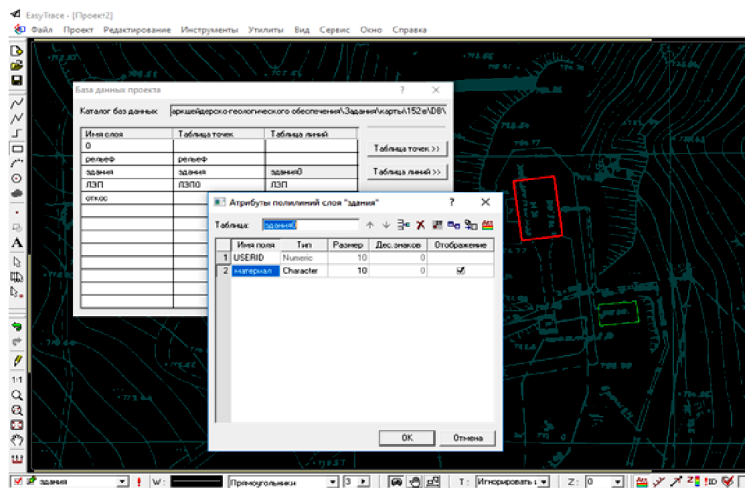


Рис. 6.23. Атрибутивные данные хранятся в таблицах баз данных

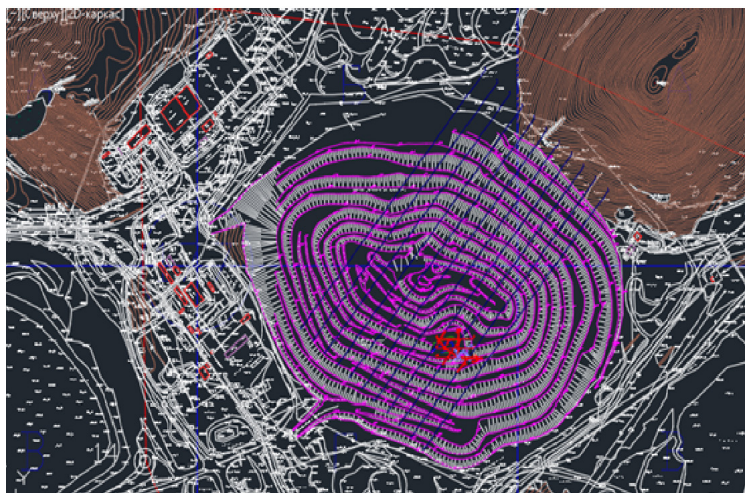


Рис. 6.24. Векторный файл в специальном ГИС-формате

6.5. Цифровые модели

6.5.1. Цифровые модели поверхностей

На горно-графической документации поверхности, отражающие рельеф земной поверхности, форму, условия залегания и качество полезных ископаемых, изображают в виде линий одного уровня (горизонтали), либо линии с одинаковыми значениями измеряемой величины (изолинии кровли и почвы пластов, изолинии мощности и т. д.). В ГИС для отображения поверхностей используются цифровые модели, создаваемые для наиболее точного и эффективного решения задач горного производства. Существует два способа создания цифровых моделей поверхности (ЦМП):

1. По регулярной сетке данных, так называемые GRID-модели. Примером может служить создание рельефа поверхности при использовании снимков дистанционного лазерного зондирования. Регулярная модель может быть представлена в виде растровой сетки, где у каждого пикселя могут быть свои значения. Достаточно простой математический аппарат по созданию регулярных моделей позволяет широко использовать их для анализа информации. В горном деле GRID-модели используются при различных математических операциях с поверхностями (вычитание, сложение, умножение и т. д.) для разнообразных гипсометрических графиков и вычисления объёмных показателей выемки, насыпи, складов полезного ископаемого.

2. Нерегулярная сетевая модель, создаваемая на основе мест характерных точек поверхности. Примером может служить тахеометрическая съёмка поверхности карьера. В этом случае основным типом создания модели поверхности служат так называемые TIN-модели (триангуляционная нерегулярная сеть). Модель представляет собой сеть треугольников, которые создаются в большинстве случаев алгоритмом триангуляции Делоне. Суть способа триангуляции изображена на рис. 6.25.

В геоинформационных системах, применяемых в горной практике, используется в основном другой тип TIN-моделей поверхности. Это TIN-модели с дополнительными структурными линиями. Задавая дополнительные структурные линии, можно задать, тем самым, дополнительные рёбра. Рёбра не могут пересекать структурные линии.

На рис. 6.27 представлены две комбинации формирования рёбер, от которых зависит форма горизонталей поверхности. Возможность формирования дополнительных ребер позволяет более точно сформировать цифровую модель поверхности.

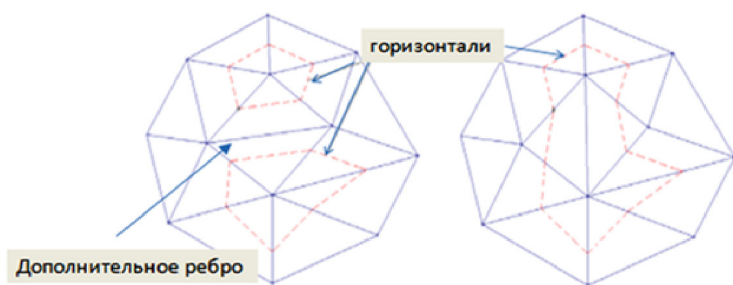


Рис. 6.27. Формирование горизонталей путём поворота ребра треугольников

6.5.2. Геологические и горно-технологические модели

Геологические объекты полезных ископаемых в геоинформационных системах отображаются в виде 3-мерных моделей. Представление тектонических нарушений, плоскостей смещения выполняется в виде триангуляционных поверхностей, TIN-моделей, подобных для отображения рельефа земной поверхности. Создание таких моделей зависит от вида исходной геологической информации.

В первом случае, создания моделей поверхности геологических нарушений на основе имеющихся геологических разрезов, необходимо будет произвести их оцифровку. Затем полученную векторную модель каждого разреза требуется модифицировать из двумерных плоскостных координат (X , Y) в пространственные 3-мерные координаты (X , Y , Z). Такие преобразования можно осуществить как в обычных CAD-системах, так и в специализированных пакетах ГИС [10].

Во втором случае, по материалам геологического опробования (скважины, шпуры, шурфы, канавы), создаются TIN-модели поверхности геологических нарушений по точкам нерегулярной сети данных опробования.

Модели рудных полезных ископаемых в геоинформационных системах могут быть представлены в виде векторных сечений по разведочным линиям месторождения, каркасных, блочных моделей (см. рис. 6. 28).

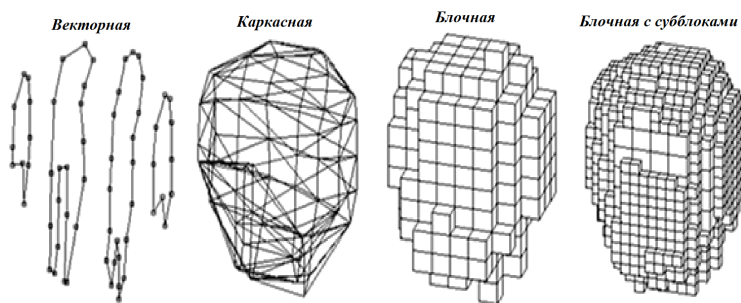


Рис. 6.28. Способы представления моделей рудных тел

В основе создания моделей используется набор сечений, на плоскостях которых располагаются контуры с точками, отрезками или полилиниями. Сечения могут быть параллельными или не параллельными.

Параллельные сечения используются, как правило, для создания объектов, имеющих прямолинейную ось (рудные тела, поверхность карьера и т. д.). Не параллельные сечения в основном используются для создания объектов, имеющих ломаную ось (подземные горные выработки).

На сечениях располагаются контуры, состоящие из точек или отрезков (см. рис. 6.29).

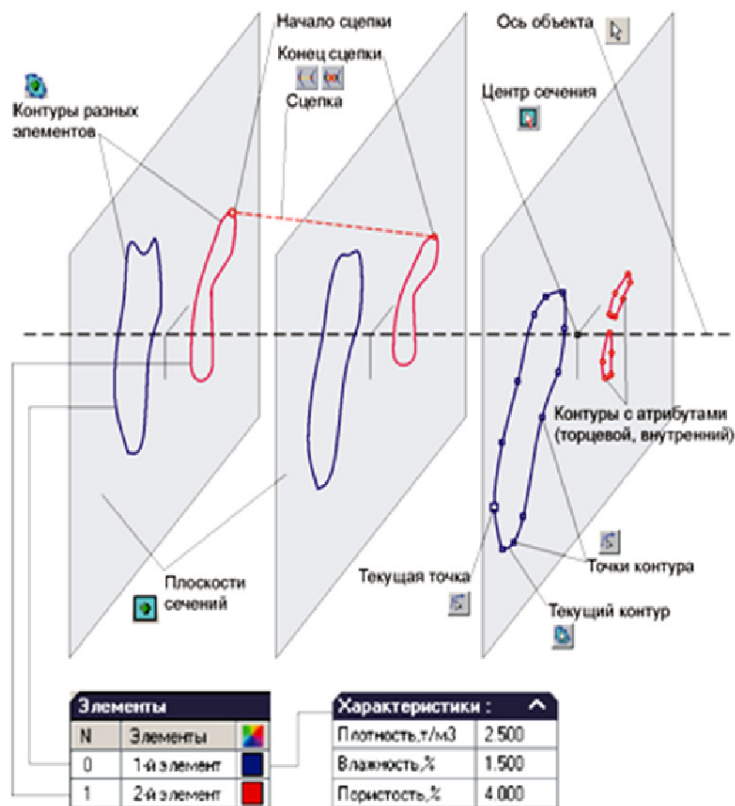


Рис. 6.29. Построение модели рудного тела. Способ векторных сечений

Контур не обязательно лежит в плоскости сечения. Они формируют векторную модель и могут относиться к различным элементам, каждый из которых может иметь свою каркасную и блочную модель, содержит свой список свойств, динамически пополняющийся. Частично свойства элементов являются предопределёнными (например: плотность, пористость) и могут использоваться в различных расчётах – в расчёте массы по объёму каркасной модели и др.

Каркасная модель представлена триангуляционной сеткой (состоящей из треугольников), которая построена на точках контуров и моделирует поверхность элемента, а следовательно, фор-

му и размеры. С помощью каркасных моделей могут быть смоделированы тела и поверхности. В первом случае создаются замкнутые триангуляционные поверхности, во втором – разомкнутые. Для управления процессом триангуляции используется тот же принцип формирования TIN-моделей поверхности с дополнительными структурными линиями (см. рис. 6.30).

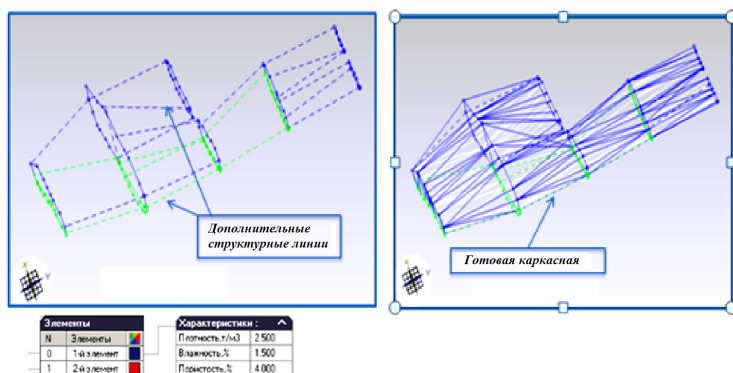


Рис. 6.30. Каркасная модель рудного тела

Для элементов, имеющих каркасные модели, могут быть созданы блочные модели, представляющие собой упорядоченное множество прямоугольных параллелепипедов, размещённых внутри замкнутой каркасной модели объекта (см. рис. 6.31).

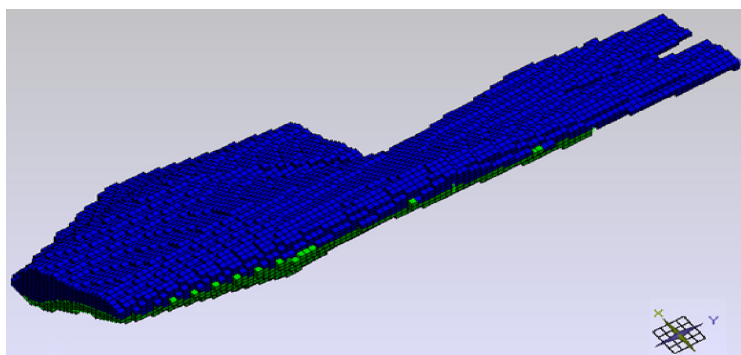


Рис. 6.31. Блочная модель рудного тела

Модели объектов могут быть объединены (сгруппированы), при этом составной объект, в свою очередь, может входить в другой составной объект.

Блочные конструкции используются для моделирования изменчивости внутреннего строения тела (обычно – содержания полезного ископаемого применительно к модели рудного тела или пласта).

Объекты горнотехнической структуры рудников (горные подземные выработки, элементы систем разработки) в геоинформационных системах отображаются как 3-мерные объёмные каркасные твердотельные объекты. Для их создания обычно используются оцифрованные маркшейдерские планы горизонтов. Модели горных выработок создаются на основе набора сечений с контурами бортов, кровли и почвы фактических выработок (см. рис. 6.32).

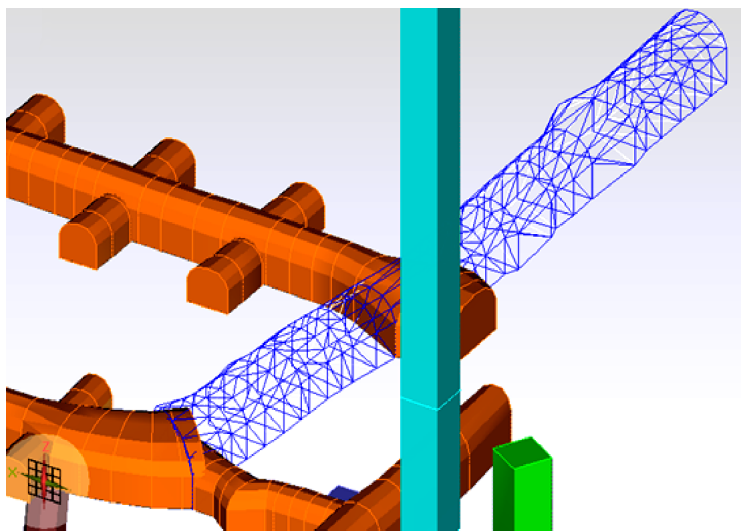


Рис. 6.32. Построение 3D-модели горных выработок

При пополнение моделей горных выработок в процессе их проходки на горном предприятии используются специальные инструменты и модули, встроенные в ГИС.

Пример создания модели горной выработки в системе *MaineFrame* (модуле *GEOTECH-3D*) на основе данных ортогональной маркшейдерской съёмки изображен на рис. 6.33.

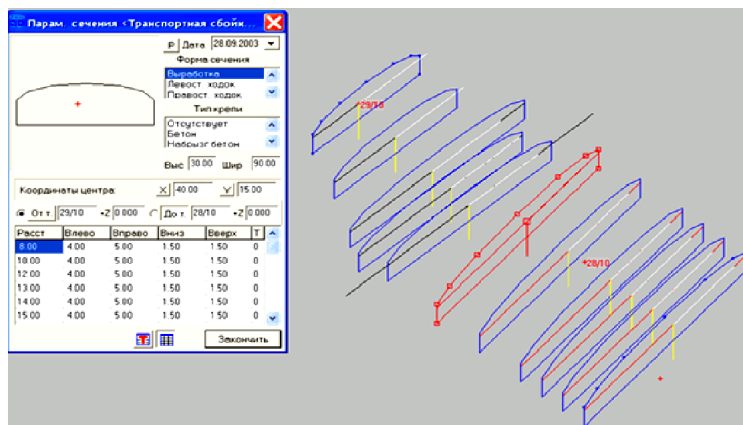


Рис. 6.33. Построение 3D-модели горной выработки в системе *MaineFrame*

Горно-геологические геоинформационные системы имеют в своём составе расширенный набор инструментов по проектированию и конструированию карьеров, отвалов, элементов систем разработки.

Применение и использование в полном объёме инструментов горно-геологических геоинформационных систем позволяет создавать полноценные объёмные модели горно-геологической и горно-технологической инфраструктуры рудников и карьеров.

6.6. Планирование и проектирование горных работ

Проектирование и планирование добычных работ являются завершающими стадиями, ради оптимизации которых и внедряются системы информатизации. Именно на этой стадии и достигается основной экономический эффект от применения информационных технологий. Проектирование и планирование добычных работ для месторождений под горный способ и отра-

батываемых системами скважинного подземного выщелачивания (СПВ) принципиально отличается. Отличаются и применяемые для этого программные продукты и исходные данные.

6.6.1. Горный способ добычи

В мировой практике применение геоинформационных технологий является стандартным, но глубина их внедрения различна. На рис. 6.34 показан типичный пример полного внедрения систем информатизации на горнорудном предприятии, охватывающем производственный процесс от геологоразведки до планирования горных работ.

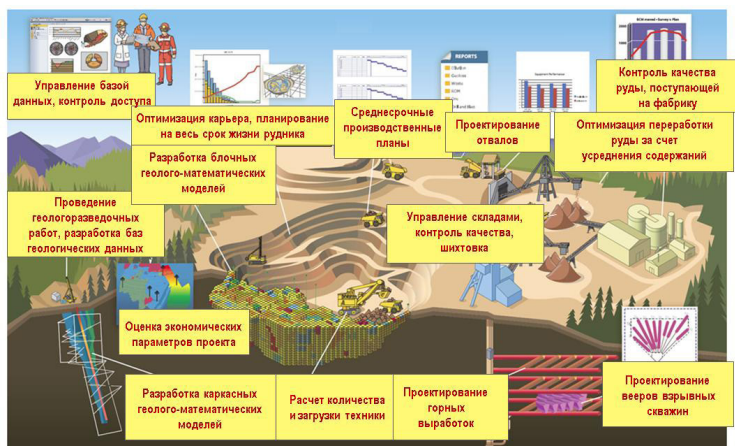


Рис. 6.34. Стандартизированная схема применения информационных технологий в горном производстве

Обязательным стандартом мировой практики является разработка блочных геолого-математических моделей месторождений, по которым проводится оценка и аудит минерально-сырьевой базы месторождения, ведутся предпроектные и проектные работы.

Имеющиеся автоматизированные алгоритмы оптимизации карьера и планирования открытых горных работ встроены в большинство современных программных продуктов – они позволяют получить быструю окупаемость проекта, рассчитать конструкцию бортов карьера и схему вскрытия для максимально возможной рентабельной отработки запасов (см. рис. 6.35).

Технологии планирования и оптимизации горных работ для подземной добычи развиты слабее, чем для открытой. Это обусловлено более сложным математическим аппаратом оптимизации и наличием большого количества вариантов отработки (только систем разработки известно более 200), что не позволяет решить задачу оптимизации подземных горных работ однозначно.

Оптимизация подземных горных работ выполняется в основном вручную с использованием инструментов 3D-визуализации (см. рис. 6.36). Эти технологии поддерживаются ограниченным числом программных продуктов.

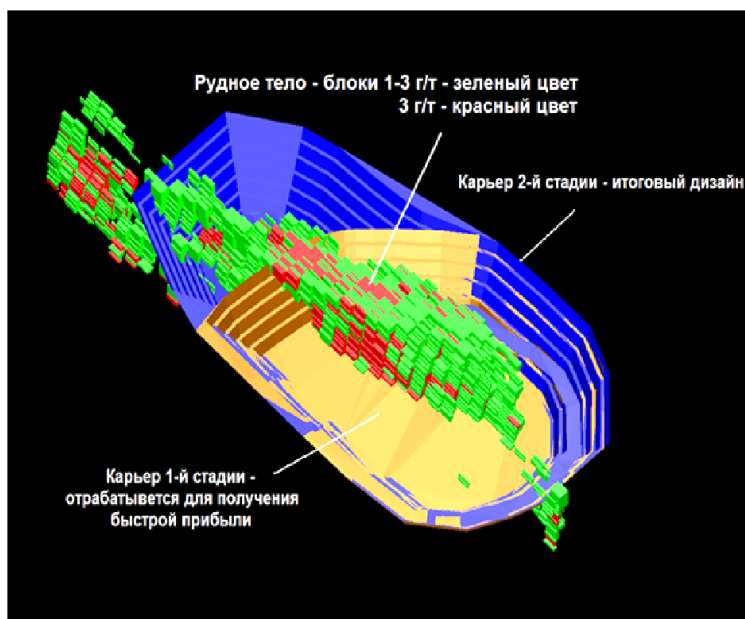


Рис. 6.35. Оптимизация контуров карьера по максимальной рентабельности горного производства

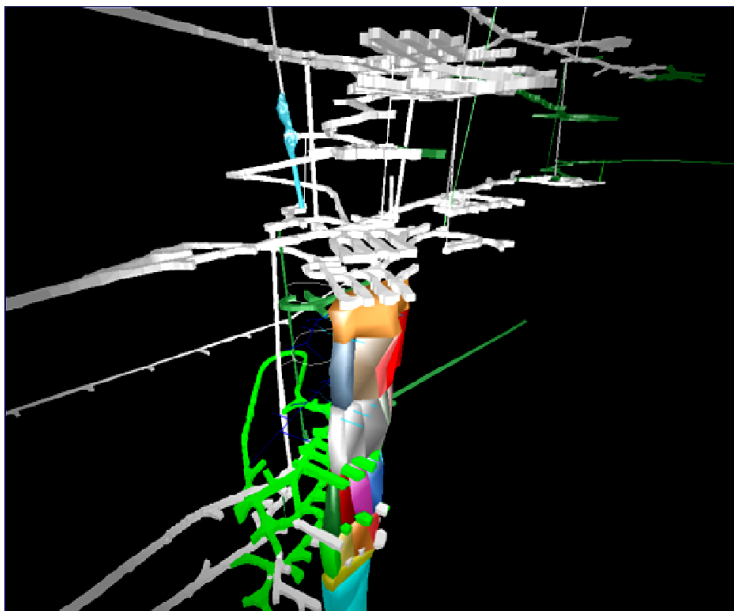


Рис. 6.36. 3D-модель горных выработок
с порядком отработки рудных тел

Стандартная схема последовательности работ для месторождений, обрабатываемых горным способом состоит из:

- разработки, дальнейшего поддержания и ведения геологических баз данных;
- создания каркасных и блочных моделей;
- проектирования рудника;
- планирования горных работ;
- маркшейдерской съёмки и погашения (списания) запасов.

Среди программных продуктов, разработанных для решения задач в горно-геологической индустрии, имеются как предназначенные для решения одной-двух задач, так и универсальные, охватывающие всю цепочку действий. Однако даже универсальные пакеты лучше решают одни задачи и хуже другие.

6.6.2. Скважинное подземное выщелачивание

Для метода СПВ (см. рис. 6.37) отсутствует стандартизированная мировая практика информатизации. С одной стороны, это обусловлено его применением для небольшого количества металлов (прежде всего уран, в резко меньшем количестве медь, золото, никель, редкие земли, скандий). С другой – связано со сложным математическим аппаратом расчёта процессов, происходящих при СПВ, и возможностью влияния на эти процессы лишь косвенно.

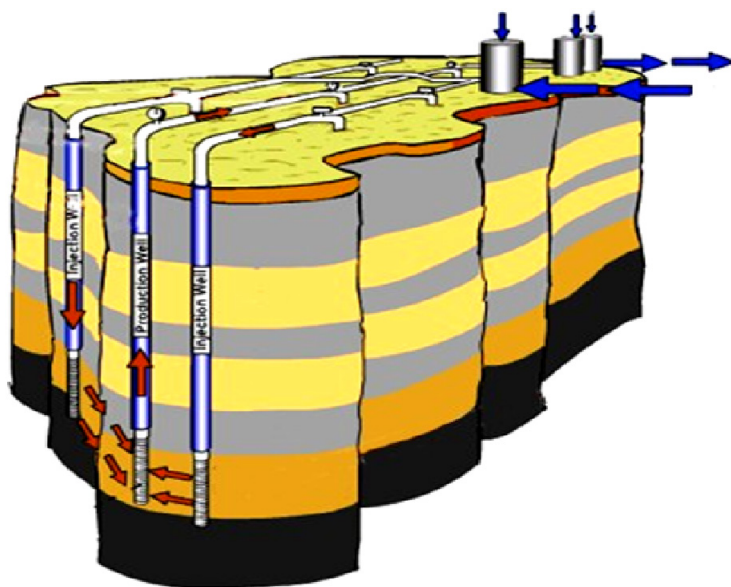


Рис. 6.37. Принципиальная схема
скважинного подземного выщелачивания

Наиболее распространённая мировая практика – моделирование СПВ на основе гидродинамических моделей (см. рис. 6.38), которая не даёт полного представления о всех происходящих при СПВ процессах.

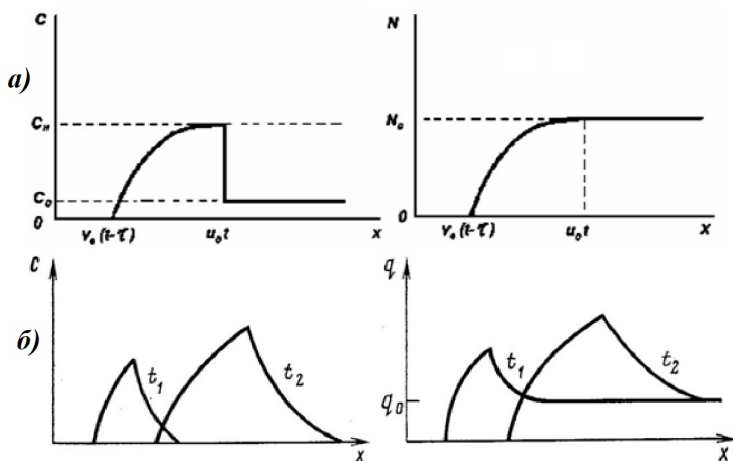


Рис. 6.38. Описание СПВ гидродинамическим моделированием:

а – модель растворения твердого вещества одномерным
фильтрационным потоком;

б – модель растворения твердого вещества
при подвижном геохимическом барьере

Процесс СПВ включает в себя следующие основные стадии:

- движение рабочих (выщелачивающих) растворов от закачанных скважин к рудному телу;
- проведение гетерогенных химических реакций на поверхности жидкой и твердой фаз, с образованием растворимых соединений урана;
- движение продуктивного раствора от рудного тела к откачным скважинам.

Более полно процесс СПВ может быть описан моделью, учитывающей не только гидродинамику потока, но и физико-химические процессы на границах раздела сред, позволяющей учитывать динамику растворения минералов (см. рис. 6.39).

Модель с учётом гидродинамики и физико-химических процессов предлагается называть геотехнологической.

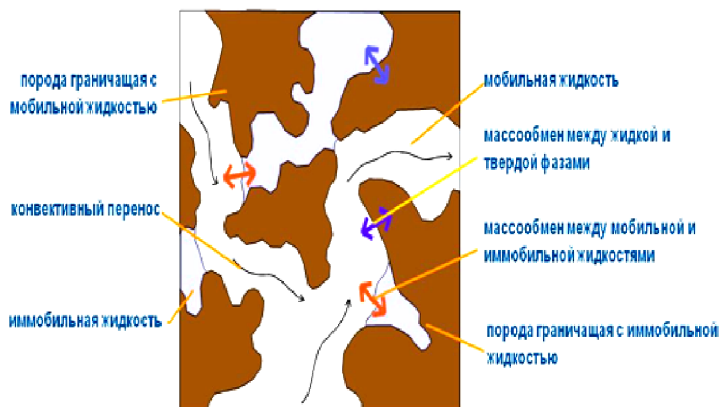


Рис. 6.39. Принципиальная схема геотехнологического моделирования

Геотехнологическая модель построена с учётом: конвективного массопереноса, гидродинамической дисперсии, растворения-осаждения урановых минералов, нейтрализации серной кислоты породой, гомогенных и гетерогенных окислительно-восстановительных процессов, образования сульфатных комплексов урана и уранила.

Оптимизация систем разработки и выбора геотехнологических режимов актуальна для отработки месторождений методом СПВ, как и горным способом. Определение оптимального расположения и сети технологических скважин, регламент подачи выщелачивающего раствора и режим дебета откачных скважин сильно влияют на экономику месторождения СПВ.

Фактически перед проектировщиками и разработчиками месторождений СПВ стоит задача найти оптимальное соотношение между капитальными затратами на бурение технологических скважин (составляют до 70 % капитальных затрат) и эксплуатационными затратами при разработке месторождения.

Чем больше расстояния между скважинами, тем медленнее происходит выщелачивание урана и тем сильнее возрастают эксплуатационные затраты. Параметр, описывающий объём прошедшего выщелачивающего раствора через рудоносную толщу, называется Ж/Т (отношение жидкого к твёрдому). Укрупнённо, чем он выше, тем выше эксплуатационные затраты. Поэтому ис-

пользование геотехнологического моделирования при проектировании и планировании добычных работ позволяет ускорить процесс оптимизации СПВ и во многом его выполнить ещё на стадии проекта.

Главной проблемой такой оптимизации является недостаток технологических данных на ранних стадиях освоения месторождений в силу невозможности учёта всех факторов при геологоразведке. Поэтому по мере отработки месторождений точность моделирования возрастает, а модуль сбора геотехнологической информации должен быть неотъемлемой частью программных продуктов по планированию отработки СПВ.

6.6.3. Сравнительная характеристика имеющихся в мире геоинформационных систем для горных предприятий

6.6.3.1. Горно-геологическая информационная система *Micromine*

Модули *Micromine*, используемые при проектировании и планировании горных работ:

Модуль «Горные работы». Модуль позволяет осуществлять следующие виды операций:

- Разработку (карьеров, строительство дорог, тоннелей, вертикальных стволов шахт).
- Производство (скважины БВР, рабочие выработки).
- Контроль содержаний (опробование и анализ по скважинам БВР с целью обеспечения детального просмотра распределения содержаний в заданной части подземного рудника).

Модуль «Оптимизация карьера». Модуль «Оптимизация карьера» используется для определения оптимальных контуров карьера и набора экономических параметров, а также обеспечивает проведение анализа формирования рудных складов и затрат с течением времени (см. рис. 6.40).

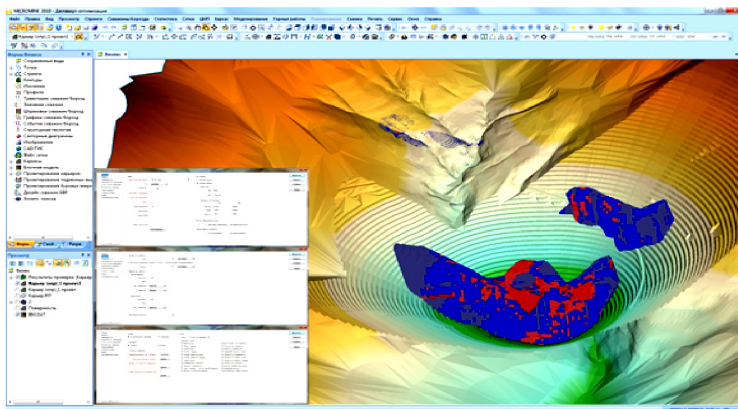


Рис. 6.40. Оптимизация и построение карьера в среде *Micromine*

Ключевые характеристики модуля «Оптимизация карьера»:

- Улучшенная оптимизация карьеров, учитывающая переменные значения углов откоса, коэффициенты потерь и разубоживания, затраты на культивацию и их анализ.
- Вычисление теоретических бортовых содержаний.
- Расчёт капитальных затрат периода.
- Поддержка регионов нескольких откосов и множественных методов переработки для нескольких значений содержаний (элементов) в однотипной породе. Также предлагается несколько методов выбора руды по бортовому содержанию и потоку наличности. Многие вводимые параметры могут определяться как функции, а не как константы.
- Поддержка минимальных размеров дна или оболочки карьера, гарантирующих обеспечение достаточного рабочего пространства на дне карьера и исключающих занижение размеров карьеров.
- Поддержка моделей рудных тел без блоков пустой породы, а также моделей полного типа, расчётных или субблочных моделей.
- Улучшенная отчётность по блочным моделям.

6.6.3.2. Интегрированная система планирования и проектирования *DataMine*

DataMine в части проектирования и планирования горных работ традиционно является наиболее мощным продуктом. В этом пакете впервые были применены методы оптимизации подземных горных работ методом «плавающего конуса». Встроенный язык программирования (написания скриптов) позволяет создавать программистам расширения к программе, чем продвинутые пользователи активно пользуются.

В системе имеется несколько модулей для проектирования и планирования открытых и подземных горных работ:

- *OPM* – модуль проектирования карьеров предлагает 3 методологии проектирования и скрипт для автоматического построения карьера.
- *UGM* – модуль проектирования подземного рудника предлагает полный набор инструментов для каркасного моделирования всех деталей горных выработок и автоматического расчёта объёмов и качества извлекаемых руд и пород.
- *RNG* – модуль проектирования подземных массовых скважинных взрывов.
- *MRO* – модуль оптимизации размещения «плавающим конусом» выемочных блоков в пространстве и последовательности их отработки на подземных рудниках по технико-экономическим критериям.
- *MSO* – модуль вычисляет оптимальный размер, форму и размещение очистных блоков подземного рудника, используя стандартную блочную модель месторождения.
- *ISTS* – модуль средне и краткосрочного планирования горных работ на рудниках. Предназначен для периодов от одного дня до трёх месяцев и более. Степень детализации программы – обычно смена или день, но периоды планирования могут быть также в часах, днях, неделях или месяцах. Графики, создаваемые в *ISTS*, включают главные операции: бурение, погрузку, транспорт и переработку. Пользователь может выбрать режим использование *ISTS* в интерактивном или автоматическом режиме, когда параметры усреднения руды и продвижение забоев рассчитываются и выполняются программой для достижения определённых пользователем целей производства. Могут задаваться и учиты-

ваться типы и модели оборудования, используемого в каждой операции, чтобы автоматически вычислялось время и показатели его работы.

- *BL* – модуль проектирования массовых взрывов на карьерах и планирования их отработки

DataMine предлагает также модули, разработанные дочерней компанией *Earthworks*:

- *NPVS* – программа оптимизации конечных контуров карьера, этапов его отработки, стратегического календарного плана и системы рудопотоков, включая рудные склады. Производит оценку геологического риска на основе условной геостатистической модели месторождения.

- *Mine2-4D* – система планирования подземных горных работ, которая позволяет снижать затраты и повышать эффективность процессов с помощью интенсивной обработки исходной информации и быстрого реагирования на изменения. Это полностью интегрированная система для горных инженеров. Она обрабатывает сложные наборы геологической, маркшейдерской и горной информации, чтобы создать детальные горные планы, разрезы и графики (см. рис. 6.41); позволяет быстро оценивать финансовые последствия любых изменений условий производства.

- *EPS* – инструмент планирования, эквивалентный *Microsoft Project*, но учитывающий специфику горных работ. Полностью объединён с *Mine2-4D*, облегчая двустороннюю передачу данных о ресурсах и взаимозависимостей, чтобы в конечном счёте создавать эффективные графики производства. Может работать автономно, импортировать исходные данные очистных блоков из любой системы и использовать их в планировании.

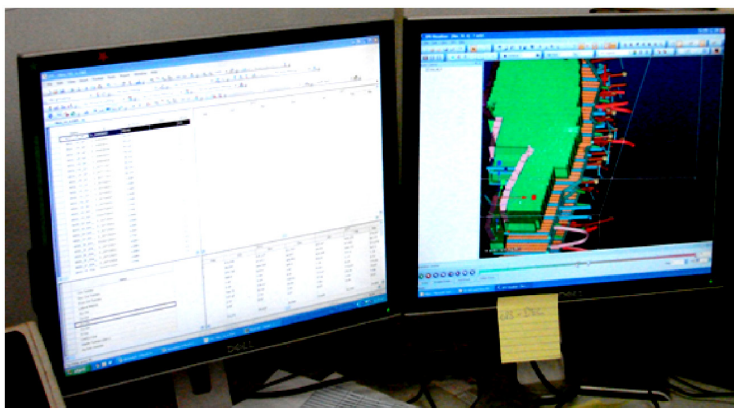


Рис. 6.41. Пример работы программы Mine2-4D

6.6.3.3. Программное обеспечение MineCAD

MineCAD – это CAD-пакет, специально разработанный для горной промышленности. Он помогает горным проектировщикам и планировщикам создавать высококачественные чертежи в динамической окружающей среде. Кроме того, он включает в себя Менеджер Проектов, чтобы управлять проектами, создаваемыми в *Mine2-4D*. Дополнительные модули пакета позволяют вести геомеханические расчёты, проектирование вентиляции, закладочных систем, массовых взрывов на подземных рудниках, систем транспорта, сопоставления плана и факта, а также других, необходимых в планировании, операций.

6.6.3.4. Система автоматизированного планирования и проектирования горного предприятия MineFrame

Программный комплекс *MineFrame* позволяет автоматизировать процесс инженерного обеспечения при ведении открытых и подземных горных работ и создать при этом условия для решения горно-геологических задач. Это достигается за счёт входящих в его состав отдельных модулей – нескольких программ и систем, разработанных на общей графической платформе *GeoTech-3D*.

MineFrame предоставляет возможность горным инженерам планировать и управлять открытыми и подземными работами

на карьере, вести планирование и проектирование буровзрывных работ, а также подготовить отчётную документацию, планы развития горных работ и вывести её на печать. Создаваемые в рамках системы автоматизированные рабочие места позволяют решать ряд задач, встречающихся при планировании, проектировании и сопровождении горных работ.

При работе с моделями объектов горной технологии *Geo-Tech-3D* использует две основные базы данных (БД):

- Геологическую.
- Технологическую.

В качестве типового решения для работы с БД используется сервер БД *Firebird*, что обеспечивает сетевой режим работы системы с минимальными издержками на его организацию. Работа с БД может осуществляться как в однопользовательском, так и многопользовательском режиме.

Для администрирования работы удалённой БД (многопользовательский режим) используется программа *GeoUsers*, входящая в состав *MineFrame* и позволяющая:

- Устанавливать для каждого пользователя свой уровень доступа, снизив тем самым вероятность случайного или несанкционированного изменения моделей объектов.
- Вести журнал изменений моделей объектов в Технологической БД.
- Осуществлять восстановление удалённых или изменённых моделей объектов.
- Осуществлять копирование и восстановление Технологической БД.

Геологическая БД используется для хранения данных по скважинному и бороздovому опробованию. Для её формирования используется редактор *GeoTools*, входящий в состав *MineFrame*.

Данные по опробованию в виде связанных таблиц параметров скважин (выработок), проб, компонентов (характеристик) полезного ископаемого и инклинометрии используются для формирования модели геологоразведочной сети и решения на этой основе задач по созданию моделей рудных тел (пластов), геостатистическому исследованию месторождений, подсчёту запасов полезного ископаемого, объёмных и качественных показателей выемочных единиц.

Технологическая БД используется для хранения моделей объектов горной технологии, созданных как непосредственно инструментальными средствами *GeoTech-3D*, так и импортированных из других систем.

Каждая модель объекта содержит информацию о своей геометрии, составе, свойствах и местоположении в границах моделируемой области пространства, форме отображения (отображается полностью, отображается контур её разреза, не отображается) для каждого из пользователей, а также состоянии (редактируется в данный момент или нет).

Это позволяет, с одной стороны, накладывая на БД пространственный фильтр, делать выборку моделей объектов только для локальной области, и, с другой стороны, используя индивидуальные настройки пользователей, обеспечить одновременную работу с одними и теми же моделями объектов разных специалистов.

Все объекты Технологической БД объединены в группы (геология, выработки, выемочные единицы, конструктивные элементы, маркшейдерские точки, поверхности), которые относятся к тому или иному проекту. Группы, в свою очередь, могут содержать подгруппы, степень вложенности которых не ограничена.

Подобная форма представления моделей в виде «дерева» позволяет достаточно просто управлять проектами, содержащими десятки тысяч объектов.

Для работы с моделями объектов, содержащимися в БД, *GeoTech-3D* предоставляет инструментальные средства:

- создания и открытия проекта;
- управления моделями объектов, включая их загрузку из БД и сохранения в ней;
- визуализации моделей объектов;
- создания и изменения моделей объектов;
- экспорта и импорта графической информации;
- решения задач горной технологии.

Используя трёхмерные модели объектов, *GeoTech-3D* обеспечивает автоматизацию решения основных геологических, маркшейдерских и технологических задач, встречающихся в практике горного дела. Среди них:

Технология

- Построение векторных и каркасных моделей объектов горной технологии, включая проектные модели карьеров, естествен-

ных и технологических поверхностей, складов (штабелей) горной массы, отвалов, подземных горных выработок, конструктивных элементов и узлов системы разработки, выемочных единиц.

- Визуализация объектов горной технологии в трёхмерном пространстве, на планах и вертикальных разрезах.
- Подготовка чертежей по планам и разрезам и их экспорт в конструкторские редакторы, включая *AutoCAD*.
- Импорт и экспорт графической информации о технологических объектах в *DXF*-формате.

Открытые горные работы

- Построение борта карьера с вписыванием системы транспортных коммуникаций.
- Конструирование траншей, полутраншей и насыпей с подсчётом объёмов вынимаемой и насыпаемой горной массы.
- Построение бергштрихов и изолиний поверхности с выносом высотных отметок.
- Подсчёт объёмов и содержаний полезного компонента в прирезках и по горизонтам.
- Подсчёт объёмов горной массы между двумя положениями карьера.
- Текущее и оперативное планирование горных работ, управление качественными показателями рудопотока.
- Проектирование массовых взрывов.

Подземные горные работы

- Создание моделей выемочных единиц.
- Параметрическое проектирование горных выработок с сечениями заданной конфигурации.
- Формирование планов и разрезов с учётом сопряжений выработок и проекций моделей близлежащих объектов на плоскость сечения.
- Подсчёт объёмов и содержания полезных компонентов в выемочных единицах.
- Создание моделей типовых конструктивных элементов и узлов с использованием механизма группировки объектов, формирование базы данных конструктивных элементов.
- Визуализация результатов мониторинга движения карьерного транспорта и сейсмических событий.
- Модуль «Закладка» учитывает особенности горных систем разработки с заполнением выработанного пространства твердею-

щей закладкой. Модуль позволяет создавать базу данных по качественным и количественным параметрам искусственной кровли, оптимизировать затраты на крепление очистного пространства, снижать риски при производстве горных работ.

- Модуль «Плана ликвидации аварии» не имеет аналогов в других системах и позволяет автоматизировать процесс формирования обязательных графических приложений для основного регламентирующего документа подземного рудника на случай возникновения опасных техногенных ситуаций, связанных со спасением людей на случай аварии. Возможности модуля позволяют визуализировать любое место возникновения аварии и принять оптимальное и быстрое решение по её локализации.

В ПО *MineFrame* имеется возможность применения в производственных процессах геомеханический мониторинг и контроль горного давления для прогнозирования и предупреждения горных ударов (см. рис. 6.42). Эта система не имеет аналогов в других программных комплексах.

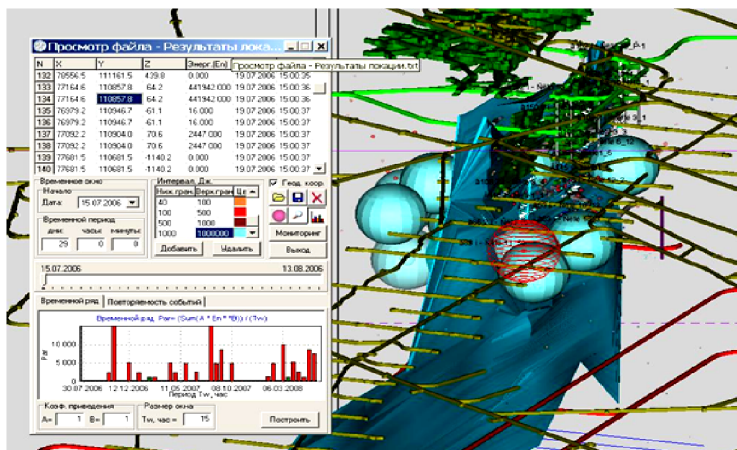


Рис. 6.42. Пример работы модуля геомеханического мониторинга в системе *MineFrame*

6.6.3.5. Система *Gemcom Surpac*

Горные инженеры для планирования горных работ используют полностью встроенный в *Surpac* модуль планирования *Minesched*. Модуль работает напрямую с блок-моделями запасов

форматов *Surpac*, *GEMS* и *Datamine*, грид-моделями *Minex*, полигональными моделями. Вместе с тем он может работать с экспортированными через текстовые файлы блок-моделями пакетов *Vulcan* или *Micromine*.

В настоящий момент планирование осуществляется интерактивно в едином графическом окне и с вводом установок во встроенные таблицы. Пользователь может планировать одновременно открытые и подготовительные/добычные подземные работы, включающие вспомогательные операции (см. рис. 6.43).

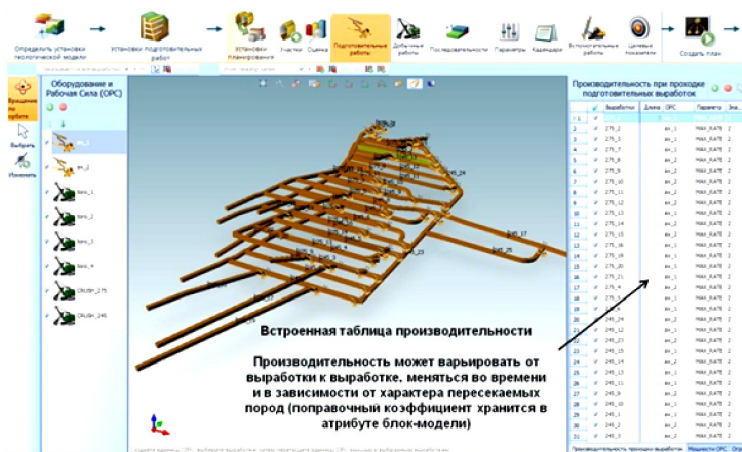


Рис. 6.43. Инструменты планирования и определение схемы подготовки рудной залежи

В распоряжении пользователя функции усреднения как непосредственно в ходе добычных работ, так и в ходе управления складами. Модуль шихтовки существенно облегчает планирование достижения целевых показателей качества.

Подземные подготовительные и добычные работы планируются в единой производственной схеме. Устанавливается последовательность проходки от выработки к выработке, от отрезка выработки к отрезку выработки и последовательность «подготовительные выработки – добычные камеры». Скорость проходки варьирует во времени и пространстве и может быть связана с характером пород. Может быть спланирована не только проходка и добыча, но и закладка (см. рис. 6.44).

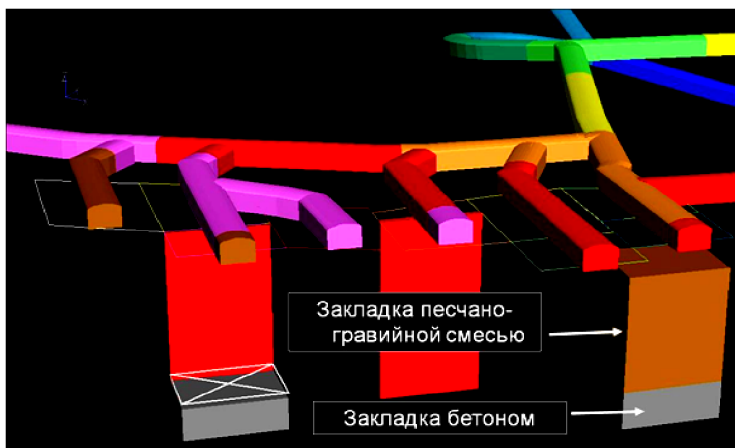


Рис. 6.44. Технологический порядок закладки очистного пространства

Итоговый план производства горных работ может быть представлен в формате *Microsoft Project* (см. рис. 6.45).

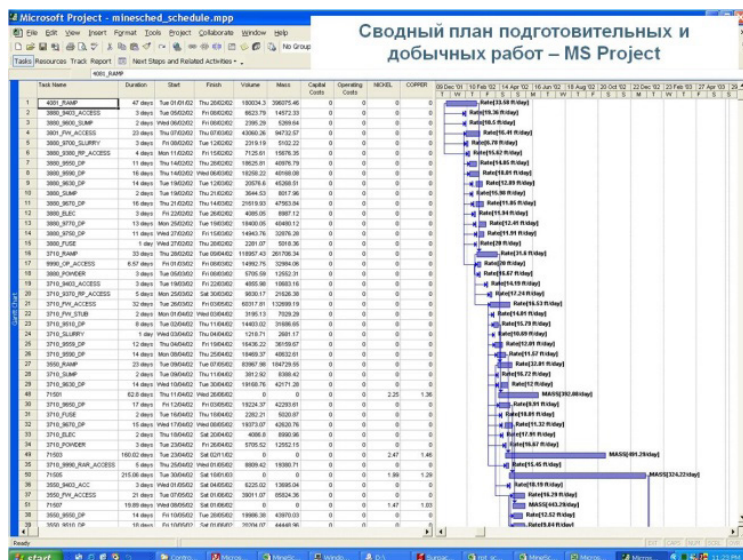


Рис. 6.45. Сводный план подготовительных и добычных работ

Основные блоки, используемые для планирования горных работ:

Планирование Горных работ

Вне зависимости от типа создающегося проекта: карьер или подземные горные выработки – ПО *Surpac* снабжает горных инженеров всем необходимым инструментарием. В его интегрированной среде, можно создать проект, где условие максимального извлечения руды одновременно соответствует требованию проекта относительно кондиций бортового содержания и минимально промышленного, а также требованиям по устойчивости горных пород, где:

- информационные данные из различных источников могут просматриваться и включаться в состав планов, поддерживающих проекты технико-экономического обоснования;
- разные детали информации могут просматриваться совместно, обеспечивая одновременно условие физических ограничений рудной площади и в то же время максимизируя экономическое извлечение запасов полезного ископаемого;
- данные могут быть задействованы и использованы непосредственно из форматов других программных пакетов при помощи усовершенствованных Дата-Плагинов *Surpac*;
- взаимодействие со всеми исходными и проектируемыми данными рудника, а именно: информация по буровым скважинам, по существующему рудному телу и моделям поверхностей, данные по оптимизации форм карьера, моделям сеток и блоков, раскраске в соответствии с поинтервальным распределением содержания, и другая информация.

Рудничная Добыча

- Вычисление и заверка объёмов.
- Сравнение кригинговых моделей с исходными данными буровых скважин в целях оптимизации процесса извлечения запасов полезного ископаемого.
- Создание масштабированных карт высокого качества для любых, связанных с проектом, информационных данных.
- Используемый при проектировании дорог и карьеров программный инструментарий приспособлен к такой маркшейдерской расстановке, которая обеспечивает безошибочное обозначение всех необходимых деталей, требуемых экскаваторщиками.

- Система интеграции между моделями рудных запасов, проектами карьеров и маркшейдерской информацией влияет на постоянное обновление контура рудного тела, планов экскаваторной выемки с выноской содержаний по рудным интервалам и на характер справок с указанием количества тонн руды.

Автоматизация рабочих процессов

- Ежемесячное выявление главных моментов рабочего процесса и урегулирование возникших проблем через простой автоматизированный процесс сравнения справок, используя *Surpac* макро-инструменты.

- Автоматизация таких повторяющихся процессов, как контроль за качеством руды и заданий по составлению печатных материалов (планов, карт и т. д.), используя макро-функциональность и способность настраивать программу под специфические процессы и поток информационных данных, применяемые компаниями.

- Создание и освоение новых функций, используя встроенный в ПО *Surpac* скриптовый язык, и определение типичных методов настройки меню инструментальной панели в целях улучшения управления рабочими процессами.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое ГИС?
2. Виды классификации ГИС.
3. История развития ГИС.
4. Какие существуют подсистемы ГИС?
5. Что такое растровая модель данных?
6. Объекты векторной модели данных.
7. Чем отличаются топологические и нетопологические векторные модели?
8. Преимущества и недостатки растровой и векторной модели.
9. Как организовано хранение данных в ГИС?
10. Типы баз данных.
11. Основные требования к базе данных.
12. Чем отличаются системы управления баз данных?
13. Устройства ввода информации в ГИС.
14. Этапы оцифровки и векторизации растровых изображений.

15. Способы улучшения качества растрового изображения.
16. Способы регистрации раstra к существующей системе координат.
17. Что такое цифровая модель поверхности?
18. Способы создания ЦМП.
19. Виды объёмных моделей, отображающие геологические объекты.
20. В чём отличие каркасной и блочной модели?

Рекомендуемая литература

1. Бугаевский Л. М., Цветков В. Я. Геоинформационные системы: учебник для вузов. М.: Златоуст, 2000. 342 с.
2. Дейт К. Дж. Введение в системы баз данных = Introduction to Database Systems. 8-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1071 с.
3. Кузнецов С. Д. Основы баз данных. 2-е изд. М.: Интернет-ун-т информ. технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 484 с.
4. Роланд Ф. Д. Основные концепции баз данных. М.: Вильямс, 2002. 256 с.
5. Кашенко Н. А., Попов Е. В., Чечин А. В. Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов. Н. Новгород: Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т, 2012. 130 с.
6. Капутин Ю. Е. Горные компьютерные технологии и геостатистика; Недра, 2002. 424 с.

ГЛАВА. 7

Системы координат, применяемые в РФ

Положение точек на земной поверхности определяется координатами – величинами, которые характеризуют расположение заданных точек относительно исходных точек, линий или плоскостей выбранной системы координат.

Система географических координат является общепринятой и единой для всего земного шара. Пространственное положение любой точки M на поверхности Земли можно определить двумя географическими координатами – широтой φ и долготой λ (см. рис. 7.1).

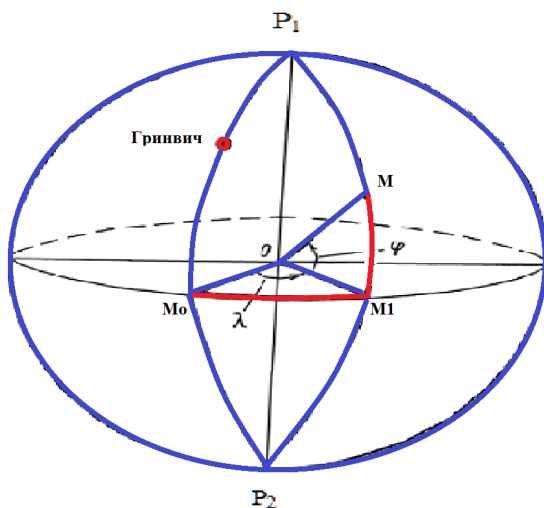


Рис. 7.1. Географические координаты

Географические координаты

Географической широтой точки M называется угол φ (MOM_1) между отвесной линией MO , проходящей через эту точку, и плоскостью экватора. Широты изменяются от 0° на экваторе до 90° к северу или югу в зависимости от того, в каком полушарии находится рассматриваемая точка. В северном полушарии широты носят название северные, а в южном – южные.

Географической долготой точки M называется двугранный угол λ между плоскостью начального меридиана $P_1M_0P_2$ и плоскостью меридиана $P_1MM_1P_2$ данной точки. За начальный меридиан в географической системе координат принят Гринвичский меридиан, проходящий через астрономическую обсерваторию в Гринвиче, находящуюся вблизи Лондона. Долготы изменяются от Гринвичского меридиана к западу или к востоку, принимают значения от 0° до 180° и имеют соответствующие названия – западные или восточные долготы.

Система географических координат проста, но неудобна для практического применения, так как географические координаты выражают в угловых величинах, а их линейные значения в различных частях земного эллипсоида неодинаковы. Поэтому в геодезии широко распространена система плоских прямоугольных координат.

Зональная система плоских прямоугольных координат

Поскольку уровенная поверхность является кривой, то большую её часть на плоскости нельзя изобразить без искажений. При решении этих задач используют различные картографические проекции. В России применяется разработанная Карлом Гауссом в XIX в. специальная картографическая проекция (полное название – кругло-цилиндрическая проекция Гаусса-Крюгера). Суть её в том, что вся уровенная поверхность Земли разделяется на 60 отдельных участков, каждый из которых ограничен двумя меридианами с разностью долгот между ними в 6° . Такие участки называются зонами (см. рис. 7.2), а система координат – зональной системой плоских прямоугольных координат.

В каждой зоне средний меридиан (делящий зону пополам) называется осевым. В плоском изображении зоны осевой меридиан P_1OP_2 и экватор Q_1OQ_2 будут представлять взаимно перпендикулярные прямые линии. Граничные меридианы $P_1Q_1P_2$ и $P_1Q_2P_2$ и параллели изобразятся кривыми линиями. 60 таких зон и составляют поверхность сфероида.

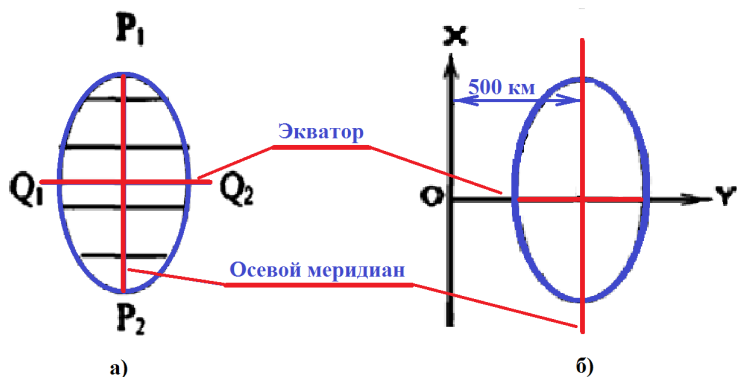


Рис. 7.2. Зональная система координат:

- а) зона в географической системе координат;
 б) зона в системе плоских прямоугольных координат

В проекции Гаусса ставится условие, что изображение углов между различными направлениями на шаре и на проекции равны между собой. В то же время длины линий передают с искажениями, причём они имеют наибольшее значение в краях зон, удалённых от осевого меридиана. Однако в пределах шестиградусной зоны такие искажения не превышают погрешностей графических построений и удовлетворяют требованиям составления карт масштабов 1:10 000 и мельче.

Все зоны последовательно проектируют на стенки цилиндра, в который вписана земная сфера, причём осевой меридиан каждой зоны проектируется без искажений. Такая проекция называется поперечно цилиндрической. После проецирования цилиндр разрезается по образующим и зоны развёртывают на плоскости.

Наличие двух взаимно перпендикулярных линий – осевого меридиана и экватора – позволило ввести для определения пространственного положения точек зоны зональную систему плоских прямоугольных координат.

За ось абсцисс X принято изображение осевого меридиана, а за ось ординат Y – изображение экватора. Начало координат – точка пересечения O осевого меридиана и экватора. Положительные направления осей: абсцисс – с юга на север; ординат – с запада на восток. Ординаты в пределах каждой зоны могут быть положительными и отрицательными. Во избежание отрицатель-

ных ординат в России принято условно считать ординату точки пресечения равной не 0, а 500 км. В этом случае ординаты всех точек каждой зоны будут положительными, так как наибольшая ширина шестиградусной зоны не превышает 385 км. Следовательно, все точки, лежащие к западу от осевого меридиана, имеют ординаты менее 500 км, точки на осевом меридиане имеют ординату 500 км, а восточнее – более 500 км и менее 900 км. Такие ординаты называют преобразованными. Чтобы знать, в какой из 60 зон лежит точка, впереди её пишут номер зоны. Для удобства решения практических задач на топографическую карту наносят координатную сетку. Координатная сетка представляет собой систему взаимно перпендикулярных линий, образующих сетку квадратов. Стороны квадратов параллельны осям абсцисс и ординат. Размер стороны квадрата соответствует определённому расстоянию на местности в зависимости от масштаба карты (для масштабов 1:10 000 – 1:100 000 – это 1 км).

7.1. Системы координат, применяемые в маркшейдерском деле

Ранее было дано описание применяемой в РФ и других странах *«Зональной поперечно-цилиндрической проекции Гаусса-Крюгера»*, иногда называемой *«Проекцией Меркатора»*. Однако это классическое представление системы координат, применяемой в геодезии и картографии. На самом деле система координат, применяемая в том или ином государстве, определяется постановлениями правительства и другими законодательными актами. В частности, в РФ на сегодняшний день постановлением Правительства РФ от 28 декабря 2012 № 1463 «О единых государственных системах координат» [17] с 1 января 2017 г. для использования в РФ принимаются две системы государственных координат:

Геодезическая система координат 2011 года (ГСК-2011) – для использования при осуществлении геодезических и картографических работ.

Общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11) – для использования в целях геодезического обеспечения орбитальных полетов и решения навигационных задач.

Этим же постановлением с 1 января 2017 г. отменяются:

1. Система геодезических координат 1995 года (СК-95), установленная постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568 в качестве единой государственной системы координат.
2. Единая система геодезических координат 1942 года (СК-42), введённая постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760.

Поясним, что это всё означает.

В разные времена, начиная с древних, для изображения поверхности Земли и различных объектов на ней применялись различные системы координат. Изменение применяемых систем координат связано с развитием технологий измерения, вычисления этих величин и точностью определения непосредственно размеров Земли (надо понимать, что размеры Земли со временем тоже могут изменяться), поэтому мы не будем перечислять их все, а назовем только некоторые из последних.

Началом истории построения в нашей стране единой геодезической системы координат можно считать 1816 год. С этого года под руководством академика Петербургской Академии Наук, основателя и первого директора Пулковской обсерватории В. Я. Струве и генерала от инфантерии, почётного члена Петербургской Академии Наук К. И. Теннера начались работы по проложению триангуляционного ряда по территории России от устья Дуная до Северного Ледовитого океана через Финляндию с включением территорий Швеции и Норвегии. Этот ряд триангуляции протяжённостью $25^{\circ}20'$ получил впоследствии название дуги Струве (см. рис. 7.13).

В нашей стране до 1940 г. координаты пунктов получали в нескольких, не связанных между собой, системах координат. В Пулковской системе координат 1932 г. вычислялись координаты точек на земной поверхности в Европейской части страны, в Западной Сибири и в Казахстане. Для определения координат пунктов Восточной Сибири и Дальнего Востока использовалась Свободненская система; в Средней Азии – Ташкентская; на Камчатке – Петропавловская СК 1936 г.; в Калымо-Индибирском районе – Магаданская система координат 1932 г.



Рис. 7.3. Геодезическая дуга Струве – Теннера – мировое наследие ЮНЕСКО

Во всех перечисленных системах координат был принят эллипсоид Бесселя (1841 г.), основные параметры которого были: большая полуось $a = 6377397$ м, полярное сжатие $\alpha = 1:299.15$.

Абсолютные высоты точек определялись от разных уровней поверхностей, совпадающих с уровнем Балтийского, Чёрного, Каспийского, Охотского и Японского морей. В связи с этим возникали определённые проблемы при производстве всех видов геодезических работ.

Однако в 1940 г. академиком Феодосием Красовским впервые для СССР был предложен трёхосный эллипсоид размеров Земли. Поэтому в 1946 г. в СССР была введена система координат 1942 г. (СК-42), иногда называемая Пулковской (*Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория Российской академии наук*). Она располагается в 19 километрах к югу от центра Санкт-Петербурга на Пулковских высотах.

Необходимость ввода такой системы координат была вызвана острой необходимостью военного времени. В 1941 г. советские войска столкнулись с проблемой отсутствия точных топографических карт на большую территорию нашей страны, знаменитой двухвёрстки. Благодаря самоотверженному труду геодезистов такие карты были созданы, а в 1943 г. геодезисты получили задание на построение карты Берлина. Так, появились карты системы координат СК-42 (Пулковской 1942 г.). Окончательно эта система координат была введена только в 1946 г. постановлением Совета Министров СССР от 7 апреля 1946 г. № 760 на основе результатов выполненного уравнивания геодезических координат и высот на территории СССР. Так как сегодня эти карты не являются секретными, их можно свободно найти на просторах интернета.

На рубеже 1950–60-х гг., в период ядерного противостояния, чтобы запутать противника, в СССР была введена специальная секретная система координат 1963 г. (СК-63). Карты в этой системе координат строились по 3-градусным зонам. Кроме того, они получали искусственное смещение центра координат на определённое расстояние по оси X и Y (разные расстояния) и поворот координатных осей на небольшой угол. Такие преобразования могли быть выполнены разными способами даже в пределах одной зоны. Поэтому система координат 1963 г. является чисто условной. Например, в Забайкальском крае существует 5 отдельных зон [19] и отдельная зона для города Чита.

В пределах области карты пронумерованы двумя цифрами – № горизонтального ряда (нумерация идет снизу-вверх) и № вертикальной колонки (нумерация идёт слева направо), которые записываются в номенклатурный номер после буквы, что и составляет номенклатуру 1:100 000 карт. Для карт производных масштабов далее следует остальная часть номенклатурного номера, которая строится так же, как в СК-42. Топографические

карты СК-63 легко отличить от карт СК-42: на их полях нет никаких надписей, кроме номеров смежных листов. Номенклатурный номер на карте может выглядеть так: Р-47-083-Бв1. Проекция топографических карт масштаба 1:10 000 в СК-63 использует 3-градусные зоны вместо стандартных 6-градусных. Соответственно искусственный сдвиг начала координат на запад имеет величину 250 км, а не 500 км как при 6-градусных зонах.

А вот система высот в СК63 используется нормальная Балтийская. Высота в СК63 равна высоте в СК42. Система координат СК-63 была отменена Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 25 марта 1987 г. за № 378-85. Однако параметры пересчёта и до сего дня остаются секретными, хотя при наличии такой карты и современных инструментальных и программных средств определение их с достаточной точностью не составляет труда.

В 2000 г. с 1 июля постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2000 г. № 568 «Об установлении единых государственных систем координат» была введена система геодезических координат 1995 г. (СК-95), с «Параметрами Земли 1990 года» (ПЗ-90).

Появление новой системы координат было вызвано тем, что проведённые современные исследования показали низкую точность определения координат исходных пунктов (пунктов Лапласа). Расхождения в координатах отдельных пунктов достигали 12,8 м, что недопустимо в современных условиях. Кроме того, возникла необходимость введения ещё и геоцентрической системы координат ПЗ-90 (аналог американской WGS-84), систем координат, широко используемых в области космической навигации. Однако и эти системы координат оказались не окончательными. Поэтому, как отмечалось ранее, с 1 января 2017 г. в РФ принимаются: геодезическая система координат 2011 г. (ГСК-2011) и общеземная геоцентрическая система координат «Параметры Земли 1990 года» (ПЗ-90.11). Последняя система координат практически соответствует американской WGS-84 и международной земной системе координат *International Terrestrial Reference System (ITRF)*. В настоящее время действует система координат *ITRF2014*, принятая 22 января 2016 г. Система координат *ITRF* рекомендует использовать эллипсоид 1980 г. *GRS80* с параметрами: главная полуось $a = 6378137,0$ м и полярное сжатие $\alpha = 298.257222101$.

На территориях субъектов РФ постановлением Правительства РФ от 3 марта 2007 г. № 139 «Об утверждении правил установления местных систем координат» разрешено введение местных условных систем координат.

Например, на территории Забайкальского края применяется система координат МСК-75 (по номеру региона). На самом деле это старая система координат 1963 г., возможно, с внесёнными корректировками после очередного уравнивания государственных геодезических сетей.

Пересчёт координат из одной системы в другую выполняют по формулам М. С. Молоденского (3-параметрическое преобразование) или через преобразование Bursa-Wolf (7-параметрическое преобразование). В табл. 7.1 и 7.2 приведены такие коэффициенты трансформирования для некоторых систем координат [4].

В заключении этого раздела необходимо отметить, что специалисту-маркшейдеру, возможно, придётся работать со всеми этими системами координат. Это вызвано тем, что за многолетний период накоплен огромный картографический материал, который невозможно переделать в силу экономических соображений. Поэтому, работая с материалами прошлых лет, результаты своей работы придётся сдавать по требованиям современности. Для этого следует хорошо знать историю картографирования, нормативные документы и правовые акты, уметь выполнять преобразования из одной системы координат в другую. Хотелось бы отметить, что такие преобразования тоже обладают определённой погрешностью, так как опираются на определённые допущения и используют алгоритм линейного приближения.

Таблица 7.1

**Коэффициенты трансформирования при переходе
в систему координат ПЗ-90.11 из других систем координат**

№ п/п	Из системы	$\Delta X, м$	$\Delta Y, м$	$\Delta Z, м$	$\omega_x,$ 10^{-3} угл.с	$\omega_y,$ 10^{-3} угл.с	$\omega_z,$ 10^{-3} угл.с	$m,$ 10^{-6}
1	СК-42	+23,557	-140,844	-79,778	-2,30	-346,46	-794,21	-0,228
2	СК-95	+24,457	-130,784	-81,538	-2,30	+3,54	-134,21	-0,228
3	ПЗ-90	-1,443	+0,156	+0,222	-2,30	+3,54	-134,21	-0,228
4	WGS-84 (G1150)	-0,013	+0,106	+0,022	-2,30	+3,54	-4,21	-0,008
5	ПЗ-90 02	-0,373	+0,186	+0,202	-2,30	+3,54	-4,21	-0,008
6	ITRF- 200S	+0,003	+0,001	0,000	-0,019	+0,042	-0,002	0,000

Таблица 7.2

Коэффициенты трансформирования при переходе из одной системы координат в другую

№ n/n	Из системы	В систему	$\Delta X, м$	$\Delta Y, м$	$\Delta Z, м$	$\omega_X, 10^{-3}$ угл.с	$\omega_Y, 10^{-3}$ угл.с	$\omega_Z, 10^{-3}$ угл.с	$m, 10^{-6}$	Эпоха ЭТ
1	СК-42	П.3-90	+25 ±2	-141 ±2	-80 ±3	0 + 100	-350 ±100	-660 ±100	0 +0,250	
2	СК-95	ПЗ-90	+25,90	-130,94	-81,76	0	0	0	0	
3	ПЗ-90	ПЗ-90.02	-1,07 ±0,1	-0,03 ±0,1	+0,02 ±0,1	0	0	-130 ±10	-0,220 ±0,020	2002.0
4	WGS-84 (G1150)	ПЗ-90.02	+0,36 ±0,1	-0,08 ±0,1	-0,18 ±0,1	0	0	0	0	2002.0
5	ПЗ-90.02	ПЗ-90.11	-0,373 +0,027	+0,186 ±0,056	+0,202 +0,033	-2,30 +2,11	+3,54 +0,87	-4,21 +0,82	-0,008 +0,004	2010.0
6	ГСК-2011	ПЗ-90.11	0,000 +0,008	+0,014 +0,018	-0,008 +0,011	-0,562 +0,698	-0,019 +0,259	+0,053 +0,227	-0,0006 +0,0010	2011.0
7	ПЗ-90.11	ITRF- 2008	-0,001 +0,002	-0,001 +0,002	0,000 +0,002	+0,019 +0,072	-0,042 +0,073	+0,002 +0,090	-0,000 +0,0003	2010.0

Надо чётко понимать порядок таких преобразований. Например, нельзя напрямую преобразовать координаты пунктов из системы координат WGS-84 в координаты системы СК-95. Необходимо сначала выполнить преобразования в системе координат СК-42, а затем из координат системы СК-42 получить координаты в системе СК-95, иначе ошибки преобразований будут значительны. Это связано с тем, что ключи перехода между системами существуют только для связей: (WGS-84 → СК-42) и (СК-42 → СК-95). Хотя, выполняя специальные методы калибровки, возможны вычисления и (WGS-84 → СК-95), но точность таких преобразований будет ниже.

Все вышесказанное относится только к плановым координатам X и Y . Для пересчёта высотных отметок требуются другие алгоритмы и не менее сложные.

7.2. Определение координат с помощью ГНСС-измерений

В качестве примера рассмотрим, как кажется, простую задачу по определению координат точки стояния с помощью «Глобальной навигационной спутниковой системы» ГНСС (*GNSS*). Совсем недавно эта аббревиатура звучала иначе – «Глобальная система позиционирования» *GPS*, и на сегодня ещё осталась в бытовых выражениях. Эту задачу маркшейдеру приходится выполнять достаточно часто при съёмках земной поверхности, карьеров и промышленных объектов.

Использование спутников для навигации и определения своего местоположения в бытовом понимании сегодня очень простая задача. Многие, даже простые смартфоны, сегодня снабжены модулями *GPS*-приёмников. Кстати, многие под термином *GPS* понимают Американскую спутниковую навигационную систему. На самом деле она называется “*Navstar*” – от сокращенного «навигационная звезда». Однако рассмотрим это немного подробнее (см. рис. 7.4).

Для определения всех трёх координат точки $A(X, Y, H)$ по данным со спутников, в принципе достаточно видеть всего 3 спутника и знать координаты их положения на небосводе. Для определения координат *GPS*-приёмнику, находящемуся в точ-

ке A , достаточно измерить расстояния $R1$, $R2$ и $R3$, так как расстояния $S1$, $S2$ и $S3$ могут быть вычислены из координат самих спутников через обратную геодезическую задачу. Мы же получаем жёсткую перевёрнутую пирамиду с вершиной в искомой точке A и основанием с тремя спутниками.

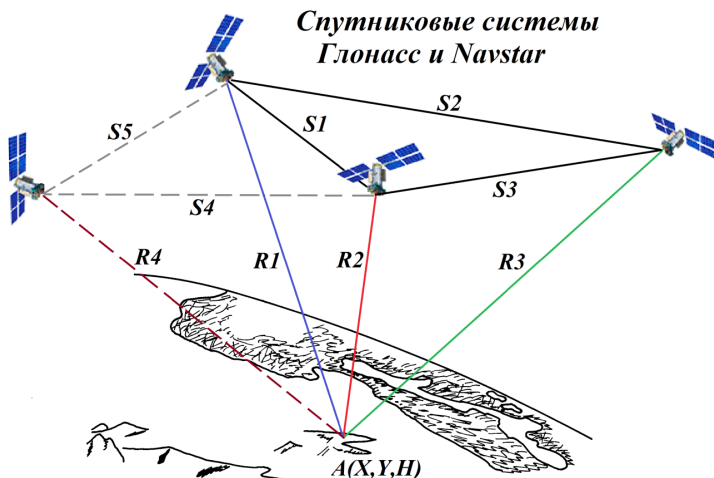


Рис. 7.4. Схема определения координат (X, Y, H) точки A с помощью спутниковых систем Глонасс и Navstar

Задача определения координат точки A решается при помощи элементарных формул тригонометрии. Четвёртый спутник (расстояния $R4$, $S4$ и $S5$ – показаны пунктиром) обычно используется для проверки результатов выполненных вычислений. Вот собственно на таком принципе и работают все навигационные системы. Однако на практике не так всё просто.

Во-первых, все спутники постоянно движутся, и с достаточно большой скоростью (около 14000 км/ч), т. е. их координаты очень быстро меняются. Измерить расстояние до спутников тоже не просто. Радиолуч, при помощи которого выполняют измерение расстояния от приёмника до спутника, движется по криволинейной траектории, так как он проходит через слои ионосферы и атмосферы различной плотности, а расстояние не маленькое 19–20 тыс. км, это если спутник расположен над головой, а если

в стороне (см. рис. 7.5)? А ведь приёмник ГНСС может принять не прямой сигнал от спутника, а отражённый от какого-либо препятствия (гора, здание и т. п.).

Для того чтобы исключить большинство ошибок измерений, применяют специальные методики:

1. Измерения выполняются большое количество раз (продолжительность измерений).
2. Измерения выполняются на 2 частотах.
3. В измерениях участвует от 4 до 16 спутников (как правило, не менее 6–8).
4. Используют базовые (эталонные) станции, где определяются поправки, вводимые в измеряемые расстояния.

В результате получают серию координат искомой точки (см. рис. 7.6).

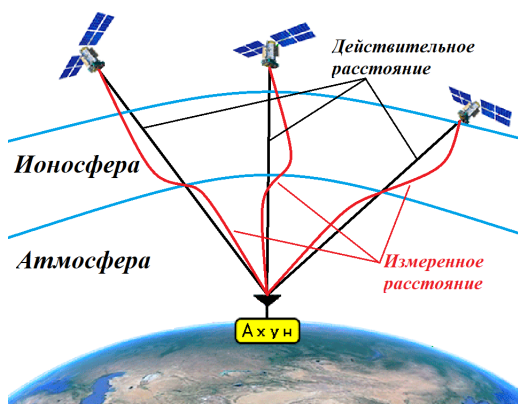


Рис. 7.5. Схема определения расстояний до спутников

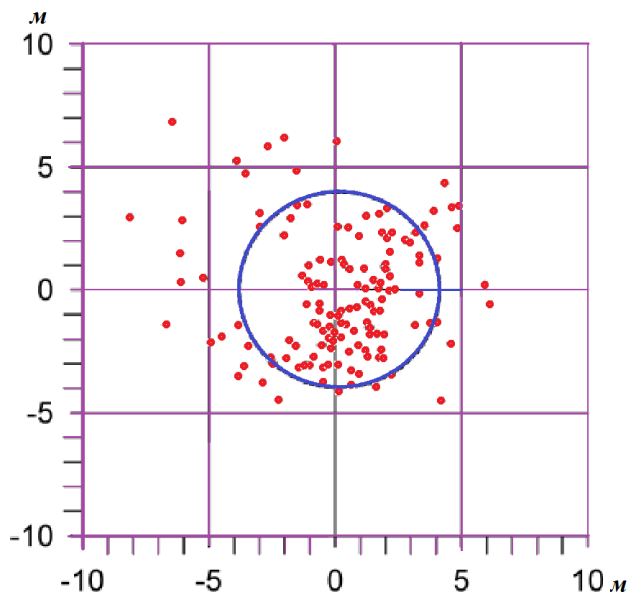


Рис. 7.6. Погрешность определения плановых координат точки по данным одного измерения, м

Как видно из рис. 7.6, погрешности отдельных определений координат могут превышать ± 5 м. Однако среднее из большого числа измерений может дать достаточно хорошие результаты. К сожалению, высотные отметки определяются в 2,0–3,0 раза хуже по сравнению с плановыми координатами.

Для получения 10-сантиметровой точности необходимо применение хотя бы одной базовой станции, а для получения миллиметровой точности, кроме измерительного приёмника, называемого ровером, требуется не менее 4 базовых станций.

Почему возникают такие сложности? В учебниках, посвящённых геодезии, указывается, что Земля имеет форму «геоида». Это очень сложная поверхность, форма которой определяется гравитационным полем Земли, с которой неудобно работать (см. рис. 7.7).

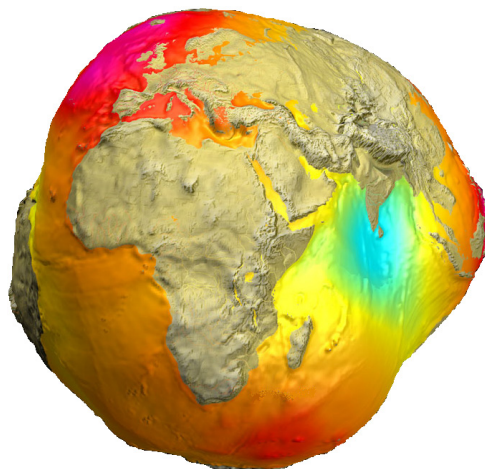


Рис. 7.7. Поверхность геоида, построенная по данным гравиметрической съёмки

Если построить разрез Земного шара, можно увидеть, как отличаются существующие поверхности друг от друга (см. рис. 7.8).

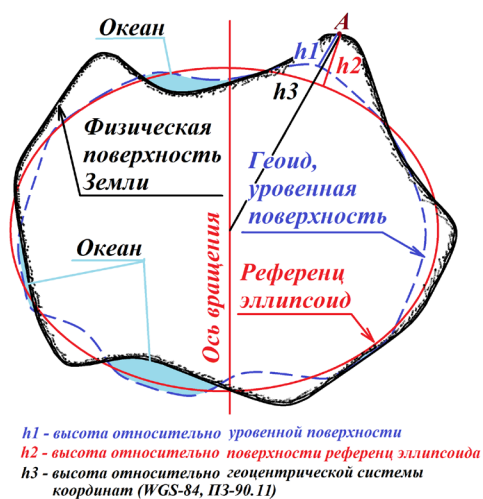


Рис. 7.8. Схема соотношения поверхностей Земли

Обратите внимание, что «Геоид», или уровенная поверхность, – «поверхность морей и океанов в спокойном состоянии, продолженная под материками», имеет очень сложную форму. Поэтому советским учёным М. С. Молоденским в 1950-х гг. было предложено в качестве формы Земли использовать «Квазигеоид», форма которого определяется на основе гравиметрических измерений.

Отклонения поверхностей квазигеоида и геоида могут достигать 2 м. Кстати, М. С. Молоденским были также разработаны формулы пересчёта координат из одной системы координат в другую.

Все картографические материалы строятся путём проектирования физической поверхности Земли на поверхность «Референц эллипсоида – эллипсоида Красовского 1942 г.» – математически правильной фигуры эллипсоида вращения, размеры которого подобраны по специальным критериям (минимальные отклонения от физической поверхности Земли на территории РФ). Из рис. 7.8 видно, что высоты точки $A(h_1, h_2 \text{ и } h_3)$ будут различны в зависимости от метода измерения.

По классической методике измерения высоты точки над уровнем моря (в РФ за нуль по высоте принят средний уровень Балтийского моря) выполняют геометрическим нивелированием. Особенность геометрического нивелирования заключается в том, что визирный луч прибора нивелира всегда располагается перпендикулярно отвесной линии или параллельно уровенной поверхности геоида. Таким образом, все высоты точек Земли принято определять относительно уровенной поверхности, а в спутниковых системах координат (геоцентрическая система координат) высоты определяются относительно центра Земли и пересчитываются на высоты от референц эллипсоида. Так как разница между поверхностью референц эллипсоида и уровенной поверхностью неизвестна (она в разных точках Земли различна), определение высотной отметки точки требует применения специальных методик измерений. На рис. 7.9 показаны соотношения различных определений высотной отметки точки M :

- H – высота точки M относительно условной уровенной поверхности;
- H' – высота точки M относительно квазигеоида;

- H^g – высота точки M относительно геоида;
- H^p – высота точки M относительно референц эллипсоида;
- ГНСС высота – высота точки M от центра Земли.

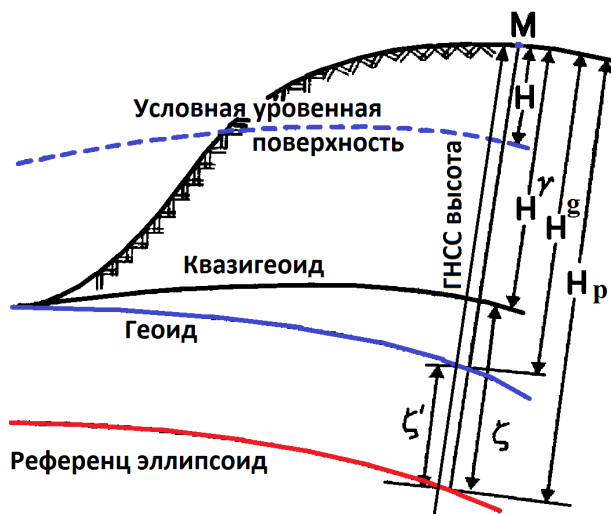


Рис. 7.9. Соотношение систем высот точки M , применяемых в геодезии и маркшейдерском деле

Для полной компенсации всех погрешностей в геодезической и маркшейдерской практике необходимо применение не только специальных профессиональных спутниковых приёмников, но и знание многих методик измерения, применение которых возможно только при определённых условиях. А результаты измерений должны обрабатываться на специализированном программном обеспечении.

Вопросы для самоконтроля

1. В чём заключается сложность определения координат точки стояния методом ГНСС?
2. Какова точность определения координат по результатам измерения ГНСС?
3. Почему сложно определить высоту точки по результатам ГНСС?

4. Какие системы координат применяются в РФ?
5. Какие системы координат введены в РФ с января 2017 года?
6. В чём сложность работы с системами координат в РФ?
7. Какими документами регламентируется работа маркшейдера в РФ?
8. На что необходимо обращать внимание при работе на современных маркшейдерских приборах?
9. Как применять программное обеспечение и компьютерную технику при решении маркшейдерских задач?

Рекомендуемая литература

1. Маркшейдерская энциклопедия / гл. ред. Л. А. Пучков. М.: Мир горной книги, 2006. 605 с.
2. О единых государственных системах координат: постановление Правительства РФ от 28.12. 2012 № 1463.
3. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ. М.: Госгортехнадзор России, 2004. 60 с.
4. Письмо Главного управления геодезии и картографии за № 1-1075 от 11.11. 1987. М.: ГУГК СССР, 1987. 8 с.

ГЛАВА. 8

Применение современных маркшейдерских приборов и программного обеспечения

8.1. Практика использования маркшейдерских приборов

Сегодня практически все маркшейдерские отделы повсеместно применяют современное электронное оборудование. Кажется, что можно только приветствовать такое положение дел. Однако первое, с чем сталкивается маркшейдер, это отсутствие инструктивных материалов по использованию этого оборудования. Торгующие организации постоянно хвалят тот или иной прибор, представляя его технические характеристики. Но давайте подробнее разберём некоторые ситуации.

Сейчас повсеместно начали применять электронные тахеометры. Они обладают высокой угловой точностью отсчитывания, как правило, имеют безотражательный дальномер и указатель направления дальности работы до 500 м. Многие маркшейдеры и геодезисты такими приборами начинают выполнять работы технической точности, например, прокладывать обычный теодолитный ход. Сразу возникает противоречие: проложение теодолитного хода требует измерения длин линий стальной лентой с относительной точностью 1:2000 (что соответствует погрешности измерения 0,5 м на 1 км хода), в связи с чем инструкция разрешает максимальную длину такого хода не более 0,9 км при съёмке масштаба 1:500 и точности измерения длин сторон 1:3000 [9] (это очень мало по современным меркам), а лазерный дальномер тахеометра измеряет длины сторон хода с точностью 2–4 мм на 1 км хода, давая относительную точность не менее 1:25000.

Возникает желание увеличить длину теодолитного хода. Для этого существует письмо Главного управления геодезии и картографии за № 1-1075 от 11 ноября 1987 г., которое разрешает увеличить не длину хода, а количество сторон в теодолитном ходе до 10 между узловыми и даже до 20 сторон между исходными точками [16]. При этом в письме не поясняется, какой длины может быть теодолитный ход. Выходит, если маркшейдер длины сторон возьмет по 5 км, а это позволяют современные тахеометры, то длина хода может составить 100 км. Вот тут и начинается маркшейдерское искусство. Маркшейдер должен рассчитать все возможные погрешности при измерениях и определить оптимальные значения расстояний, углов и количество сторон. Перечислим основные моменты:

- длины сторон нельзя брать менее 100 м. При коротких сторонах теодолитного хода падает точность измерения углов в теодолитном ходе;

- длины сторон не должны быть очень большими (хотя тут ограничений нет), так как с увеличением длины сторон возникает необходимость введения дополнительных поправок за кривизну Земли и рефракцию. А эти поправки зависят от температуры воздуха на измеряемом участке, давления и влажности воздуха, абсолютной высоты и перепада высот точек, между которыми измеряют расстояние.

С точки зрения профессионального решения лучше отказаться от теодолитного хода и перейти к построению полигонометрического хода 1-го или 2-го разряда, тем более что электронный тахеометр это позволяет. Однако и тут не всё так просто. Все проводимые измерения должны опираться на исходные точки более высокого класса (это золотое правило геодезии). А если их нет на этом участке?

Мы принципиально не приводим формулы (они достаточно сложны и требуют специальной математической подготовки), по которым выполняют такие расчёты. Их изучают в специальных курсах геодезии и маркшейдерского дела, но об особенностях проводимых измерений маркшейдер и геодезист должен помнить всегда.

Повсеместно электронные тахеометры используются и для определения координат точки стояния методом обратной засечки. Однако в современных инструкциях формул определения погрешности решения такой задачи нет. Дело в том, что изменилась

методика измерения, по которой стало достаточно 2 исходных точек вместо 3, так как дополнительно стали измерять и расстояния до исходных точек.

Проведённые натурные эксперименты и математическое моделирование показали, что при расстояниях до исходных точек около 1 км и перепаде высот 80–100 м, что типично для измерений на карьере средней мощности, погрешность определения координат искомой точки составит 6–10 см. Маркшейдеру опять следует подумать, устроит ли его такая точность измерений или необходимо применить другую методику измерения.

В качестве ещё одного примера можно привести широко рекламируемые аэрофотосъёмки, выполняемые с беспилотников. Они действительно позволяют быстро получить съёмку больших участков местности. Но прежде чем соглашаться на такие услуги, следует внимательно ознакомиться с техническими характеристиками, причём не летательного аппарата, а фотокамеры, установленной на нём, так как именно она определяет точность выполненных измерений. Вот тут маркшейдер опять сталкивается с проблемой точности измерений.

На находящиеся в широкой продаже беспилотники или вертолеты устанавливаются, к сожалению, может, и хорошие, но бытовые фотокамеры. Да, мы получим хорошую красивую картинку, именно картинку, так как в фотокамеры бытового уровня устанавливаются короткофокусные объективы с большим количеством линз. Вспомним школьную физику, раздел оптики: луч света, проходя через среды различной плотности, преломляется.

В объективах бытового уровня присутствуют значительные искажения, а исправляются они современным программным обеспечением того же фотоаппарата. Поэтому наши глаза видят достаточно хорошую картинку, но это не даёт никакой гарантии о точности полученного материала. Насколько была откорректирована данная фотография, мы можем только догадываться.

В аэрофотосъёмке на профессиональном уровне, как правило, должны использоваться длиннофокусные объективы с постоянным фокусным расстоянием. Такие объективы до сих пор применяются в так называемых профессиональных зеркальных фотоаппаратах. И такие фотокамеры имеют значительную стоимость. Поэтому быстрое выполнение работы не означает её высокое качество.

Используя современное электронное, зачастую высококачественное и дорогое оборудование, маркшейдер всегда должен помнить о правильности его применения и использованных методиках измерения. Он должен всегда думать о точности выполненных измерений и не связывать эту точность только с технической точностью используемого оборудования. Надо помнить, что все измерения выполняются не в безвоздушном пространстве. На точность измерений влияет окружающая среда с её особенностями: наличие воздушной оболочки Земли, гравитационного и магнитного поля.

Например, ошибки измерения ГНСС-приёмников могут достигать значительных размеров, хотя координаты они всегда выдают с точностью до миллиметров. Нам приходилось сталкиваться со случаем, когда координата, определённая прибором, отличалась от действительной на 25 м. Данная ошибка была вызвана близким расположением рядом с прибором двух вышек сотовой связи. Находясь на расстоянии около 50 м от GPS-приёмника, они искажали приём сигналов от спутников.

8.2. Особенности применения современного программного обеспечения

Решение маркшейдерских задач в XXI в. немыслимо без применения компьютерных технологий. Мы постепенно уходим от карт и планов, выполненных на бумажной основе. Зачастую нам уже привычно видеть карту местности или технический чертеж на экране монитора. Нам не нужны линейка, карандаш, транспортир и циркуль, чтобы выполнить какие-либо измерения на карте или плане. Всё это выполняется другими средствами и часто одним кликом компьютерной мыши. Компьютер и специальное программное обеспечение позволяют нам в несколько раз быстрее выполнять различные задачи, подсчитывать объёмы различных объектов, легко выполнять математические действия не только с числами, но и со сложными поверхностями, строить 3D-модели реальных объектов.

Однако за этой простотой кроется и много подводных камней. Например, если оператор работает с картой местности масштаба 1:2000, в наиболее распространённой программе *AutoCAD*, то все

координаты точек программа, в зависимости от настроек, выдаёт с точностью до одного миллиметра. Однако, как известно из теории геодезических съёмок, точность такой карты составляет всего 0,2 м. Это вызвано тем, что съёмка местности производится всегда дискретно, измеряемые точки берутся по сетке в среднем 30×30 м. Более мелкие детали, например рельефа, сглаживаются или просто теряются. В геодезии существует правило: нельзя из карты мелкого масштаба получить карту более крупного масштаба, например: из карты масштаба 1:1000 нельзя получить карту масштаба 1:500 (наоборот – можно). На самом деле, трансформировать карту можно, но точность карты масштаба 1:500 будет ниже необходимой, т.е. останется такой же, как карты масштаба 1:1000, что недопустимо. Электронные же варианты карты нам никак об этом не сообщают. Об этой особенности картографической продукции маркшейдер должен помнить всегда. Помнить, что точность изображённых на карте объектов зависит от исходной точности выполненной съёмки, а не от тех чисел, которые нам выдаёт компьютерная программа.

Поэтому, проводя обработку маркшейдерских измерений и используя даже очень современные средства программного обеспечения, надо всегда помнить о точности вводимых исходных данных. На самом деле надо знать, что компьютерной программе безразлично, какие значения вы вводите в поля исходной формы. Как правило, программа проглотит всё и только от специалиста (оператора) зависит, что и как она посчитает.

Ещё одна особенность использования специальных программ, это наше незнание алгоритма, по которому программа выполняет вычисления. Даже если к программе прилагается подробная инструкция, это не является гарантией того, что в ней подробно излагается алгоритм её работы. Это тоже важная часть работы маркшейдера. Он должен точно знать метод обработки исходной информации, так как от этого зависит точность конечных результатов. В нашей стране часто используются иные методы вычислений, чем принятые в других странах. И пока нам приходится использовать зарубежные программные средства вычислений, это надо учитывать.

Вопросы для самоконтроля

1. На что необходимо обращать внимание при работе на современных маркшейдерских приборах?
2. Как применять программное обеспечение и компьютерную технику при решении маркшейдерских задач?

Рекомендуемая литература

1. О единых государственных системах координат: постановление Правительства РФ от 28.12.2012 № 1463.
2. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ. М.: Госгортехнадзор России, 2004. 60 с.
3. ГКИНП-02-033-82. Инструкция по топографической съёмке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500. М.: Недра, 1982. 160 с.
4. Письмо Главного управления геодезии и картографии за № 1-1075 от 11.11.1987. М.: ГУГК СССР, 1987. 8 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии излагаемый материал представлен исторической справкой о возникновении маркшейдерских измерений в древности и примерами современных методов измерения, проводимых как на Земной поверхности, так и её недрах. Достаточно подробно изложены основы современных измерений, необходимых маркшейдеру в процессе обеспечения строительства горных предприятий и при проведении предпроектных изысканий.

В издании подробно рассмотрены особенности применения современных методик XXI в.: маркшейдерских и геодезических измерений и съёмок, с которыми может столкнуться маркшейдер в своей практической деятельности; рассматриваются основные причины возникновения погрешностей измерений, приводятся методы устранения или существенного их уменьшения. Уделено внимание также методам предварительной оценки погрешностей измерений, которые необходимы при составлении проектов производства как геодезических, так и маркшейдерских работ. Приводятся ссылки на нормативные источники, выполнение которых обязательно при производстве маркшейдерских работ.

Пособие может быть также рекомендовано для инженерно-технических работников маркшейдерских служб горных предприятий.

ГЛОССАРИЙ

Анаглифический метод – метод получения стереоэффекта для стереопары обычных изображений при помощи цветового кодирования изображений, предназначенных для левого и правого глаза.

Аэрофотосъёмка – фотографирование участка земной поверхности с летательного аппарата.

База данных – представленная в объективной форме совокупность самостоятельных материалов (статей, расчётов, нормативных актов, судебных решений и иных подобных материалов), систематизированных каким либо образом.

Буссольная съёмка – съёмка горных выработок при помощи шнуров буссоли (компаса) и полукруга.

Векторизация растровых изображений – преобразование изображения из растрового представления в векторное.

Векторная модель пространственных данных – это цифровое представление точечных, линейных и полигональных пространственных объектов в виде набора координатных пар.

Внешняя ориентация фотокамеры – параметры положения камеры в пространстве: положение (координаты: x , y , z) и ориентация (углы разворота и наклона: ω , ϕ , κ).

Географические координаты – обобщённое понятие об астрономических и геодезических координатах, когда отклонения отвесных линий не учитывают.

Географический (истинный) азимут – горизонтальный угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки от северного направления географического меридиана до заданного направления и изменяющийся от 0 до 360°.

Геодезическая высота – высота точки над поверхностью земного эллипсоида.

Геодезическая долгота – двугранный угол между плоскостями геодезического меридиана данной точки и начального геодезического меридиана.

Геодезическая дуга Струве – Теннера – ряд триангуляции протяжённостью 25°20', проложенный по территории России от устья Дуная до Северного Ледовитого океана через Финляндию с включением территорий Швеции и Норвегии.

Геодезическая широта – угол, образованный нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке и плоскостью его экватора.

Геодезические координаты – три величины, две из которых характеризуют направление нормали к поверхности земного эллипсоида в данной точке пространства относительно плоскостей его экватора и начального меридиана, а третья является высотой точки над поверхностью земного эллипсоида.

Геодезия – наука об определении формы, размеров Земли и измерениях на земной поверхности.

Геоид – фигура Земли, образованная уровенной поверхностью, совпадающей с поверхностью Мирового океана в состоянии полного покоя и равновесия и продолженной под материками.

Геоинформационная система – система сбора, хранения, анализа и графической визуализации пространственных (географических) данных и связанной с ними информации о необходимых объектах.

Геометрическое нивелирование – нивелирование при помощи геодезического прибора с горизонтальной визирной осью.

Герон Александрийский – древнегреческий математик, механик и изобретатель.

Глонасс – Глобальная навигационная спутниковая система РФ (ГНСС).

ГНСС (GNSS) – Глобальная навигационная спутниковая система.

ГНСС (GNSS) – Глобальная навигационная спутниковая система. Ранее имела название GPS – глобальная система позиционирования.

Дигитайзер – устройство, предназначенное для ввода в компьютер чертежей с листа.

Дисторсия – искажения, возникающие в объективе фотоаппарата.

Земной эллипсоид – эллипсоид, который характеризует фигуру и размеры Земли.

Зум-объектив – фотообъектив с переменным фокусным расстоянием.

Калибровка фотокамеры – определения значений элементов внутреннего ориентирования съёмочных камер (дисторсии объектива).

Кроп-фактор – показывает, во сколько раз диагональ данной матрицы отличается по размеру от полноформатной.

Маркшейдерское дело – специальность горного инженера. В переводе с немецкого: Искусство устанавливать границы.

Наземный лазерный сканер – сканер для выполнения геодезических и маркшейдерских высокоточных съёмок на земной поверхности.

Обратная геодезическая задача – определение длины и направления линии по данным координатам её начальной и конечной точек.

Ортофотоплан – это топографический план местности на точной геодезической основе, полученный путём аэрофотосъёмки или космической съёмки с последующим преобразованием снимков из центральной проекции в ортогональную с помощью метода ортотрансформирования.

Осевой меридиан – меридиан, принятый за ось какой-либо системы координат на поверхности.

ПЗС-матрица – означает «Приборы с Зарядовой Связью». ПЗС-матрица способна под воздействием света накапливать, сохранять и затем позволять считывать электрические заряды.

Пиксели – точки, которые сохраняют в светочувствительной матрице фотоаппарата информацию в цифровой форме об отдельной части кадра.

Плоские прямоугольные геодезические координаты – прямоугольные координаты на плоскости, на которой отображена по определённому математическому закону поверхность земного эллипсоида.

Плоский тест-объект – сетка прямоугольных квадратов или других геометрических фигур, предназначенных для определения искажений в фотокамерах.

Плоскость геодезического меридиана – плоскость, проходящая через нормаль к поверхности земного эллипсоида в данной точке и параллельная его малой оси.

Плоскость начального меридиана – плоскость меридиана, от которой ведётся счёт долгот.

Постобработка – камеральная обработка результатов полевых измерений.

Проекция Меркатора – равноугольная цилиндрическая проекция Меркатора – одна из основных картографических проекций. Разработана Герардом Меркатором для применения в его «Атласе».

Пространственный тест-объект – тест-объект, представляет собой пространственное поле маркированных точек, координаты которых известны.

Растровая модель данных – цифровое представление пространственных объектов в виде совокупности ячеек раstra (пикселов) с присвоенными им значениями класса объекта.

Референц-эллипсоид – земной эллипсоид, принятый для обработки геодезических измерений и установления системы геодезических координат.

Спектральная съёмка – вид фотосъёмки, в процессе которой происходит одновременное получение фотографических изображений объекта в различных участках видимого и невидимого спектров излучения (инфракрасная съёмка, цветная, чёрно-белая и т. п.).

Триангуляция Делоне – триангуляция для заданного множества точек S на плоскости, при которой для любого треугольника все точки из S , за исключением точек, являющихся его вершинами, лежат вне окружности.

Уровенная поверхность – поверхность морей и океанов в спокойном состоянии, продолженная под материками.

Фокусное расстояние объектива – физическая характеристика оптической системы.

Фотограмметрический сканер – сканер высокого разрешения (15 мкм) для преобразования аналоговых аэрофотоснимков (цифровое изображение).

Фотограмметрия – решает задачи измерений по аэрофото- и космическим снимкам для различных целей, в том числе: для получения карт и планов, обмеров зданий и сооружений и т. п.

TIN-модель – *Triangulation Irregular Network* – триангуляционная нерегулярная сеть (модель поверхности в виде сети смежных не пересекающихся треугольных граней, определённая по узлам и ребрам, которые покрывают поверхность).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агрикола, Г. О горном деле и металлургии в двенадцати книгах (главах) / Г. Агрикола; под ред. С. В. Шухардина. – 2-е изд. – Москва: Недра, 1986. – 294 с.
2. Бугаевский, Л. М. Геоинформационные системы: учебник для вузов / Л. М. Бугаевский, В. Я. Цветков. – Москва: Златоуст, 2000. – 342 с.
3. Букринский, В. А. История маркшейдерии: учеб. пособие для вузов / В. А. Букринский, В. Н. Попов, П. В. Яковлев; под ред. М. Е. Певзнера. – Москва: Горная книга, 2007. – 291 с.
4. Вдовин, В. С. Развитие геоцентрических систем координат в России / В. С. Вдовин // VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Геодезия. Маркшейдерия. Аэросъемка. На рубеже веков». 16–17 февр. 2017 г. Москва, 2017.
5. ГКИНП (ГНТА)–02-036-02. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов / Федеральная служба геодезии и картографии России. – Москва: ЦНИИГАиК, 2002. – 48 с.
6. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных = Introduction to Database Systems / К. Дж. Дейт. – 8-е изд. – Москва: Вильямс, 2006. – 1071 с.
7. Заводской устав Татищева // Горный журнал. 1831. Кн. 1. С. 1–22; Кн. 2. С. 174–197; Кн. 3. С. 332–349; Кн. 5. С. 163–179; Кн. 6. С. 331–344; Кн. 7. С. 1–14; Кн. 8. С. 145–157; Кн. 9. С. 315–328; Кн. 10. С. 1–16.
8. Зинченко, О. Н. Цифровые камеры для топографической аэрофотосъемки. Обзор моделей [Электронный ресурс] / О. Н. Зинченко. – Москва: Ракурс, 2013. – 14 с. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 20.09.2018).

9. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. – Москва: Недра, 1985. – 152 с.
10. Капутин, Ю. Е. Горные компьютерные технологии и гео-статистика / Ю. Е. Капутин. – Москва: Недра, 2002. – 424 с.
11. Кашенко, Н. А. Геоинформационные системы: учеб. пособие для вузов / Н. А. Кашенко, Е. В. Попов, А. В. Чечин; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Нижний Новгород: ННГАСУ, 2012. – 130 с.
12. Кузнецов, С. Д. Основы баз данных / С. Д. Кузнецов. – 2-е изд. – Москва: Интернет-ун-т информ. технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 484 с.
13. Ломоносов, М. В. Полное собрание сочинений. – Т. 5. Труды по минералогии, металлургии и горному делу. 1744–1763 гг. – Москва; Ленинград: Академия наук СССР, 1954. – 757 с.
14. Маркшейдерская энциклопедия / гл. ред. Л. А. Пучков. – Москва: Мир горной книги, 2006. – 605 с.
15. Новоселов, В. Г. Использование модуля PHOTOMOD Mosaic для построения качественных ортофотопланов [Электронный ресурс] / В. Г. Новоселов. – Москва: Ракурс, 2005. – режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 20.07.2018).
16. О внесении изменений в «Инструкцию по топографической съемке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1: 500»: письмо Главного управления геодезии и картографии от 11.11.87 № 1-1075. – Москва: ГУГК СССР, 1987. – 8 с.
17. О единых государственных системах координат: постановление Правительства РФ от 28.12.2012. № 1463.
18. О лицензировании производства маркшейдерских работ: постановление Правительства РФ от 28.03.2012. № 257.
19. Пересчет координат МСК / СК-42 / СК-63 / WGS84 / ПЗ-90 онлайн [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mapbasic.ru/msk-wgs/> (дата обращения: 27.09.2018).
20. По страницам сочинения Герона Александрийского «О диоптре» // Квант. – 2010. – № 3. – С. 23–25.
21. РД 07-408-01. Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр. – Москва: Госгортехнадзор России, 2001. – 7 с.
22. РД 07-603-03. Инструкция по производству маркшейдерских работ. – Москва: Госгортехнадзор России, 2004. – 60 с.

23. РД 07-604-03. Инструкция по маркшейдерскому учёту объемов горных работ при добыче полезных ископаемых открытым способом. – Москва: Госгортехнадзор России, 2003. – 13 с.

24. Рекомендации по контролю точности на различных этапах фотограмметрической обработки в системе PHOTOMOD [Электронный ресурс] / Служба технической поддержки. – Москва: Ракурс, 2013. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 7.09.2018).

25. Роланд, Ф. Д. Основные концепции баз данных / Ф. Д. Роланд. – Москва: Вильямс, 2002. – 256 с.

26. Сечин, А. Ю. Некоторые аспекты использования современных цифровых фотограмметрических камер [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин. – Москва: Ракурс, 2008. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 10.07.2018).

27. Сечин, А. Ю. Новая технология построения «плотных» моделей рельефа и эффективное использование возможностей параллельных вычислений в версии 5.1 системы PHOTOMOD [Электронный ресурс] / А. Ю. Сечин. – Москва: Ракурс, 2011. – Режим доступа: <http://www.racurs.ru/> (дата обращения: 25.06.2018).

28. УРАЛГЕОИНФОРМ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ugi.ru/kartograficheskie_uslugi/aerofotosemka/ (дата обращения: 15.06.2018).

29. 3GSM GmbH [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.3gsm.at/services/blastmetrix-3d/> (дата обращения: 25.06.2018).

30. ADAM Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.adamtech.com.au/3dm/analyst.html/> (дата обращения: 25.06.2018).

Учебное издание

Смолич Сергей Вениаминович
Смолич Константин Сергеевич
Просекин Борис Александрович

СОВРЕМЕННОЕ МАРКШЕЙДЕРСКОЕ ИСКУССТВО

Редактор Т. Р. Шевчук
Вёрстка И. Н. Аргуновой

Подписано в печать 22.11.2018.
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Гарнитура Times New Roman. Способ печати цифровой.
Усл. печ. л. 11,1. Уч.-изд. л. 7,9. Заказ № 18176.
Тираж 100 экз. (1-й з-д – 35 экз.).

ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный университет»
672039, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30