

**А.Н. Петин, П.В. Васильев**

**ГЕОИНФОРМАТИКА  
В РАЦИОНАЛЬНОМ  
НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ**



Белгородский государственный национальный  
исследовательский университет

А.Н. Петин, П.В. Васильев

# ГЕОИНФОРМАТИКА В РАЦИОНАЛЬНОМ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

Монография

Издательско-полиграфический  
комплекс  
НИУ БелГУ

Белгород 2011

УДК 528.92:550.8 / 004.9 (075)

ББК 26.8я73+32.973.202-018я73

П 21

Печатается по решению  
редакционно-издательского совета  
Белгородского государственного университета

Рецензенты:

*Б.И. Кочуров*, доктор географических наук, профессор,  
ведущий научный сотрудник Института географии РАН;

*В.А. Дунаев*, доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
заведующий отделом геологии и геоинформатики ФГУП ВИОГЕМ

**Петин А.Н.**

П 21      Геоинформатика в рациональном недропользовании / А.Н. Петин,  
П.В. Васильев – Белгород: Изд-во БелГУ, 2011. – 268 с.

ISBN 978-5-9571-1455-3

Излагаются основы геоинформационного обеспечения рационального недропользования в районах интенсивного развития технологий добычи и переработки запасов месторождений твёрдых полезных ископаемых. Рассмотрены вопросы методики сбора и анализа данных, оконтуривания рудных тел, прогнозирования геолого-технологических показателей, картирования и оценки промышленных запасов месторождений. Описаны компьютерные методы построения моделей рудных тел и современные подходы к управлению извлечением запасов при соблюдении эколого-экономических и нормативно-правовых ограничений, обеспечивающих минимизацию ущерба окружающей среде. Дается обзор современных горно-геологических информационных систем рационального недропользования, оптимизации добычи и решении задач геоэкологии.

Монография может быть полезна специалистам в области наук о Земле, недропользователям, а также студентам, обучающимся по специальностям: «Природопользование», «Земельный кадастр», «Инженерная геология» и «Гидрогеология».

ISBN 978-5-9571-1455-3

УДК 528.92:550.8 / 004.9 (075)

ББК 26.8я73+32.973.202-018я73

© Петин А.Н., Васильев П.В. 2011

© Белгородский государственный университет, 2011



# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Понятие о горно-геологической информационной системе .....	3
1.2. Порядок учета и стадийность изучения недр .....	6
1.3. Методологические основы изучения взаимодействия геологической среды и техносферы.....	7
1.4. Развитие ГИС недропользования .....	11
1.5. Инфраструктура пространственных данных.....	12
1.6. Стандартизация пространственных данных.....	14
1.7. Нормативно-правовое обеспечение разработки месторождений.....	17
1.7.1. Учет движения запасов полезных ископаемых.....	17
1.7.2. Эксплуатационные и разведочные работы.....	18
1.7.3. Геолого-маркшейдерское обеспечение горных работ.....	19
<b>ГЛАВА 2 СБОР ДАННЫХ И ОБРАБОТКА ИЗМЕРЕНИЙ .....</b>	<b>24</b>
2.1. Системы координат и картографические проекции .....	24
2.2. Сбор данных .....	26
2.2.1. Топографические и маркшейдерские измерения.....	26
2.2.2. Геологическая документация и опробование .....	32
2.2.3. Сбор геологических данных.....	36
2.2.4. Геохимическое исследование недр .....	38
2.2.5. Геофизические методы разведки.....	40
2.2.6. Методы технологической минералогии .....	48
2.3. Первичная обработка данных.....	50
2.3.1. Векторизация и растеризация.....	50
2.3.2. Декластеризация данных .....	52
2.3.3. Расчет траектории скважины .....	53
2.3.4. Составление композитных и групповых проб.....	54
2.3.5. Учёт проб с резко выделяющимися значениями .....	56
<b>ГЛАВА 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....</b>	<b>58</b>
3.1. Особенности моделирования в недропользовании.....	58
3.2. Типы моделей пространственных данных .....	63
3.3. Построение комплексных моделей .....	72
3.4. Формирование баз данных проб и моделей.....	73
3.5. Анализ пространственной изменчивости.....	76
3.5.1. Расчет эмпирических вариограмм.....	77
3.5.2. Моделирование вариограмм .....	80
3.6. Прогнозирование качества минерального сырья .....	81
3.6.1. Показатели качества минерального сырья.....	83
3.6.2. Прогноз технологических свойств руд .....	86
3.6.3. Прогноз развития оруденения.....	92
3.7. Оконтуривание рудных тел .....	94
3.8. Каркасное моделирование.....	95
3.9. Блочное моделирование .....	96
3.10. Интерполяция геопоказателей.....	100
3.10.1. Метод ближайшей точки.....	100
3.10.2. Метод линейной интерполяции .....	101
3.10.3. Метод обратных расстояний .....	101
3.10.4. Метод естественных соседей .....	103

3.10.5. Метод кригинг .....	105
3.10.6. Метод имитации кондиций.....	112
3.11. СОЗДАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ .....	114
3.11.1. Операции с множествами .....	114
3.11.2. Оценка сложности месторождений.....	116
3.12. ВИЗУАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛЕЙ И ОТОБРАЖЕНИЕ КАРТ .....	120
<b>ГЛАВА 4 ПОДСЧЕТ ЗАПАСОВ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ.....</b>	<b>124</b>
4.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ ПО СТЕПЕНИ РАЗВЕДАННОСТИ .....	125
4.2. КОНДИЦИИ ДЛЯ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ.....	128
4.2.1. Параметры кондиций для балансовых запасов .....	129
4.2.2. Кондиции для подсчета забалансовых запасов .....	133
4.3. МЕТОДЫ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ .....	134
4.3.1. Метод среднего арифметического.....	135
4.3.2. Метод треугольников .....	141
4.3.3. Метод многоугольников .....	142
4.3.4. Метод разрезов.....	145
4.3.5. Метод осаждения слитка .....	149
4.3.6. Статистический метод .....	152
4.3.7. Метод стохастической имитации.....	153
4.3.8. Метод регулярных блоков .....	153
4.4. ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЗАПАСОВ .....	155
4.5. ПОГРЕШНОСТЬ ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ .....	157
4.6. ВЫБОР МЕТОДА ПОДСЧЕТА ЗАПАСОВ .....	159
<b>ГЛАВА 5 УПРАВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЕМ ЗАПАСОВ.....</b>	<b>163</b>
5.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЗАПАСОВ ПО СТЕПЕНИ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ К ДОБЫЧЕ .....	163
5.2. УЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЗАПАСОВ РУД.....	167
5.3. ФОРМЫ УЧЁТА ДВИЖЕНИЯ ЗАПАСОВ.....	168
5.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ И ЗАСОРЕНИЯ .....	169
5.5. УЧЕТ ЗАПАСОВ ПО СТЕПЕНИ ГОТОВНОСТИ К ВЫЕМКЕ .....	173
5.6. ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ОСВОЕНИЯ НЕДР .....	176
5.7. ТРЕБОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ .....	188
<b>ГЛАВА 6 ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ .....</b>	<b>197</b>
6.1. ОБМЕН ПРОСТРАНСТВЕННЫМИ ДАННЫМИ ЧЕРЕЗ ИНТЕРНЕТ.....	197
6.2. ПРОГРАММЫ ДЛЯ СОЗДАНИЯ НГИС .....	198
6.3. ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ .....	210
6.3.1. Горно-геологическая информационная система Geoblock. ....	212
6.3.2. Геолого-маркшейдерская система для горных работ ГЕОМИКС.....	214
6.3.3. Программное обеспечение Roxar .....	216
6.4. ОПТИМИЗАТОРЫ ГРАНИЦ ОТКРЫТЫХ РАЗРАБОТОК.....	217
6.5. ПРИМЕНЕНИЕ ГИС В ГЕОЭКОЛОГИИ.....	241
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>249</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЯ .....</b>	<b>252</b>
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО НЕДРОПОЛЬЗОВАНИЯ.....	252
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....</b>	<b>253</b>
<b>ССЫЛКИ В ИНТЕРНЕТ .....</b>	<b>254</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>255</b>

## Введение

Современные средства вычислительной техники и программного обеспечения предоставляют недропользователям, географам, геологам, горным инженерам и геоэкологам широкие возможности решения задач информационно-аналитического сопровождения процессов разведки, добычи и переработки минерального сырья. Компьютерные технологии построения моделей земельных и горных отводов предприятий по добыче полезных ископаемых сегодня повсеместно применяются не только на этапе геологического изучения месторождений и на стадии технико-экономического обоснования проектов их освоения, но и внедряются в практику каждодневной работы горнодобывающих компаний. В связи с этим моделирование формирования качества и оптимизация управления запасами минерального сырья с применением компьютеров является необходимым условием повышения экономической эффективности недропользования и улучшения конкурентоспособности горнодобывающей компании на мировом рынке.

Вопросы геолого-маркшейдерского обеспечения рационального недропользования рассматривались во многих работах [1; 2; 3]. В последние годы в связи с широким распространением новых программно-аппаратных средств моделирования и автоматизации горного производства весьма трудоемкие процедуры оценки запасов и планирования добычи требуют развития новых подходов. Было предложено большое число оригинальных приёмов моделирования залежей, способов и методов подсчёта запасов. Основные *методы* оценки запасов месторождений, применяемые в геологической практике, были детально описаны в трудах В.И. Смирнова [4], Е.И. Погребницкого, И.Д. Когана [5; 6] и других геологов [7]. В работах геодезистов и маркшейдеров П.А. Рыжова, И.Н. Ушакова, В.А. Букринского [8; 9; 1] и других специалистов [10]. Вопросы управления качеством, усреднения и полноты извлечения запасов руд рассматривались в трудах Адигамова, Бастана, Грачева, Ершова, Ермолова Ломоносова, Стрельцова, Зарайского и многих других исследователей [11; 12]. Ими были заложены теоретические основы управления запасами и качеством минерального сырья при разработке рудных месторождений.

Математические основы компьютерной методики геостатистического анализа данных при решении базовых геолого-маркшейдерских графических задач достаточно детально изложены в монографии [13], где также приведены примеры построения планов, разрезов и объёмных изображений объектов для условий подземной и открытой разработки месторождений. Для анализа текущего состояния отработки запасов необходимо иметь подробную компьютерную цифровую модель месторождения, которую можно сделать только на основе всего комплекса проведенных геологораз-

ведочных работ и геодезических измерений. Для создания цифровых моделей рельефа (ЦМР) всё шире используются аэрокосмические данные, спутниковые измерения и результаты дистанционного многозонального зондирования. Хотя в вопросах теории и практики применения геостатистики в настоящее время накоплен большой [14; 15; 16] и использования крупных интегрированных систем горно-геологического моделирования [13; 17], однако вместе с развитием передовых технологий в горном производстве возникает новый круг задач, которые требуют решения с помощью новейших компьютерных технологий. В их число входят такие задачи, как автоматизация процесса построения цифровых моделей месторождений, выбор оптимальных схем триангуляции и интерполяции, поиск наилучшего метода подсчёта запасов, визуализация динамических моделей открытой и подземной отработки запасов, управление качеством рудопотоков, обеспечение безопасности эксплуатации гидротехнических сооружений и складирование отвалов пустых пород с учётом экологических последствий.

Таким образом, основной целью применения геоинформационных технологий в недропользовании является повышение экономической эффективности работы и конкурентоспособности горнодобывающих предприятий за счет автоматизации геолого-маркшейдерского программного обеспечения эксплуатации месторождений. При построении комплексных горно-геологических и эколого-географических моделей открывается возможность более достоверно оценить качество и количество имеющихся промышленных запасов, повысить точность прогноза техногенных изменений на окружающих территориях. Объединение детальных геолого-географических моделей размещения полезных ископаемых с горно-технологическими моделями эксплуатации существенно повышает оперативность экономической оценки месторождений [5][18; 19]. В конечном счете определение реальной и потенциальной рыночной стоимости минерального сырья в недрах при вероятных издержках производства является сегодня необходимым элементом планирования стратегии развития горнодобывающей компании, действующей в условиях постоянного повышения социально-технологических требований и достаточно жестких эколого-экономических ограничений.



## Глава 1

### **Общие вопросы организации рационального недропользования**

В настоящее время при освоении недр и добыче полезных ископаемых все шире внедряются компьютерные технологии и программные средства, которые позволяют автоматизировать трудоемкую работу по составлению карт, визуализации геологических структур, планированию горных работ и подсчету промышленных запасов. Речь идет, в первую очередь, об использовании специализированных геоинформационных систем, позволяющих наиболее оперативно и эффективно решать практические задачи горнодобывающей промышленности. В последние годы геологами, маркшейдерами и горными инженерами все интенсивнее используются интегрированные горно-геологические или недропользовательские геоинформационные системы (НГИС). По функциональному наполнению, имея много общего с традиционными ГИС, эти системы отличаются рядом особенностей, главные из которых:

- преимущественная ориентировка на решение объёмных задач в связи с естественной трехмерностью размещения геопоказателей и атрибутов в недрах месторождения;
- применение широкого комплекса методов математического моделирования для описания строения залежей;
- необходимость автоматизированного создания многослойных детальных карт, планов и разрезов масштабного ряда от 1:500 до 1:5000;
- наличие модулей или подсистем решения специальных технологических задач (от подсчета объемов и запасов до календарного планирования и оптимизации добычи);
- визуализация динамических, изменяющихся во времени моделей для наглядного графического представления результатов работы.

Количество интегрированных горно-геологических информационных систем в мире с полным набором функций для решения задач горнодобывающих предприятий не так уж велико. Это объясняется тем, что для создания комплексной горно-геологической системы требуются значительные интеллектуальные и материальные ресурсы: специализированные коллективы разработчиков, использующих передовые инструментальные средства программирования для решения сложных задач обработки пространственной геолого-маркшейдерской информации и построения объемных цифровых моделей месторождений.

Практически все ведущие ГИС недропользования имеют ядро в виде собственных систем управления базами данных (СУБД) с оригинальным форматом их хранения, хотя в последнее время наметилась тенденция к переходу на Oracle, MS Access и установлению тесного взаимодействия с другими базами данных через механизм ODBC. Варианты связи пространственной и атрибутивной информации для разных типов метаданных представлены в геореляционной или интегрированной форме. Обычный набор пространственных типов данных: точки, траектории опробования, полигоны и полилинии, сети триангуляции, регулярные решетки и блоки, нерегулярные сеточные модели и сети конечных элементов, сплошные объемные тела. Соответственно рассеянные точки рельефа поверхности, контакты границ раздела сред, однозначно проецируемые на горизонтальную плоскость, или точки с суммарными значениями геопоказателей (подсчитанные мощности рудных прослоев вдоль стволов скважин) рассматриваются как точки 2D, тогда как точки геологического (геофизического, геохимического, гидрогеологического и т. д.) опробования массива пород считаются точками 3D. Это позволяет в дальнейшем выборочно применять двумерные или трехмерные методы интерполяции, такие, как метод обратных расстояний, точечный или индикаторный кригинг, интерполяцию по сетке треугольников и т. д. В результате формируются интерполяционные решетки растровых 2D-моделей топографического порядка или матричных (воксельных) 3D-моделей геологических тел. Объемные решетки обычно называют блочными регулярными моделями, а пространственные сети конечных элементов (октаэдров, тетраэдров или более сложных выпуклых полиэдров) – нерегулярными моделями.

Следует отметить, что, например, для целей подсчета запасов некоторые типы осадочных и россыпных месторождений бывает достаточно описать сетью триангуляции Делоне или двойственной ей диаграммой Вороного, чтобы потом с приемлемой точностью оценить запасы полезного компонента. В общем случае, однако, необходимо выполнять построение полностью трехмерной блочно-каркасной модели, учитывающей тектонические нарушения, структурно-текстурные особенности массива, размытость границ рудных тел с вмещающими пустыми породами. Отсканированные, оцифрованные геологические планы и разрезы часто служат для сопоставления автоматизированных и экспертных методов построения. Обычная проблема состоит в том, что оконтуривание рудных тел на планах и разрезах выполнялось ранее геологами вручную и архивные картографические материалы, утвержденные в Государственной комиссии по запасам, не всегда соответствуют действительности. При доразведке и ведении добычных работ эти материалы быстро устаревают, необходима их постоянная актуализация. Кроме того при падении рыночных цен на добываемое минеральное сырье (дополнительно – при увеличении обязательных отчислений, налогов, платежей) расчетное бортовое содержание полезного компонента, обеспечивающее рентабельную работу горнодобывающего предприятия, должно неизбежно

повыситься. В результате этого изоповерхности технологических сортов руд и, следовательно, изолинии полезного компонента на соответствующих разрезах и погоризонтных планах приобретают иную конфигурацию, что требует корректировки графиков ведения горных работ. При разработке небольших, главным образом жильных, тел с четкими границами между рудой и породой такого рода влияние не столь существенно, как при добыче руд на крупных железорудных месторождениях.

Важнейшая государственная задача применения геоинформационных систем в недропользовании состоит в оценке величины и качества запасов месторождений для их утверждения в государственном комитете по запасам (ГКЗ). Оценка геолого-промышленных запасов полезных ископаемых должна выявить как можно более точно количество и качество полезного ископаемого, которое может быть экономически выгодно и в установленном законодательством порядке извлечено из недр путём добычи, рудоподготовки и обогащения. Всесторонняя оценка запасов эксплуатируемых месторождений включает в себя не только определение объёмов и содержаний компонентов в залежи, но также учитывает технические и юридические аспекты добычи, обогащения и продажи готовой продукции. Таким образом, список научных дисциплин, которые в той или иной мере составляют предмет недроведения и используются при геолого-промышленной оценке запасов полезных ископаемых, включает геодезию, географию, геологию, маркшейдерскую, горное дело, обогащение, экономику горного производства, законодательные вопросы землепользования, охрану недр и экологию. В связи с этим современные компьютерные технологии геоинформатики для недропользования интегрируют в себе все необходимые программные средства, обеспечивающие решение комплексной задачи оценки геолого-промышленных запасов месторождений полезных ископаемых и последствий их отработки.

### **1.1. Понятие о горно-геологической информационной системе**

Геоинформационная система недропользования (НГИС) – информационная система с набором программных средств обработки и хранения пространственно-временных данных, основой интеграции которых служит горно-геологическая и маркшейдерская информация. В более широком смысле под геоинформационной системой недропользования следует понимать аппаратно-программный человеко-машинный комплекс, обеспечивающий сбор, обработку, интеграцию, отображение и распространение пространственно-координированной информации и знаний о территории добычи и переработки полезных ископаемых для их эффективного использования при решении научных и прикладных задач, связанных с инвентаризацией, анализом, моделированием, прогнозированием и управлением окружающей средой и территориальной организацией горного производства. Кроме того, под термином «ГИС» часто понимают какой-либо программный продукт, реализующий

функциональные возможности ГИС в основном значении применительно к решению задач природопользования [20].

Впервые термин «географическая информационная система» появился в англоязычной литературе как GIS - Geographical Information System. Для горно-геологических приложений часто применяется сокращение MGIS Mining GIS. В русскоязычной научной литературе используются две формы : исходная – «географическая информационная система» ГИС и редуцированная – «геоинформационная система». В данной работе аббревиатура «НГИС» вводится для обозначения ГИС решения задач недропользования.

Необходимость проанализировать пространственное расположение явлений и объектов, их количественные и качественные характеристики при помощи карты возникает у различных специалистов. Прежде всего это, конечно, управляющие структуры, владеющие большими массивами информации, на основе которой принимаются решения. В картах также нуждаются специалисты, оценивающие и прогнозирующие состояние горного производства: рынков сбыта продукции, загрязнений территории и т.п. Круг ее возможных потребителей чрезвычайно широк – это одна из причин резко возросшего за последние годы спроса на географические информационные системы – ГИС.

Нередко даже наличие большого объема информации не позволяет решить проблему до тех пор, пока она не будет представлена на карте. К примеру, данные о количестве дорожно-транспортных происшествий тесно связаны с другими показателями: опасными перекрестками, плохим качеством дорожного покрытия, большой интенсивностью движения и т.п. Во многих случаях, после представления в виде тематической карты, эти данные позволяют определить критические участки и способствуют быстрому принятию решений по ликвидации предпосылок происшествий.

В последнее время ГИС рассматриваются в качестве эффективного инструмента анализа различных данных при исследовании особенностей развития определенных территорий и выработки комплексных решений. Специфика ГИС в отличие от других информационных систем состоит в том, что ГИС базируются на информации, привязанной к пространственным координатам. В результате информация может быть визуализирована в качестве объемных сцен или на карте, что позволяет представить ее в наглядном графическом виде для принятия решений. ГИС могут использоваться для решения самого широкого круга задач – обследования земель и мониторинга, определения состояния собственности и дорожных магистралей, анализа распространения различных заболеваний и причин их возникновения, исследования состояния окружающей среды. Географическая природа данных, обрабатываемых в современных городах, предлагает безграничные возможности для улучшения предоставляемых услуг, управления, стратегического планирования. Это связано с тем, что геоданные обеспечивают

естественные связи, которые могут интегрировать информацию от различных служб и обобщать их по вертикали управления. ГИС дает возможность отслеживать динамику ситуации, быстро вносить изменения и решать много других задач с пространственной информацией, что крайне необходимо для успешного развития рынка и дает ощутимый экономический эффект. Использование НГИС увеличивает эффективность деятельности организации, горнодобывающего предприятия или административных органов управления.

Появление ГИС относится к началу 60-х годов прошлого века. Именно тогда сложились предпосылки и условия для информатизации и компьютеризации сфер деятельности, связанных с моделированием географического пространства и решением пространственных задач. Их разработка базировалась на исследованиях университетов, академических учреждений, оборонных ведомств и картографических служб.

Современные ГИС представляют собой новый тип интегрированных информационных систем, которые, с одной стороны, включают методы обработки информации многих ранее существовавших автоматизированных систем, а с другой – обладают спецификой в организации и обработке данных. ГИС служат в качестве многоцелевых, многозадачных систем управления и являются основой автоматизированных систем управления (АСУ). Это обуславливает повышенное значение ГИС – современного средства организации многих видов производств.

Современная ГИС – это автоматизированная система, имеющая большое количество графических и тематических баз данных, соединенная с модельными и расчетными функциями для манипулирования ими и преобразования в пространственную картографическую информацию для принятия на ее основе разнообразных решений и осуществления контроля [21]. Однако ГИС не следует рассматривать просто как компьютерное хранилище данных или систему управления. Во-первых, СУБД обычно входит в состав ГИС, а полная технология обработки информации в ГИС значительно шире, чем только работа с базой. Во-вторых, современная ГИС рассчитана не только на обработку геоданных, но и на проведение математических расчетов и выполнение экспертных оценок. Наконец, информация, обрабатываемая и хранящаяся в ГИС, имеет не только пространственную, но и временную характеристику, что важно в первую очередь для географических данных.

В комплексных горно-геологических НГИС в настоящее время всё шире внедряются элементы экспертных систем – класса автоматизированных информационных систем, содержащих базы и знания, способные осуществлять анализ и коррекцию данных независимо от пользователя, анализировать и принимать решения как по запросу, так и независимо от запроса пользователя и выполнять ряд аналитически-классификационных операций [20; 13].

## 1.2. Порядок учета и стадийность изучения недр

Основные этапы изучения и стадии геологического картирования для различной детальности исследования территорий, применяемые при разведке и промышленном освоении недр, приведены на рис. 1.1.

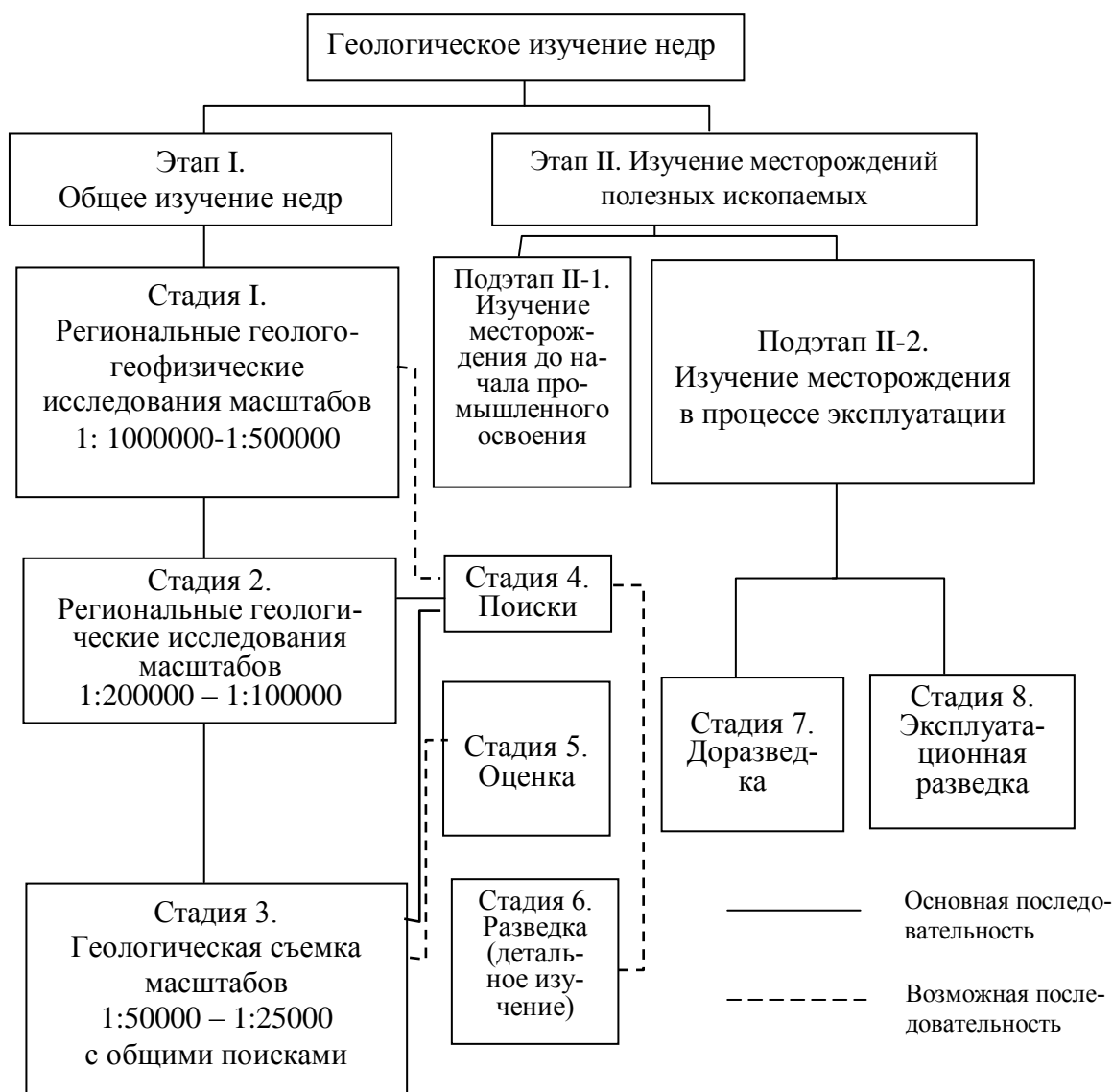


Рис. 1.1. Основные этапы и стадии изучения недр

Поступающие в Российский федеральный фонд геологической информации (Росгеолфонд) сведения обрабатываются для составления реестра минеральных ресурсов страны и издания государственного баланса запасов полезных ископаемых с использованием:

- государственного федерального статистического наблюдения за деятельностью организаций, осуществляющих поиски, разведку, оценку запасов месторождений полезных ископаемых и их добычу;
- территориальных балансов запасов полезных ископаемых;

- заключений органов государственной экспертизы запасов (ГКЗ, ЦКЗ, ТКЗ), утвержденных в установленном порядке;
- актов о списании запасов, не подтвердившихся при разработке и последующих геологоразведочных работах или утративших промышленное значение и по иным причинам.

Согласно действующему «Положению о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов»<sup>1</sup>, все разведанные запасы полезных ископаемых, которые служат или могут служить сырьевой базой для действующих, реконструируемых и проектируемых предприятий, подлежат обязательной проверке и утверждению Государственной комиссией по запасам (ГКЗ) Российской Федерации. В «Положении...» приводятся требования к постановке запасов на учёт и перечень основных полезных ископаемых и компонентов, запасы которых должны учитываться в формах статистической отчетности.

Учитывая важное государственное значение информации о запасах полезных ископаемых, их подсчет для эксплуатируемых месторождений должен вестись на основе постоянного пополнения, уточнения и детализации всех геологоразведочных данных.

Общие запасы подразделяются по трём категориям: по государственному значению, степени разведанности и готовности к промышленному освоению. По государственному значению и постановке на учёт в налоговых органах выделяют балансовые и забалансовые запасы; по степени разведанности – категории А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>; по готовности к промышленному освоению – исходные, промышленные, вскрытые, подготовленные и готовые к выемке.

Подробные определения видов запасов, а также основные понятия, относящиеся к сфере геоинформатики и недропользования, приведены в глоссарии в этом учебном пособии. Часть из приведенных терминов подробно рассмотрена непосредственно в соответствующих главах, остальные приводятся для адекватного понимания основных положений, изложенных в книге.

### **1.3. Методологические основы изучения взаимодействия геологической среды и техносферы**

При рассмотрении горно-геологической среды, ее структуры, строения и функционирования во взаимосвязи с другими оболочками Земли, особое внимание необходимо уделять экологической функции литосферы и формированию в процессе взаимодействия человека и геологической среды природно-технических систем.

Широко используемое настоящее время понятие "геологическая среда", по-разному трактуется различными авторами в зависимости от направлений

---

<sup>1</sup> Положение о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов / Приказ МПР России 09.06.1997. – М., 1997. – № 122

их исследований. Наиболее распространенным считается определение «геологической среды», данное Е.М. Сергеевым, который под этим термином понимает верхнюю часть литосферы, рассматриваемую как многокомпонентную систему, находящуюся под воздействием инженерно-хозяйственной деятельности человека, в результате чего происходит изменение природных геологических процессов и возникновение новых антропогенных явлений, что в свою очередь вызывает изменение инженерно-геологических условий строительства объектов на конкретной территории. Основные элементы геологической среды – это горные породы, подземные воды, формы рельефа, геологические процессы и явления и их инженерно-геологические аналоги.

В.Т. Трофимовым, Д.Г. Зилингом [22] выделены следующие экологические функции литосферы:

1) ресурсная – включает минеральные, органические и органно-минеральные ресурсы, подземные воды, геологическое пространство, рассматриваемые как необходимый компонент функционирования экосистем;

2) геодинамическая – способность литосферы к развитию природных и антропогенных геологических процессов и явлений, определяющих условия функционирования экосистем;

3) геофизико-геохимическая – представляет собой совокупность геофизических и геохимических полей, влияющих на экологическую комфортность проживания населения.

Сравнительный анализ данных функций показал, что они анализируются как при частных геологических исследованиях, так и при комплексном геоэкологическом изучении территории. Однако только в последнем случае ресурсная, геодинамическая и геофизико-геохимическая функции литосферы рассматриваются во взаимосвязи между собой с целью выявления влияния геологической среды и литосферы в целом на условия проживания и состояние здоровья человека.

С конца 70-х годов XX столетия в отечественную геологическую и географическую литературу был введен термин «природно-техническая система» (ПТС) с целью рассмотрения возникающих в процессе взаимодействия человека и природы особых образований – систем. Разные авторы (А.Ю. Ретеюм, К.Н. Дьяконов, Г.К. Бондарик, В.Т. Трофимов, В.К. Епишин, А.П. Камышев, В.А. Королев, А.Л. Ревзон и др.) вкладывают в это понятие свой смысл от сугубо географического до инженерно-геологического. Однако общее в их понимании то, что ПТС – это особые целостные системы, упорядоченные в пространственно-временном отношении совокупностью взаимодействующих компонентов, включающих орудия, продукты и средства труда, естественные и искусственно измененные природные тела, а также естественные и искусственные информационно-энергетические поля.

Горнодобывающее предприятие располагается в конкретных природных условиях и связано потоками вещества, энергии и информации с природными системами. Как техническая система, горнодобывающее предприятие вклю-



чает в себя горные выработки, технические сооружения, машины и механизмы, материалы, коммуникации, техногенные источники энергии и информации. В процессе функционирования горнодобывающее предприятие (техническая система) взаимодействует с окружающей природной геосистемой, образованными горными массивами и рудными телами, водоносными горизонтами и поверхностными водными объектами, почвами, растительностью, приземным слоем атмосферы и естественными источниками энергии. При взаимодействии технической системы (ТС) с природными геосистемами (ГС) посредством обмена вещества энергии и информации формируется ПТС. Они являются относительно новым объектом исследования, объединяющим интересы геологов, горных инженеров, географов, геохимиков и экологов. Изучение их основных компонентов и вещественно-энергетических связей между ними, определяющих структуру природно-технической системы (показаны на рис. 1), служит основой оптимального управления горнодобывающим предприятием, а также прогноза и контроля состояния природной среды, что, в конечном счете, приводит к рациональному экономически и экологически сбалансированному освоению природных ресурсов в горнодобывающих районах.

В свою очередь, горнопромышленные природно-технические системы по своей структуре могут быть различного уровня: элементарной, локальной и региональной. ПТС элементарного уровня образуется при взаимодействии отдельного сооружения горнопромышленного объекта с геологической средой.

Горнопромышленная ПТС локального уровня формируется и функционирует под влиянием взаимодействия всех сооружений горнодобывающего комплекса с литосферой и состоит из элементарных природно-техногенных систем.

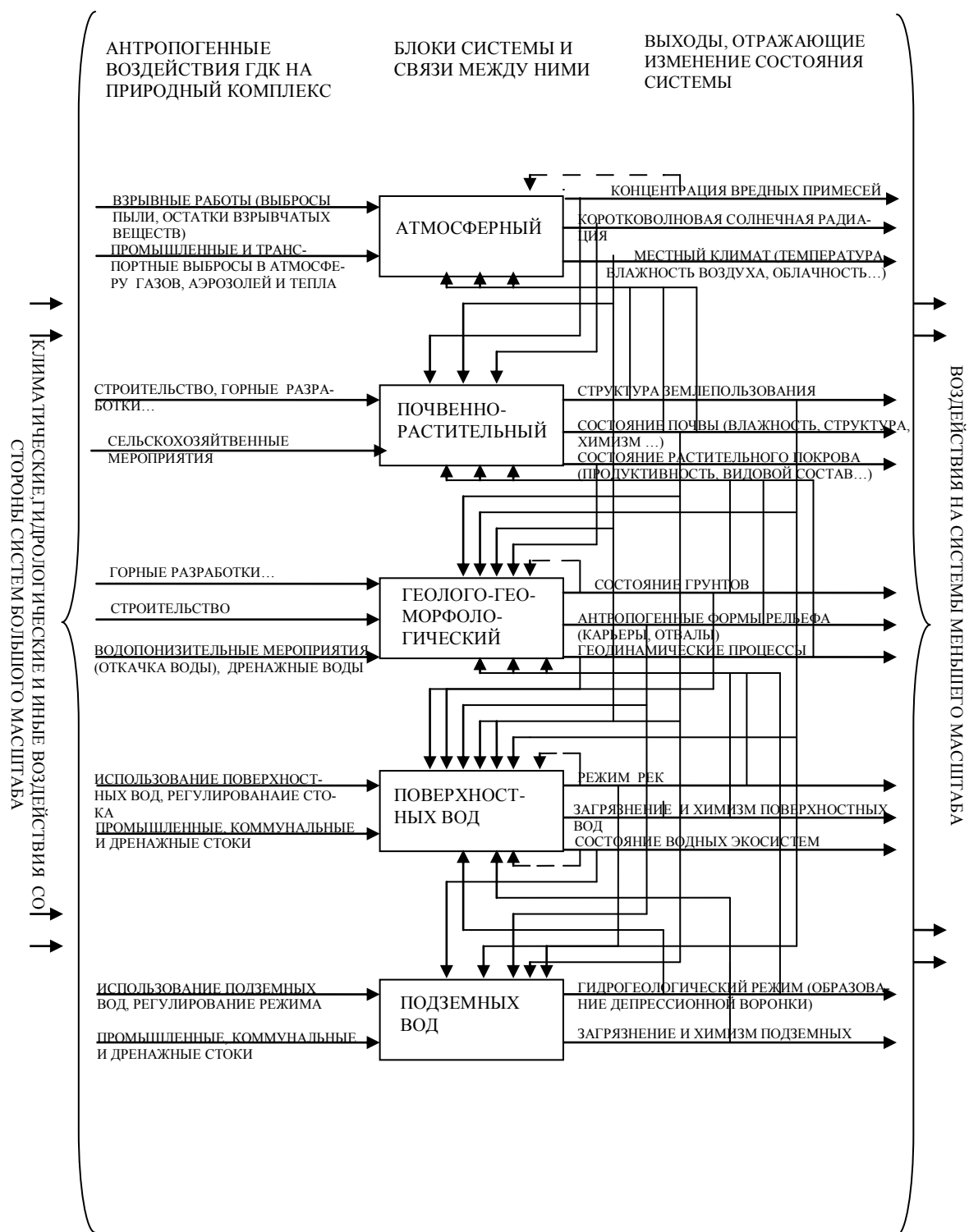


Рис. 1.2. Функциональная блок-схема природно-технической системы (ПТС) активно разрабатываемого железорудного месторождения

Горнопромышленная ПТС регионального уровня может быть образована несколькими природно-техническими системами локального уровня, связанными между собой однородностью геолого-структурного происхождения и распространением определенного типа полезного ископаемого.

#### **1.4. Развитие ГИС недропользования**

В настоящее время сформировалось два направления развития геоинформационных систем недропользования в географических приложениях, в геологии и горном деле – информационное и прогнозно-аналитическое.

В соответствии с приказом № 904 от апреля 2005 года Федерального агентства по недропользованию вся первичная цифровая геологическая информация, полученная за счет госбюджета, сдается для анализа и хранения в Росгеолфонд. В контрактах на выполнение любых работ по геологическому картированию предусматривается как обязательное использование ГИС, так и цифровое представление полученных материалов.

Вот лишь некоторые масштабные работы, которые ведутся предприятиями Федерального агентства по недропользованию:

- создание цифровой геологической карты России масштаба 1:2000000 по изображениям, полученным со спутников;
- создание ГИС-Атласов геологического содержания на территорию России и сопредельных государств СНГ;
- создание карт геологического строения и геологической изученности недр по Уральскому, Сибирскому и Дальневосточному округам;
- создание ГИС-Атласа «Космический образ России»;
- создание Атласа геофизических карт России;
- создание Атласа гидрогеологических карт России;
- создание Государственной геологической карты России масштаба 1:1000000 третьего поколения;
- создание ГИС-Атласа российской части Кавказа и прилегающих акваторий.

В мире существует всего несколько крупных специализированных программ, применяющихся при изучении недр и автоматизирующих решение горно-геологических задач. Это так называемые интегрированные горно-геологические информационные системы. Как правило, эти программы разработаны зарубежными компаниями и ими же поставляются на рынки мира (или их дистрибьюторами). Поскольку программы не учитывают специфику ведения горных работ на отдельном предприятии, то на каждом из них необходимо проводить дополнительную адаптацию программы к существующим условиям отработки месторождения. Кроме того, такие программы достаточно сложны в освоении, стоят дорого, а их локализованные для российского рынка версии выходят со значительным опозданием после срока выхода англоязычных релизов. Это диктует необхо-

димось разрабатывать собственные, отечественные программы с аналогичным набором функциональности.

Существует другое направление, когда для решения специализированных задач разрабатываются макросы или сценарии с использованием встроенного языка программирования на базе известных, но не часто применяемых при изучении недр и разработке месторождений полезных ископаемых ГИС-пакетов: MapInfo, ArcInfo, AutoCAD Map. Эти программы также поставляются зарубежными компаниями или их российскими дистрибьюторами. Такие программы также сложны в освоении и внедрении, так как изначально они были созданы для выполнения иных задач. А простое написание функций не решает задач горного производства. Кроме того, они также не учитывают специфику предприятия и, как правило, после продажи пакетной версии связь с предприятием прерывается, что также явно не способствует их внедрению. Подобные программы более доступны по цене, однако набор функций в них невелик в сравнении с интегрированными системами.

В целом процесс разработки требует значительных финансовых и интеллектуальных ресурсов, поэтому под силу лишь опытному коллективу разработчиков. Следует учитывать, что конкурентоспособность разработчиков информационных технологий на рынке весьма высока, поэтому даже после разработки очень хорошей программы встает задача её продвижения к пользователям. Наряду с непосредственно разработкой, вопросы финансовой поддержки дальнейших исследований также весьма актуальны при создании таких высокотехнологичных программных продуктов, какими являются ГИС для недропользователей. В перспективе развития сырьевой базы России и особенно при разработке запасов стратегически важного минерального сырья (месторождений ряда цветных металлов, радиоактивных и редкоземельных элементов) полностью полагаться на импортные программные продукты нельзя по ряду причин.

### **1.5. Инфраструктура пространственных данных**

Реализация концепции инфраструктуры пространственных данных в РФ стала возможна после снятия с 2007 года ряда ограничений, которые коснулись, прежде всего, систем координат, точности отображения географических объектов на общедоступных картографических материалах и использования ДДЗ любого разрешения. Инфраструктура пространственной информации – открытая система внутри кадастра объектов недвижимости в рамках действующего законодательства. Распределенная архитектура пространственных данных Российской Федерации представлена на рис. 1.2.

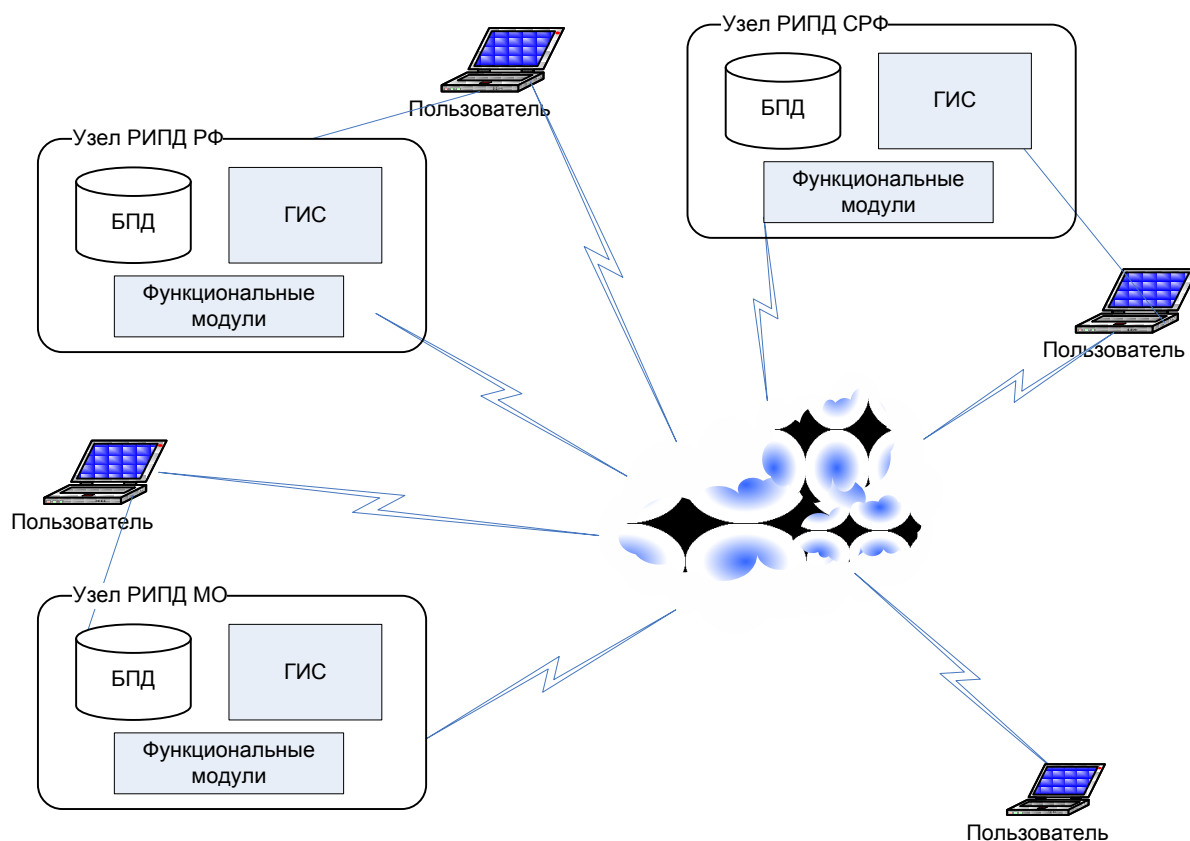


Рис. 1.3. Схема взаимодействия пользователей с пространственными данными

Любая картографическая продукция, которая опирается на результаты дешифрирования, – это произведение человека, взявшего на себя ответственность прочертить ту или иную линию на снимке или на ортофотоплане. Таким образом, оператор или организация, в которой работает оператор, должны нести ответственность за полноту и качество конечного продукта. С учетом всех ранее высказанных соображений по секретности, актуальности и достоверности информации было принято решение для целей кадастра о необходимости создания цифровой основы на базе ортофотоизображений разного масштаба (1:2000 для урбанизированных территорий и 1:10000 для неурбанизированных территорий), т.е. после изготовления ортофотоплана это изображение становится основой. Далее к ней добавляются легитимные векторные слои в нужном масштабе и системе координат. На начальной стадии созданием картографической основы могут заниматься производственные организации, а далее эта информация должна передаваться в кадастровые органы, где она ведется до следующего обновления.

На основе ортофотоизображений создается информация, затем доступная всем. Для этого необходима развитая инфраструктура обмена информацией. Проблема обмена информацией различных форматов хранения и на разных уровнях, в том числе через Интернет, сегодня объективно существует и решается на государственном уровне.

## 1.6. Стандартизация пространственных данных

Важным элементом успешного взаимодействия между разработчиками и пользователями геоинформационных систем является выработка стандартов хранения пространственных данных и методов их обработки, в том числе в сети Интернет. Кроме национальных комитетов по стандартизации и разработке форматов пространственной информации существуют международные организации, занятые решением этой проблемы.

Европейский стандарт языка разметки географических данных, Geography Markup Language (GML) Estafette, был подготовлен 20 февраля 2003 г. Цель создания GML заключалась в том, чтобы подтвердить, что с помощью стандартов Open GIS Consortium (OGC) возможен лёгкий, открытый обмен пространственной информацией через сеть Интернет.

Geography Markup Language основан на XML-кодировании пространственной и атрибутивной информации. Этот формат позволяет пользователям организовать прозрачную и стандартную среду для публикации и обмена геоинформацией в Web. С помощью продуктов GeoMedia, Intergraph Inc. шесть организаций, используя спецификацию GML 2.1, передали друг другу по очереди без потерь и ошибок реальные данные – векторную цифровую карту масштаба 1:10000, покрывающую всю территорию Нидерландов.

Для обмена электронными и цифровыми картами в РФ разработан стандарт «Пространственные данные, цифровые и электронные карты» с его техническим описанием. В стандарте изложены область применения, нормативные ссылки, определения, обозначения и сокращения, требования к системе классификации и кодирования, к цифровому описанию, к форматам обмена, к системам условных знаков.

Содержание стандарта отражает следующие основные моменты:

- 1) концептуальную и логическую модели электронных и цифровых карт, положенные в основу методов представления данных;
- 2) описание используемой терминологии, видов электронных и цифровых карт, масштабного ряда, проекций, разграфки и систем координат;
- 3) правила классификации, кодирования и цифрового представления картографической информации;
- 4) способы представления и кодирования информации о качестве данных (точности, полноте, непротиворечивости) и информации, описывающей сами цифровые данные (метаданные);
- 5) описание типов используемых пространственных и непространственных примитивов, а также способы их кодирования;
- 6) описание структур данных и обменных файлов;
- 7) перечень используемых носителей информации и описание механизма протокола обмена между потребителями.

Другим документом, регулирующим пространственные данные, является ГОСТ 52573-2006 «Географическая информация, метаданные».

Настоящий стандарт распространяется на пространственные и метаданные услуг, связанные с предоставлением их пользователям.

Стандарт устанавливает методологию формирования метаданных и определяет:

- базовый набор метаданных, необходимый и достаточный для основных операций, таких, как поиск, определение соответствия выдвигаемым требованиям, доступ и использование;
- обязательные и условные пакеты метаданных, их сущности и элементы;
- необязательные элементы метаданных, позволяющие при необходимости использовать их расширенное описание.

Стандарт предназначен для применения учреждениями, организациями и предприятиями, создающими геоинформационные системы (ГИС) различного назначения, базы и банки пространственных данных, а также автоматизированные системы их обработки, в том числе в сети Интернет.

В настоящее время Консорциум OGC (Open Geospatial Consortium) объединяет более 250 организаций, работающих над задачей построения информационной среды, где географическая информация будет легкодоступна пользователям. Главная задача Консорциума – содействие в разработке и использовании современных стандартов открытых систем и технических средств в области обработки данных о Земле и связанных с этим информационных технологий. Свою деятельность Консорциум ведет за счет членских взносов участников Консорциума и финансирования проектов и программ из средств общественных фондов.

Консорциум занимается разработкой спецификаций (технических условий) современных интерфейсов и методов, которые могут быть использованы при создании хранилищ пространственных геоданных, служб и приложений. Членами Консорциума являются пользователи ГИС-технологий, разработчики ПО и провайдеры, предлагающие услуги на основе таких технологий. В работе Консорциума участвуют различные правительственные организации, поставщики ДДЗ, разработчики СУБД, интеграторы, поставщики и разработчики ГИС, высшие учебные заведения и университеты. Консорциум помогает им прийти к соглашению по поводу спецификаций на интерфейсы, схем данных и архитектур систем. Системы различных производителей программного обеспечения, построенные на основе стандартов OpenGIS®, могут взаимодействовать, работая как на одном компьютере, так и в сети. Стандарты Консорциума – важная часть инфраструктуры Spatial Web-геопропространственных ресурсов в сети Интернет.

Принятие спецификаций происходит в рамках работы Технического Комитета. Технический Комитет состоит из нескольких Рабочих Групп. Рабочие Группы представляют собой форумы для обсуждения проблем обеспечения взаимодействия, рассмотрения спецификаций, демонстрации

образцов реализации ключевых технологий, для решения задач взаимодействия геопространственных приложений, данных и услуг. Главная задача деятельности Технического Комитета заключается в разработке и принятии спецификаций, предварительно опробованных в составе тестовых систем. Технический Комитет также отвечает за сопровождение и внесение исправлений в уже утвержденные Консорциумом технические спецификации. Все решения Комитета принимаются на основе консенсуса его членов.

Открытый Консорциум по обработке геопространственных данных, OGC [14i] в мае 2005 г. объявил, что его членами одобрены и утверждены тексты 6 технических требований или спецификаций (OpenGIS Specifications).

1. Сопровождение карт в Интернет (Web Map Context Documents Implementation Specification 1.1, WMC). Определяет состав документа, сопровождающего карту, созданную на основе геопространственных данных, собранных с одного или более картографических Интернет-серверов. Контекстный документ содержит информацию о серверах, с которых получены слои карты, границах покрытия, проекциях и необходимых метаданных для работы с картой в клиентском приложении. Кроме того, в документ может включаться дополнительная информация, необходимая для аннотирования или общего описания карты. Контекстный документ создается с помощью языка XML.

2. Кодирование запросов (Filter Encoding Implementation Specification 1.1, FES). Определяет способы XML-кодирования для составления комбинированных пространственно-атрибутивных запросов для поиска объектов в различных базах геопространственных данных. Целью этого кодирования, как правило, является обработка нужных объектов для представления на карте соответствующими символами или цветами либо их запись в другом формате. Запросы формулируются на основе синтаксического метода BNF (Backus-Naur Form), который описан в Технических требованиях OGC к службам каталогов. Спецификации FES изначально были частью требований Web Feature Service (WFS), но впоследствии были выделены в отдельный документ, поскольку выяснилась необходимость их применения к другим типам Web-услуг – Web Map Service, Web Coverage Service и т. п.

3. Создание географических объектов (Geographic Objects-1 Application Implementation Specification, GO-1). Помогает разработчикам в создании геопространственных приложений, способных работать на различных платформах и использоваться в качестве основы для разработки новых приложений с помощью C++ или Java. Приложения обычно поддерживают ограниченный набор геометрических объектов и графики, необходимой для визуализации этих объектов, а также средства управления дисплеями, мышью, клавиатурой и другими аппаратными компонентами. После создания приложения, отвечающего требованиям GO-1, становится возможным разрабатывать программы для составления карт с развитыми системами условных знаков и для обновления карт на любой платформе. Моде-



ли интерфейсов высокого уровня позволяют разработчикам по максимуму использовать важнейшие компоненты программной среды на любых платформах.

4. Локальные службы (OpenGIS Location Services – Core Services Implementation Specification 1.1, OpenLS). Предлагает шесть интерфейсов для создания LBS-приложений, включая геокодирование данных, разработку маршрутов движения, справочников типа Yellow Pages и т.п. Новая версия OpenLS создана на базе версии 1.0 по результатам тестирования, проведенного OGC, и с учетом опыта применения этой версии.

5. Доступ к сетевым службам (Web Feature Service Implementation Specification 1.1, WFS). Определяет требования к интерфейсам для доступа к данным и операциям с географическими объектами. К таким операциям отнесены: удаление записи объекта, ее обновление, защиту объектов от удаления, составление запросов, основанных на пространственных и других ограничениях.

6. Общая схема реализации сетевого обслуживания (OGC Web Services Common Implementation Specification 1.0.). Создана на основе обобщения опыта формулирования общих определений, которые уже используются или будут использоваться в интерфейсах OGC Web Service (OWS), и в требованиях к ним.

## **1.7. Нормативно-правовое обеспечение разработки месторождений**

Освоение недр должно осуществляться в соответствии с Законом РФ «О недрах»<sup>1</sup>, Положением о геологическом и маркшейдерском обеспечении<sup>2</sup>, Правилами охраны недр (ПБ-07-601-03)<sup>3</sup> и другими нормативными актами, регламентирующими недропользование. В частности, в «Правилах...»[II, п.12] особо отмечается необходимость «совершенствования организации и методов ведения геологических и маркшейдерских работ на основе широкого внедрения геоинформационных и иных компьютерных технологий обработки геологической и маркшейдерской информации».

### **1.7.1. Учет движения запасов полезных ископаемых**

В настоящее время компьютеризированный учет движения запасов полезных ископаемых и потерь при их добыче и переработке обеспечивается:

- в соответствии с «Положением о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов»;

---

<sup>1</sup> Закон о Недрах РФ. Москва, №2395-1 от 21 февраля 1991 г. (с последующими редакциями и изменениями)

<sup>2</sup> Положение о геологическом и маркшейдерском обеспечении промышленной безопасности и охраны недр: РД 07–408–01 // Госгортехнадзор России. Москва, 2001. – №18

<sup>3</sup> Правила охраны недр: ПБ 07-601-03 // Приказ Госгортехнадзора России 06.06.03. – Москва, 2003. – №71. – 60 с

- разработкой месторождения с соблюдением «Правил охраны недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых»;
- ежегодным согласованием планов развития горных работ, нормативов плановых потерь при добыче с органами Ростехнадзора;
- ведением установленных форм геологической и маркшейдерской документации и обеспечением ее сохранности;
- проведением эксплуатационной разведки;
- осуществлением ежегодного учета состояния и движения запасов, потерь и разубоживания, а также учета запасов по степени их подготовленности к отработке по формам статистической отчетности 5-ГР, 70-ТП, 72-ТП;
- списанием запасов в соответствии с приказом № 31/19 от 14.02.94 Роскомнедр и Госгортехнадзора РФ.

### **1.7.2. Эксплуатационные и разведочные работы**

По целевому назначению эксплуатационная разведка подразделяется на опережающую и сопровождающую.

Опережающая эксплуатационная разведка является составной частью комплекса работ по подготовке месторождения к освоению с целью уточнения особенностей геологического строения, морфологии и пространственных контуров россыпи, количества и качества запасов алмазносных песков, горнотехнических, геокриологических и гидрогеологических условий разработки и технологических свойств минерального сырья.

Работы по эксплуатационной разведке выполняются с опережением добычных работ не менее чем на 1-1,5 года, и ее результаты служат основой для подсчета промышленных запасов и корректировки проектов на проведение горно-подготовительных и добычных работ и технологических схем переработки песков, установления нормативов потерь и разубоживания.

В методике опережающей эксплуатационной разведки освещаются задачи геологической службы и методы их решения применительно к конкретным условиям разработки полезных ископаемых, технология выполнения и организации опережающей и сопровождающей эксплуатационной разведки, обеспечивающей рациональное использование запасов месторождения с соблюдением законодательства и инструктивных требований по охране недр.

Сопровождающая разведка предусматривает организацию системного контроля всех технологических операций горнодобычных и обогатительных работ. Основными целями сопровождающей эксплуатационной разведки являются:

- обеспечение полноты выемки промышленных запасов;

- контроль соблюдения нормативных показателей потерь и разубоживания при добыче;
- сопоставление данных разведки и эксплуатации;
- оперативная корректировка направления вскрышных и добычных работ;
- учет движения разведанных запасов.

Сопровождающая эксплуатационная разведка заключается в выполнении оперативного, систематического и контрольного эксплуатационного опробования. Содержание, методика и технология выполнения этих видов опробования, а также необходимая геологическая документация работ регламентируются в «Инструкции по геологическому обслуживанию горно-рудных предприятий».

### **1.7.3. Геолого-маркшейдерское обеспечение горных работ**

Маркшейдерский контроль добычи и вскрыши проводится с целью обеспечения достоверного учета извлекаемых и оставляемых в недрах запасов основных и совместно с ними залегающих полезных ископаемых и попутных компонентов. Маркшейдерский контроль добычи и вскрыши включает:

- периодический подсчет объемов вынутых горных пород по маркшейдерским съемкам и сравнение полученных объемов с соответствующими отчетными данными;
- определение по маркшейдерским данным средней полноты загрузки транспортных сосудов с целью повышения точности оперативного учета;
- измерение остатков полезного ископаемого на специально подготовленной территории или в специальных помещениях и корректировку по ним объемов, числящихся на складах по бухгалтерскому учету.

Контрольный подсчет объемов по карьере выполняется один раз в год до 1 февраля следующего за отчетным года. Объемы подсчитываются способом в «две руки» или двумя независимыми подсчетами. Для контрольного подсчета объемов используются съемки, выполненные в начале и конце контролируемого периода, или проводится разовая съемка карьера (части карьера).

Если объем горных пород, вынутых за год, при контрольном подсчете объемов определяется способом вертикальных сечений, то расстояния между сечениями принимаются не больше 30-40 м при среднем радиусе кривизны контуров уступов до 300 м и 50-60 м при большем радиусе кривизны. Вертикальные сечения можно составлять в масштабе 1:2000, число сечений принимается не меньше 10. Если площади соседних сечений различаются больше чем на 30%, то между ними берется дополнительное сечение.

Способ подсчета объемов в торцевой части карьера выбирается с учетом радиуса кривизны бровок и конфигурации уступов. При подсчете объемов способом среднего арифметического отметки для вычисления средней высоты определяются не реже чем через 40-50 м. При подсчете объемов способом в «две руки» расхождение между двумя независимыми подсчетами не должно превышать 1% определяемого объема.

При многорядном и каскадном взрывании, если на уступах имеются остатки взорванных пород, принимается следующий порядок подсчета объема горных пород, вынутых за год.

#### Определение остатков полезного ископаемого на складе.

При проектировании и строительстве открытых складов осуществляется топографическая съемка площадки склада в масштабе не мельче 1:1000 с сечением рельефа через 0,25-0,5 м.

Съемка отвала полезного ископаемого на складе длительного хранения проводится после окончания складирования и перед началом отгрузки. При выявлении изменения формы или объема отвала выполняется контрольная съемка, корректирующая соответствующие данные в учетных документах.

Определение объема и плотности полезного ископаемого в отвале должно осуществляться без превышения допустимых погрешностей.

При остатках полезного ископаемого на складе в размере 75% объема месячной добычи и больше складирование организуется так, чтобы маркшейдерским измерениям подлежала часть отвала, не превышающая 25% месячной добычи. Общий остаток полезного ископаемого на складе получается как сумма постоянной части отвала и переменной, определенной по маркшейдерским измерениям. Если такая организация складирования невозможна, то учет поступившего и отгруженного полезного ископаемого ведется по результатам взвешивания. Книжные остатки в этом случае корректируются по маркшейдерским замерам.

Отвалам полезного ископаемого по возможности придается правильная геометрическая форма, удобная для инструментальной съемки.

#### Требования к геолого-маркшейдерской отчетности и графике

Общий список необходимых чертежей земной поверхности пользователей недр приведен в табл. 1.

Таблица 1.1. Список необходимых чертежей, планов и карт

Индекс	Наименование групп и чертежей	Масштаб (один из указанных)
1	<i>Чертежи, отражающие рельеф и ситуацию земной поверхности</i>	
1.1	План земной поверхности территории производственно-хозяйственной деятельности горного предприятия	1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10 000
1.2	План застроенной части земной поверхности (города, поселка)	1:1000, 1:2000, 1:5000
1.3	План промышленной площадки	1:500, 1:1000, 1:2000

Индекс	Наименование групп и чертежей	Масштаб (один из указанных)
1.4	План породных отвалов (для шахт, рудников)	1:500, 1:1000, 1:2000, 1:5000
1.5	План участка земной поверхности, отведенной под склады полезного ископаемого	1:200, 1:500, 1:1000
1.6	Планы внешних отвалов вскрышных пород	1:2000, 1:5000
1.7	План гидроотвалов, шламо- и хвостохранилищ	1:2000, 1:5000
1.8	План участка рекультивации земель, нарушенных горными разработками	1:2000, 1:5000
1.9	Картограмма расположения планшетов съемки земной поверхности	Не регламентируется
1.10	Совмещенный план горных выработок и земной поверхности	1:2000, 1:5000
2	<i>Чертежи, отражающие обеспеченность горного предприятия пунктами маркшейдерской опорной геодезической и съёмочной сетей</i>	
2.1	План расположения пунктов маркшейдерской опорной сети на земной поверхности	Не регламентируется
2.2	План расположения пунктов разбивочной сети (для строительной организации)	То же
2.3	Абрисы и схемы конструкции реперов и центров пунктов опорной сети	То же
3	<i>Чертежи отводов горного предприятия</i>	
3.1	План земельного отвода горного предприятия	В масштабе плана 1.1
3.2	План горного отвода горного предприятия и разрезы к нему	То же
<p><i>Примечания.</i></p> <p>1. Если один или несколько планов 1.2-1.8 совпадают по масштабу с планом 1.1, то отдельно такие планы не составляют.</p> <p>2. При значительном количестве на земной поверхности устьев скважин различного назначения на плане 1.1 разрешается их не изображать, а составлять отдельный план расположения скважин.</p> <p>3. Если породные отвалы изображены на плане 1.3, план 1.4 не составляют. План 1.4 отвалов бедных или некондиционных полезных ископаемых, занимающих большую территорию, можно составить в масштабе 1:2000 или 1:5000.</p>		

При ведении открытых горных выработок пользователями недр перечень необходимых чертежей приведен в следующей таблице:

Таблица 1.2. Перечень необходимых чертежей для открытых горных работ

Индекс	Наименование чертежей	Масштаб (один из указанных)
4	<i>Чертежи горных выработок, отражающие вскрытие, подготовку и разработку месторождения</i>	
4.1	Карьеры	
4.1.1	Планы горных выработок по горизонтам горных работ	1:1000, 1:2000
4.1.2	Сводный план горных выработок (составляется на основе плана 4.1.1)	1:1000, 1:2000, 1:5000
4.1.3	Разрезы горных выработок карьера вкрест простирания или по поперечным направлениям, приуроченным к разведочным линиям	1:1000, 1:2000, 1:5000

Индекс	Наименование чертежей	Масштаб (один из указанных)
4.1.4	Разрезы горных выработок по направлениям подвигания фронта работ (при подсчете объемов выемки горной массы способом вертикальных сечений)	В масштабе плана 4.1.1
4.1.5	Картограмма расположения планшетов съемки горных выработок	Не регламентируется
4.2	Прииски	
4.2.1	Планы горных выработок полигонов	1:1000, 1:2000
4.2.2	Планы горных выработок по горизонтам горных работ (при разработке россыпи несколькими слоями или уступами)	В масштабе плана 4.2.1
4.2.3	Разрезы горных выработок полигонов (поперек и вдоль россыпи, приуроченные к разведочным линиям)	Горизонтальный в масштабе плана 4.2.1; вертикальный в 10 раз крупнее горизонтального
4.2.4	Разрезы по направлению подвигания фронта горных работ (при подсчете объемов выемки торфов и песков способом вертикальных сечений)	В масштабе плана 4.2.1
4.2.5	Картограмма расположения планшетов съемки горных выработок полигонов	Не регламентируется

Чертежи, подлежащие хранению до ликвидации горного предприятия:

- планы отвалов некондиционных полезных ископаемых, хранилищ отходов обогатительных фабрик и породных отвалов;
- план земной поверхности с отражением результатов работ по рекультивации земель, нарушенных горными работами;
- чертежи по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах;
- исполнительные продольные профили автомобильных дорог;
- исполнительные профили руслоотводных, водозаводных и других капитальных траншей и канав.

П р и м е ч а н и е. До этого же времени хранят журналы вычислений, послужившие основой составления названных чертежей.

Чертежи, подлежащие постоянному хранению (уничтожению не подлежат):

- план земной поверхности территории производственно-хозяйственной деятельности горного предприятия;
- план застроенной части земной поверхности;
- план горного отвода и разрезы к нему, план земельного отвода;
- план промышленной площадки;
- картограммы расположения планшетов съемок земной поверхности и горных выработок;

- схема расположения пунктов маркшейдерской опорной и геодезической сетей на территории производственно-хозяйственной деятельности горного предприятия, абрисы и схемы конструкций реперов и пунктов;
- чертежи горных выработок, отражающие вскрытие, подготовку и разработку месторождения.

Для оформления маркшейдерской документации при ведении горных работ необходимо выполнение требований и составление планов, схем и чертежей в соответствии с требованиями Горная графическая документация, ГОСТ 2.850-75 - ГОСТ 2.857-75 официальное издание

В нижеследующей таблице приведен перечень необходимой горной графической документации, передаваемой на хранение при ликвидации предприятия.

Таблица 1.3. Горная графическая документация, передаваемая на хранение при ликвидации предприятия

№ п/п	Наименование чертежей	Масштаб (один из указанных)
1	План земной поверхности территории производственной деятельности горного предприятия	1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10000
2	План застроенной части земной поверхности	1:1000, 1:2000
3	План горного отвода и разрезы к нему, план отвода земельного участка	В масштабе плана (см. п.1)
4	План промышленной площадки	1:500, 1:1000
5	Картограмма расположения планшетов съемок земной поверхности и горных выработок	Не регламентируется
6	Схема расположения пунктов маркшейдерской опорной сети на территории производственно-хозяйственной деятельности горного предприятия, абрисы и схемы конструкции реперов и пунктов	То же
7	Чертежи горных выработок, отражающие вскрытие, подготовку и разработку месторождения	1:1000, 1:2000, 1:5000
8	Геологическая карта карьерного поля	1:2000, 1:5000, 1:10000
9	Вертикальные геологические разрезы	1:1000, 1:2000, 1:5000, 1:10000
10	Геологические рабочие планы (допускаются совмещенные с маркшейдерскими планами)	1:1000, 1:2000

**П р и м е ч а н и е.** Журналы вычислений, послужившие основой составления этих чертежей, хранят постоянно.

## Глава 2

### Сбор данных и обработка измерений

#### 2.1. Системы координат и картографические проекции

Системы координат. Любые пространственные данные обладают «местоположением» (шириной, долготой и превышением над уровнем моря), т.е. географическими координатами. Хотя применение таких координат удобно с точки зрения их понимания и измерения, но неудобно для выполнения геометрических расчетов и преобразований. Например, довольно сложно определить кратчайшее расстояние между двумя пунктами Земли, если их положение задано в градусах. Поверхность Земли – не плоскость, поэтому формулы вычисления расстояний на реальной поверхности сложны. Тем не менее, при решении локальных задач поверхность Земли можно представить плоской и использовать простые формулы геометрии на плоскости, а также прямоугольные декартовы координаты в пространстве. Важный вопрос при этом – выбор местной декартовой системы координат. Системы координат могут быть различны; очевидно одно: необходимо иметь унифицированный подход, позволяющий легко получать локальные системы координат, взаимно увязывать их, а при необходимости переходить к географическим координатам. Естественной предположить, что следует создать модель поверхности Земли, где все локальные системы координат должны иметь начала координат и ось  $z$ , направленную по нормали к модели поверхности [20]. В России с 1 июля 2002 г. обязательна к применению система координат СК-95 для всех геодезических и картографических работ, а для геодезического обеспечения полетов – ПЗ-90 (Параметры Земли 1990 года).

Государственная система координат ПЗ-90.

За отсчетную поверхность в государственной геоцентрической системе координат (ПЗ-90) принят общий земной эллипсоид со следующими геометрическими параметрами:

- большая полуось – 6378136 м;
- сжатие – 1:298,257839;
- центр эллипсоида совмещен с началом геоцентрической системы координат;
- плоскость начального (нулевого) меридиана совпадает с плоскостью  $zx$  этой системы.

Геометрические параметры общего земного эллипсоида приняты равными соответствующим параметрам уровенного эллипсоида вращения. При этом за уровенный эллипсоид вращения принята внешняя поверхность Земли, масса и угловая скорость вращения которой задаются равными мас-



се и угловой скорости вращения Земли. Масса Земли  $M$ , включая массу ее атмосферы, умноженная на постоянную тяготения  $f$ , составляет геоцентрическую гравитационную постоянную  $fM = 39860044 \times 10^7 \text{ м}^3/\text{с}^2$ , угловая скорость вращения Земли  $\omega$  принята равной  $7292115 \times 10^{-11} \text{ рад/с}$ , гармонический коэффициент геопотенциала второй степени  $J_2$ , определяющий сжатие общего земного эллипсоида, принят равным  $108263 \times 10^{-8}$ .

В последнее время все чаще применяется система координат WGS-84. Это обусловлено тем, что в ней выдаются координаты системы глобального позиционирования GPS, получившей широкое распространение в мировой практике геодезических работ.

### Картографические проекции

Цифровая форма пространственных данных предполагает применение каких-либо картографических проекций – математического способа отображения поверхности Земли на плоскость. К настоящему времени имеется большое количество различных проекций, выбор которых зависит от цели, размеров, стандартов карты [10i]. Характер и величина искажений составляют важнейшие характеристики проекций. В курсе картографии выделяют равноугольные, равновеликие, равнопромежуточные и произвольные проекции. К основным классам проекций относят: цилиндрические, псевдоцилиндрические, поперечно-цилиндрические, конические, псевдоконические, поликонические, азимутальные, псевдоазимутальные, перспективные (Рис. 1.4).

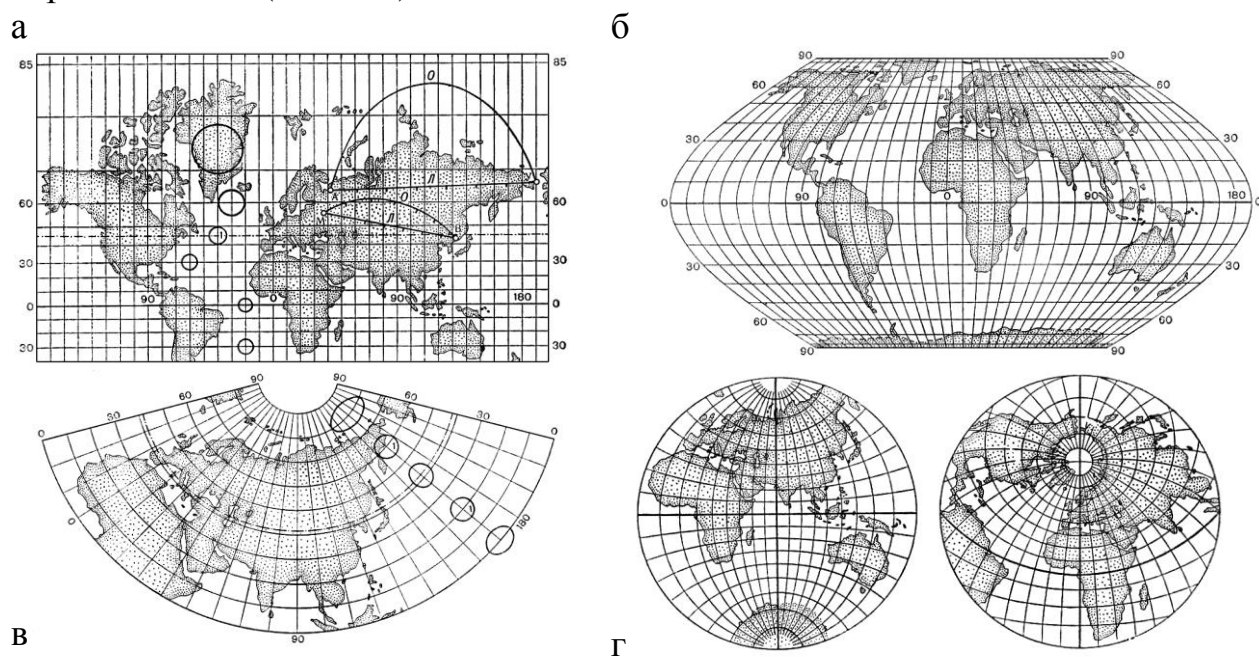


Рис. 1.4. Основные виды картографических проекций: а) цилиндрическая Меркатора; б) псевдоцилиндрическая Каврайского; в) коническая равнопромежуточная; г) азимутальная равноугольная

При создании ГИС горнодобывающих предприятий и решении информационно-аналитических задач недропользования на местном уровне обычно используют локальную систему координат с прямоугольной декар-

товой системой координат. Однако для крупных предприятий, у которых горные отводы занимают значительные территории, необходимо использовать картографические проекции для учета сферичности Земли и устранения искажений.

## **2.2. Сбор данных**

Пространственные данные (геоданные) – основа информационного обеспечения ГИС недропользования. В качестве источников выступают аналоговая или цифровая информация, которая служит основой создания моделей пространственных данных. Информационное обеспечение ГИС при разведке и освоении месторождений полезных ископаемых представляет собой весьма трудоемкий процесс. Помимо вновь поступающих геоданных по многим объектам недропользования за длительный период эксплуатации накоплен большой объём в основном аналоговых данных («бумажные» карты, статистические табличные отчеты, тексты), а современные компьютерные системы должны обновляться в реальном режиме времени цифровой информацией. Возникает необходимость переноса отсканированных растровых материалов в векторную форму, а текстовых описаний – в атрибутивную информацию, связанную с пространственными объектами в базах данных ГИС.

### **2.2.1. Топографические и маркшейдерские измерения**

При сборе и интерпретации информации от различных типов источников по топографии и рельефу необходимо иметь в виду их общие свойства: пространственный охват, масштабы, разрешение, качество, форму существования (аналоговая – цифровая), периодичность поступления, актуальность и обновляемость, стоимость и условия получения, приобретения и перевода в цифровую форму (цифрования), доступность, форматы представления, соответствие стандартам и иные характеристики, объединяемые обобщающим термином «метаданные». Существует несколько основных типов источников пространственных данных[21].

1. Картографические источники (карты, планы, атласы, схемы), представленные, как правило, на бумажном носителе. Такие данные должны быть вначале переведены в электронный вид с помощью сканирования или цифрового фотографирования. Полученные растровые изображения могут быть непосредственно использованы в качестве слоя карты в ГИС либо переведены в векторный вид (векторизация), а затем также быть использованы в качестве слоя карты в ГИС. Кроме современного метода «сканирование – векторизация», ранее широко использовался метод дигитализации, когда векторные данные непосредственно «скальвались» пером с твердой копии карты, уложенной поверх дигитайзера (цифрового планшета).

2. Данные дистанционного зондирования Земли (ДДЗ Земли, данные ДЗЗ), включая аэро- и космоснимки в видимом, инфракрасном, ультрафиолетовом, радиодиапазоне или во многих диапазонах волн сразу; результа-

ты лазерного сканирования поверхности Земли, а также другие данные, полученные неконтактным способом.

3. Данные полевых изысканий, полученные с использованием различных геодезических приборов (теодолиты, нивелиры, электронные тахеометры, лазерные сканеры) и приборов глобальной спутниковой навигации (GPS, ГЛОНАСС).

4. Данные натурных наблюдений на гидрометеорологических и иных постах и станциях. Как правило, они характеризуют распределение некоторых явлений на Земле, таких, как температура, осадки, скорость и направления ветра и др. Эти данные обычно передаются в ГИС в виде точечных объектов (с координатами места наблюдения) с атрибутами, содержащими измеренные значения.

5. Информация ведомственной и государственной статистики. Она обычно помещается в ГИС в виде атрибутов пространственных данных.

Как правило, наиболее распространены данные картографических, статистических источников, а также данные ДЗЗ, поэтому именно на них следует обратить наибольшее внимание.

Картографические источники отличаются большим разнообразием – помимо общегеографических и топографических карт насчитываются сотни типов тематических карт. Картографические источники геоданных можно разделить по имеющейся системе классификации карт.

Общегеографические карты. Топографические (масштаб 1:200 000 и крупнее), обзорно-топографические (от 1:200 000 до 1:1 000 000 включительно) и обзорные (мельче 1:1 000 000) карты содержат разнообразные сведения о рельефе, гидрографии, почвенно-растительном покрове, населенных пунктах, хозяйственных объектах и путях сообщения, административно-территориальных и государственных границах. Для геоинформатики такие карты выполняют две важные функции: получение сведений о тематической нагрузке и ее пространственной привязке.

К тематическим относят карты природы (карты геологического строения и природных ресурсов, геофизические и др.), населения (карты населения и расселения, этнографические и антропологические, демографические, социально-экономические и др.), экономики (карты промышленности, сельскохозяйственного производства, трудовых ресурсов, лесного хозяйства и др.).

В литературе данные дистанционного зондирования обозначают аббревиатурой ДДЗ, а процесс зондирования – ДЗЗ. Из-за внешнего сходства этих аббревиатур их часто путают, а некоторые даже считают синонимами.

К данным дистанционного зондирования Земли относят географически координированные сведения о земной поверхности: аэрокосмические, различные методы морского и наземного базирования (фототеодолитную съемку, сейсмо-, электро-, магниторазведку, гидроакустическую съемку морского дна). Ряд компаний предоставляют открытый доступ к картографической и спутниковой информации на своих сайтах (Рис. 1.5).

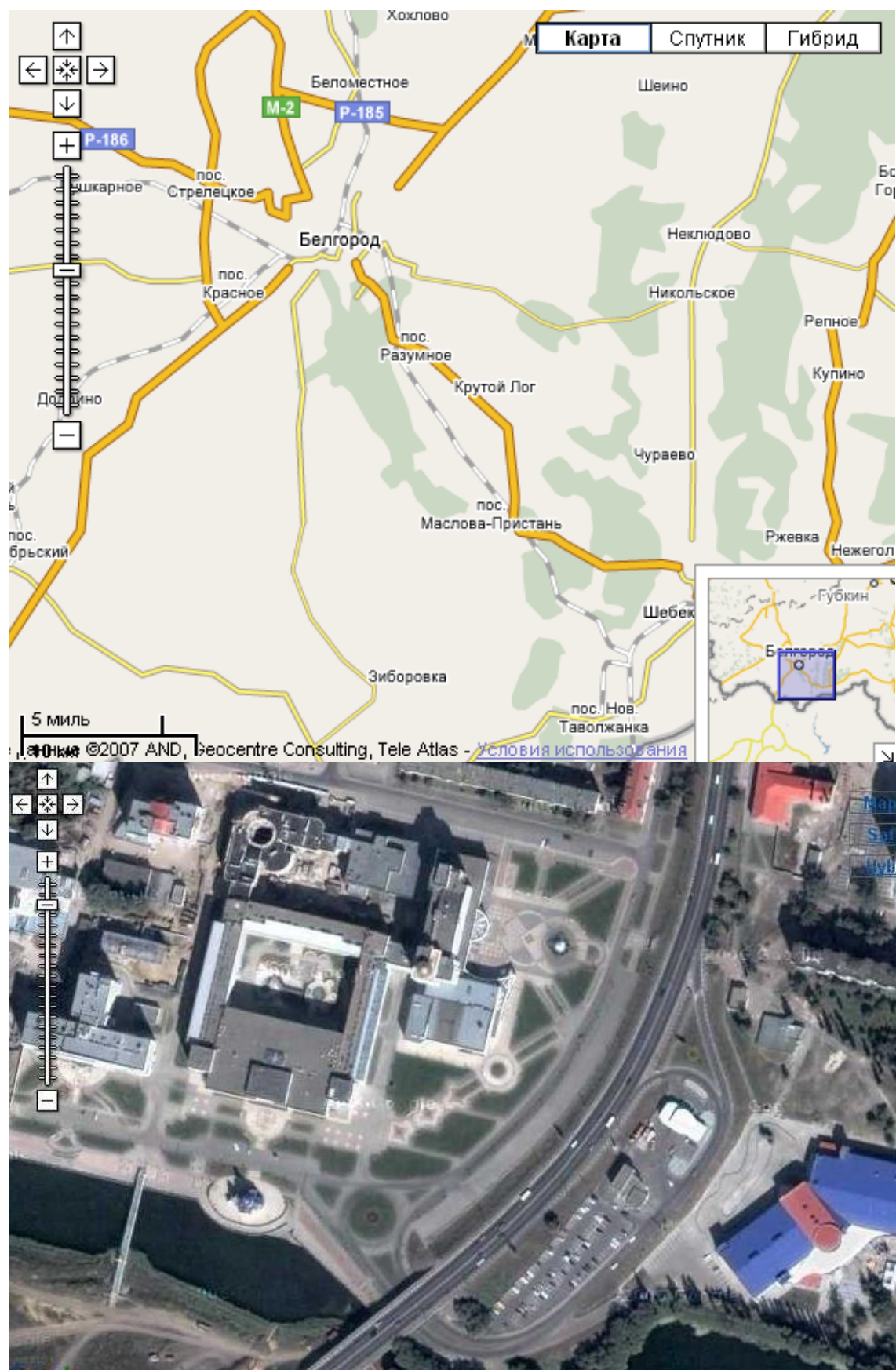


Рис. 1.5. Карта участка Белгородского района и фрагмент космоснимка г. Белгорода на сайте Google

Номенклатура космических материалов весьма разнообразна. Существуют две основные технологии космических съемок: с применением фотографических и сканирующих систем. Дистанционное зондирование осуществляется специальными приборами – датчиками, которые могут быть пассивными или активными. Пассивные датчики улавливают отраженное или испускаемое естественное излучение, а активные – способны сами излучать активный сигнал и фиксировать его отражение от объекта. К пассивным датчикам относятся оптические и сканирующие устройства, действующие в диапазоне отраженного солнечного излучения; к активным – радарные устройства, сканирующие лазеры, микроволновые радиометры. Наблюдается тенденция к комбинированному использованию различных многоканальных, многоцелевых датчиков с высоким разрешением, включая всепогодное оборудование.

Технология съемки земной поверхности, основанная на фотографических системах, постепенно вытесняется съемкой с применением лазерного сканирования (LIDARS). Это связано с эпизодичностью фотосъемок и трудностями, обусловленными облачностью. Снимки сканеров бывают сверхвысокого разрешения от 0,6 до 5 м (QuickBird-2, Tes, Ikonos), высокого разрешения от 5 (SPOT) до 30-40 м (Landsat TM, Ресурс-0), среднего разрешения 150-200 м (Ресурс-0, Метеор-Природа) и малого разрешения 1 км (NOAA) и более. На снимках сканера высокого качества в целом выделяются те же объекты, что и на фотографических изображениях, однако главное преимущество сканирования – это регулярная повторяемость съемки и удобство автоматизированной обработки информации в цифровом виде.

Наиболее точное определение координат основано на использовании глобальных систем позиционирования. Суть их работы заключается в том, что спутники, мгновенные координаты которых точно известны, летящие по заданным орбитам, постоянно излучают радиосигналы, регистрируемые специальными спутниковыми приемниками на Земле. Это позволяет с помощью радиотехнических средств измерять расстояния и определять координаты приемника, что необходимо при выполнении геодезических и нивелирных работ, исследовании геодинамических процессов и мониторинге состояния окружающей среды. Главные преимущества таких приемников – оперативность и точность получения координат, минимизация влияния человека, цифровая форма записи, четкая привязка по времени и др.

Сегодня в мире созданы две спутниковые глобальные системы позиционирования: GPS (*США*) и ГЛОНАСС (*Россия*). Осуществляется европейский проект спутниковой системы навигации ГАЛИЛЕО (*Galileo*). Эта система предназначена для решения навигационных задач для любых подвижных объектов с точностью менее одного метра. Системы глобального позиционирования работают в гринвичской пространственной прямоугольной геоцентрической системе координат. Геоцентрические координаты GPS и ГЛОНАСС установлены независимо. GPS действует в координатах WGS-84, а ГЛОНАСС – в координатах ПЗ-90. Каждая система закреп-

лена координатами пунктов своей космической геодезической сети и использует свой эллипсоид, поэтому координаты одних и тех же точек будут различаться, но обычно не более чем на 10 м.

### Лазерное сканирование при съёмке рельефа местности

Внедрение в практику геодезических работ, маркшейдерии и смежных областей лазерных сканирующих систем стало наиболее значительным технологическим новшеством последнего времени. Успех новой технологии обусловлен «естественной» трехмерностью и высокой пространственной точностью результатов на уровне первых сантиметров.

Практическое использование лазерных сканирующих систем (ЛС) предполагает решение серьезных методических проблем, таких, как выбор оптимального режима съемки применительно к конкретной топологии сцены, оценка точности определения пространственных координат объектов того или иного класса. Однако наиболее интересный и перспективный аспект применения технологии лазерного сканирования – создание математического аппарата обработки данных лазерной съемки, по результатам которой могут быть автоматически распознаны и полностью подготовлены к нанесению на топографическую карту или цифровую модель местности важнейшие компоненты сцены наблюдения. Такими компонентами являются: цифровая модель рельефа, растительность, здания и коммуникации, а также многие другие географические объекты естественного и антропогенного происхождения. Вышесказанное позволяет без преувеличения рассматривать лазерную локацию как отдельный раздел геодезии и фотограмметрии.

Преимущества метода лазерного сканирования перед тахеометрической съемкой и другими наземными видами съемки: быстрая программная трехмерная визуализация; высокая точность; несравнимо более полные результаты; быстрый сбор данных; обеспечение безопасности при съемке труднодоступных и опасных объектов.

Материальные затраты по сбору данных и моделированию объекта методами трехмерного лазерного сканирования на небольших участках и объектах сопоставимы с традиционными методами съемки, а на участках большой площади или протяженности – ниже. Даже при сопоставимых расходах на съемку полнота и точность результатов лазерного сканирования позволяют избежать дополнительных расходов на этапах проектирования, строительства и эксплуатации объекта. Сравнение временных затрат просто бессмысленно – счет идет на порядки.

При построении 3-мерных моделей, например, технологического оборудования цехов, точность взаимного расположения элементов модели обычно не меньше 3-5 см.

Преимущества метода перед фотограмметрическими способами съемки следующие. Лазерное сканирование и моделирование аналогично фотограмметрическим методам, но позволяют получать координаты с одной точки стояния и без последующей камеральной обработки – с возмож-



ностью контроля измерений непосредственно в полевых условиях. Кроме того, обеспечивается более высокая точность измерений по сравнению с фотограмметрическими методами при одинаковом удалении от снимаемого объекта. Необходимо отметить и такие преимущества лазерного сканирования, как:

- возможность настройки сканеров на фиксацию первого или последнего отражения, что дает возможность разделять отраженный сигнал от растительности и поверхности Земли – «пробивать» растительность;
- упрощенная схема привязки к системе координат.

Финансовые и временные затраты свидетельствуют о целесообразности применения лазерного сканирования. При отсутствии необходимости векторизации трехмерного раstra работа с результатами лазерного сканирования может выполняться в режиме реального времени, что для фотограмметрических способов невозможно.

#### Основные направления применения в геологии и недропользовании:

- мониторинг цифровых моделей карьеров и подземных выработок;
- мониторинг горнопромышленных объектов;
- создание высокоточных цифровых моделей сложных технологических объектов и узлов для целей проектирования, реконструкции и капитального строительства;
- определение объемов выработок и складов;
- маркшейдерское сопровождение буровзрывных работ.

Решающим фактором, определившим распространение лазерного сканирования (ЛС), является технологическая простота сбора пространственных данных по подстилающей поверхности. При использовании лазерного сканирования оказывается возможной непосредственная съемка рельефа и многих классов наземных объектов как естественных, так и имеющих антропогенную природу. Точность изображения компонентов рельефа и наземных объектов по результатам съемки, а также точность геометрических измерений составляет, как правило, 10-20 см, что позволяет использовать данные, полученные лазерным сканированием, для создания и обновления топографических карт и планов полного масштабного ряда вплоть до масштабов 1:1000 - 1:2000.

При изучении возможности применения ЛС можно указать на ряд значительных преимуществ в сравнении с традиционными методами.

1. Производительность лазерного сканирования чрезвычайно высока. На практике при съемке линейных объектов она составляет 500-600 км за один аэросъемочный день. Следует отметить, что время, затрачиваемое на камеральную обработку результатов съемки при реализации метода ЛС, как правило, сопоставимо со временем выполнения авиационных работ, что делает возможным проведение такой обработки оперативно на месте работ. Это в свою очередь позволяет эффективно контролировать качество съемки и при необходимости ее повторить. Понятно, что подобная производительность значительно превосходит возможности традиционных аэро-

съемочных технологий, требующих сложной камеральной обработки и значительных затрат времени.

2. Метод лазерного сканирования не требует выполнения наземных геодезических работ по плано-высотному обоснованию результатов аэросъемки. Необходимость проведения таких работ может составить серьезную проблему при реализации традиционных методов съемки, особенно для удаленных и труднодоступных районов.

3. Без ограничений возможно проведение съемки для сцен с отсутствующей или слабовыраженной текстурой поверхности: карьеров, участков тундры, песчаных пляжей, заснеженных и водных поверхностей. Известно, что стереофотограмметрические измерения таких сцен затруднены – невозможно установить соответственные точки в стереопаре. В маркшейдерской практике подобные ландшафты встречаются достаточно часто.

Как отмечается в работе [23], лазерное сканирование в настоящее время для многих компаний становится эффективным средством решения практических задач маркшейдерии, геодезии, обновления топографических карт и планов, создания различных видов кадастровых и геоинформационных систем. Наиболее перспективным направлением развития технологий лазерного сканирования в недропользовании представляется их интеграция с классическими аэросъемочными и фотограмметрическими методами, что способствует распространению принципиально новых систем картографирования топографии горных отводов и рельефа местности в режиме реального времени.

#### Статистическая обработка результатов

Для упорядочения всей совокупности данных Государственным комитетом статистики определены группы статистических показателей по отраслям. Среди них: 1) группы промышленности; 2) природных ресурсов и окружающей среды; 3) технического прогресса; 4) сельского хозяйства и заготовок; 5) капитального строительства; 6) транспорта и связи; 7) торговли; 8) труда и заработной платы; 9) населения, здравоохранения и социального обеспечения; 10) народного образования, науки и культуры; 11) бюджетного населения; 12) жилищно-коммунального хозяйства и бытового обслуживания населения; 13) материально-технического снабжения и переписей; 14) финансов. Каждая из групп характеризуется набором показателей.

При создании НГИС используется, как правило, не один вид, а комплекс разнообразных типов данных для изучаемой территории.

#### **2.2.2. Геологическая документация и опробование**

Данные, полученные при эксплуатационной разведке и доразведке месторождения, составляют геологическую документацию. Цели геологической документации на действующем предприятии – установление истинных границ тел полезных ископаемых, выявление их внутреннего строения и размещения типов и сортов для рационального планирования подготовительных, нарезных и очистных работ, предотвращения сверх-



нормативных потерь и разубоживания при добыче. Основными видами геологической документации служат следующие материалы: иллюстративно-текстовой – зарисовки забоев и других элементов подземных горных выработок, уступов карьеров, их описание; табличный – журналы описания керна и шлама скважин, опробования; каменный – образцы, керна и шлам скважин, шлифы и аншлифы; фотодокументация.

Объектами геологической документации служат геологоразведочные, подземные горные (штреки, квершлагги, орты, рассечки, восстающие, уклоны, гезенки) и открытые горные (уступы карьеров) выработки, а также буровые разведочные и технологические скважины.

По форме и уровню завершенности геологическая документация подразделяется на *первичную* и *сводную*. Выделяют следующие виды первичной геологической документации:

- массовая – документация (в масштабе 1:500–1:200) всех скважин доразведки и эксплуатационной разведки, всех доступных для наблюдения горных выработок (подземных и открытых) и очистных забоев, журналы опробования, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований, каталоги образцов горных пород и полезных ископаемых;
- детальная – характеризующая наиболее интересные в геологическом отношении объекты, тектонические нарушения, контакты, зоны выклинивания и внутреннее строение тел полезных ископаемых;
- специализированная – предназначенная для отображения различных минеральных парагенезисов, структурно-текстурных особенностей, фациальных переходов, трещиноватости и др.

Документация буровзрывных скважин основана на изучении и опробовании шлама, который систематически отбирается с определенным интервалом в процессе бурения. Разведочные скважины колонкового бурения документируются по керна, а при низком его выходе (менее 50 %) используется также шлам.

При открытой разработке месторождений к первичным геологическим документам относятся:

- журналы массовых зарисовок и фотографий уступов карьеров и забоев очистных заходов на уступах, а также журналы детальных и тематических зарисовок;
- журналы документации и опробования скважин (буровзрывных и эксплуатационной разведки), забоев и уступов карьера;
- рабочие фрагменты геологических планов уступов карьеров для отдельных участков и блоков;
- журналы замеров водопритоков, определения объемной массы и других физических свойств горных пород и полезных ископаемых, обуславливающих их разрабатываемость и устойчивость откосов.

При подземной разработке рудных месторождений первичная документация включает материалы:

- массовые зарисовки и фотографии разведочных, капитальных, подготовительных, нарезных и очистных горных выработок;
- журналы документации и геологические колонки скважин (буровзрывных и эксплуатационной разведки);
- журналы опробования скважин и горных выработок, определения физических свойств горных пород и полезного ископаемого; журналы гидрогеологических наблюдений и определения водопритоков; журналы документации признаков проявления горного давления.

При подземной разработке угольных месторождений документируются скважины эксплуатационной разведки, вертикальные, горизонтальные и наклонные, подготовительные и нарезные выработки. Форма документации очистных выработок зависит от принятой на шахте системы разработки. Особое внимание уделяется вводу в справочную систему ГИС документации гидрогеологических, газометрических и инженерно-геологических исследований.

К сводным геологическим материалам относятся геологические карты района и месторождения с поперечными и продольными геологическими разрезами, которые составляются на основе данных до проектных стадий геологоразведочных работ, что дает возможность оценить перспективы расширения сырьевой базы предприятия. В результате анализа и обобщения материалов первичной документации на предприятиях составляются такие сводные геологические документы:

- погоризонтные геологические планы (на маркшейдерской основе), соответствующие по абсолютным отметкам почве эксплуатационных уступов или эксплуатационным горизонтам рудника (шахты); на них наносятся структурные элементы, стратиграфические границы, технологические типы и сорта полезного ископаемого;
- поперечные и продольные геологические разрезы по профилям детальной и эксплуатационной разведки, характеризующие морфологию и условия залегания тел полезных ископаемых, размещение их технологических типов, положение водоносных горизонтов и инженерно-геологических ярусов;
- погоризонтные качественные, сортовые или геолого-технологические планы;
- сводные геологические планы карьера, сводные планы эксплуатационных подземных горизонтов рудника (шахты);
- планы и разрезы с изолиниями структурно-морфологических и качественных показателей месторождения и отдельных тел полезного ископаемого;
- блок-диаграммы месторождения, гидрогеологические и инженерно-геологические планы (карты) для месторождений со сложными условиями.

На угольных месторождениях, кроме перечисленных, используются также следующие сводные геологические документы:

- план (карта) выхода угольных пластов под покровные отложения;
- гипсометрические планы или вертикальные проекции угольных пластов;
- геологические рабочие планы по угольным пластам (на маркшейдерской основе);
- планы изолиний мощности (для невыдержанных угольных пластов);
- планы (или вертикальные проекции) изменения качества углей в изолиниях содержания золы, влаги, выхода летучих компонентов, серы и других качественных показателей, влияющих на свойства угля;
- литолого-прочностные планы пород кровли (на шахтах) и пород почвы (на карьерах) угольного пласта;
- альбомы структурных колонок угольных пластов.

К сводной геологической документации относятся также материалы математической обработки данных опробования, технологических испытаний, гидрогеологических и инженерно-геологических исследований.

Одна из важнейших задач, решаемых в процессе доразведки и эксплуатационной разведки, – определение качества полезного ископаемого. Наиболее часто качество минерального сырья выявляется в процессе опробования путем отбора и последующего анализа или испытания различного рода проб. Методика опробования на действующих предприятиях и типы отбираемых при этом проб принципиально не отличаются от таковых в предшествующие стадии разведки. Основная особенность заключается в более детальном изучении химического состава участков и горизонтов рудных тел, блоков и выемочных единиц. Геологическое опробование служит главным источником данных о характере пространственного распределения и степени природной концентрации полезных компонентов, являясь, таким образом, основой геометризации недр, подсчета и движения запасов, планирования. Сущность геологического опробования – в отборе, обработке и анализе некоторого количества материала с целью определения концентраций и свойств полезных компонентов в каждой точке наблюдений и распределения содержаний или параметров на объем полезного ископаемого, характеризующегося данной пробой.

В процессе эксплуатации месторождения для целей геологического опробования применяются объемные, площадные и линейные типы проб. К объемным относят валовые и штучные пробы. К площадным – задилочные, точечные, горстьевые – отбираются на поверхности ненарушенного массива в горных выработках или на поверхности отбитой горной массы в навале. К линейным пробам относят бороздовые, керновые и шламовые.

Наряду с геологическим существует также техническое опробование, которое направлено на уточнение физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород. Некоторые свойства – объемная масса, влажность – важные параметры, необходимые для подсчета запасов, дру-

гие – крепость, буримость, коэффициент разрыхления, способность руд к слеживанию, самовозгоранию, гранулометрический состав – используются при совершенствовании систем разработки, уточнении структуры месторождений и условий локализации рудных тел.

### **2.2.3. Сбор геологических данных**

Месторождения, передаваемые горнодобывающим отраслям для промышленного освоения, должны быть разведаны до уровня, достаточного для проектирования и строительства горных предприятий. Функции, связанные с обеспечением геологической информацией на горном предприятии, ложатся на геологическую службу этого предприятия. Задачи, выполняемые геологической службой, можно объединить в три группы:

1) выявление и оценка новых запасов полезного ископаемого в районе горного отвода для расширения минерально-сырьевой базы действующего предприятия и продления срока его существования – задачи стадии доразведки месторождения;

2) уточнение данных о разведанных запасах по мере их вскрытия, подготовки и отработки, т.е. повышение степени разведанности запасов – задачи эксплуатационной разведки;

3) детализация сведений о геологическом строении месторождения и составе полезных ископаемых для контроля за качеством и полнотой отработки запасов, а также для совершенствования технологии разработки месторождения и переработки минерального сырья – текущие задачи геологической службы.

Как отмечалось, сбор геологических данных начинается с доразведки. Задачи доразведки разрабатываемого месторождения:

- последовательное уточнение его геологического строения, горно-геологических условий, а также качества полезного ископаемого на недостаточно детально изученных участках;
- расширение общих контуров месторождения за счет выявления и оконтуривания новых участков, зон и залежей полезного ископаемого как по площади, так и в глубину;
- детализация данных по предварительно оцененным участкам, продуктивным зонам и залежам с переводом их запасов в категории разведанных для восполнения отработанных запасов или расширения сырьевой базы действующего предприятия;
- дополнительное изучение вещественного состава и технологических свойств полезного ископаемого, геолого-технологическое картирование с учетом новых данных, уточнение и пересмотр требований стандартов к качеству добываемого сырья, а также технологических схем переработки;
- геолого-экономическая переоценка месторождения с учетом вновь выявленных запасов полезного ископаемого.

Методика доразведки разрабатываемого месторождения должна учитывать принятые при детальной разведке плотность и форму разведочной сети, итоги сопоставления материалов разведки и эксплуатации, а также технологию разработки. Результаты доразведки обобщаются в соответствующем отчете с подсчетом запасов [13].

Эксплуатационная разведка, согласно методическим указаниям, проводится с целью планомерного систематического получения достоверной информации для обеспечения текущего (годового), оперативного (месячного) и декадно-суточного планирования, оперативно-диспетчерского управления в течение суток или смены, а также для контроля за полнотой и качеством отработки запасов. Она осуществляется в течение всего периода разработки месторождения и по целевому назначению разделяется на опережающую и сопровождающую добычу полезного ископаемого.

Опережающая эксплуатационная разведка совмещается с проходкой горно-капитальных, горно-подготовительных и нарезных выработок. По ее результатам определяются или уточняются запасы, качество и пространственное размещение полезного ископаемого в пределах выемочного участка и эксплуатационного блока. Разведочные работы ведутся при подземной разработке месторождения в пределах выемочного участка и эксплуатационного блока, подготавливаемых к очистной выемке, а при открытой – в пределах уступа или его части. опережение очистных работ составляет один – два года. Полученные данные используются для локального проектирования отработки, текущего планирования горных работ.

Сопровождающая эксплуатационная разведка опережает развитие очистных работ. Ее цели – уточнение контуров отдельных тел и локальных скоплений полезного ископаемого, запасов и качества, пространственного размещения технологических сортов, пустых пород и некондиционных участков в пределах каждого отрабатываемого блока. На результатах геологоразведочных работ основывается оперативное и декадно-суточное планирование, оперативно-диспетчерское управление, а также корректировка добычных работ, постоянный контроль за полнотой и качеством отработки запасов, определение и учет фактических показателей потерь и разубоживания.

Основные задачи эксплуатационной разведки:

- изучение вещественного состава, структурно-текстурных особенностей и технологических свойств полезного ископаемого;
- оконтуривание блоков пустых пород и некондиционных участков, прослеживание контактов полезного ископаемого с вмещающими породами, а также границ технологических типов;
- уточнение физико-механических свойств полезного ископаемого и вмещающих пород, гидрогеологических и инженерно-геологических условий отработки конкретных участков и блоков;
- оперативный подсчет запасов по выемочным участкам и блокам, учет их состояния и движения.

Работы этой стадии, в отличие от предыдущих, проводятся не на всем месторождении, а по мере развития очистной выемки с опережением ее на один или два года.

#### **2.2.4. Геохимическое исследование недр**

Геохимические методы наиболее широко и эффективно применяются на стадии поисков месторождений рудных полезных ископаемых и поисково-оценочных работ.

Основные задачи геохимических исследований при доразведке – поиски смещенных частей рудных тел, их апофиз, рудных столбов, а также слепых рудных тел на новых, перспективных участках и в пространстве между скважинами и горными выработками; определение по единичным выработкам уровня вскрытия рудных тел и перспектив распространения оруденения на глубину.

Полученные при геохимических исследованиях результаты позволяют повышать эффективность проводимых разведочных и добычных работ путем рационального расположения разведочных горных выработок, сокращения их объемов, повышения достоверности интерполяции геологических и геофизических данных на участках, не вскрытых горными выработками или скважинами.

В процессе доразведки эксплуатируемых месторождений, когда горными выработками и буровыми скважинами рудные тела пересекаются на нескольких уровнях, для решения указанных задач наиболее эффективен метод изучения первичных ореолов элементов-индикаторов основных полезных компонентов и их зональность.

Многочисленные исследования подтвердили, что все месторождения полезных ископаемых и отдельные рудные тела сопровождаются ореолами различных химических элементов. В количественном отношении параметры таких ореолов (интенсивность, ширина и соотношения параметров ореолов различных элементов), а также соотношение между размерами ореолов и рудных тел резко изменяются в зависимости от геолого-промышленного типа месторождения и особенностей его строения (петрохимический состав вмещающих пород и их физико-механические свойства, структурные условия локализации оруденения, вещественный состав руд и т.д.). Такие ореолы характеризуются набором практически одних и тех же химических элементов для какого-либо полезного ископаемого, вне зависимости от геологической обстановки.

Ширина первичных ореолов обычно превышает мощность зон околорудно измененных пород; вдоль зон разрывных нарушений ореолы могут прослеживаться на значительные расстояния от участков скопления промышленных руд. На практике часто используются полиэлементные ореолы, построенные путем суммирования (аддитивные) или перемножения (мультипликативные) значений содержаний элементов-индикаторов, которые часто по размерам и интенсивности значительно превосходят моноэлементные и поэтому более контрастны.

Современные компьютерные технологии применяются для расчета многочисленных вариантов мультипликативных коэффициентов зональности, что позволяет выявить среди них оптимальные, которые и используются для перспективной оценки аномалий или рудных образований.

Наиболее широкие и интенсивные ореолы дают руды цветных и благородных металлов: вольфрама, молибдена, кобальта, никеля, мышьяка, меди, свинца, цинка, висмута, серебра, сурьмы, ртути, олова.

Более сложно построены геохимические аномалии рудных образований телескопической формы. В этом случае приходится учитывать геохимические особенности разнотипной минерализации. Например, на многих свинцово-цинковых месторождениях для колчеданной стадии рудообразования основными элементами-индикаторами служат мышьяк, медь, висмут, молибден; для полиметаллической стадии – свинец, цинк, серебро, кадмий, сурьма; для более поздних сульфоантимонитовых стадий – мышьяк, сурьма, ртуть. В результате в строении ореолов устанавливается четко проявленная зональность по простиранию и падению рудных тел. Элементы-индикаторы в вертикальной зональности располагаются, как правило, в характерной последовательности и отличаются от основных полезных компонентов, максимальные концентрации которых в плоскости падения рудных тел обуславливаются, прежде всего, типом месторождения.

Для уточнения направления доразведки месторождения может быть проанализирована продольная геохимическая зональность первичных ореолов, проявляющаяся на проекции рудоносных зон и характеризуется совмещенными контурами ореолов элементов-индикаторов. Для изучения этого вида зональности на продольную проекцию выносятся точки пересечения скважин с плоскостью рудного тела и значения содержаний элементов-индикаторов или различных геохимических коэффициентов.

Перед составлением проекта геохимических исследований на действующем предприятии рекомендуется тщательно проанализировать результаты изучения первичных ореолов на стадии предварительной и детальной разведки. Затем провести по уже вскрытым выработкам рудным телам опытно-методические работы с целью уточнения состава элементов-индикаторов, интенсивности и зональности их ореолов, а также фонового содержания. При эксплуатационной разведке, в отличие от стадий предварительной разведки нового объекта, необходимо определение фонового содержания не по рудному полю или месторождению в целом, а по конкретным участкам, где проводятся геохимические исследования.

Методика изучения первичных ореолов едина. Пробы для геохимических исследований отбираются по разрезам, ориентированным вкрест простирания рудных тел и на различных уровнях по вертикали. Расстояние между пробами зависит от ширины зон гидротермально измененных пород и уточняется в процессе проведения опытно-методических работ в пределах зоны околорудных изменений; шаг опробования может изменяться от 0,5 до 3 м, а для слабоизмененных и неизмененных – до 10 м; горные вы-

работки и керн буровых скважин в пределах гидротермально измененных пород опробуются пунктирно-бороздовым способом с равномерным отбором в пробу 6-10 сколков по всему интервалу опробования. На участках слабоизмененных пород отбираются штучные пробы. Масса геохимических проб 200-300 г, после протирания и квартования масса навески для анализа должна составлять 50-100 г.

Для определения ширины ореолов с различными уровнями содержания, расчета их параметров, а также выявления фонового содержания по исследуемому участку желательно отбирать не менее 30-50 равномерно расположенных проб.

Обычно геохимические исследования при доразведке действующих предприятий включают следующие операции:

- анализ всех отобранных геохимических проб на элементы-спутники, характерные для данного типа месторождения;
- составление на высококачественной геологической основе геохимических погоризонтных планов, проекций и разрезов с оконтуриванием на них моноэлементных и суммированных ореолов рассеяния элементов-индикаторов;
- оценка уровня эрозионного среза, выявленной аномалии или уровня вскрытия рудного тела, прогнозирования смещенных участков рудных тел, апофиз, рудных столбов, скрытого оруденения на основе анализа мощностей ореолов, интенсивности их проявления, морфологических особенностей, графиков отношений суммы или произведений содержаний элементов надрудных и подрудных ореолов.

Учитывая высокую степень неравномерности распределения полезных компонентов в рудах большинства месторождений цветных, редких и благородных металлов и сложность распространения их элементов-индикаторов, геохимические исследования целесообразно проводить совместно с другими методами геофизики.

### **2.2.5. Геофизические методы разведки**

Для дистанционного сбора данных при изучении недр широко используются геофизические методы. Если геологические и геохимические методы относятся к прямым методам «близкого действия», основанным на непосредственном исследовании минерального, петрографического или геохимического состава вскрытых выработками горных пород, то геофизические методы – это методы как «ближнего» (до 1 м), так и «дальнего» (до тысяч километров) действия. Они обеспечивают равномерность, объемный, интегральный характер получаемой объективной информации. При этом производительность экспериментальных геофизических работ значительно выше, а стоимость в несколько раз меньше по сравнению с разведкой с помощью неглубоких (до 100 м) и в сотни раз меньше, чем глубоких (свыше 1 км) скважин. Повышения геологической и экономической эффективности изучения недр можно достигнуть при использовании геофи-



зических методов исследования как важнейшего фактора ускорения научно-технического прогресса в геологии и горном деле.

Геофизика имеет следующие прикладные направления исследований земной коры: глубинная; региональная; разведочная, подразделяемая на нефтегазовую, рудную, нерудную, угольную; инженерная, включающая инженерно-геологическую, гидрогеологическую, гляциологическую, почвенно-мелиоративную, мерзлотно-археологическую и техническую; экологическая. Формирование последней идет за счет экологических аспектов всех перечисленных прикладных направлений геофизики.

Каждое физическое поле численно характеризуется своими наблюдаемыми (наблюдаемыми, измеряемыми или регистрируемыми) физическими параметрами поля  $P_n$ . Данные собирают при проведении геофизических работ с помощью мобильной аппаратуры. Так, гравитационное поле определяется ускорением свободного падения или силой тяжести  $g$  и ее градиентами по осям координат  $g_x, g_y, g_z$ , геомагнитное поле – полным вектором напряженности  $T$  и различными его элементами (вертикальной  $Z$ , горизонтальной  $H$  составляющими и др.), электромагнитное – векторами магнитной  $H$  и электрической  $E$  составляющих, упругое – амплитудой  $A$  и временем  $t$  распространения упругих волн различного вида, термическое – температурой  $T_o$ , ядерно-физическое – интенсивностью естественного  $J_\gamma$  и искусственно вызванных  $J_{\gamma\gamma}, J_{nn}$  гамма- и нейтронных излучений.

Принципиальная возможность проведения геологической разведки на основе различных физических полей Земли определяется тем, что распределение параметров полей в воздушной оболочке, на поверхности акваторий или земли, в горных выработках и скважинах зависит не только от происхождения естественных или способа создания искусственных полей, но и распределения в земле геометрических и литолого-петрографических неоднородностей. Эти неоднородности отличаются по физическим свойствам от вмещающей среды, и в результате создаются аномальные физические поля. Аномалией, или полезным сигналом, в геофизике считается отклонение измеренного параметра поля от нормального, за которое чаще всего принимается поле над однородным полупространством. При этом возникновение аномалий связано с тем, что объект поисков, создающий аномалию (возмущение), либо сам создает поле в силу естественных причин, например, естественное постоянное электрическое поле вокруг рудных залежей, либо искажает искусственно созданное поле вследствие различия физических свойств, например, за счет отражения сейсмических или электромагнитных волн от контактов разных толщ.

Надежность и эффективность выделения аномалий во многом определяются методикой проведения работ, куда входит система наблюдений, т.е. выбор расстояний между пунктами, шага съемки, при профильных наблюдениях и между профилями при площадной съемке. Густота сети наблюдений зависит от решаемых задач, масштабов съемок, простира-

размеров и глубины залегания разведываемых объектов, вкрест предполагаемого простирания которых профили обычно и ориентируются.

Аномалии обычно проявляются на фоне не всегда однородного и спокойного поля среди разнообразных помех геологического, природного, техногенного характера. При этом влияют различные неоднородности верхней части геологической среды, неровности рельефа, наличие космических, атмосферных, климатических, промышленных и других помех. В результате наблюдается интерференция полезных сигналов и помех разной природы. При этом происходят как простое наложение или суперпозиция полей, так и сложные, нелинейные их взаимодействия.

Выявление аномальных параметров физических полей  $P_a$  – актуальная физико-математическая проблема, решаемая путем применения, как правило, компьютерных способов обработки геофизических данных. Они включают, в частности, аппаратно-калибровочные преобразования; введение поправок в наблюдаемое поле с учетом нормального поля; разного рода трансформации  $P_n$  в  $P_a$ ; специальные способы компьютерной обработки и перехода от реальных, наблюдаемых, к информационным параметрам поля в виде цифровых данных с понижением уровня помех. В результате строятся графики аномалий: по горизонтали откладываются точки записи, т.е. пункты измерений или пикеты, а по вертикали  $P_a$ . При отрисовке карт вначале в заданном масштабе на карту наносятся линии профилей, а перпендикулярно линиям профилей откладываются значения  $P_a$ ; затем выводятся карты аномалий в виде изолиний равных значений  $P_a$ , временные разрезы (по горизонтали откладываются точки наблюдений, а по вертикали вниз времена  $t$  прихода сигналов от объектов, расположенных на разных глубинах).

Важным этапом геофизического процесса является преобразование аномальных информационных параметров поля  $P_a$  в параметры реальных, непосредственно связанных с аномалиями, объектов  $P_o$ . К основным параметрам объектов относятся их физические свойства  $\xi$  и геометрические характеристики  $\zeta$ , т.е.  $P_o = g(\xi, \zeta)$ .

Каждое физическое поле определяется соответствующими физическими свойствами разведываемых объектов и вмещающей среды. Так, гравитационное поле зависит от изменения плотности пород  $\sigma$ ; магнитное поле – от магнитной восприимчивости  $\chi$  и остаточной намагниченности  $J_r$ ; электрическое и электромагнитное поля – от удельного электрического сопротивления пород  $\rho$ , диэлектрической  $\epsilon$  и магнитной  $\mu$  проницаемостей, естественной поляризуемости, или электрохимической активности  $\alpha$ , и вызванной поляризуемости  $\eta$ ; упругое поле – от скорости распространения  $v$  и затухания  $\beta$  различных типов волн, а последние, в свою очередь, – от плотности, упругих констант (модуль Юнга  $E$ , коэффициент Пуассона  $\nu$  и др.); термическое поле – от тепловых свойств: теплопроводности  $\lambda_T$ , теп-

лостности  $C$ , температуропроводности  $a$  и др.; ядерные – от естественной и наведенной радиоактивности, гамма-лучевых и нейтронных свойств. Физические свойства горных пород изменяются иногда в небольших пределах (плотность от 1 до 6 г/см<sup>3</sup>), а иногда в очень широких пределах (удельное электрическое сопротивление от 0,001 до 10<sup>15</sup> Ом·м). В зависимости от целого ряда физико-геологических факторов одна и та же порода может характеризоваться разными свойствами, и наоборот, разные породы могут иметь одинаковые свойства.

Геометрические характеристики создающих аномалии объектов: глубина, размеры, особенности физических границ, на которых физические свойства могут резко (контрастно, на границах различных типов пород) или плавно (с градиентом, при постепенном изменении концентрации химических элементов в породах) изменяться.

Определение геометрических и физических параметров объектов  $P_o$  по аномальным параметрам физических полей  $P_a$  называется решением обратной задачи геофизики (ОЗ:  $P_a = > P_o$ ). В противоположность этому определение аномальных параметров физических полей по известным геофизическим и физическим параметрам объектов составляет суть прямой задачи геофизики (ПЗ:  $P_o = > P_a$ ). Решение прямых и обратных задач в каждом геофизическом методе основано на известных в теории поля интегральных и дифференциальных уравнениях связи между  $P_o$  и  $P_a$ . Такое решение называется математическим моделированием. При этом иногда реальные объекты, создающие аномалии, можно аппроксимировать пространственными геологическими моделями сравнительно простой геометрической формы с заданными размерами и физическими свойствами. В общем же случае для описания рудных тел необходимо использовать всю совокупность геофизических полей для выявления структуры геохимического поля при стохастическом расположении геологических объектов в объеме изучаемого месторождения.

Геофизические методы по месту их применения можно условно разделить на наземные, скважинные и подземные.

Специфика применения методов наземной геофизики на действующих предприятиях заключается в их детальности, крупномасштабности, сложности учета геометрии выработок, наличии техногенных полей, а также в максимальном приближении трассы наблюдений и источников искусственных полей к изучаемым объектам.

Гравиметрические методы, базирующиеся на оценке гравитационных аномалий, позволяют определить глубину залегания, форму и размеры тел полезных ископаемых, отдельных структурно-тектонических зон в пределах месторождений, а также выявить карстовые тела, зоны тектонически нарушенных, трещиноватых, плотных и брекчированных пород. По положительным аномалиям изучают рудные месторождения, а по отрицательным – месторождения каменной соли, ископаемых углей. Интенсив-

ными положительными аномалиями характеризуются пегматитовые, кварцевые, баритовые жилы, трубки алмазоносных кимберлитов.

Магнитометрические методы на основе изучения магнитных аномалий, вызванных различной магнитной восприимчивостью горных пород и полезных ископаемых, дают возможность исследовать и оценивать месторождения ферромагнитных руд. Хорошие результаты получены при применении магнитометрических методов для изучения кимберлитовых алмазоносных трубок, бокситовых руд, золотоносных россыпей, а также трещиноватости, тектонической нарушенности и закарстованности массивов.

Электрометрические методы исследования массивов горных пород разделяют на две группы. Методы первой группы предназначены для выявления и изучения аномалий в электромагнитных полях; с помощью методов второй группы определяют закономерности прохождения электрических токов, а также поглощение, отражение и преломление электромагнитных волн в породах. Наиболее широко распространены методы: собственных потенциалов (естественного электрического поля), заряженного тела, вызванной поляризации, кажущихся электросопротивлений, магнитометаллургический.

С помощью названных методов изучают сульфидные и угольные месторождения, участки повышенной фильтрации подземных вод, оконтуривают рудные тела, пласты антрацита и графита, исследуют крутопадающие пласты, дайки, погребенные структуры, выявляют разрывные нарушения, картируют породы, трещиноватые и закарстованные зоны.

Высокочастотные радиоволновые методы (индуктивные, компарационные, радиоволнового просвечивания, интерференционные), базирующиеся на электромагнитных свойствах горных пород, применяют для определения местоположения и размеров графита, обнаружения тектонических нарушений и обводненных зон, талых областей в зонах многолетней мерзлоты, плавунгов в песках и т. п.

Сейсмические методы (отраженных волн) и корреляционный (преломленных волн) дают достаточно точную информацию о строении и состоянии массива горных пород. Сейсмические методы используют при разведке и инженерно-геологических изысканиях, при изучении зон трещиноватости, разломов, карстовых полостей, многолетней мерзлоты, выветрелых горных пород, а также при оценке параметров упругости и прочности горных пород.

Радиометрические методы, фиксирующие естественные поля, применяются при разведке радиоактивных, обладающих незначительной радиоактивностью гранитных массивов, а также при выявлении разломов, зон трещиноватости и других элементов массивов горных пород.

Геофизические методы исследования скважин (каротаж) основаны на изучении в них различных физических полей. По данным каротажа строят геологические разрезы, оценивают структуру месторождений, расчленяют толщи по литологическим признакам, выявляют полезные ископаемые, определяют физические свойства горных пород. При каротаже используют

те же поля и методы, что и в полевой геофизике, но существенно отличающиеся аппаратурной реализацией методов и приемов выполнения работ. Геофизические характеристики измеряются скважинными приборами и сигналы регистрируются на поверхности в виде кривых или массивов цифровых данных.

Наиболее распространены такие виды каротажа скважин: электрический (собственных потенциалов и кажущихся сопротивлений), магнитный, акустический, термический, радиоактивный (гамма-каротаж, гамма-гамма-каротаж, нейтронный гамма-каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж, наведенной радиоактивности, радиоактивных изотопов), фотометрический, газовый.

Около- и межскважинные геофизические исследования основаны на изучении в массивах горных пород естественных или искусственно созданных геофизических полей. Чаще применяют методы: скважинная магнито-разведка, скважинная гравиразведка, радиоволновый, акустического просвечивания, заряженного тела, переходных процессов, пьезоэлектрический, контактный метод поляризационных кривых.

Перечисленные методы позволяют обнаружить и оконтурить рудные тела и другие геологические образования, отличающиеся по свойствам от вмещающих пород, установить их размеры и элементы залегания, уточнить морфологию зоны выклинивания. Некоторыми из этих методов выявляют и геометризуют гидротермально измененные или неметаморфизованные зоны.

Геофизическими методами контролируют техническое состояние скважин. К этим методам относятся инклинометрия, предназначенная для измерения углов отклонения оси скважины от вертикали (зенитное искривление) и от плоскости разведочного разреза (азимутальное искривление), и кавернометрия для определения фактического диаметра скважины.

В гидрогеологических исследованиях при выделении фильтрующих горизонтов, выявлении и изучении притоков, оценке дебитов и минерализации подземных вод, установлении значений коэффициентов фильтрации используются такие геофизические методы, как термометрия, резистивиметрия (измерение удельного сопротивления промывочной жидкости), расходометрия (определение скорости перемещения жидкости по скважине), барометрия (определение давления по стволу скважины).

В группу методов подземной (шахтной) геофизики включаются методы, посредством которых изучают подземное пространство с помощью источника и приемника поля, помещенных в горных выработках или в скважинах подземного бурения. Подземная геофизика применяет в основном обычные геофизические методы, реже – методы или модификации, не имеющие аналогов в наземной геофизике. Основное назначение этих методов – оперативное обеспечение геолого-геофизическими данными процесса разведочных работ и подготовки эксплуатационных блоков; кроме того, решаются задачи по изучению гидрогеологических и инженерно-

геологических условий, в том числе прогнозирования геодинамических процессов, включая проявления горного давления.

Специфические особенности геофизических работ, проводимых на шахтах и рудниках, следующие:

- высокая детальность наблюдений, необходимая для определения контуров тел полезных ископаемых в плане и разрезе;
- проявление горно-геологических факторов и явлений (трещиноватость, разломы, карст и т. д.), осложняющих интерпретацию геофизических и решение основных задач;
- ограниченность размеров площади для проведения исследований в горных выработках;
- небольшие размеры питающих и измерительных установок;
- плохие условия для заземления питающих и приемных линий;
- высокий уровень промышленных помех, влияющих на характеристики полей и проведение наблюдений;
- повышенные требования к соблюдению правил техники безопасности, в частности при работе в выработках, опасных по пыли и газу.

Исходя из названных особенностей в подземной геофизике получили распространение различные варианты (в соответствующем аппаратурном воплощении) методов электро-, грави-, термо-, магнито- и сейсморазведки, геоакустики и др.

Возможность применения гравиразведки в подземных горных выработках с целью решения поисково-разведочных задач и уточнения горно-технических условий эксплуатации обусловлена существенным отличием плотностных показателей изучаемых объектов и вмещающих горных пород. Использование современных высокоточных приборов позволяет обнаружить и количественно описать эти объекты при значительной избыточной или недостаточной их плотности. Так, значительную избыточную плотность по сравнению с вмещающими породами имеют руды металлов. В то же время карстовые зоны, полости характеризуются недостатком плотности. Следует отметить, что создаваемые этими объектами силы тяжести невелики, поэтому выявить их наземными работами не удастся, особенно при глубоком залегании, небольших размерах и влиянии внешних факторов. В этих условиях проведение гравитационных измерений в разветвленной системе подземных горных выработок на разных горизонтах дает хорошие результаты.

При подземной гравиразведке можно решать такие задачи:

- вести поиски в межвыработочном пространстве рудных залежей, не выявленных при разведке;
- выяснять условия залегания, форму и размеры рудных залежей, ориентировочно оценивать их запасы;
- выявлять литологические и тектонические контакты пород с разной плотностью при изучении глубинного строения месторождений;
- обнаруживать проявления глубинного карста, пустоты в проливной толще, зоны обрушения;

- определять плотностные характеристики толщ горных пород между горизонтами.

С помощью методов подземной магниторазведки выясняют природу магнитных аномалий, выявляемых при наземной съемке, ведут поиск намагниченных тел в окрестностях выработок, в том числе и в забойном пространстве, определяют их пространственное положение, формы и размеры, а также элементы залегания, формы и размеры намагниченных тел (рудных залежей), подсеченных горной выработкой.

В подземной геофизике используют практически все известные методы электроразведки: электропрофилирование применяется для оконтуривания рудных тел низкого удельного сопротивления; метод заряда – для установления сплошности залежей; метод вызванной поляризации – для фиксации вкрапленных руд, слабо отличающихся по удельному сопротивлению от вмещающих пород, а также для выделения участков наиболее обогащенных руд; дипольное электромагнитное профилирование – для оконтуривания рудных тел и технологических сортов руд.

Дипольное электромагнитное профилирование в горных выработках дает возможность выявить в околывыработочном пространстве рудные тела, обводненные и ослабленные зоны, решить геокартировочные и горно-технические задачи, связанные с выделением объектов, различающихся по электрическим свойствам и расположенных вблизи горных выработок. Исследования проводят с помощью той же аппаратуры, что и в наземном варианте, но с повышенной влагоизоляцией.

Каротаж скважин подземного бурения незаменим при решении таких задач, как направленная проходка горных выработок, сокращение объема колонкового бурения и числа скважин при оценке рудоносности эксплуатационных блоков, пространственная привязка рудных подсечений, борьба с разубоживанием извлекаемой рудной массы и т. д.

Радиоволновые методы в шахтно-рудничном варианте, по существу, решают те же задачи, что и в скважинном. Наиболее перспективно их использование для решения следующих задач:

- оценка рудоносности блоков пород между выработками для последующего целенаправленного ведения горно-буровых работ;
- выяснение особенностей морфологии, размеров, условий залегания полезных ископаемых – уточнение контуров, выделение мест разрыва сплошности, апофиз и пережимов;
- контроль за отработкой эксплуатационных блоков с целью предотвращения потерь и разубоживания полезного ископаемого.

Сейсмические и геоакустические методы подземной геофизики позволяют решать такие задачи: определять упругие свойства горных пород, изучать степень их трещиноватости, исследовать напряженное состояние массива, выявлять подземные полости, заполненные газами и жидкостью, а также зоны обрушения и зоны разломов, обнаруживать и оконтуривать залежи, угольные и соляные пласты, измерять толщину кровли выработок. Все многообразие этих методов можно объединить в три группы: 1) отра-

женных и преломленных волн; 2) проходящих волн; 3) использующих волны от естественных упругих колебаний.

В подземной сейсморазведке чаще всего применяется метод проходящих волн. Он позволяет обнаружить объекты, их пространственное положение, установить форму, размеры, некоторые характеристики внутреннего строения. Сейсмоакустические методы третьей группы дают возможность регистрировать участки проявления горного давления и определять их местонахождение, поэтому они широко распространены в практике работы геомеханических служб рудников и шахт.

Следует отметить, что эффективность применения геофизических методов в геологическом обеспечении для создания горно-геологических информационных систем добывающих предприятий повышается за счет их комплексирования, определяемого конкретной геологической обстановкой. Необходимость комплексирования связана с так называемыми естественными помехами, к которым относится наличие в разрезе пород, близких по некоторым свойствам к полезным ископаемым, а поэтому часто не разделяемых в рамках одного метода [24]. Фильтрация таких помех, как одна из основных трудностей при интерпретации результатов геофизических исследований, часто практически невозможна без применения дополнительных геологических данных и комплексных методов геофизики, основанных на изучении различных свойств горных пород.

#### **2.2.6. Методы технологической минералогии**

Главная задача технологической минералогии – определение вещественного состава, структурно-текстурных характеристик и физико-химических свойств минерального сырья с целью прогнозирования его технологических показателей переработки на различных стадиях освоения месторождения.

В современный комплекс минералого-аналитических методов входят: высокоразрешающая оптическая и электронная микроскопия, рентгенография, рентгенотомография, люминесценция, инфракрасная и мессбауэровская спектроскопия, магнитометрия, микрорентгеноспектральный, термический и элементный анализы, обеспеченные соответствующей нормативно-методической документацией, стандартными образцами состава (СОС) и фазового состава и свойств минералов (СОФС).

На основе технологической оценки полезных ископаемых можно прогнозировать экономически обоснованную целесообразность вовлечения сырья в переработку с учетом современного развития технологий, методов и способов обогащения, контроля эффективности управления перегорно-обогачительного производства [25]. Постепенное ухудшение качества минерального сырья, увеличение доли труднообогащаемых объектов и вовлечение в переработку бедных руд, ранее не изучавшихся, оптимизация технологий передела и повышение экономической эффективности ком-



плексного использования запасов сырья невозможны без прикладных минералогических исследований.

Минералогическими исследованиями руд разных минеральных типов и генезиса устанавливаются их морфоструктурные характеристики, особенности состава и строения рудных минералов, их физические свойства, выявляются формы нахождения главных рудных и акцессорных минералов, определяющие технологические свойства руды в целом. Это позволяет прогнозировать комбинированные технологии их переработки и оценивать ожидаемое качество готовых продуктов. Морфология рудных агрегатов, их гетерогенное внутреннее строение, трещиноватость и пористость служат индикаторами потенциального способа химико-металлургического передела сырья.

Технологическая минералогия с каждым годом приобретает все большее значение в комплексе геологоразведочных работ. Ее методы и приемы помогают с минимальными затратами проводить оценку технологических свойств руд и пород и способствуют созданию эффективных технологий их переработки, предусматривающих максимально возможное извлечение всех полезных минералов.

Схематически последовательность операций методики определения функции раскрытия минеральных фаз рудного сырья для компьютерного моделирования и минералургического картирования месторождений представлена на Рис. 1.6.

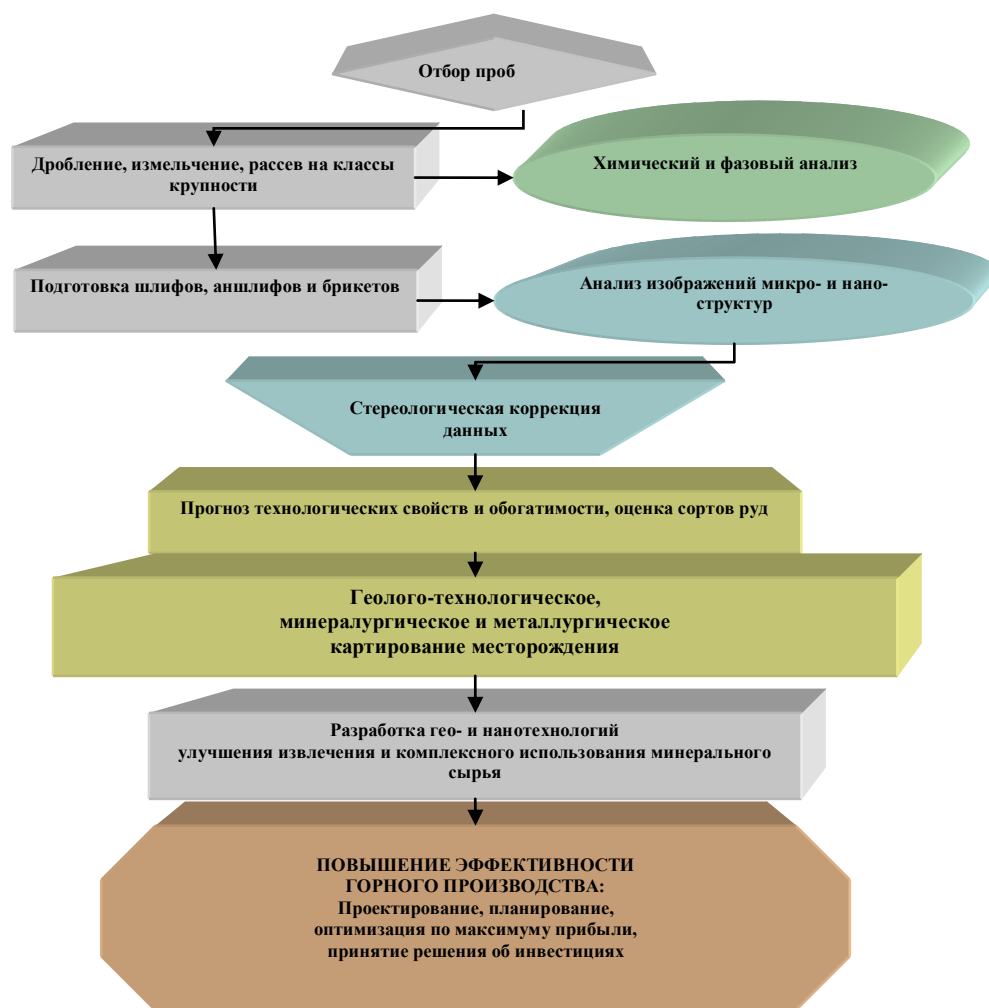


Рис. 1.6. Схема компьютерной технологии минералургического картирования

При создании ГИС недропользования методы и средства технологической минералогии позволяют сформировать базы данных генетических типов и технологических сортов руд, выполнить минералогическое и гео-металлургическое картирование месторождений не только по главному извлекаемому компоненту, но и с учетом содержаний вредных примесей в рудах.

## 2.3. Первичная обработка данных

### 2.3.1. Векторизация и растеризация

Все многообразие электронных изображений можно разделить на два типа: векторное и растровое.

Процедура векторизации предназначена для перевода существующих картографических изображений из растрового в векторный вид. Этот процесс очень сложный и не может быть выполнен в полностью автоматизированном режиме. Векторное изображение – это изображение, представленное параметрическим описанием геометрических фигур. Иначе говоря, векторизация необходима для того, чтобы программа «понимала», что за

объект представлен на растре. Кроме того, для хранения векторного изображения требуется гораздо меньше объема памяти, нежели для растрового. Это важное свойство векторного изображения.

Главное отличие векторного изображения от растрового состоит в том, что векторное изображение дает информацию о том, где расположен тот или иной объект, растр же дает информацию о том, что расположено на данной точке территории.

Растрезация – процесс, обратный векторизации, т.е. процесс перевода векторного изображения в растровое. Этот процесс должен выполняться только в автоматизированном режиме. В отличие от векторного изображения растр не содержит информации о геометрических параметрах объектов. Другими словами, точка на растре «не знает», частью какой геометрической фигуры она является. Отсюда вытекает одно из главных свойств растрового изображения – разрешение, т.е. количество точек растрового изображения, приходящееся на линейную единицу носителя (обычно точка на дюйм (dpi)). Поэтому при создании растрового изображения необходимо четко представлять, каким целям оно будет служить. Помимо разрешения, важное свойство растра – цветность (палитра). Основные виды палитр: True Color (полноцветная) – RGB, CMYK или Lab model с 8 или более бит на цвет/компонент; High Color (цветная) – RGB 15 (5-5-5) или 16 (5-6-5) бит на все цвета (в последнее время применяется редко); Indexed (индексированная) – до 256 индексированных цветов из полноцветной или цветной палитры; Grayscale (градации серого) – содержит только яркостную характеристику изображения, 8 или более бит на представление градаций серого; Bitmap (монокромная) – 1 бит на точку, точка либо окрашена, либо нет. Наиболее распространены для цветных изображений True Color, для монокромных – Bitmap. Выбор палитры определяется назначением растра.

Векторное представление геоданных называют векторной моделью, растровое – растровой. Основные отличия векторной модели от растровой можно свести к следующим основным аспектам [16].

Основное предназначение векторной модели данных – сам пространственный объект, растровой – местоположение точек объекта. Геометрия векторной модели содержит  $x$ ,  $y$ ,  $z$  координаты представления геолого-географических объектов, в то время как геометрия регулярной растровой модели может задаваться как полной матрицей всех значений координат в ячейках, так и более компактно – точкой привязки и приращениями дискретных значений центров узлов по координатным осям. В последнем случае растровая 2D модель задается 6-ю параметрами, а воксельная 3D модель задается 9-ю параметрами.

Векторная модель может описывать произвольный контур границ исследуемой области. В растровой модели границы обычно прямоугольные. Векторная модель более точно представляет форму объекта, тогда как растровая описывается прямоугольными элементами и, следовательно, является более обобщенной и, как правило, менее точной.

В то же время растровая модель может отображать плавные переходы значений между объектами и поверхностями, например, концентрацию загрязнений или высоту над уровнем моря. Равные значения показателей для нескольких уровней представляются в виде изолиний, контурных линий с подписями или закрашенных цветных областей.

Векторная модель используется для высококачественной картографии и там, где важны четкость и точность, например, для кадастровых применений. Растровая модель полезна для хранения изображений и хорошо подходит для операций со множествами при пространственном моделировании геологических объектов.

Логические операции с двумя и более наборами растровых данных позволяют создавать комплексные растровые и воксельные регулярные модели. Для векторных объектов расчет результатов операций перекрытия моделей (оверлейных операций) более сложен.

Когда необходимо конвертировать данные из одной модели в другую, используют векторизацию или обратную ей операцию – растеризацию. Создание полигонов из сетки относительно просто: необходимо следовать в границах объекта по ячейкам с заданными значениями. Однако векторизация линейных объектов по растровому изображению – более трудная задача и требует порой применения сложных математических операций или даже ручного оконтуривания объектов, особенно при низком качестве оригинала.

### **2.3.2. Декластеризация данных**

Разведочные выработки и точки опробования часто размещаются на площади месторождения достаточно неравномерно. Сеть скважин эксплуатационной геологической разведки, как правило, сгущается на наиболее перспективных участках месторождения с целью повышения достоверности оценки запасов и обеспечения надежного планирования добычи. Если подобный суммарный массив данных непосредственно использовать при интерполяции содержаний и построения блочной модели, то влияние более плотно покрытых точками участков будет существенно преобладать по сравнению со слабаразведанными периферийными областями месторождения.

Для уменьшения негативного влияния неоднородной густоты сети опробования на интерполяцию применяется процедура декластеризации. Она осуществляет обработку первичных данных непосредственно перед использованием их в процедурах интерполяции. При этом сами первичные данные сохраняются в исходной таблице в неизменном виде. В процедуре декластеризации предлагаются следующие варианты отбора проб в ячейках регулярных решеток типа GRID 2D или GRID 3D:

- случайный выбор точки опробования среди всех попавших в ячейку (каждый раз новый выбор номера точки);

- псевдослучайный выбор точки опробования внутри ячейки (номер точки повторяется);
- выбирается ближайшая к центру ячейки точка опробования;
- используется среднее значение всех точек опробования в ячейке.

Декластеризация позволяет повысить точность и быстроту работы таких методов интерполяции, как кригинг, обратные расстояния и полиномиальная регрессия. Вместе с тем необходимо отметить, что при интерполяции по методу ближайшей точки, при линейной интерполяции по сети треугольников и по методу соседних регионов Вороного в декластеризации нет необходимости, поскольку алгоритмы перечисленных методов уже включают в той или иной степени операции декластеризации или сглаживания.

### 2.3.3. Расчет траектории скважины

Для расчета траектории ствола скважины и определения координат центров проб по данным инклинометрии в базе данных первичной информации должны присутствовать как минимум следующие данные:

- о скважинах с именами скважин (например, ДН 103b) и координатами устьев скважин (X,Y,Z);
- результаты инклинометрии скважин (глубина замера, зенитный и азимутальный углы);
- данные опробования; для интервалов отбора проб (от и до) и с результатами анализа проб по контролируемым компонентам (химический и минералогический состав проб, плотность и т. д.).

В общем случае расчет траектории стволов скважин осуществляется по данным инклинометрии методом усреднения углов, когда зенитный угол  $\theta$  (отклонение скважины от вертикали или горизонтали) и азимут  $\alpha$  на протяжении участка интерполяции принимаются равными средним арифметическим соответствующих углов, замеренных на концах интервалов. Приращения координат  $dX$ ,  $dY$ ,  $dZ$  для двух точек замера вычисляются по формулам:

$$dX = dL \cdot \sin((\theta_1 + \theta_2)/2) \cdot \sin((\alpha_1 + \alpha_2)/2),$$

$$dY = dL \cdot \sin((\theta_1 + \theta_2)/2) \cdot \cos((\alpha_1 + \alpha_2)/2),$$

$$dZ = dL \cdot \cos((\theta_1 + \theta_2)/2),$$

где  $dL$  – длина интервала.

Метод отличается приемлемой точностью для скважин глубиной до 2000 м. Для более глубоких скважин используются более точные формулы [26]. В современных интегрированных ГИС для недропользования при отсутствии данных инклинометрии предусмотрена возможность получения таких данных путём оцифровки ствола скважины с отсканированных из имеющейся геологической документации планов и разрезов. При отсутствии измерений скважина обычно считается вертикальной.

#### **2.3.4. Составление композитных и групповых проб**

Для моделирования вариограмм и интерполяции необходимо иметь пробы одинаковой длины. Составные пробы чаще всего рассчитывают вдоль траектории скважины или разведочного пересечения. Искусственные интервалы обычно не совпадают с интервалами опробования, поэтому пересчитанные значения вещественных атрибутов (содержания компонентов, плотность, масса, влажность и прочие характеристики) должны определяться как средневзвешенная оценка исходных проб, входящих в составной интервал. В ряде случаев могут использоваться и другие методы пересчёта вещественных атрибутов, такие как присвоение среднеарифметических, максимальных или минимальных значений. Для невещественных атрибутов (индекс породы, текст, логическая переменная и так далее) можно применять один из методов присвоения: по пробе центра интервала, по пробе с максимальным размером в композите, по пробе с максимальным значением в композите.

Как правило, длина композитных проб выбирается равной средней длине опробования на месторождении и составляет величину в пределах одного или двух метров. Для выявления неравномерности длины опробования можно построить гистограмму распределения и определить наиболее оптимальную длину композитных интервалов.

Если на месторождении несколько ценных компонентов и каждый был интерпретирован отдельно, то компоновку для каждого из них целесообразно проводить отдельно.

1. Расчёт композитных интервалов по уступам. Метод применяется, когда пользователь хочет рассчитать средние содержания для каждой скважины, разбив интервалы по абсолютным превышениям, например, по уступам проектного карьера.

2. Расчёт композитных интервалов по содержаниям. Этот метод применяют при необходимости оценить мощности рудных пересечений с заданными средними содержаниями полезного компонента на выходе. При этом можно включить безрудные прослои в рудные интервалы, а также учесть включение безрудного материала выше или ниже рудных пересечений. Этот метод целесообразно использовать, когда рудное пересечение слишком маломощное и следует добавить к нему безрудные интервалы и пересчитать среднее содержание полученного композита, а также на месторождениях с сильно неравномерным распределением полезного элемента и нечеткими геологическими границами рудных тел.

3. Расчёт композитных интервалов по геологии. В этом случае композитные интервалы будут созданы для каждой скважины в пределах каждого литологического или геологического кода (Рис. 1.7). Операция объединяет пробы в композитные интервалы вдоль скважины до тех пор, пока

не встретит другой геологический код, после чего будет начат следующий композит. Метод подходит для расчёта средних содержаний в пределах геологических тел или пластов.

4. Расчёт композитных проб по интервалам. Метод применяется для объединения различных файлов скважин с интервалами различной длины. Для этого обычно используют файл документации геологии и файл опробования. Метод объединяет эти файлы в один, пересчитывая при необходимости интервалы опробования. При этом пересчета содержаний не происходит, так как вновь созданные интервалы основаны на исходных файлах, а не на заданной длине композитного интервала.

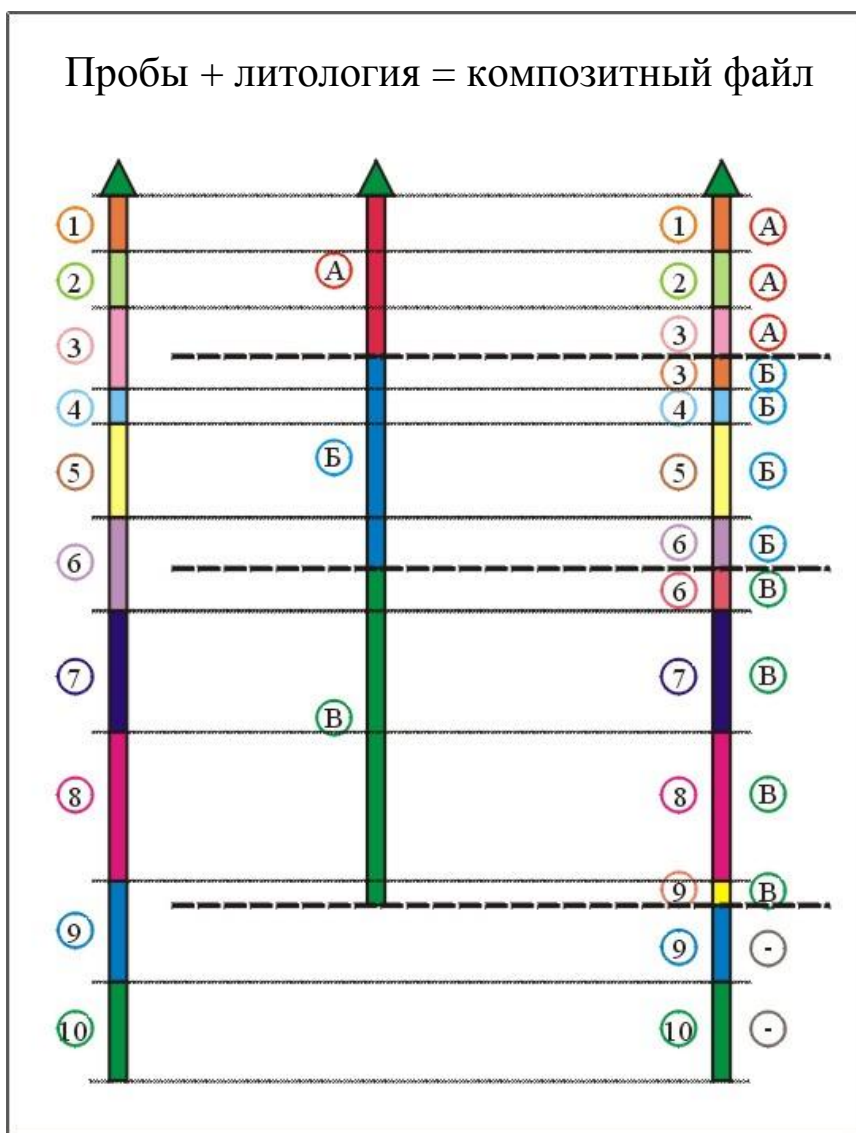


Рис. 1.7. Составление композитных проб по данным опробования (1-10 – номера проб) и литологии (А, Б, В – типы пород)

Объединение проб можно выполнять не для всей базы данных, а лишь в пределах отдельных пластов или минерализации. Для этого в таблице интервального опробования необходимо указать поле индекса, кото-

рое будет служить в качестве индикатора выполнения или невыполнения компоновки. Например, записи, помеченные флажком индикатора 0, не будут включаться в композитные пробы.

### **2.3.5. Учёт проб с резко выделяющимися значениями**

Понятие о пробах с экстраординарными (или «ураганными») значениями показателей возникло при разведке и оценке месторождений редких металлов, где содержание металла крайне неравномерно, и часто возникает проблема учета самородков для определения среднего содержания металла по выработке, блоку или залежи [4]. Обычно среди большого количества проб их всего несколько, но содержание полезного компонента в них может значительно превышать в десятки и даже сотни раз средние значения по остальным пробам вплоть до 100%. Такие пробы получили название ураганных. При подсчете запасов возникает проблема отнесения проб к категории ураганных и способа их учета при вычислении среднего содержания полезного компонента, чтобы не допустить резкого завышения или уменьшения запасов последнего. Вопрос оценки резко выдающихся значений был исследован в связи с широким развитием разведки буровыми скважинами крупновкрапленных руд олова, вольфрама, слюды, ртути и др. В итоге были установлены основные статистические критерии отбора проб и правила обработки ураганных значений.

Пробы с необычайно высокими или низкими содержаниями указывают на крайне неравномерное распределение ценного компонента, и запасы в таких блоках должны оцениваться по более низкой категории как недостаточно разведанные с точки зрения его распределения. Поэтому в первую очередь необходимо тщательно проверять пробы на наличие дубликатов и выявлять ошибки определения содержаний.

Согласно рекомендациям Государственного комитета по запасам (ГКЗ), к ураганным относят такие пробы, контроль которых по каким-либо причинам невозможен, а учет при оценке приводит к завышению запасов более чем на 10%. В связи с этим важно оценить и смоделировать пространственное распределение компонента внутри залежи, чтобы выделить в ней соответствующие участки и ограничить область влияния ураганных проб на конечные результаты.

Наиболее простой способ учёта ураганных проб и некорректных записей в базе данных состоит в визуальном просмотре полей таблиц и гистограмм опробования. Записи со значениями ниже и выше определенного порога исключаются или заменяются предельно допустимыми значениями. В одних случаях выдающееся содержание заменяют ближайшим по величине, в других – средним с учетом «ураганного», в третьих – средним без учета «ураганного» содержания, в четвертых – удвоенным средним и т. д. Если в массиве проб не выявлено наличие эффекта самородков, то наиболее целесообразным представляется замена исключительного значения ближайшим по величине содержанием, признанным рядовым.



Одним из распространённых способов обнаружения экстраординарных проб является способ классификации значений, который реализуется в компьютерных программах следующим образом:

- диапазон содержаний ценного компонента делится на 10 классов, пробы сортируются по содержанию ценного компонента, а в каждом классе концентраций подсчитывается число проб и доля компонента от общего числа;
- если последний класс, 90-100%, содержит более 40% проб, то его вновь разбивают на 10 классов содержаний для выявления ураганных записей;
- границей ураганных проб считается минимальное содержание первого класса, в котором содержится более 10% ценного компонента.

Приведенный анализ данных рекомендуется проводить отдельно для каждого рудного тела, типа руды или залежи. В практике известны случаи, когда граница ураганного класса резко отличалась для разных участков месторождения.

Ещё один способ учёта ураганных проб состоит в том, что строится кумулятивное распределение массива точек данных опробования и исследуется его хвостовая часть, близкая к 100%. Граница начала ураганных проб определяется по точке излома графика упорядоченных по возрастанию значений. После этого принимается решение об исключении хвостовой части кумулятивного распределения по достижении им значения 95 или 99%. Следует, однако, отметить, что вопрос о необходимости отбрасывания ураганных значений остается открытым.

В геостатистике ураганные значения могут быть частично учтены введением эффекта самородков при моделировании вариограмм. Существует точка зрения, приведенная в монографии [15], что правильно выполненная геостатистическая интерполяция по методу кригинга позволяет устранить отрицательное влияние некоторого количества ураганных проб, если их доля составляет порядка нескольких процентов. В целом автоматизированные алгоритмы компьютерной обработки ураганных проб с помощью анализа изменчивости геопоказателей и применения универсального кригинга позволяют повысить достоверность подсчёта геолого-промышленных запасов.

## Глава 3

# Моделирование месторождений

### 3.1. Особенности моделирования в недропользовании

Последовательность и детальность компьютерного моделирования эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых может существенно варьироваться в зависимости от генетического типа и морфологических особенностей рудных тел, полноты и достоверности геологоразведочных данных, проектных или производственных требований к точности оценки качества и количества запасов, а также сложившихся особенностей отработки на том или ином горном предприятии. Последовательность операций может быть представлена в виде схемы (рис. 3.1).

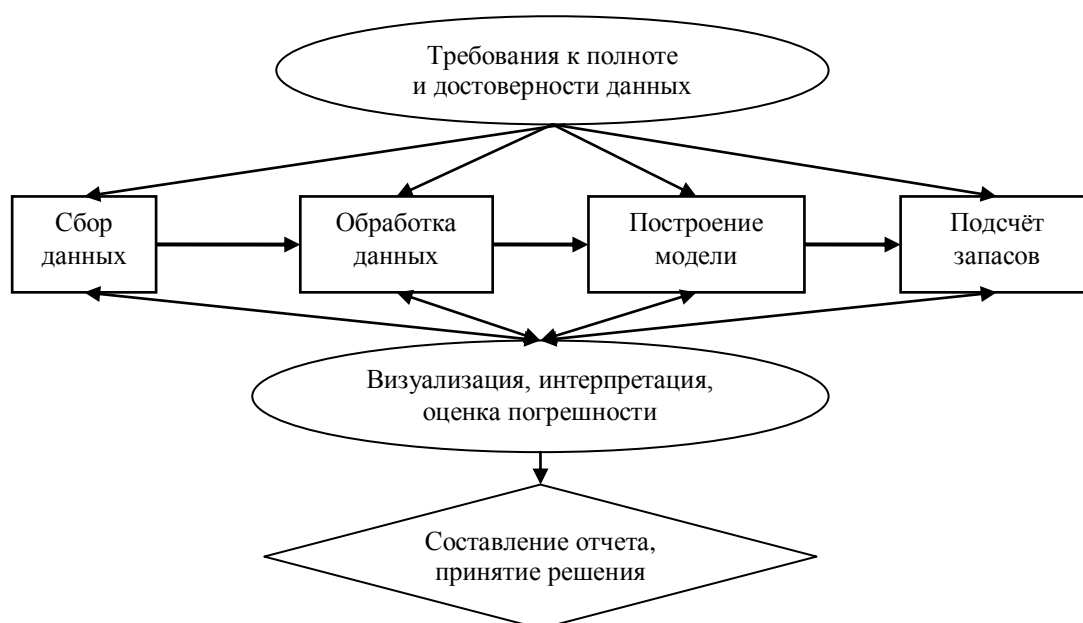


Рис. 3.1. Схема последовательности операций по оценке запасов

В соответствии с формализованной постановкой задач обработки данных (распознавание, классификация, моделирование, оценивание и прогнозирование) структура программного обеспечения для геолого-промышленной оценки месторождений включает [27]:

- методы статистического анализа геотехнологических показателей в недрах и рудопотоках;

- методы теории случайных функций, геостатистического анализа (методы взвешивания с учетом анизотропии) и оценки геотехнологических показателей в недрах (дискретный, случайный и универсальный кригинг);
- оптимальную статистическую экстраполяцию, экспоненциальное сглаживание, метод адаптивной авторегрессии, адаптивную селективную модель, адаптивную полиномиальную модель, адаптивный метод множественной регрессии, метод авторегрессии проинтегрированного скользящего среднего, прогноз по направлениям добычи и уровням рудоподготовки;
- передаточные функции и спектральный анализ взаимосвязанных динамических рядов (предупреждающий прогноз дестабилизации качества руд);
- метод главных компонент, факторный анализ, кластерный анализ, дискриминантный анализ, дисперсионный анализ (ситуационное моделирование, классификация объектов и ситуаций, выделение однородных геотехнологических зон, прогноз производственных ситуаций);
- методы стохастической геометрии и стереологической реконструкции пространственных объектов по их одномерным и двумерным сечениям;
- методы горно-геометрического моделирования размещения геотехнологических показателей и оконтуривание горно-геологических объектов.

При постановке и решении задач геологического обеспечения горного производства необходимо учитывать специфику сбора и обработки геолого-маркшейдерских данных. Основные из них:

- пробы или разведочные пересечения, характеризующие в пространственной привязке качественные и структурно-морфологические параметры месторождения, – носители первичной информации;
- различная сеть опробования (равномерная, неравномерная);
- сложность и многообразие форм визуализации как первичных, так и расчетных данных;
- необходимость преобразования структуры графических изображений (вычленение, схематизация, детализация, континуализация);
- выбор вариантов исходных данных для решения задачи («данные – интерпретация – геоинформационные объекты – параметры»).

Решение задачи динамического моделирования геотехнологических зон в общем случае должно представлять следующую последовательность операций:

- формирование исходного массива «объекты-параметры» из базы данных;
- визуализация и анализ данных «объекты-параметры»;
- коррекция данных;

- анализ качества данных и выбор информационного набора характеристик;

- анализ данных с целью выбора формальной постановки задачи (моделирование по совокупности параметров или описание объектов выбором интегральных характеристик);

- оценка сложности горно-геологических условий месторождения и изменчивости параметров (расчет статических и динамических характеристик);

- оценка контрастности руд;

- выделение однородных геотехнологических зон по интегральным параметрам путём построения изолиний размещения контрастности и визуализация зон;

- классификация объектов;

- графическое отображение объектов, принадлежащих к различным группам;

- оконтуривание статистически однородных участков с отрисовкой выделенных блоков, скважин, выбор масштаба и вида изображений;

- интерпретация результатов классификации (оценка качества разделения по различным статистическим критериям – обобщенная внутри-классовая дисперсия, многофакторный дисперсионный анализ);

- имитационное моделирование изменения залежи и горной выработки во времени по стадиям отработки запасов.

Вслед за принятием геологом решения о правильности и надежности выделения однородных геотехнологических зон возможен переход к оценке объемно-качественных характеристик выявленных горно-геологических объектов. Комплекс задач подсчета запасов реализуется с помощью последовательности процедур, образующих проблемно-ориентированные программные модули следующего состава:

- расчет координат точек скважин по данным инклинометрии;

- расчет координат характерных точек скважин (геологических границ, границ интервалов опробования);

- расчет координат скважин на горизонтальных сечениях;

- расчет координат характерных точек скважин в проекции на заданную плоскость;

- выделение интервалов типов и сортов руд по качественным признакам с учетом кондиций на мощность выделяемых интервалов;

- выделение рудных интервалов по количественным характеристикам с учетом кондиций на содержание и мощность;

- расчет среднего содержания компонентов в рудных интервалах;

- расчет линейных запасов компонентов в рудных пересечениях;

- расчет пространственных и качественных параметров разведочного сечения или профиля;

- подсчет запасов полезных ископаемых в геологических или эксплуатационных блоках;

- сводный подсчет запасов полезных ископаемых по типам и сортам руд, рудным телам и месторождению в целом.

Координирующим элементом структуры компьютерной технологии геолого-промышленного обеспечения управления качеством руд в системе «месторождение – малоотходная технология – техногенное месторождение», на основе которого реализуются указанные процедуры, является базовый комплекс задач компьютерного моделирования месторождения по данным детальной и эксплуатационной разведок, эксплуатационного и малообъемного технологического опробования. Сложность и специфичность структуры геотехнологической информации, условий ее получения, преобразования и использования предопределили необходимость создания соответствующего проблемно-ориентированного банка данных.

Целевое назначение системы геолого-промышленного обеспечения управления качеством руд определяет следующий примерный состав информационных моделей, на основе которых формируются технологические карты обработки геологических данных в интерактивном режиме:

- модели размещения геотехнологических показателей в массиве;
- модели динамических рядов геотехнологических показателей (оперативная информация по добыче, рудоподготовке и обогащению);
- модели изменчивости качества руд и их обогатимости по уровням формирования рудопотоков;
- модели ситуационного моделирования по участкам месторождения (геотехнологические, геоэкологические зоны, зоны контрастности и т. д.) и распознавания производственных ситуаций;
- модели прогнозирования геотехнологических показателей в заданных объемах, по направлениям ведения горных работ и уровням рудопотоков;
- модели состояния запасов;
- модели статистического регулирования и оперативного планирования качества руд.

Специализированная ориентация компьютерной технологии на горно-геологические проблемы на содержательном уровне определяет необходимость решения следующих иерархически взаимосвязанных методических задач:

- анализ содержательной постановки задачи, результатом чего является установление адекватности сформулированных целей и полученных выводов;
- формализация исходной информации задачи на основе диалога, уточняющего отдельные компоненты задачи;
- выбор и конструирование способа решения формальной задачи, результатом которой является компьютерная схема обработки данных;
- контроль процессов решения задачи на основе анализа и предварительной интерпретации промежуточных результатов с внесением при необходимости корректирующих воздействий на предыдущие этапы;

- интерпретация конечных результатов, позволяющая геологу убедиться в адекватности их содержательной трактовки.

Интегрированное горно-геологическое программное обеспечение помогает автоматизировать большинство рутинных операций по интерпретации и обобщению разнородной пространственной информации. При оценке запасов месторождений необходимо выполнить следующие важнейшие операции:

- формирование структуры базы данных;
- заполнение базы данных геолого-маркшейдерской информацией;
- обработка первичных данных и выполнение статистических расчётов;
- анализ изменчивости геологических показателей;
- прогнозирование показателей переработки по данным опробования;
- выделение технологических сортов и составление композитных проб;
- моделирование рудных тел и зон минерализации;
- подсчёт запасов полезного ископаемого и ценных компонентов;
- оценка погрешности подсчёта запасов;
- представление отчета.

Отмеченная общая последовательность операций должна обеспечивать достоверный подсчёт запасов как с учётом технических погрешностей получения исходных данных, так и по причине природной изменчивости геологических показателей в недрах.

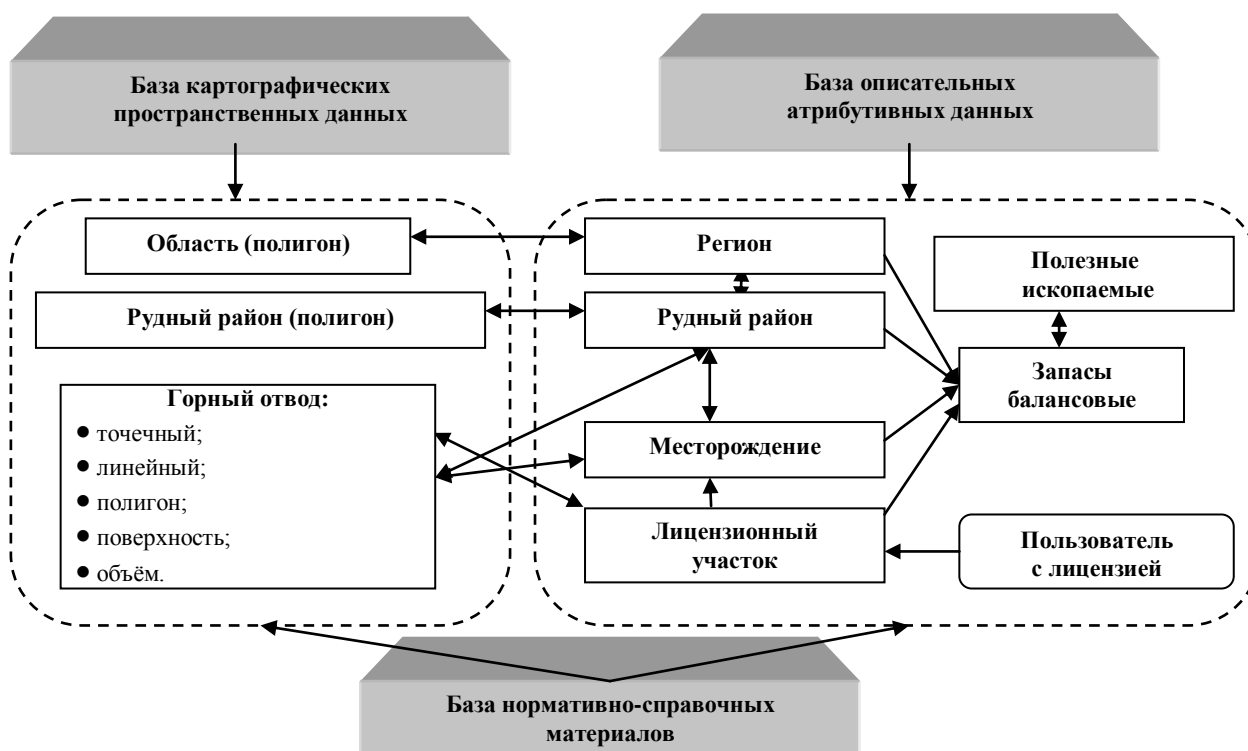


Рис. 3.2. Схема ведения кадастра недропользования

Таким образом, на основе полученного отчёта реализуется возможность принятия обоснованных решений по извлечению запасов с наибольшей экономической прибылью для горнодобывающего предприятия при минимальном экологическом ущербе.

### 3.2. Типы моделей пространственных данных

Для всестороннего решения широкого комплекса задач компьютерной геолого-промышленной оценки месторождений требуется достаточно разнородный набор форматов данных. Это обеспечивает возможность избирательного и адекватного представления линейных, плоских и объёмных горно-геологических объектов и имитации протекающих в них динамических процессов. Простые графические примитивы при этом объединяются в специализированные типы моделей данных.

Наиболее важные типы или наборы данных (datasets), применяемые для детального горно-геологического моделирования и подсчёта запасов месторождений полезных ископаемых, представлены в табл. 4.

Таблица 3.1

**Основные типы пространственных моделей данных в недропользовании**

Название	Описание	Использование
1	2	3
DHOLES	Протяженные скважинные или бороздовые пробы	Для статистического анализа проб, проверки достоверности данных опробования, расчета линейных запасов по разведочным выработкам, подготовки входных данных для дальнейшего моделирования рудных тел.
2D POINTS	Рассеянные точки данных по поверхности рельефа или границам раздела сред	Точки с координатами и высотной отметкой вычисляются при решении маркшейдерских задач (прямой и обратной засечек, тахеометрической съемки, нивелирного и теодолитного ходов). Применяются в дальнейшем для построения триангуляции Делоне, интерполяции на 2D регулярных решетках. По ним может вестись подсчёт запасов статистическим и среднеарифметическим методами.
3D POINTS	Рассеянные точки данных опробования в объёме залежи полезного ископаемого	Точки с координатами вычисляются по данным инклинометрии скважин, решения маркшейдерских задач. Применяются далее для оценки разведанности, интерполяции геопоказателей, построения зон близости в 3D. По ним может вестись подсчёт запасов статистическим и среднеарифметическим методами.
POLYGONS	Полигоны или многоугольники на плоскости	Геолого-структурные задачи, оценка протяженности границ и площадей оруденения. Оконтуривание рудных тел. Подсчет запасов методом разрезов
POLYLINES	Полилинии или ломанные на плоскости	Представление структурных линий, водоразделов, бровок уступов, дорог, съездов, трасс линий электропередач и коммуникаций. Определение кратчайших расстояний.

1	2	3
TIN	Сети триангуляции на поверхности	Подсчет объемов по поверхности. Подсчет запасов методом треугольных призм.
SOLIDS	Каркасные тела, описываемые полигонами в виде треугольников в объеме	Определение объемов и запасов горно-геологических объектов произвольной формы. Динамические операции с трехмерными объектами. Определение сложности и вскрываемости руд месторождения.
2D GRID	Решетки или матрицы прямоугольников моделей поверхностей	Подсчет объемов по регулярным ячейкам поверхности. Двумерные задачи математической физики. Подсчет запасов методом осаждения слитка или палетки Соболевского.
3D GRID	Решетки или матрицы параллелепипедов объемных блочных моделей	Горно-технологические и экологические задачи на регулярных решетках. Подсчет запасов методом блоков. Оптимизация границ отработки по прибыли.
2D MESH	Сети конечных элементов для описания поверхностей	Геотехнологические, геомеханические и гидро-геологические 2D задачи. Подсчет запасов методом треугольных призм.
3D MESH	Сети конечных элементов объемных тел	Геотехнологические, геомеханические и гидро-геологические 3D задачи. Подсчет запасов методом тетраэдров.

Деление типов моделей данных на 2D и 3D при моделировании обусловлено необходимостью решения двумерных или объемных математических задач. В действительности все приведенные в таблице модели при решении задач недропользования должны отражать объемные пространственные связи и иметь структуру как минимум с полями ID, X, Y, Z и G. В различных горно-геологических программах применяются от пяти до десяти типов моделей пространственных данных. Модели размещаются обычно в отдельных директориях или в таблицах с различной структурой полей, что позволяет упорядочить информацию и облегчить работу пользователя с большим разнообразием скважинных, контурных, блочных и сеточных данных. Для разных проектов в базе данных создаются хранилища текущей информации.

Модель данных скважин DHOLEs отображает результаты геологического изучения месторождения вдоль скважин, разведочных пересечений, отдельных точек анализа состава и результатов геофизического каротажа.

Данные разведки и эксплуатационного опробования формируются, как правило, с применением систем управления базами данных (СУБД) или вручную, или могут быть импортированы, например, из текстового файла. Современные интегрированные горно-геологические системы работают с различными типами данных скважин: файлов ВТТ (описывающих связи между файлами данных), файлов запросов, файлов NetScript-



программ, электронных таблиц, текстовых файлов и т.д. Это обусловлено тем, что на практике часто бывает необходимо скрыть от пользователя некоторые тонкости работы системы, например, задание имен файлов и связей между ними, а давать возможность описывать все привычным для него способом (длинные описания на русском языке). Современные СУБД после загрузки скважин в качестве модели данных позволяют представить их в 3D режиме в перспективной проекции с цветовой гаммой, цвета которой соответствуют различным зонам скважин, литологическим типам пород или концентрациям элементов, например, по интервалам опробования (рис. 3.3).

По скважинной модели современные полнофункциональные НГИС позволяют делать послойные выборки результатов анализов проб и определять изменение с глубиной содержания компонентов руд, распространённость

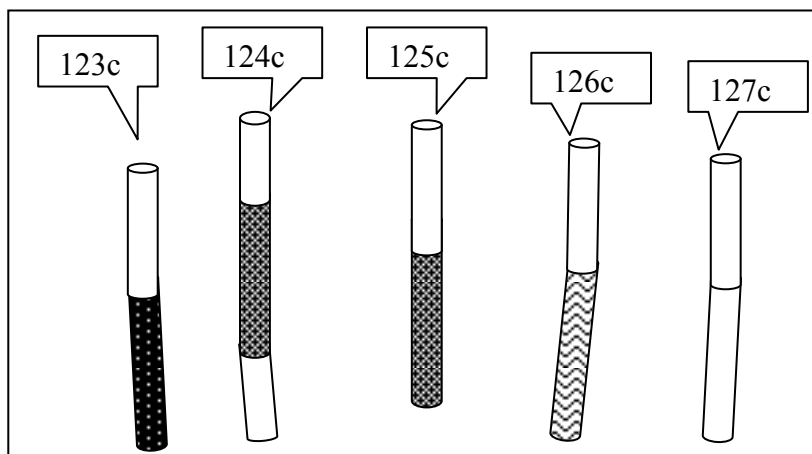


Рис. 3.3. Объемный вид скважин модели данных DHOLES

того или иного типа руды и т.д. Кроме того на основе этой модели строятся погоризонтные планы в изолиниях содержания компонентов руд.

В формате данных модели DHOLES могут храниться также любые линейные данные – результаты опробования, пространственные линеаменты региональных геологических структур, наборы данных высотных отметок для верхних или нижних бровок уступов карьеров (стринги), поинтервальное описание скважин и т.д.

Модель сеток триангуляции TIN (Triangulated Irregular Network) широко используется для описания рельефа и поверхностей границ раздела сред (например, поверхности уровня грунтовых вод или контактов пластов залежи). Триангуляционные модели формируются путем соединения ребрами множества рассеянных в пространстве точек для образования нерегулярной сети треугольников (рис. 3.4).

Предполагается, что в каждом треугольнике поверхность признака описывается плоскостью. Сети TIN могут использоваться для представления поверхности геологического блока или описания поверхности математической функции и могут отображаться в перспективных проекциях с удалением скрытых по-

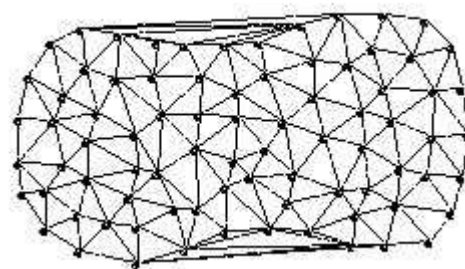


Рис. 3.4. Модель данных TIN

верхностей. Высотные отметки или другие значения, связанные с ячейками сеток триангуляции, показываются соответствующими маркерами, выделением ребер треугольников цветом или путём проведения изолиний. На базе сеток триангуляции могут создаваться твердотельные модели объектов массива горных пород.

В таблицах данных некоторых систем геологического моделирования можно хранить и отображать на экране сразу несколько сеток различных объектов. В этом случае для работы на экране с конкретной сеткой, описывающей моделируемую поверхность, она делается активной. Тогда интерактивные средства редактирования применяются только к активной сетке. При создании новой сетки или считывании данных с диска она также становится активной.

Триангуляционная сеть строится путем соединения отрезками-ребрами множества точек опробования, устьев скважин, пересечения разведочных пересечений с границами контактов пород, пикетов рельефа местности и т.д. Рассеянные точки обычно связываются ребрами так, чтобы сформировать сеть треугольников, удовлетворяющую критерию Делоне. Критерий Делоне гласит, что ни одна из вершин не должна лежать внутри

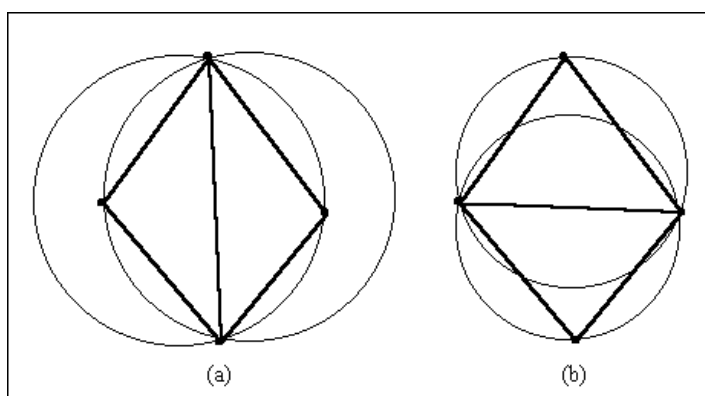


Рис. 3.5. Два смежных треугольника:  
а) нарушающий и б) удовлетворяющий критерию Делоне

какой-либо окружности, описанной вокруг любого из треугольников сети триангуляции (рис. 3.5).

В процессе триангуляции соседние треугольники проверяются на критерий Делоне. При необходимости осуществляется замена смежного ребра двух треугольников (диагональ четырехугольника, состоящего из двух треугольников, заменяется диагональю между другой парой вершин).

Процесс замены ребер составляет основу алгоритма триангуляции.

Когда некоторая новая точка добавляется в сетку триангуляции, то эта точка включается в список вершин, а ребра треугольников, смежных с новой вершиной, при необходимости меняются местами согласно критерию Делоне. Если критерий Делоне выполняется везде на сетке, то минимальный внутренний угол всех треугольников максимизируется. В результате длинные и тонкие треугольники преобразуются по возможности в равносторонние.

При триангуляции точек результирующая граница является выпуклой оболочкой вершин. Однако во многих случаях полезно расширить границы TIN за выпуклую оболочку. Например, TIN может использоваться для моделирования границ между стратиграфическими единицами. Такие сетки TIN можно использовать для создания моделей SOLID пластов гор-

ных пород. Входные данные, используемые для создания данного типа моделей, часто представлены скважинными данными интервального опробования. Результат триангуляции точек замеров пространственных показателей (координат устьев скважин, контактов пород в выработках, уровня грунтовых вод, опробования почвы, замера концентраций вредных компонентов и т.д.) с построением сетки TIN представлен на рис. 3.6, а. Внешние границы сетки TIN обычно являются не просто границами выпуклого многоугольника, а служат границами минерализации, контуром подсчёта запасов или земельного отвода. В различных программах имеются средства автоматического расширения сетки TIN в границах, задаваемых в виде полигона.

Если какой-либо «полигон экстраполяции» был введен пользователем до триангуляции точек данных, то внешние границы сетки TIN автоматически будут расширены до полигона, как показано на рис. 3.6, б. Лишняя вершина создается в каждой из вершин полигона и вершины располагаются вдоль ребер полигона, чтобы обеспечить условие, что ни одно из ребер треугольника не длиннее заданного пользователем максимума. Все новые вершины устанавливаются в состояние «доступные» и могут быть сразу же отредактированы пользователем.

Если вершины представить в виде ряда забитых молотком гвоздей в доске, то выпуклую оболочку данного ряда точек можно представить в виде оболочки, которая была бы сформирована резиновой лентой, опоясывающей внешнюю границу гвоздей.

Сети триангуляции, как правило, применяются для описания поверхностей. Причем в качестве моделируемой поверхности может выступать рельеф земной поверхности или распределение какого-то параметра по земной поверхности (например, содержание тяжелых металлов в почве, полезного компонента в рудном теле, загрязнение окружающей среды). Триангуляционные модели обеспечивают более высокую точность описания пространственных данных и меньшие затраты памяти по сравнению с растровыми и блочными моделями.

Исходными данными для построения триангуляционной модели поверхности служат высотные отметки, изолинии, а также другие структурные линии, изменяющие форму поверхности.

В основе триангуляционной модели данных лежит триангуляция – особая структура данных из вычислительной геометрии, определенная на

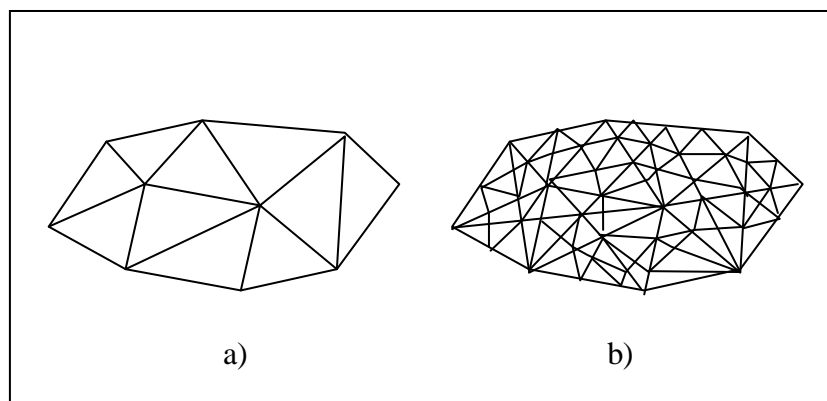


Рис. 3.6. Построение сеток TIN: а) триангуляция точек данных; б) триангуляция с экстраполяцией

плоскости. В самом общем понимании триангуляция – это планарный граф, построенный на множестве заданных узлов и разбивающий всю плоскость на треугольники и одну внешнюю бесконечную фигуру [21].

Триангуляция может быть различного вида. В триангуляционной модели данных обычно используется так называемая триангуляция Делоне с ограничениями (критерий Делоне).

Так как триангуляция определена на плоскости, то для моделирования поверхностей (в частности, рельефа) в каждом узле триангуляции дополнительно добавляется еще одна координата –  $z$  (высотная отметка). При этом каждый треугольник триангуляции становится пространственным, определяя некоторую плоскую часть моделируемой поверхности.

Такие триангуляционные модели поверхностей обычно относят к классу так называемых 2,5-мерных моделей, подчеркивая тем самым, что, несмотря на наличие координаты  $z$ , это не полноценная 3D модель, так как не любая поверхность может быть описана такой моделью.

Триангуляционная модель данных содержит три основных типа данных: узлы, ребра и треугольники. Узлы в триангуляции характеризуются координатами ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ), ребра в триангуляции являются отрезками, соединяющими два некоторых узла. Большинство ребер в триангуляции в явном виде не представляется, так как их всегда можно косвенно получить через треугольники. В явном виде представляются только особые ребра, для которых нужно хранить дополнительную информацию: например, признак структурированности линии или то, что поверхность не сохраняет гладкость вдоль этой линии.

В базе данных моделей TIN треугольники описываются ссылками на три образующих узла, а также ссылками на смежные треугольники и особые ребра. Ссылки на смежные треугольники и ребра нужны только для ускорения операций анализа поверхности, а для отображения на карте не нужны.

Модели типа SOLID обычно создаются на основе сеток TIN. Модель данных SOLID удобны для построения трехмерных стратиграфических моделей на основе описания границ сплошных тел множеством полигонов, как правило, треугольников. После создания такой модели через нее могут быть в любом месте проведены сечения, а удаление скрытых поверхностей и операции затенения используются для получения близкой к реальности картины. Сплошные тела SOLID применяются для предварительной структуризации изучаемого района и его визуализации. Модели данных типа SOLID используются также для автоматической генерации 3D сеток конечных элементов типа MESH 3D.

Прежде чем приступать к созданию моделей типа SOLID, необходимо построить ряд сеток TIN, описывающих, например, контакты между смежными слоями почвы или пластами различных типов горных пород.

Сетки TIN преобразуются во временные примитивы тел, которые представляют собой аппроксимацию пластов породы. Трансформация осуществляется путем проецирования внешней границы (периметра) каждой из сетки TIN вниз до горизонтальной плоскости. Это можно представить в виде процесса экструзии, когда некая двухмерная поверхность выдавливается путём прессования в виде трехмерного сплошного тела. Иллюстрация этой операции представлена на рис. 3.7.

Преобразование или конверсия нескольких сеток TIN в массив тел SOLID осуществляется с помощью экструзии TIN и последующих операций с множествами, проиллюстрированных для двухмерного случая на рис. 3.8. Двухмерное сечение трех сеток TIN, помеченных как а, б и с, показано в верхней части рисунка. Границы создаются по периметру сплошного тела, и одна большая граница создается в основании тела. Высотная отметка горизонтальной плоскости, сечение через которую на рисунке показано в виде прямой линии, выбирается так, чтобы основание результирующего тела оказалось ниже любой интересующей точки поверхности. Ряд двухмерных сечений сплошных тел А, В и С, сформированных экструзией сеток TIN, показан на рис. 3.8 под номером 2.

Заключительный этап процесса моделирования состоит в объединении отдельных сплошных тел для формирования моделей слоев почвы или пластов горных пород. Для этого используются операции с множествами. Этот шаг процесса моделирования иллюстрируется на рис. 3.8 под номером 3. Перекрывающиеся части твердых тел отбрасываются, и смежные тела помечаются точно по границам. Модель В вычитается из модели А, образуя временное тело А-В. Затем модель С вычитается из модели А-В, образуя тело А<sub>1</sub>. В свою очередь тело В<sub>1</sub> формируется вычитанием модели С из модели В. Модель С не пересекает другие модели тел и не нуждается в усечении. Разрез через завершенную твердотельную модель пластов породы показан в нижней части рис. 3.8.

В некоторых случаях комбинацию процессов экструзии и операций с множествами можно упростить. Например, можно создать тело А<sub>1</sub> непосредственно «заполнением» между сеткой TIN А и двумя сетками TIN В и С. В процессе этого объединения тело А<sub>1</sub> создается за одну операцию.

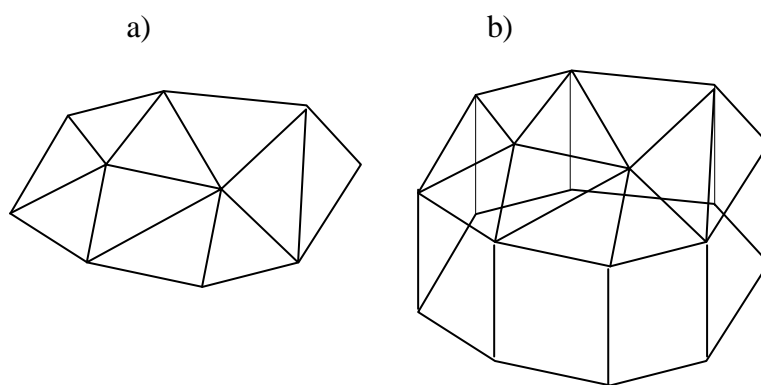


Рис. 3.7. Триангуляция: а) поверхности пласта; б) экструзия сетки TIN в тело пласта SOLID

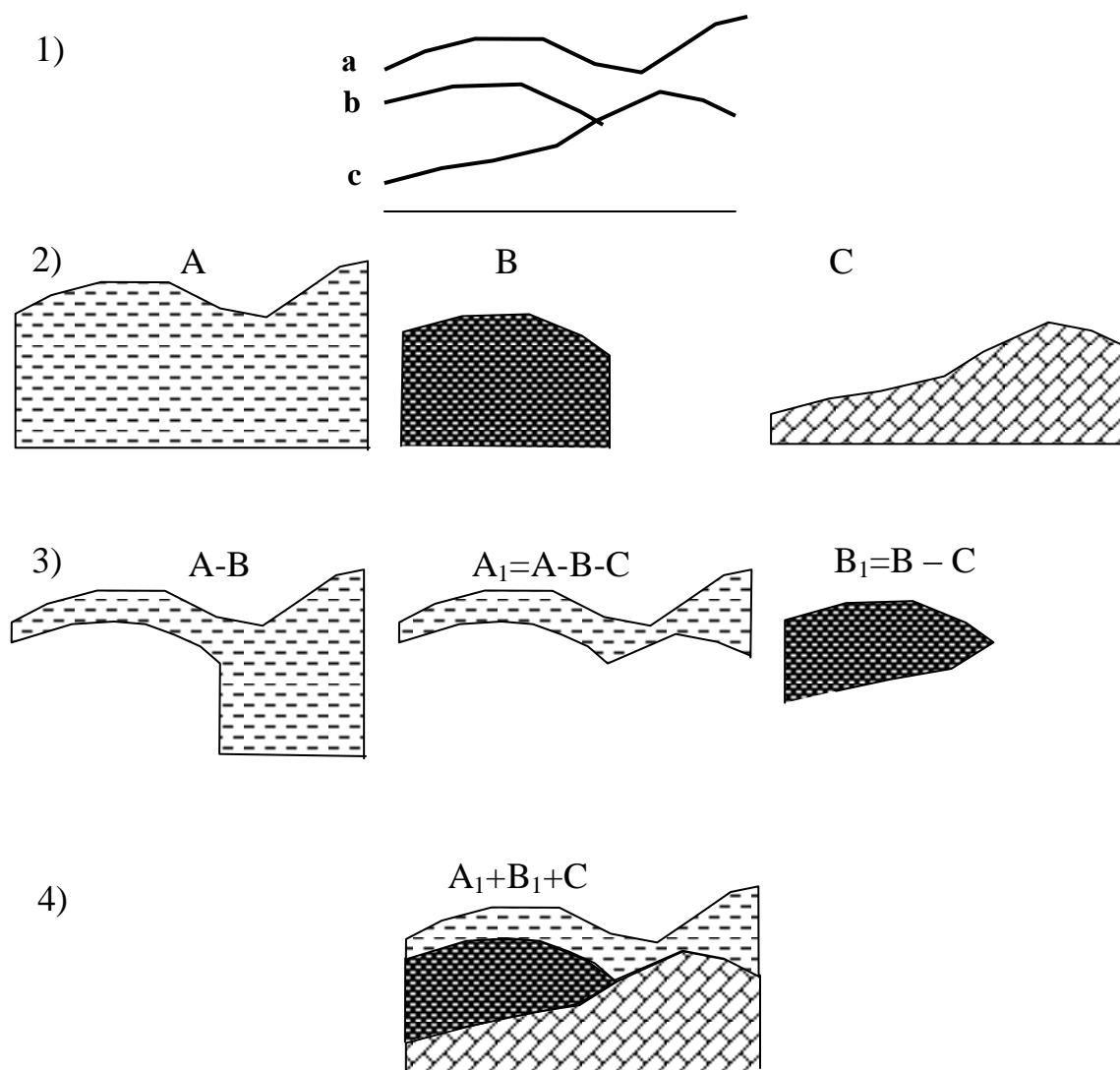


Рис. 3.8. Создание стратиграфической модели: 1) сечения сеток TIN; 2) экструзия TIN в SOLID; 3) выделение пластов в операциях с множествами; 4) конечная модель трех пластов осадочных горных пород

Комбинация операций экструзии (продолжения) модели TIN в модель SOLID и логических операций с двумя моделями представляет пользователю мощный и гибкий инструмент, позволяющий моделировать довольно сложные стратиграфические структуры, такие, как разломы, складки, линзы и зоны сжатия. После создания SOLID моделей легко определить объемы и массы тел. Кроме того, простые модели можно в дальнейшем комбинировать и модифицировать, наращивая их сложность.

Для построения трехмерных моделей земельного отвода горнодобывающего предприятия в базе данных необходимо иметь как поверхностные данные о рельефе, так и данные опробования по скважинам и выработкам.

Модели решеток GRID 2D и 3D (блочные модели) используются для интерполяции, построения блок-диаграмм, отображения изоповерхностей и сечений, расчетов по методу конечных элементов, для оперативного подсчета запасов и оптимизации этапов добычи.

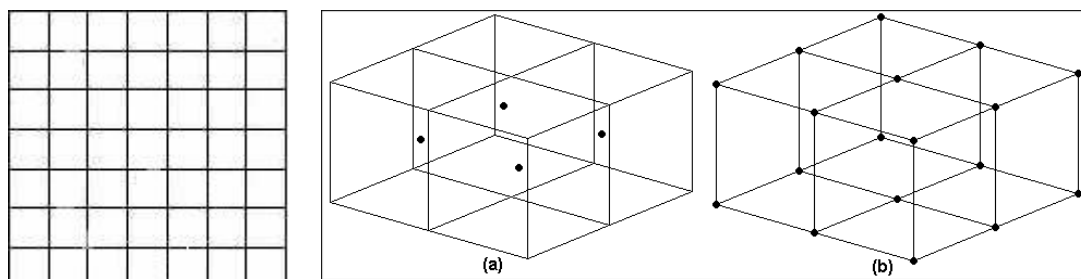


Рис. 3.9. Решетки 2D и 3D модели данных GRID

Сгенерированная по заданным параметрам решетка GRID предназначена, в первую очередь, для интерполяции значений модели рассеянных точек данных POINT в узлах решетки (рис. 3.9). В настоящее время разработано множество процедур интерполяции, и их правильный выбор зависит от подготовленности пользователя. По заполненной значениями решетке строятся изолинии, закрашенные полосы между изолиниями (изоленты) или изоповерхности для представления в объеме.

В компьютерных системах обычно поддерживаются два типа решеток 3D GRID: центровершинные GRID и центроблочные GRID (рис. 3.10). Когда вычисления выполняются на центровершинные GRID, вычисляемыми точками являются узлы решетки или углы ячеек решетки. В центроблочных GRID вычисления проводятся в центрах ячеек.

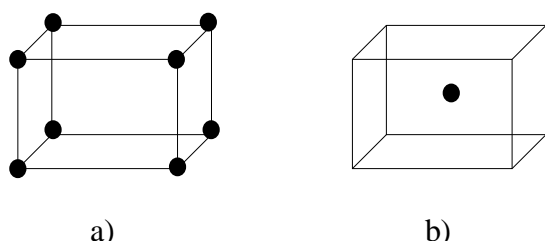


Рис. 3.10. Типы решеток 3D GRID:  
а) значения в вершинах;  
б) значения в центрах блоков

Когда массив данных импортируется в центроблочную GRID, имеется одно значение массива для каждого блока. Функции построения изолиний и цветовых полос используют скалярные значения в углах ячейки, поэтому при проведении изолиний значения центров ячеек интерполируют в углы ячеек. Внутренняя интерполяция применяется лишь для визуализации. Для центровершинных решеток GRID вычисления и визуализация выполняются для значений в углах ячеек и в пересчете значений внутри ячейки нет необходимости.

На завершающей стадии блочная модель может быть показана с отображением числовых значений геопоказателей в блоках (например, соответствующих определенному бортовому содержанию или сортам руд).

Модели сеток MESH 2D и 3D используются для представления геологических структур нерегулярными сетками элементов. В типе данных

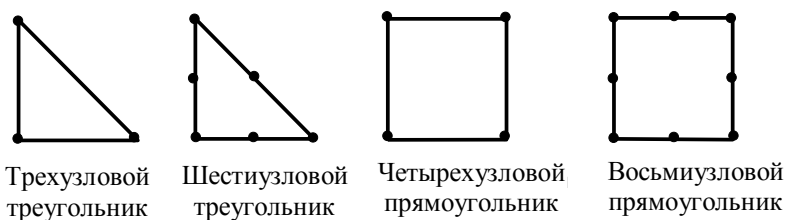


Рис. 3.11. Элементы модели 2D сеток MESH

MESH 2D обычно поддерживаются четыре типа конечных элементов (рис. 3.11).

Данные типы моделей, MESH 2D и 3D, создаются с помощью генераторов сеток или путём сгущения или разрежения сеток триангуляции (2D) и тетраэдрализации (3D) рассеянных точек данных.

Сетки MESH применяются для решения различных задач массопереноса, прогноза распространения минерализации, расширения экологически опасных зон загрязнения, фильтрации грунтовых вод и многих других динамических задач геологии широко используются конечно-разностные схемы вычислений и методы конечных элементов.

Сетки MESH 3D для решения объемных задач по методу конечных элементов поддерживают, как правило, четыре типа ячеек следующих форм: кубические, призматические, пирамидальные и в форме тетраэдров (рис. 3.12).

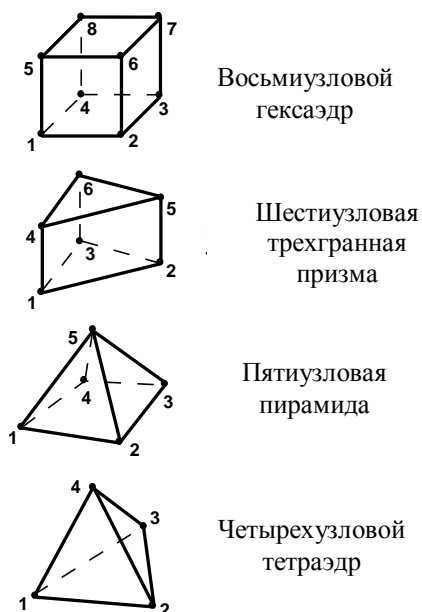


Рис. 3.12. Элементы 3D сеток MESH

### 3.3. Построение комплексных моделей

Представление геологического строения залежи с помощью сочетания множества геометрических фигур различной конфигурации позволяет достаточно точно охарактеризовать рудные тела и оценить их объемы и массу. Полезные ископаемые, залегающие в виде множеств рудных тел, ограниченных сложными геометрическими поверхностями вмещающих пород, описываются приближенно различными наборами более простых геометрических фигур – полигонами, сетями треугольников и многоугольников, тетраэдрами и полиэдрами, матрицами регулярных прямоугольных блоков.

Геостатистический подход к построению распределений показателей с возможностью оценивания дисперсии в блоках и определения ошибок подсчёта запасов также выполняется на сеточных или блочных моделях во многих программных продуктах.

Стохастическая имитация и стереология позволяют осуществить реконструкцию пространственного размещения множества рудных тел по результатам опробования вдоль профилей и разведочных пересечений. Для восстановления геологического строения между линиями или областями опробования (профили буровых скважин, бороздовое опробование горных выработок или обнажения) при этом используются транзитивные вероятности переходов между различными типами пород, минералогическими разновидностями и технологическими сортами руд.

По аналогии с векторным и растровым подходом к представлению данных цифровое моделирование месторождений подразделяется соответ-



ственно на два типа: *каркасное* и *блочное*. Если первый тип, иногда называемый геометрическим, выполняется без интерполирования, то второй основан главным образом на интерполировании геопоказателей в блоках. Блочная модель строится заполнением каркасов рудных тел или по результатам стохастической имитации кондиций.

При каркасном моделировании геологические объекты описываются набором векторных линий: контурами границ, многоугольниками или полигонами и для трёхмерного случая – многогранниками или полиэдрами. В любом случае все грани геологических объектов представляют собой не что иное, как полигон или контур. Проекции разломов в плоскости сечений, линии водоразделов или бровки уступов при этом представляются в виде незамкнутых ломаных или полилиний, в ряде горно-геологических пакетов называемых стрингами. При традиционных способах моделирования каркасное моделирование выполнялось без применения компьютеров, вручную, с помощью отрисовки контуров рудных тел и вмещающих пород на планах и разрезах. Подсчёты запасов такими методами как геологических блоков, разрезов, треугольников и ближайшего района основаны на предварительном полигональном или каркасном моделировании месторождения.

При блочном моделировании всё пространство месторождения разбивается решеткой на блоки и для каждого блока в узле решетки вычисляются значения геологических показателей путём интерполяции или имитации значений исходных точек опробования. При интерполяции используются различные процедуры дистанционного взвешивания и геостатистики, которые практически невыполнимы без применения компьютеров. Таким образом, подсчёт запасов ведётся по регулярным блокам модели, трёхмерному аналогу метода объёмной палетки Соболевского или осаждения слитка.

### **3.4. Формирование баз данных проб и моделей**

Компьютерное моделирование больших горно-геологических объектов и оценка запасов месторождений невозможны без формирования и постоянного обновления баз данных (БД). Объёмы БД для моделирования и оперативного подсчёта запасов обычно составляют десятки и сотни мегабайт, а для детально разведанных и эксплуатируемых месторождений с пополнением информации объём может составлять гигабайты. Поэтому выбор формата хранения БД, её структуры и установление связей между таблицами играют важную роль для обеспечения надежности и быстрого действия последующих вычислений. На рис. 3.13 представлена общая схема состава БД и операций по подсчёту запасов. Для формирования полной модели месторождения и последующей оценки запасов база данных должна содержать набор информации, представленный в электронном виде. Такой набор включает, в частности, следующую информацию:

- координаты устьев скважин;

- каталог маркшейдерских точек по трассам выработок;
- данные инклинометрии;
- данные опробования (скважин, бороздовых траншей, канав и т.д.);
- другие характеристики выработок (выход керна, каротаж, описание литологических интервалов и т.д.).

Как дополнение к первичной информации вводится обычно имеющаяся по месторождению после утверждения в ГКЗ картографическая информация:

- топография поверхности месторождения;
- геологические планы и разрезы с нанесением контуров рудных тел, зон, подсчетных блоков, литологических и стратиграфических границ, тектонических нарушений;
- планы подземных горизонтов с нанесением контуров выработок;
- план опробования поверхности по траншеям (бороздам).



Рис. 3.13. Общая схема состава геолого-маркшейдерской БД и операций моделирования месторождения и оценки запасов

Вся эта информация вводится из максимально достоверных источников. При этом ввод числовой и текстовой информации должен производиться в формате, соответствующем формату файлов той или иной геоинформационной системы, или вводиться, например, в формате xls с последующим импортом в «родной» формат программного обеспечения. Ввод же графической информации, как правило, осуществляется непосредственно в самой программе (векторизация сканированных изображений), хотя такая информация может быть также импортирована из других программ. Изображение должно быть в векторном виде.

В БД компьютерных систем геологического моделирования месторождений предусматриваются средства, позволяющие осуществлять:

- определение ошибок в записях при загрузке таблиц базы данных – контроль соответствия длины проб и разности интервалов опробования, проверка диапазонов изменения содержаний, поиск ураганных аномальных значений и пр.;
- анализ полноты исходного массива «объекты-параметры», в том числе выделение размытых объектов по характеристикам и по числу отсутствующих значений;
- выявление слабоизменяющихся параметров по числу градаций значений и изменению масштаба измерения параметров;
- построение гистограмм распределения значений показателей и расчет усредненных характеристик для заполнения пропусков в исходных данных;
- формирование таблиц «объекты-параметры» в заданных границах горно-геологических объектов;
- удаление дублирующих свойств, корреляционный анализ и определение представительности обработки исходных данных;
- выбор информационной совокупности параметров, транспонирование таблиц «объекты-параметры» и нормализация данных.

По результатам всех этапов анализа данных формируется схема их обработки на компьютере для решения конкретной функциональной задачи геологического обеспечения. В качестве обязательных в реляционных таблицах геологической базы данных в большинстве интегрированных систем используются следующие поля:

ID – идентификатор записи, ключевое поле для обеспечения связи с другими таблицами, ускорения поиска и расчёта;

DHOLE, BOREHOLE или DH – алфавитно-цифровой идентификатор разведочной выработки (скважины или борозды опробования);

SAMPLE – алфавитно-цифровой номер пробы;

FROM – начало интервала опробования;

TO – конец интервала опробования;

X (EAST) – координата X или направление на восток;

Y (NORTH) – координата Y или направление на север;

Z (ELEVATION) – координата Z или направление вверх по вертикали;

AZIMUTH – азимутальный (горизонтальный) угол, град;

DIP или SLOPE – вертикальный угол отклонения соответственно от вертикали или от горизонтали, град;

DENSITY – плотность пробы, г/см<sup>3</sup>;

MOISTURE – влажность пробы, %.

Прочие поля показателей, названий химических компонентов и типов горных пород и руд обычно могут быть выбраны пользователем при создании базы данных по своему усмотрению, однако в промышленных системах для наименований полей предпочитают, как правило, стандартные обозначения, взятые из соответствующих справочников элементов, минералов и горных пород.

Учитывая, что информация представлена большим массивом данных (особенно это касается данных опробования), могут появляться ошибки, связанные как с процессом ввода, так и с ошибками первичных материалов. На это необходимо обратить внимание и стараться их минимизировать проверкой данных.

Перечисленные выше модели данных тесно связаны с математическими моделями и являются их неотъемлемой частью. Математическая модель – это абстрактный аналог физической модели, в которой объекты заменены математическими понятиями – переменными, параметрами, константами. Математические модели можно разбить на три группы: детерминированные, вероятностные и динамические.

Детерминированной моделью называется такая модель, в которой отсутствует случайная компонента и каждому значению аргумента соответствует только одно значение зависимой переменной. К вероятностным моделям относятся модели законов распределения случайных величин. Динамические модели – изменяющиеся во времени, могут быть как детерминированными, так и вероятностными.

Применение современных компьютерных систем позволяет автоматизировать решение многих горно-геологических задач, таких, как: выявление статических закономерностей размещения и связей между показателями, моделирование рудных тел, подсчет запасов полезного ископаемого с разбивкой по сортам и категориям, учет добычи, потерь и разубоживания, планирование горных работ, построение горно-геометрических схем размещения различных показателей месторождения, определение складов и отвалов по данным маркшейдерской съемки и т.д. [3].

### **3.5. Анализ пространственной изменчивости**

Изменчивость пространственных геолого-экологических показателей существенно влияет на методику сбора первичной информации, густоту разведочной сети скважин опробования и технологию компьютерного моделирования месторождения и окружающей местности. Процедуры количественной оценки изменчивости можно разделить, как это отмечается в

[28], на 1) детерминированные, или аналитические, 2) вероятностные и 3) геостатистические.

Использование компьютерных технологий привело к подавляющему распространению наиболее устойчивых к нарушению исходных предпосылок, робастных и учитывающих пространственное размещение проб геостатистических методов анализа изменчивости. Среди геостатистических методов наибольшее распространение получили методы на основе расчета вариограмм изменчивости геопоказателей и транзитивно-вероятностные, использующие теорию Марковских цепей.

Вариограммы для оценки локальной или глобальной изменчивости геопоказателей на месторождении определяют в два этапа:

- 1) строится экспериментальная или эмпирическая вариограмма;
- 2) подбирается модель вариограммы, описывающая функционально-пространственную закономерность изменчивости изучаемого показателя.

Экспериментальная вариограмма находится вычислением дисперсии содержаний в каждой точке множества по отношению к каждой другой точке и отображается в виде графика зависимости дисперсии от расстояния между данными точками в заданном интервале величин – лаге. Затем модельную вариограмму обычно получают путём подгонки кривой с заданным законом распределения к экспериментальной по методу наименьших квадратов.

### 3.5.1. Расчет эмпирических вариограмм

При расчете эмпирической вариограммы расстояния между всеми парами рассеянных точек подразделяются на некоторое число интервалов, или лагов, как это показано на рис. 3.14. Дисперсии всех пар точек, чьи расстояния друг от друга попадают в один и тот же лаг, усредняются. Результаты усреднения выводятся в виде графика зависимости эмпирической вариограммы от увеличения расстояния, соответствующего большему или меньшему лагу. Это приводит к тому, что для каждого лага отображается лишь одна точка эмпирической вариограммы.

Схема расчёта эмпирической вариограммы для двухмерного случая представлена на рис. 3.14.

В программном обеспечении при вводе полного числа лагов и размера единичного лага одновременно указывается и

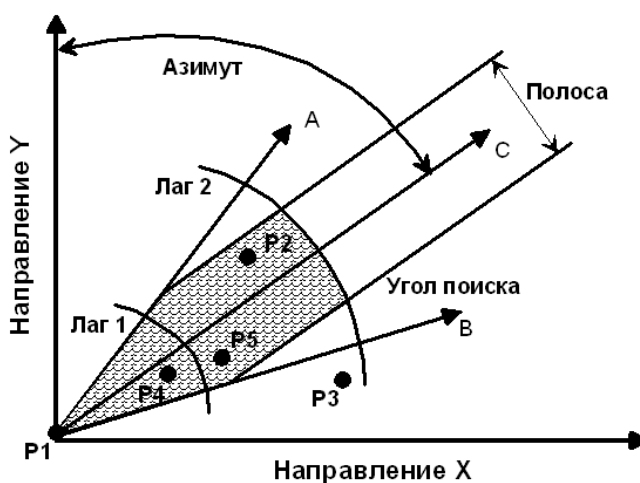


Рис. 3.14. Схема расчета эмпирической вариограммы

допуск лага. Обычно величина допуска соответствует половине размера единичного лага.

Вычисляемые по исходным рассеянным точкам данных статистические функции называются *эмпирическими вариограммами*. При анализе первичных данных в геостатистике используются следующие виды вариограмм.

1. Вариограмма. Эта функция используется в качестве наиболее общепринятого представления изменчивости данных и на самом деле является полувариограммой. Значение вариограммы  $\gamma(h)$  по геопоказателю  $g$  в зависимости от величины некоторого лага  $h$  вычисляется так:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (g_{1i} - g_{2i})^2 \quad (3.1)$$

где  $N$  – число пар точек, чьи совместные расстояния попадают в заданный интервал лага  $h$ , а  $g_{1i}$  и  $g_{2i}$  – значения в начале и конце каждой пары точек

2. Ковариация. Ковариация представляет собой обычно используемую в традиционной статистике функцию. Значение ковариации для лага  $h$  вычисляется как

$$C(h) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (g_{2i} g_{1i} - \bar{g}_{-h} \bar{g}_{+h}) \quad (3.2)$$

где  $\bar{g}_{-h}$  и  $\bar{g}_{+h}$  – средние значения начала и конца лага соответственно.

3. Коррелограмма. Функция вычисляется по стандартной ковариации для значений стандартного отклонения показателя в начальных и конечных точках:

$$\rho(h) = \frac{C(h)}{\sigma_{-h} \sigma_{+h}} \quad (3.3)$$

где  $\sigma_{-h}$  и  $\sigma_{+h}$  есть стандартные отклонения начальных и конечных значений соответственно.

4. Общая относительная вариограмма. Данная вариограмма вычисляется по стандартной вариограмме делением на квадраты средних значений в каждом интервале:

$$\gamma_{GR}(h) = \frac{\gamma(h)}{\left(\frac{m_{-h} + m_{+h}}{2}\right)^2} \quad (3.4)$$

5. Парная относительная вариограмма. В этой формуле каждая пара точек нормализуется делением на квадраты средних значений между начальным и конечным значениями.

$$\gamma_{PAR}(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \frac{(g_{1i} + g_{2i})^2}{\left(\frac{(g_{1i} + g_{2i})^2}{2}\right)^2} \quad (3.5)$$

Опыт показал, что генеральная относительная и парная относительная вариограммы эффективны при обнаружении пространственных структур и анизотропии при разреженном облаке рассеянных точек [15]. Эти вариограммы можно использовать только при положительных отклонениях данных.

6. Логарифмическая вариограмма. Эта вариограмма вычисляется по следующему уравнению в натуральных логарифмах значений данных:

$$\gamma_L(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\ln(g_{1i}) - \ln(g_{2i}))^2 \quad (3.6)$$

7. Родограмма. Данная функция похожа на традиционную вариограмму за исключением того, что в расчетах используется корень квадратный из абсолютной разности, а не квадрат разности:

$$\gamma_R(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \sqrt{|g_{1i} - g_{2i}|} \quad (3.7)$$

8. Мадограмма. Функция аналогична традиционной вариограмме за исключением того, что используется не квадрат разности, а абсолютная разность значений признака в парных точках:

$$\gamma_M(h) = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N |g_{1i} - g_{2i}| \quad (3.8)$$

Родограмма и мадограмма особенно эффективны для установления ранга и анизотропии, однако их нельзя применять для моделирования эффекта самородков в вариограммах.

Для большого количества точек вычисление вариограммы может занять много времени. После завершения расчета эмпирической вариограммы выполняют её аппроксимацию модельной функцией.

### 3.5.2. Моделирование вариограмм

Модельные вариограммы создаются на основе рассчитанных эмпирических вариограмм. Обычно поддерживаются четыре типа модельных функций. Каждая из функций характеризуется эффектом самородка, контрибуцией и рангом (Рис. 3.15).

*Эффект самородка* отражает некоторую минимальную дисперсию. *Контрибуция*, иногда называемая *силл* (sill), представляет собой среднюю дисперсию точек на таком расстоянии от рассматриваемой точки, где уже отсутствует корреляция между точками. Аналогично *ранг* представляет собой расстояние, на котором уже нет корреляции между точками.

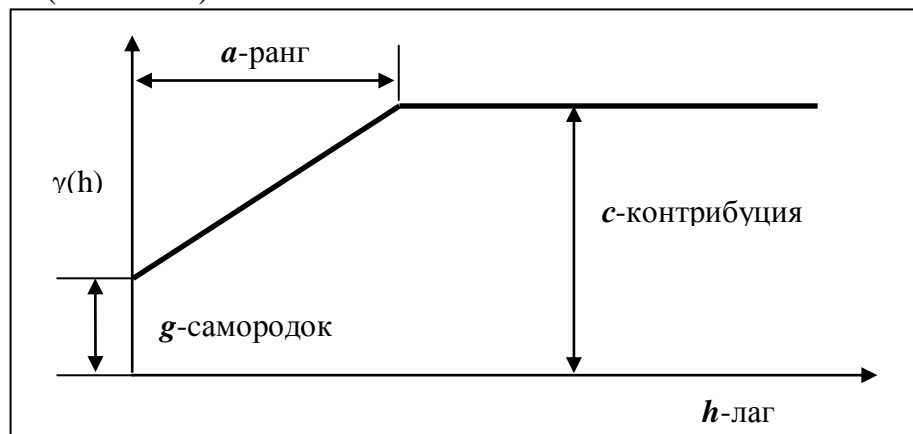


Рис. 3.15. Параметры задания модельной вариограммы

После расчета эмпирической вариограммы выбирается тип модели и строится модель вариограммы для описания исходных данных. Этот процесс не полностью автоматизирован и часто требует некоторых суждений со стороны пользователя. Модельная вариограмма является некоторой математической функцией, моделирующей тренд в эмпирической вариограмме (рис. 3.16).

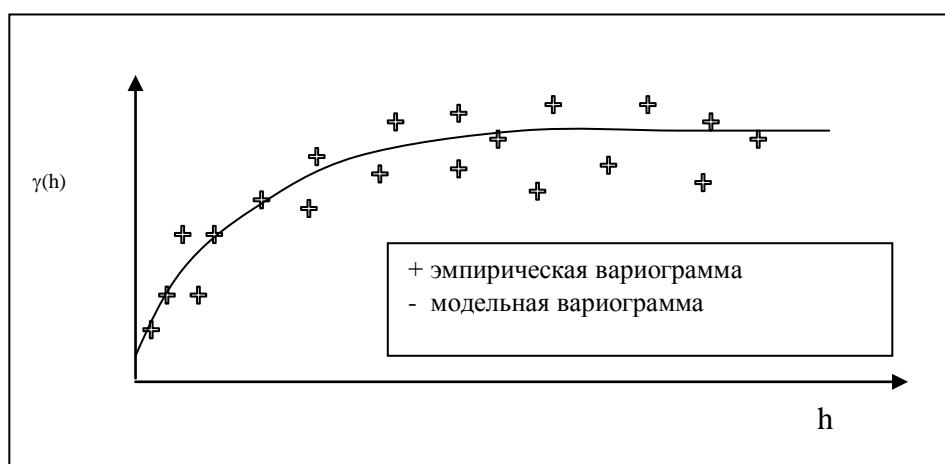


Рис. 3.16. Построение модели вариограммы

Как видно из рисунка, форма вариограммы показывает, что на больших расстояниях дисперсия в  $\gamma(h)$  мала. Другими словами, точки, которые ближе друг к другу, имеют схожие значения  $\gamma(h)$ . После некоторого



уровня разделения дисперсия значений становится несколько больше и модельная вариограмма выходит на асимптоту к значениям, соответствующим средней дисперсии.

Аппроксимация экспериментальных вариограмм модельными функциями обычно выполняется по методу наименьших квадратов. В качестве основных параметров используются лаг  $h$ , ранг  $a$  и контрибуция  $c$ . Чаще всего используются следующие модельные функции:

1. Сферическая:

$$\gamma(h) = c \left[ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], \text{ если } \frac{h}{a} \leq a$$

$$\gamma(h) = c, \text{ если } \frac{h}{a} > a$$
(3.9)

2. Экспоненциальная:

$$\gamma(h) = c \left[ 1 - \exp \left( - \frac{3h}{a} \right) \right]$$
(3.10)

3. Гауссова:

$$\gamma(h) = c \left[ 1 - \exp \left( - \frac{3h^2}{a^2} \right) \right]$$
(3.11)

4. Степенная:

$$\gamma(h) = ch^a$$
(3.12)

где ранг изменяется в диапазоне  $0 < a < 2$

После нахождения модельной вариограммы, наилучшим образом соответствующей исходной экспериментальной вариограмме, она обычно служит наглядной иллюстрацией изменчивости геологических признаков и для вычисления весовых коэффициентов интерполяции в процедуре кригинга.

### 3.6. Прогнозирование качества минерального сырья

Задача прогнозирования при промышленной оценке месторождений полезных ископаемых преследует цель выявления детальной структуры рудоносной залежи как статического объекта недр с кондиционными запасами и определение планируемого при добыче и переработке количества и качества рудной массы в результате динамического формирования рудопотоков [29].

Прогноз, полученный на основе количественных методов, только тогда можно считать достоверным, если он подтверждается вскрытыми качественными генетическими закономерностями. Иными словами, количественный прогноз должен получить качественную геологическую интерпретацию, не противоречащую общим генетическим концепциям о месторождении. Вместе с тем количественный прогноз может стать основой для новых качественных геологических построений. Поэтому единство качест-

венных и количественных сторон размещения показателя при его прогнозировании имеет решающее значение.

Количественные методы прогнозирования основаны на математическом моделировании геологических структур (блочно-каркасном, стохастическом, регрессионном, горно-геометрическом и т.д.) и выявлении функциональных закономерностей размещения прогнозируемых показателей и вмещающей толщи пород. С точки зрения теории случайных функций прогнозирование представляет собой задачу оценки среднего значения случайной функции в пределах некоторой области в пространстве или во времени с помощью математических методов аппроксимации, интерполяции и экстраполяции.

Среди методов прогнозирования можно выделить следующие [1]:

- интерполяционные и экстраполяционные;
- статистические и стохастические;
- эвристические (интуитивные) и экспертные (аналитические).

По видам прогнозы разделяют на поисковые, нормативные, интервальные, точечные. По временным срокам – на оперативные (оперативно-календарное планирование) до 1 месяца; текущие (краткосрочное планирование) – от 1 месяца до 1 года; перспективные (среднесрочное планирование) – от 1 года до 5 лет; долгосрочные (долгосрочное планирование) – от 5 до 15 лет и дальнесрочные – свыше 15 лет.

Точность прогноза – оценка доверительного интервала прогноза для заданной вероятности его осуществления. Достоверность прогноза – оценка вероятности осуществления прогноза для заданного доверительного интервала. Ошибка прогноза – величина отклонения прогноза от действительного состояния объекта.

Для прогнозирования размещения показателя характерны два типа прогноза: интерполяционный и экстраполяционный.

*Интерполяционный прогноз* осуществляется в пространстве залежи между точками определения показателя и опирается на эти точки. Исходной при интерполяционном прогнозе является гипотеза о непрерывном (по П. К. Соболевскому) и однородном размещении прогнозируемого показателя между точками его опробования. Надежность интерполяционного прогноза определяется только техническими ошибками и ошибками интерполирования, законы накопления которых изучены гораздо полнее. Поэтому методы оценки точности интерполяционного прогноза лучше разработаны, чем для экстраполяционного прогнозирования.

*Экстраполяционный прогноз* используется для описания закономерностей размещения показателя за границами разведанной площади. Этот тип прогноза основывается на гипотезе о сохранении вскрытой на разведанном участке залежи закономерности размещения показателя в прилегающей к этому участку области экстраполяционного прогноза.

Экстраполяционный прогноз имеет следующие источники ошибок: технические ошибки измерения показателя; ошибки в зоне интерполяции, прилегающей к прогнозируемой области экстраполяции; нарушение однородности размещения геопоказателя в области экстраполяции по сравнению с прилегающим к ней полностью разведанным или эксплуатируемым участком. Наиболее опасен третий источник, влияние которого трудно-предсказуемо и пока имеет слабое теоретическое обоснование.

В теории прогнозирования по промежутку времени, на который рассчитан прогноз, различают оперативные, кратко-, средне-, долго- и дальнесрочные (сверхдолгосрочные) прогнозы.

1. Оперативные и краткосрочные прогнозы размещения показателей качества и количества запасов, построенные по наиболее полным данным эксплуатационной и детальной разведки, необходимы для составления месячных, квартальных и годовых текущих планов развития горных работ.

2. Среднесрочный прогноз выполняется по горно-геометрическим планам размещения показателей, построенным по данным детальной разведки для перспективного пятилетнего планирования развития горных работ.

3. Долгосрочный и дальнесрочный прогнозы размещения показателей необходимы для составления генерального плана развития горных работ предприятия на весь срок его существования, порой исчисляемый десятками лет. Это позволяет для долгосрочного прогноза использовать мелкомасштабные горно-геометрические планы и карты, выявляющие наиболее общие тенденции в размещении показателей и контуров оруденения.

Эффективность прогнозирования качественных характеристик, т.е. точность полученных оценок, зависит от вида модели изменчивости руды в массиве, неоднородности горных пород, количества информации, размеров и пространственного соотношения оцениваемых блоков и разведочной сети. Повышения эффективности прогнозирования добиваются путём использования комплекса различных методов. Мерой достоверности прогнозов служит отношение числа прогнозов, подтвержденных фактическими результатами, к общему числу прогнозов.

### **3.6.1. Показатели качества минерального сырья**

Обеспечение высокого качества продукции – одна из важнейших задач горно-обогачительного производства. Одним из направлений науки о качестве продукции является квалиметрия (от *qualitas* – качество). Методы квалиметрии основаны на учете не только ценностно-качественных параметров, но и количественных, что позволяет находить обоснованные решения важнейших задач горного производства.

Основной показатель качества рудных и нерудных полезных ископаемых, металлических, химических и агрономических руд – их веществ-

венный состав, который характеризуется в первую очередь содержанием полезных компонентов и вредных примесей. Содержание полезных элементов или полезных минералов определяется в расчете на массу воздушно-сухой руды; выбор единиц измерения зависит от вещественного состава, условий технологической переработки и дальнейшего использования. Требования к качеству полезного ископаемого обычно выражаются техническими условиями, нормами и стандартами предприятия.

В процессе управления качеством руд должны быть обеспечены все необходимые требования к минимизации негативных экологических последствий горного производства на стадиях добычи, рудоподготовки и обогащения [30]. Нормативной документацией, регламентирующей отработку запасов месторождений в соответствии с требованиями Ростехнадзора, служат «Правила охраны недр».

Основные природные факторы, влияющие на качество добытого минерального сырья:

- природное качество, определяемое содержанием полезных и вредных компонентов в единице объема рудного тела;
- степень изменчивости показателей в объеме карьерного поля; форма рудных тел, элементы их залегания;
- разнообразие типов и количество сортов руд, для которых требуется раздельная добыча.

Количественный состав полезных и вредных компонентов в единице рудного массива определяет главную качественную характеристику ископаемого, возможность промышленного использования и степень его полезности с учетом издержек добывающего и перерабатывающего комплексов. На месторождениях некоторых видов полезных ископаемых (уголь, стройматериалы, бокситы, апатиты и т.д.) качественные характеристики ископаемого изменяются в геологических контурах или в крупных блоках незначительно, в результате чего возможна добыча минерального сырья, достаточно однородного по составу. В большинстве же случаев показатели качества полезного ископаемого в недрах варьируются в значительных пределах по всему объему залежи. Причем характер этой изменчивости часто настолько сложен, что невозможно описать его в виде непрерывной математической функции.

Требования промышленности к содержанию основных ценных компонентов зависят от вещественного состава руд, запасов месторождений, уровня техники и технологии добычи и переработки полезных ископаемых. Например, как отмечается в [12] мелкие (преимущественно медно-рудные) месторождения, разрабатываемые подземным способом, имеют минимальное содержание меди – 2-3 %, крупные – 1 %. Минимальное содержание меди в рудах при открытой добыче составляет 0,5 %. Низкими технико-экономическими показателями переработки силикатных руд объясняются повышенные требования к содержанию в них никеля и кобальта (соответственно 0,6 и 0,037 %) по сравнению с сульфидными рудами (0,3 и

0,015 %). Для железных руд и концентратов минимальное содержание металла зависит от технологических свойств руды и колеблется в широких пределах: от 16 % для легкообогатимых сидеритовых руд до 50-65% – для концентратов и руд, направляемых в плавку без обогащения.

Уровень требований определяется также назначением продукции. Например, для производства ферросплавов используют хромитовые руды с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  не менее 40 % и отношением  $\text{Cr}_2\text{O}_3 : \text{Fe}_2\text{O}_3$  не менее 2,5-3, а для производства огнеупоров – с содержаниями железа не менее 35 % и  $\text{SiO}_2$  не более 8 %. С развитием техники и технологии переработки полезных ископаемых требования к качеству снижаются.

Вредные примеси в рудах оказывают существенное влияние на оценку качества руды. Они усложняют процесс ее переработки, удорожают стоимость конечного продукта, ухудшают его качество. Для железных руд вредными примесями являются сера, фосфор, мышьяк, а также олово, цинк, свинец, медь, для руд марганца – фосфор, для бокситов – кремнезем, сера, ванадий, хром, кальций, медь, органические вещества, для золотых руд – мышьяк, силикатных, никелевых – медь, для фосфоритов – магний, для серных руд – углерод, битумы, мышьяк и селен и т.д.

В большинстве случаев руда кроме главных содержит попутные компоненты. При очень небольших содержаниях специальная добыча последних была бы неэкономична, но при попутном извлечении они представляют собой значительную ценность и могут быть важной сырьевой базой ряда редких и рассеянных элементов. Например, такие попутные компоненты, как платиноиды в медно-никелевых рудах, кобальт магнетитовых месторождений, серебро, золото, кадмий, теллур и селен в медно-полиметаллических рудах, часто значительно повышают ценность месторождений, а запасы этих элементов могут быть даже выше, чем на крупных самостоятельных месторождениях.

По приведенным в работе [12] данным, доля сопутствующих ценных компонентов в суммарной стоимости сырья в отдельных типах руд в среднем составляет в %: свинцово-цинковых – 38; медных – 44; медно-цинковых – 50; медно-молибденовых – 45; силикатных никелевых – 24; сульфидных, медно-никелевых – 34. Наличие в рудах ценных сопутствующих компонентов снижает требования промышленности к содержанию основных металлов. Так, в комплексных меднорудных месторождениях минимальное содержание меди может быть снижено до 0,3 %. Минимальное содержание сурьмы в собственных месторождениях составляет 1,2 %, а в комплексных – 0,5 %. Такие же показатели для ртутных месторождений будут соответственно равны 1,5 и 0,1 %.

По содержанию полезного компонента с учетом требований промышленности и существующих схем их переработки выделяются богатые, рядовые и бедные руды. Богатые руды обычно хорошо перерабатываются и требуют меньшего количества обогатительных операций по сравнению с рядовыми и бедными: эти руды могут направляться непосредственно в металлургический передел, минуя стадию обогащения.

В монографии [2] подчеркивается, что качество, точнее – совокупность определяющих его свойств, зависит от условий промышленного использования минерального сырья и технологии его переработки. Из многочисленных показателей качества полезных ископаемых к ведущим относятся показатели назначения, технологичности и сохраняемости. В зависимости от вида минерального сырья к показателям назначения принадлежат параметры, отражающие состав и определяющие свойства полезных ископаемых. Показатели технологичности – это свойства, обуславливающие эффективность разработки, обогащения или металлургического передела (крепость, абразивность, флотуемость, растворимость и т. д.). Такие свойства, как слеживаемость, окисляемость, самовозгораемость и другие, влияют на показатели сохраняемости полезных ископаемых при складировании и транспортировании.

Показатели качества минерального сырья, в частности его дробимость, измельчаемость и обогатимость, влияют на качество конечной продукции и технико-экономические показатели перерабатывающих производств. При этом важен не только уровень качественных характеристик, но и стабильность этого уровня во времени. При колебаниях качества добытых полезных ископаемых нарушается оптимальный режим их переработки, ухудшаются технико-экономические показатели обогащения и металлургического передела, снижаются извлечение полезных компонентов, выход концентрата, увеличиваются потери в хвостах обогащения.

### **3.6.2. Прогноз технологических свойств руд**

Ожидаемые технологические свойства и показатели обогащения (выход и качество концентрата, извлечение ценного компонента в концентрат) можно спрогнозировать по уравнениям регрессии на основе статистического подхода или путём моделирования закономерностей раскрытия минералов в процессах рудоподготовки.

#### Статистический подход

Основой статистического анализа является изучение функций распределения вероятностей качества руд и выявление статистических характеристик этих распределений.

Вид функций распределения качественных показателей руд может дать информацию о физической сущности явлений и процессов – как природных, так и технологических. Изучение функций распределения и их статистических параметров может иногда дать информацию об изменении уровня и стабильности качества руд в процессе создания товарной продукции горного предприятия.

В работах по управлению качеством продукции горнодобывающей промышленности к контролю качества относят всю систему получения информации о качественном состоянии рудного сырья. В нее включают процессы отбора проб, последующей их обработки и анализа, а также проверки показателей качества продукции.

Для прогнозирования обогатимости руды при установившемся режиме работы оборудования на практике широко используются статистические зависимости и уравнения регрессии. В первом приближении часто ограничиваются простой линейной зависимостью. Более точные результаты могут быть получены при установлении уравнений множественной регрессии с несколькими влияющими переменными вида

$$Z = aX + bY + c, \quad (3.13)$$

где  $Z$  – выход или качество концентрата;  $X$ ,  $Y$  – значения наиболее влияющих показателей в исходных образцах;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты, полученные на основе статистической обработки представительной выборки проб.

Коэффициенты уравнений находят по результатам статистического анализа данных опробования и фактически достигнутых показателей обогащения малообъемных проб для заданных технологических режимов.

Для готовой блочной модели месторождения можно использовать регрессионный способ вычисления технологических показателей переработки в каждой ячейке в соответствии с установленными регрессионными уравнениями. На практике коэффициенты уравнений регрессии необходимо постоянно перепроверять, используя результаты лабораторных испытаний проб руды на обогатимость. Недостатки статистического подхода:

- произвольное сочетание руд с различными структурно-текстурными характеристиками приводит к значительным отклонениям от ранее установленных регрессионных зависимостей;
- изменение топологии схем переработки, рабочих режимов измельчительного и обогатительного оборудования резко ухудшает достоверность прогнозов и требует установления новых регрессионных зависимостей;
- прогноз показателей (выхода, качества и извлечения) осуществляется лишь на основе обработки статистических данных последствия и контроля продуктов переработки, а не на основе знания истинных физических закономерностей разрушения руды, динамики и кинетики извлечения полезных компонентов в концентрат.

Задача управления качеством – сформировать рудопотоки при выемке таким образом, чтобы стабилизировать качество сырья и, в идеальном варианте, ликвидировать расхождения между прогнозом и фактическими показателями переработки. Описание изменчивости качества рудопотоков с помощью моделей динамических рядов и прогнозирование на их основе объемно-качественных показателей позволяют построить вероятностные динамические системы регулирования качества руд. При компьютерном регулировании качества с помощью АСУ показатели рудной массы автоматически поддерживаются на заданном техническими условиями уровне и тем самым достигается стабильность состава сырья [31].

#### Моделирование раскрытия минералов

Для более достоверного прогнозирования технологических показателей переработки руды используются методы моделирования раскрытия

минеральных фаз при измельчении горной массы до заданной крупности частиц. Среди большого числа предложенных методов моделирования раскрытия минералов, учитывающих реальные физические процессы дробления и измельчения руды как системы множества частиц, является *метод стохастической фрагментации*. При этом для построения трехмерной структуры массива и определения результатов её взаимодействия с сеткой разрушения используются принципы стохастической геометрии и стереологии.

Метод фрагментации заключается в моделировании минеральной структуры исходной монолитной руды и наложения на неё сетки разрушения, соответствующей заданной технологии рудоподготовки к обогащению. Имитация случайного или селективного раскрытия полезной фазы осуществляется за счёт применения стохастического моделирования измельчения ячеек сетки с учётом микротвердости и прочности границ срастания минералов. Один из перспективных способов трехмерной реконструкции строения руды – автоматическая обработка микроизображений в минераграфии на основе алгоритмов стереологии. Следует отметить, что основным структурным элементом в методе фрагментации принят не размер зерна минерала, а размер поля минеральной фазы (обычно слагаемой агрегатами зерен ценного минерала в рудных прослоях и иногда отдельными зернами ценного минерала в безрудных прослоях), как наиболее полно отвечающий целям раскрытия и извлечения в технологии обогащения минерального сырья. Например, магнетитовый кварцит в этом случае представляется в виде чередования фаз магнетита и кварца, а не как последовательность отдельных зерен (кристаллов) соответствующих минералов, тогда как в кимберлитовых рудах полезной минеральной фазой будут вкрапленные кристаллы алмаза.

В одномерном случае алгоритм стохастического прогнозирования раскрытия минералов сводится к следующему. Для отобранной пробы задаются параметры моделирования: 1) средний период структуры, 2) ожидаемый гранулометрический состав продуктов измельчения и 3) наиболее вероятная характеристика извлечения полезного компонента в схеме обогащения – функция сепарации. В общем случае в качестве периода структуры может быть взята сумма средних размеров ценной минеральной фазы и пустой породы в том или ином типе или сорте руды:

$$L_{\text{структуры}} = L_{\text{минерал}} + L_{\text{порода}} \quad (3.14)$$

Если точные стереологические данные о распределении крупности вкраплений фаз минералов отсутствуют, то используются сведения о средних размерах минеральных фаз в изученных разновидностях руд. В этом случае распределение крупности вкраплений фаз минералов принимается логнормальным и сегменты отрезков генерируются с помощью метода Монте-Карло путем выборки из соответствующего эмпирического или логнормального распределения.



При наличии представительного количества проб и качественных аншлифов могут быть применены современные анализаторы изображений для определения стереологических характеристик методами компьютерной количественной минералогии под микроскопом.

Вдоль оси  $X$  в пределах достаточно протяженной линии –  $L$  на изображении аншлифа (не менее 1000 пересечений фаз минерал – порода) последовательно генерируются отрезки, соответствующие сегментам пересечения минеральных фаз линией сканирования при линейном стереологическом анализе аншлифов руды под микроскопом. Вероятность появления того или иного минерала (для двухфазной системы фаза А считается породой, фаза В – извлекаемой ценной фазой) задается квадратной матрицей переходных вероятностей с нулями по диагонали. На синтезированную подобным образом линейную структуру минеральных фаз накладывается решетка разрушения, размер ячеек которой соответствует геометрической шкале крупности с основанием 2 (распределение по стандартной шкале ГОСТа или Тайлера может быть переведено в значения данной шкалы). В каждой размерной ячейке подсчитывается доля той или иной минеральной фазы и подсчитывается качество «сростков». По сути определяется распределение объёмов ячеек селективной выемки в зависимости от величины выемки и содержания в ней полезного минерала. Определяется матрица раскрытия фаз. Для каждого класса крупности путем подсчета числа «раскрытых частиц» и различных по качеству «сростков» находятся спектры сростков, образующих в сумме стохастическую матрицу раскрытия  $L$  минералов руды.

Иллюстрация подобного типа расчётов показана в виде трехмерной гистограммы на рис. 3.17.

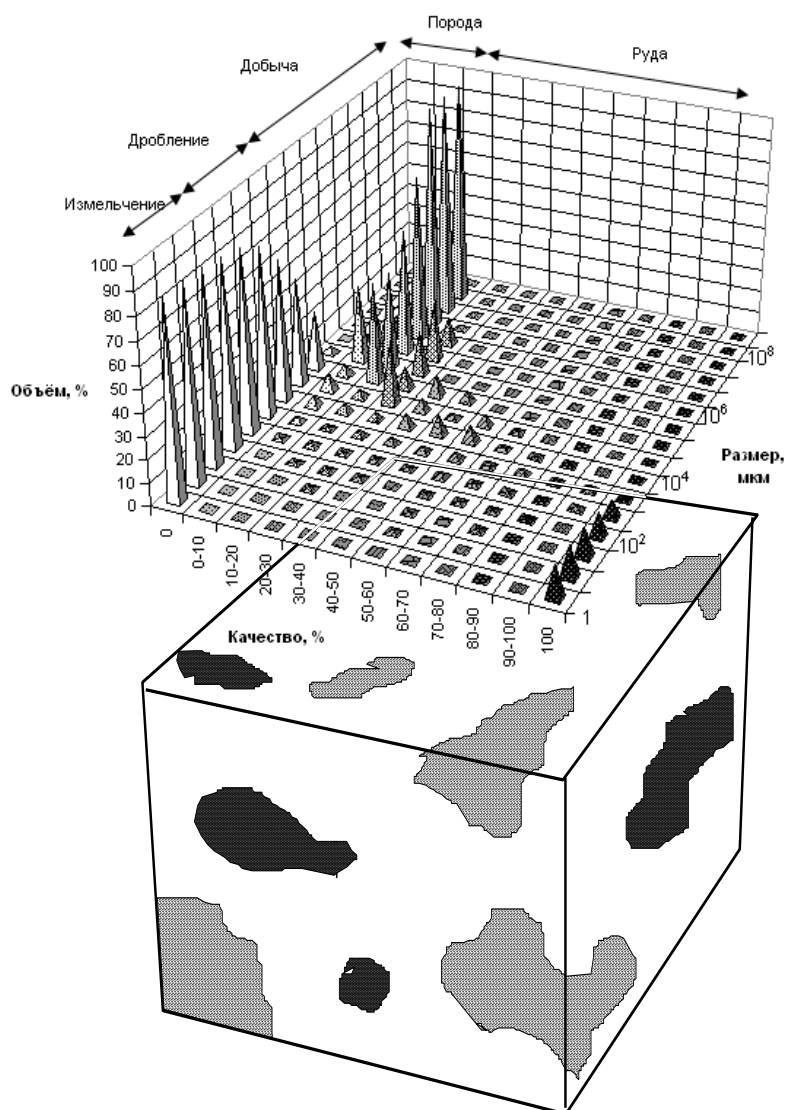


Рис. 3.17. Моделирование раскрытия рудных минералов

В расчетах по данному методу используются ожидаемые обобщенные характеристики измельчения и сепарации при получении готового продукта (концентрата) – распределение частиц по крупности и функция вероятности извлечений частиц в концентрат.

Матрица стохастического раскрытия  $\mathbf{L}$  и вектор заданного гранулометрического состава продукта измельчения  $\mathbf{f}$  можно использовать для расчета ожидаемого потенциального фракционного состава измельченного сырья  $\gamma$  (гамма функции распределения «частиц руды» по крупности, качеству и физическим свойствам). В матричном виде уравнение имеет вид:

$$\gamma = \mathbf{f} \mathbf{L} \quad (3.15)$$

В реальных производственных процессах рудоподготовки и обогащения в той или иной степени происходит избирательное дробление, измельчение и раскрытие полезного компонента в зависимости от вещественного состава, структурно-текстурных особенностей и физико-химических свойств руды. В этой связи для оценки влияния вкрапленности и гетерогенности руды на скорость преобразования её фракционного со-

става в рассмотрение вводятся следующие две функции: **R** – функция учёта удельной поверхности минеральных фаз в сростках и **H** – функция учёта микротвёрдости минеральных фаз по Виккерсу. Их произведение определяется как функция раскрываемости минералов руды **Λ**.

Таким образом, в результате совместный циклический процесс «измельчения – раскрытия» многофазной и гетерогенной руды может быть охарактеризован следующим имитационным уравнением:

$$\gamma = f \prod_{k=1}^t [(M\Lambda + I_m - \Lambda) \cdot (BS + I_n - S)] \quad (3.16)$$

где  $t$  – число циклов сокращения крупности во времени;  $k = 1 \dots t$  – индекс тактов сокращения крупности;  $m, n$  – заданное число соответственно классов качества и крупности;  $f$  – распределение входного потока руды по крупности, вектор  $n$ ; **B** – функция разрушения Бродбента-Каллкотта, матрица  $n \times n$ ; **S** – скорость отбора кусков к разрушению, диагональная матрица  $n \times n$ ; **Λ** – функция раскрываемости, зависящая от удельной поверхности и микротвёрдости минеральных фаз руды, стохастическая матрица  $m \times m$ ; **M** – скорость отбора материала к пересортировке качества, диагональная матрица  $m \times m$ ; **I<sub>m</sub>** – единичная диагональная матрица  $m \times m$ ; **I<sub>n</sub>** – единичная диагональная матрица  $n \times n$ .

Произведение матрицы  $\gamma$  фракционного состава сырья на вектор функцию извлечения  $\varepsilon$  (вероятность извлечения фракций частиц в обогащенный продукт) даёт прогноз ожидаемого фракционного состава концентрата и позволяет рассчитать его выход и качество. Суммированием фракций концентрата легко рассчитываются интегральные значения: выход и качество концентрата (в объемных процентах), извлечение ценной минеральной фазы в готовый продукт. Значения выхода, качества и извлечения в пересчете на металл (в массовых долях или процентах) могут быть теперь определены по соотношениям, учитывающим плотность слагающих породу минералов и содержание в них полезного компонента.

В итоге прогноз общепринятых технологических показателей обогащения – выхода концентрата  $\bar{\gamma}_c$ , содержания в нем полезного компонента  $\beta_c$  и извлечения  $\bar{\varepsilon}_c$  может быть осуществлен по формулам [50]:

$$\begin{aligned} \bar{\gamma}_c &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \varepsilon_j \gamma_{ij}; \\ \bar{\beta}_c &= \bar{\gamma}_c^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \beta_j \varepsilon_j \gamma_{ij}; \\ \bar{\varepsilon}_c &= \frac{\bar{\gamma}_c \bar{\beta}_c}{\bar{\alpha}_0}. \end{aligned} \quad (3.17)$$

где  $i = 1, \dots, n$  – индекс размерного класса частиц;  $j = 1, \dots, m$  – индекс класса качества частиц;  $\varepsilon_j$  – вероятность извлечения частиц в концентрат в классе качества  $j$ , сепарационная характеристика оборудования;  $\gamma_{ij}$  – фракционный состав измельченной исходной руды, матрица распределения частиц по размерам и качеству (см. пример на рис. 3.17);  $\beta_j$  – содержание ценного

компонента в классах шкалы качества;  $\alpha_0$  – среднее содержание компонента в исходной руде.

Данные формулы соответствуют идеальной сепарации с границей разделения  $\xi_p$ . При идеальном разделении минеральных частиц в  $i$ -й продукт извлекаются полностью только частицы фракций  $\xi_{pi-1} < \xi < \xi_{pi}$ , поэтому сепарационная характеристика имеет вид прямоугольного импульса. При неидеальном разделении очертания импульса расплываются из-за взаимозасорения продуктов. Для многокомпонентного сырья с несколькими извлекаемыми минералами оценка ожидаемых геотехнологических показателей  $i$ -го продукта также может быть выполнена по формулам (3.17).

Компьютерная технология прогнозирования геолого-технологических показателей на базе моделирования раскрытия минералов позволяет существенно повысить достоверность оценки промышленных запасов, обеспечивает улучшение надежности планирования добычи и служит важнейшим источником информации для внутрикарьерного усреднения минерального сырья и управления качеством рудопотоков.

### 3.6.3. Прогноз развития оруденения

Прогнозирование развития оруденения и морфологии рудных тел на слаборазведанных участках залежи и нижележащих горизонтах – важнейшая задача геологического моделирования, позволяющая в ряде случаев существенно уменьшить объём геологоразведочных работ и эксплуатационной разведки на разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых [1].

Природными факторами, предопределяющими трудность технологического обеспечения качества добываемого сырья, являются форма рудных тел, их структура и элементы залегания, включая размеры, углы падения и простирания.

Результаты прогноза горно-геологических условий представляются в виде комплекта горно-геометрических планов, разрезов, карт, на которых изображается размещение различных горно-геологических и горнотехнических показателей месторождения (гипсометрии и мощности залежи, тектонической нарушенности, качества полезного ископаемого, его технологических свойств и т. п.). Точность прогнозных карт определяют путём сопоставления обработанных наблюдений с данными разведки и эксплуатации, с материалами измерений геолого-маркшейдерских служб горного предприятия, с показателями фактической геометризации месторождения. Прогнозирование минерализации и строения залежей с множеством разнообразных структурных элементов и рудных тел во многих случаях может быть эффективно выполнено с помощью методов стохастической геометрии. Одним из разделов стохастической геометрии является стереология, в рамках которой рассматриваются прикладные вопросы реконструкции пространственных геометрических (в том числе – геологических) структур на основе измерений, проведенных по точкам (опробование массива), вдоль линий (разведочные выработки) или на секущей плоскости (разрезы по профилям или горизонтам месторождения).

### Стереология 3D структур

Полевые геологические измерения, опробование и лабораторные микроскопические анализы проводятся, как правило, вдоль разведочных линий, по поверхности или на сечении пространственных геологических структур. Это могут быть пробы керна скважин, борозд, горных выработок, образцов обнажений пород, приготовленные тонкие срезы прозрачных шлифов или полированных аншлифов руд и т.д. Во всех подобных случаях реальное трехмерное строение геологического объекта характеризуется измерениями, выполненными вдоль одномерной секущей линии или на двумерном плоском сечении. Задача моделирования состоит в том, чтобы по 1D и 2D характеристикам реконструировать, воспроизвести как можно детальнее 3D структуру массива месторождения. В этом плане стереология предоставляет математический аппарат для извлечения необходимой пространственной информации.

Стереологические формулы зависят от некоторых предположений о «стохастичности». В частности, предполагается, что либо сама структура является стохастической, случайной, либо метод выбора сечений включает в себя элементы рандомизации. В различной степени и то и другое условие встречается при проведении измерений на реальных геологических объектах или при реализации методики обработки данных (например, случайная ориентация объёмной палетки при подсчёте запасов по методу «осаждения слитка» и т.д.)

Формула для средних значений. Основной принцип стереологии, математически точно обоснованный для любого случайного множества пространственных элементов, устанавливает меру измерения объёмной доли данных элементов  $V_V$  в зависимости от замеров, проведенных точечным, линейным или планиметрическим методом:

$$V_V = A_A = L_L = P_P \quad (3.18)$$

Здесь доля объема  $V_V$  исследуемой фазы (рудных тел или минералов) равна доле площади этой фазы в плоском сечении  $A_A$ , а также равна линейной доле  $L_L$ , т.е. доле длины отрезков прямых, лежащих в исследуемой фазе для произвольной пробной системы секущих, и, наконец, доля объёма равна точечной доле  $P_P$  данной фазы в случайной системе пробных точек внутри изучаемого объёма.

В общей стереологии доказывается, что монолитная стохастическая структура может быть описана без геометрических допущений с помощью интегральных мер или собственных характеристик, таких, как удельная поверхность исследуемой фазы  $S_V$  и её объёмная доля  $V_V$ . Это позволяет обоснованно применять геостохастическое моделирование для геолого-промышленной оценки запасов определенных типов месторождений. Методика трехмерного совмещения каркасной геологической модели с решеткой эксплуатационных блоков (единиц селективной выемки, ячеек блочной модели, сменных объёмов добычи и т.д.) позволяет оценивать также ожидаемые потери и разубоживание, объёмы подготовленных к вы-

емке запасов, потенциальные показатели обогащения и, в конечном счёте, вычислить оптимальные контуры отработки запасов месторождения по этапам с максимальной прибылью для горнодобывающего предприятия.

### 3.7. Оконтуривание рудных тел

Компьютерный подсчет запасов производят в пределах оцифрованного контура залежи или месторождения. Контуром может быть естественная граница залежи или некоторый условный контур, в пределах которого полезное ископаемое удовлетворяет определенным кондициям по мощности, содержанию полезных или вредных компонентов, или граница степени разведанности месторождения – контур той или иной категории запасов.

Установление перечисленных контуров на планах и разрезах по данным геологоразведочных и горных работ называется оконтуриванием месторождения [4].

Различают внутренний и внешний, или нулевой, контуры. *Внутренним контуром* называют контур, проходящий по граничным выработкам, обнаружившим полезное ископаемое. *Внешним* называют контур, проходящий через точки естественной границы распространения полезного ископаемого или, в случае невозможности установления последней, через точки, находящиеся между рудными и соседними с ними безрудными выработками.

Площадь между внутренним и внешним контурами месторождения называют *межконтурной* или *приконтурной* полосой. Построение внутреннего контура обычно не вызывает затруднений. Построение же внешнего контура требует знания геологических особенностей месторождения.

Различают два случая.

1. Построение контура в условиях ограниченной экстраполяции, когда контур проводят между рудной и безрудной выработками посередине между ними или по разрезам с учетом среднего угла выклинивания рудной залежи.

2. Оконтуривание в условиях неограниченной экстраполяции, когда безрудных выработок нет или они расположены слишком далеко от рудных. В этом случае внешний контур проводят по точкам, построенным с учетом только рудных скважин. Точность построения контура при этом весьма низкая.

Применяемые способы построения контура подразделяются на геологические, морфологические и формальные.

*Геологические способы* основаны на учете приуроченности некоторых типов месторождений к определенным геологическим структурам с известными границами, к крупным разрывным нарушениям, к границам смены продуктивных пород, фаций и т.п.

*Морфологические способы* применяют с использованием разрезов. По данным разведочных выработок строят разрезы и линии, оконтуривающие

залежь. Линии экстраполируют за пределы внутреннего контура до их пересечения. По отмеченным на плане точкам проводят внешний контур.

*Формальные способы* применяют в тех случаях, когда не могут быть использованы геологические и морфологические приемы. Их связывают или с параметрами разведочной сети системой разработки, или с размерами тел по простиранию и по падению. Внешний контур проводят параллельно внутреннему на расстоянии, равном среднему расстоянию между разведочными выработками или его половине. Иногда внешний контур залежи проводят за пределами внутреннего на два этажа (горизонта горных работ) – для выдержанных месторождений и на один этаж – для менее выдержанных (слюдоносные пегматиты, жильные месторождения редких металлов и т.п.). Внешний контур строят по «правилу треугольника», высота которого равняется половине длины тела полезного ископаемого по простиранию.

Для изометрических тел внешний контур строят в виде конуса или полушария. Лучшими приемами определения внешнего контура следует считать такие, которые исходят не из формальных соображений, а из геологических особенностей месторождения полезного ископаемого.

В практике подсчета запасов в пределах внешнего контура приходится оконтуривать балансовые или кондиционные запасы, удовлетворяющие определенным требованиям по мощности залежи, содержанию полезных или вредных компонентов, технологическим свойствам как в отдельности, так и совместно.

### **3.8. Каркасное моделирование**

Обычная технология оценки запасов минерального сырья предусматривает создание блочной модели рудных тел или месторождения, которые иногда могут быть построены без определения каких-то геологических границ и распространяться на все пространство месторождения. Но в большинстве случаев все рудные тела, зоны, литологические типы пород и т.д. предварительно оконтуриваются с помощью каркасных моделей поверхностей или замкнутых объемов. Чаще всего ограничивают рудные тела и зоны, а решение об объектах, включаемых в состав каркасной модели, принимает геолог, хорошо знающий этот объект. Обычный набор каркасов для модели [23]:

- рудные тела или зоны; части зон, разделенные тектоникой;
- специально выделяемые районы месторождений с высокими (низкими) содержаниями;
- безрудные зоны внутри рудных тел;
- ограниченные в пространстве объемы литологических разностей горных пород;
- подсчетные блоки руды с утвержденными в ГКЗ запасами;
- подземные горные выработки.

Каркасная модель представляет месторождение набором объемных геологических тел, каждое из которых описывается триангуляционной поверхностью тела, натянутой на систему контуров, т.е. границ тела в плоскости разведочного сечения. Построение каркасно-объемной модели осуществляется поэтапно между смежными сечениями. Каркасная модель геологического тела наиболее полно и достоверно (насколько это позволяет плотность разведочной сети) описывает его форму, вследствие чего достигается более высокая, чем при использовании картографической модели, достоверность подсчета объема тела. Кроме того, каркасно-объемная модель позволяет считать запасы в заданном контуре любой конфигурации и автоматически строить геологические разрезы по произвольно выбранному сечению. Каркасная модель наиболее наглядно отображает особенности геологического строения и естественные закономерности распределения полезного компонента вдоль напластования горных пород. В отличие от блочной модели она позволяет более эффективно прогнозировать качественные и технологические параметры геолого-минералогических типов, имеющих субвертикальное строение, в местах недостаточного изучения сетью геологоразведочных скважин.

Для того, чтобы получить каркасную модель, необходимо предварительно создать некоторое множество замкнутых 2-мерных или 3-мерных периметров. А затем объединить их в каркас. Плоские периметры, как правило, вводятся с применением сканеров и последующей оцифровки или векторизации. Обычно таким образом с отсканированных геологических планов и разрезов вводятся:

- контуры рудных тел или зон;
- планы подземных горных выработок;
- контуры подсчетных блоков.

Создание замкнутых каркасов пространственных объемов – одна из наиболее сложных операций в процессе моделирования. При этом смежные контуры соединяются линиями связи в точках, которые должны быть затем соединены между собой путём триангуляции в каркас поверхности оболочки рудного тела. Однако в ряде случаев эта операция усложняется [17]:

- сложной формой смежных контуров, их расхождением и схождением;
- из-за требуемой корректировки каркаса по результатам проверки включения в него всех кондиционных проб;
- при необходимости учитывать выклинивание рудных тел на границах;

### **3.9. Блочное моделирование**

На этапе предварительной оценки запасов, особенно для жильных месторождений и залежей с ясными границами между рудой и вмещающими породами, иногда достаточно ограничиться построением каркасной



модели полигонального или контурного типа. Однако при решении задачи подсчёта запасов с учётом предполагаемого способа ведения горных работ и непосредственно на стадии эксплуатации месторождения необходимо создавать и поддерживать в актуальном состоянии детальную блочную модель. Это обусловлено тем, что планирование и добыча полезных ископаемых осуществляются в привязке во времени (смена, месяц, год) и определяются параметрами применяемой системы добычи. При изменении характеристик технологического оборудования, его габаритов и производительности изменяется в свою очередь и селективность выемки, влияющая на качество и количество извлекаемых запасов. Принимая во внимание эти факторы, можно утверждать, что реальной дискретной модели процессов горного производства в конечном счёте наиболее адекватно соответствует именно блочная модель месторождения.

Блочная модель с заданными размерами или параметрами прототипа может быть создана после генерации решетки GRID 3D несколькими способами.

1. Выполняется операция пересечения решетки GRID с подготовленной заранее каркасной моделью рудных тел. Происходит заполнение оболочек каркасов блоками с пометкой блоков атрибутами принадлежности к соответствующему геологическому объекту.

2. Для узлов решетки GRID выполняется интерполяция значений показателей по имеющимся точкам данных в целом по месторождению. Модель заполняется блоками. Затем эта модель дополняется и обновляется другими блочными моделями. В первую очередь в неё вводят топографическую блочную модель и блоки «воздуха» в качестве идентификатора приобретают соответствующий атрибут, обычно равный нулю. В другом варианте из регулярной решетки GRID просто удаляются «воздушные» блоки.

3. Для каждого из вертикальных или горизонтальных слоев решетки GRID интерактивно производят оконтуривание зон минерализации полигонами. Это выполняется обычно вручную с помощью курсора мыши на экране компьютера, по данным опробования. Полигоны заполняются блоками заданного размера. После этого запускается процедура интерполяции, которая определяет показатели качества блоков по исходным точкам данных внутри контуров минерализации или в границах различных рудных тел.

Следует отметить, что в ряде программных пакетов процесс генерации решетки совмещен с выполнением процедур интерполяции, в других, наоборот, вначале генерируется пустая решетка и при необходимости её можно вызвать для проведения интерполяции показателей. Последний подход более предпочтителен, поскольку позволяет создавать блочные модели рудных тел, минерализации и стратиграфии без интерполяции, а путём выполнения логических операций пересечения множеств и заполнения каркасов блоками.

Проблемы, связанные с необходимостью хранения и обработки больших по объему блочных моделей, решаются различными способами: созданием блоков только для наиболее важных участков оруденения, переходом к блокам с переменными размерами, организацией хранения структуры решетки в виде квадродерева и т.д.

#### Граничные условия и параметры модели

Перед созданием блочной модели задаются границы области определения модели и осуществляется привязка модели к условной или мировой системам координат. То есть создаётся как бы прототип модели с одним-единственным блоком, который должен вмещать всю моделируемую залежь.

Ориентация блочной модели должна соответствовать строению залежи и учитывать анизотропию геопоказателей. Если эллипсоид анизотропии повернут относительно принятой системы координат, то иногда бывает целесообразно так установить систему координат, чтобы ось X модели, например, совпадала с направлением большой оси анизотропии. Тогда все дальнейшие расчёты необходимо будет вести в новой системе координат.

При настройке на конкретное месторождение этот файл используется для генерации решетки блоков. Основные параметры блочной модели следующие:

- XO, YO, ZO – координаты привязки модели. Привязка рамок модели к мировой координатной системе устанавливается по отношению к углу первого родительского блока, а не к его центру;
- DX, DY, DZ – размеры блоков по осям X, Y, Z;
- NX, NY, NZ – число блоков модели по осям X, Y, Z. При значении NZ, равном единице, можно моделировать поверхности, слои или пласты. Число блоков, в комбинации с размерами блоков, определяет полную область моделирования.

Если отсутствуют файл или таблица с системой опорных точек, то по умолчанию границы модели могут быть приняты, например, в пределах  $XO = 0$ ,  $YO = 0$ ,  $ZO = 0$ ,  $DX = 100$ ,  $DY = 100$ ,  $DZ = 100$ ,  $NX = 10$ ,  $NY = 10$ ,  $NZ = 10$ . Эти данные вместе с основными параметрами блочной модели записываются в файл границ модели. Однако в практике размеры блока должны быть связаны с размерами разведочной сети. При построении блочных моделей путём интерполяции обычно выбирают минимальный размер основных блоков модели равным 25-30% среднего размера расстояний между скважинами разведочной сети. В геостатистике считается, что для получения несмещенной оценки кригинга размер оцениваемых основных блоков не должен быть меньше половины среднего расстояния между пробами в данном направлении. Если размер блока меньше, то можно ожидать большее смещение средней оценки.

### Заполнение каркасов блоками

Можно построить блочную модель по уже готовой полигональной или каркасной модели, заполняя блоками внутренние области оболочек геологических тел, что является аналогом векторно-растрового преобразования, показанного на рис. 3.18.

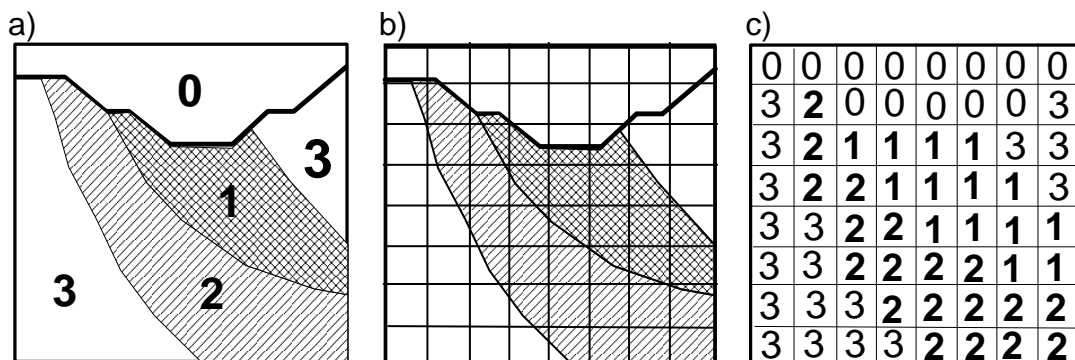


Рис. 3.18. Преобразование контурной модели в блочную: а) полигоны пластов залежи; б) совмещение с регулярной решеткой; в) блочная модель

Согласно показанному на рисунке преобразованию полигон-грид («вектор-растр»), модель векторных данных в виде полигонов с их номерами покрывается регулярной квадратной решеткой (обычно – прямоугольной) и определяется принадлежность каждого квадрата или блока тому или иному полигону. Блок получает номер того полигона, которому он принадлежит. Эта операция обычно выполняется при преобразовании двумерных контурных моделей по разрезам или объёмных каркасных моделей в двумерные и трехмерные блочные модели месторождений.

При обратном преобразовании грид-полигон («растр-вектор») квадратные ячейки блочной модели или пиксели растрового изображения с одинаковыми номерами автоматически оконтуриваются путём выделения полигонов соответствующих номеров (рис. 3.19).

Подобное преобразование широко используется при обработке растровых спутниковых изображений, при создании компактных по занимаемому объёму каркасных аналогов блочных моделей больших месторождений. В последнем случае регулярная объёмная блочная модель преобразуется во множество каркасных агрегатов различного размера, поверхность которых описывается прямоугольными элементами.

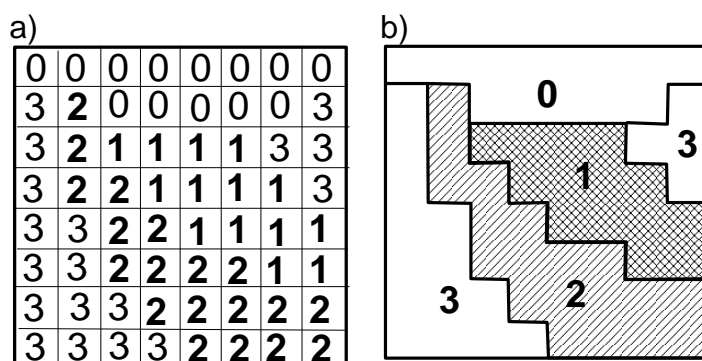


Рис. 3.19. Преобразование блочной модели в контурную: а) значения в блоках, б) контуры рудных тел

Создать полигоны можно интерактивно в графическом окне карты либо путем сканирования чертежа с последующей его оцифровкой и векторизацией. При оцифровке контуров тел каждому присваивается атрибутивное имя или код соответствующей зоны, типа породы. В дальнейшем эти параметры присваиваются блокам, созданным на основе контуров. Примерами атрибутивных полей могут являться Порода, Зона, Пласт, Уступ или любые другие показатели, которые требуются для описания геолого-маркшейдерских объектов.

Узловые точки полигонов могут быть заменены точными трехмерными координатами выбранных интервалов скважин. Для заполнения полигонов блоками первые должны быть представлены как замкнутые области или периметры так, чтобы смежные контуры не перекрывались.

### 3.10. Интерполяция геопоказателей

Интерполяция – это процесс, при котором точки данных, рассеянные в пространстве и во времени, преобразуются в непрерывный массив или решетку численных значений – грид. Исходная информация для решетки может представлять собой все, что угодно, начиная от замеров топографических высот и уровня загрязнения на промышленных предприятиях в регионе до анализов проб на содержание полезного компонента в обнажениях горных пород. Точки данных должны при этом иметь местоположение с некоторыми координатами  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  и измеренным значением атрибута  $G$ . Координатная система при проведении вычислений должна быть декартовой.

Двумерную решетку (или регулярную сеть) данных можно представить в виде системы воображаемых параллельных линий, перекрывающих исходные точки данных, как это показано на рис. 3.20.

Для 3D интерполяции в НГИС применяются следующие основные методы: ближайшей точки, взвешенных обратных расстояний, ближайших соседей и кригинг. Рассмотрим более подробно эти методы интерполяции исходных рассеянных точек в узлы регулярных решеток.

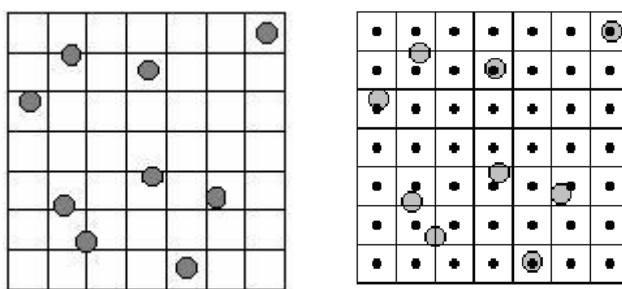


Рис. 3.20. Интерполяция рассеянных точек данных в узлы регулярной сетки грид

#### 3.10.1. Метод ближайшей точки

Этот метод является единственным, позволяющим интерполировать любые типы данных для любых типов решеток путем присвоения атрибутов ближайшей точки текущему узлу решетки GRID или сетки MESH. При этом интерполируемые свойства, геопоказатели или атрибуты исходных точек могут быть как вещественными, числовыми, так и символьными или текстовыми.

### 3.10.2. Метод линейной интерполяции

В методе *линейной интерполяции* вначале выполняется триангуляция рассеянных точек и строится временная сетка TIN. Исходя из предположения, что поверхность показателя внутри каждого треугольника изменяется линейно, сетка TIN описывает кусочно-линейную поверхность объекта или границы раздела сред.

Уравнение плоскости, задаваемое тремя вершинами какого-либо треугольника, имеет следующий вид:

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (3.19)$$

где коэффициенты  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  вычисляются для координат трех вершин  $(x_1, y_1, z_1)$ ,  $(x_2, y_2, z_2)$  и  $(x_3, y_3, z_3)$  как:

$$A = y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \quad (3.20)$$

$$B = z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \quad (3.21)$$

$$C = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \quad (3.22)$$

$$D = -Ax_1 - By_1 - Cz_1 \quad (3.23)$$

Уравнение плоскости может быть записано также в виде:

$$z = f(x, y) = -\frac{A}{C}x - \frac{B}{C}y - \frac{D}{C} \quad (3.24)$$

Эта форма уравнения плоскости используется для расчета высотной отметки  $z$  в любой точке треугольника.

При линейной схеме интерполяции сама процедура вычисления значения экстраполяции вне выпуклой оболочки невозможна, так как сетка TIN покрывает только выпуклую оболочку множества рассеянных точек. Поэтому всем узлам вне выпуклой оболочки множества рассеянных точек обычно присваивается некоторое экстраполируемое значение, по умолчанию равное, например, максимальной высотной отметке точек данных или выбираемое пользователем.

Для 3D случая линейной интерполяции по рассеянным пространственным точкам строится сеть тетраэдров и определяется принадлежность каждого узла трехмерной решетки определенному тетраэдру. Затем по уравнению гиперплоскости в узле определяется значение геопоказателя, которое присваивается текущей элементарной ячейке блочной модели.

### 3.10.3. Метод обратных расстояний

Один из наиболее распространенных методов интерполяции рассеянных точек – метод обратных расстояний или метод инверсно-дистанционного взвешивания (*IDW*). Методы взвешивания по обратным расстояниям основаны на предположении, что на значение некоторого узла поверхности интерполяции влияют, главным образом, значения ближайших рассеянных точек данных и в меньшей степени значения в удаленных точках данных. Поверхность интерполяции является взвешенным средним значением в точках данных, и весовой коэффициент, приписываемый каж-

дой рассеянной точке, обратно пропорционален расстоянию от данной рассеянной точки до узла интерполяции.

Уравнение простой формы взвешенной интерполяции по методу обратных расстояний имеет следующий вид:

$$g = f(x, y, z) = \sum_{i=1}^n w_i g_i, \quad (3.25)$$

где  $n$  – число рассеянных точек множества,

$g_i$  – значения показателя в рассеянных точках,

$w_i$  – весовые коэффициенты функции, приписываемые каждой рассеянной точке.

Классическая форма весовой функции следующая:

$$w_i = \frac{R_i^{-p}}{\sum_{i=1}^n R_i^{-p}}, \quad (3.26)$$

где  $p$  – некоторое положительное вещественное число, называемое степенным параметром (обычно,  $p = 2$ ), и  $R_i$  – расстояние от рассеянной точки до узла интерполяции равно

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}, \quad (3.27)$$

где  $(x, y)$  – координаты узла интерполяции и  $(x_i, y_i)$  – координаты каждой рассеянной точки.

Весовая функция меняет свои значения от единицы в рассеянной точке до некоторого стремящегося к нулю значения при увеличении расстояния от рассеянной точки. Весовые функции нормируются так, что сумма их весов равна единице.

Действие весовой функции состоит в том, что интерполяционная поверхность учитывает каждую рассеянную точку и наиболее сильное влияние на нее оказывают рассеянные точки, ближе всего расположенные к узлу интерполяции.

При взвешенной интерполяции по обратным расстояниям вместо стандартной функции дистанционного взвешивания (3.26) иногда удобнее использовать следующее уравнение:

$$w_i = \frac{\left[ \frac{R_{max} - R_i}{R_{max} R_i} \right]^2}{\sum_{k=1}^l \left[ \frac{R_{max} - R_k}{R_{max} R_k} \right]^2}, \quad (3.28)$$

где  $R_i$  – расстояние из узла интерполяции до  $i$ -й рассеянной точки,  $R_{max}$  – расстояние от узла интерполяции до наиболее удаленной рассеянной точки и  $n$  – полное число рассеянных точек.

Это уравнение в ряде случаев обеспечивает лучшие результаты интерполяции, чем при использовании формулы (3.26).

Весовая функция зависит от расстояния и радиально симметрична относительно каждой рассеянной точки. В результате при интерполяции высотных отметок интерполяционная поверхность достаточно симметрична относительно каждой точки и направлена в сторону средней высоты между рассеянными точками.

Трехмерный случай

Единственное отличие 3D версии *IDW* интерполяции заключается в том, что уравнения для узловых функций включают дополнительно *Z* компоненту.

3D уравнения для метода *IDW* идентичны 2D уравнениям, а расстояния между точками вычисляются с помощью формулы:

$$R_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \quad (3.29)$$

где  $(x, y, z)$  – координаты интерполяции точки и  $(x_i, y_i, z_i)$  – координаты каждой из рассеянных точек.

#### 3.10.4. Метод естественных соседей

Метод естественных соседей, или соседних регионов (*Natural Neighbor Interpolation – NNI*), имеет много положительных сторон. Он может применяться как для интерполяции, так и экстраполяции, и кластеризации рассеянных точек. Интерполяция *NNI* была впервые введена в работе Сибсона (Sibson, 1981). Более детальное описание этого метода интерполяции приведено в работе Ватсона (Watson, 1992).

Интерполяция *NNI* основана на Сети полигонов Вороного множества рассеянных точек. Сеть полигонов Вороного может быть построена из Делоне триангуляции множества рассеянных точек. Делоне триангуляция является сеткой TIN, которая строится при условии выполнения критерия Делоне. Имеется один полигон Вороного в сети для каждой рассеянной точки. Полигон занимает всю область, которая ближе к включенной рассеянной точке, чем к любой другой рассеянной точке. Полигоны множества рассеянных точек являются замкнутыми полигонами, а полигоны за выпуклой оболочкой множества – открытыми полигонами. Каждый полигон Вороного строится с использованием окружающих треугольников по триангуляции Делоне рассеянных точек. Вершины полигонов Вороного совпадают с центрами окружающих треугольников.

Как показано на рис. 3.21, полигоны Вороного рассеянных точек по периметру сетки TIN являются открытыми полигонами. Поскольку такие полигоны имеют неограниченную площадь, они не могут напрямую использоваться для интерполяции по методу ближайших соседей. Чтобы как-то ограничить эти полигоны, комплект рассеянных точек искусственно заключается в границы прямоугольной области или рамки. Полигоны обрезаются границами рамки.

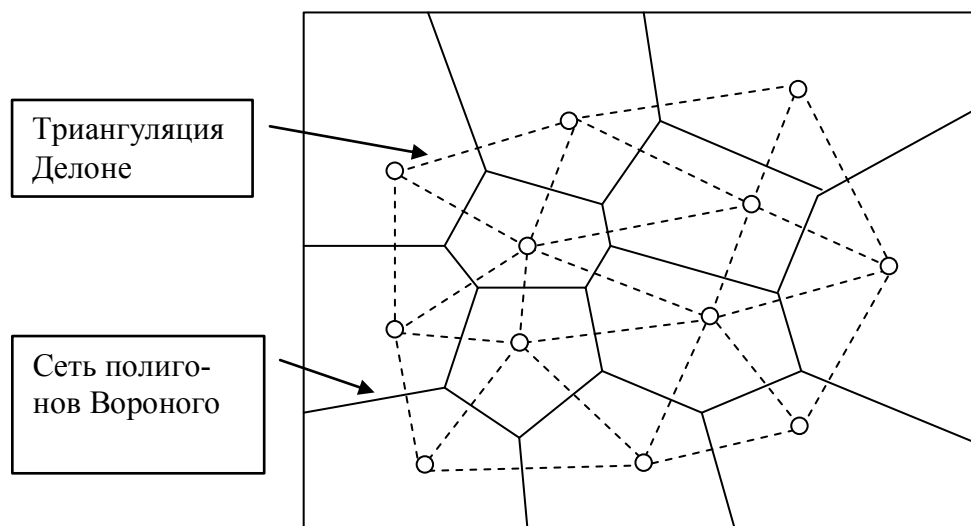


Рис. 3.21. Ограничительная рамка при интерполяции по методу ближайших соседей

В границах площадей полигонов Вороного по периметру модели рассеянных точек можно выполнять экстраполяцию (оценивая значения интерполяции точек вне выпуклой оболочки множества рассеянных точек) так же, как и интерполяцию. Однако вычисленное значение экстраполяции некоторым образом зависит от относительных размеров ограничивающей рамки и размеров множества рассеянных точек. Чем больше ограничивающая рамка, тем больше влияние периметра рассеянных точек на экстраполируемое значение. Если ограничивающая рамка очень большая, экстраполируемые значения будут зависеть лишь от точек на выпуклой оболочке множества рассеянных точек. Если ограничивающая рамка незначительно больше множества рассеянных точек, экстраполируемые значения будут зависеть от внутренних рассеянных точек в окрестности узла интерполяции.

Основное уравнение интерполяции *NNI* аналогично используемому в методе интерполяции *IDW*. Так же, как и при *IDW* интерполяции, узловые функции могут быть либо постоянными, градиентными плоскостями или квадратичными. Различие между *IDW* интерполяцией и *NNI* интерполяцией по методу ближайших соседей состоит в том, что данный метод используется как для расчета весов, так и для выбора подмножества рассеянных точек интерполяции. Для функции  $f$  в узле  $p$  интерполянт Сибсона оценивается следующим образом:

$$f(p) = \sum_{i=1}^k u_i f(p_i) / \sum_{i=1}^k u'_i f(p_i), \quad \text{где } u'_i = u_i / \sum_{i=1}^k u_i \quad (3.30)$$

где  $u_i$  — является пересечением площадей (объемов) ячейки Вороного для точки  $p_i$  и временной ячейки Вороного для точки  $p$ . (Рис. )



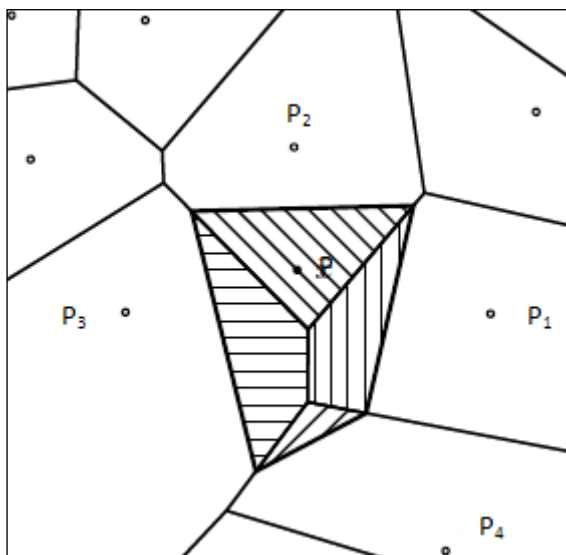


Рис. 3.22. Добавление временной точки  $p$  в диаграмму Вороного

диаграммы Вороного, но и нахождения площадей пересечения многоугольников в двумерном случае, или объемов многогранников в трехмерном случае.

#### Трехмерный случай

Уравнения для 3D версии *NNI* аналогичны двумерному случаю. В 3D версии рассеянные точки разбиваются сетью тетраэдров, удовлетворяющих критерию Делоне. Тетраэдры используются для задания сети полиэдров Вороного (или полиэдров вместо полигонов в 2D). Локальные координаты для интерполяции базируются на покрываемых полиэдрами Вороного объемах, а не на покрываемых полигонами Вороного площадях, как в случае 2D.

Все, что касается ограничивающей рамки применимо и для 3D случая. Различие состоит лишь в том, что для 3D случая ограничивающая рамка представляет собой параллелепипед, а не прямоугольник.

#### **3.10.5. Метод кригинг**

*Кригинг* является геостатистическим методом интерполяции, названным в честь южноафриканского горного инженера Д. Криге, который разработал эту методику для повышения точности оценки рудных запасов. За прошедшие годы кригинг стал фундаментальным инструментом в области геостатистики.

Традиционная геостатистика развилась на базе приложений для горной промышленности, где обычно ведётся интенсивное опробование массива. В этой связи применение базовых геостатистических методов реализуется в следующей последовательности.

1. Рассчитываются значения пространственной статистики (вариограммы) для заданных в пространстве по направлениям регулярных лагов.

Интерполяция Сибсона традиционно реализуется геометрически, то есть вычисляются весовые вклады для интерполянта путём определения площадей или объемов  $u_i$ , связанных с пробами  $p_i$  после вставки в диаграмму Вороного временного узла  $p$  [32].

Однако интерполяций естественных соседей в её традиционной форме требует больше вычислительных ресурсов, чем другие подходы, так как необходимо не только построение

2. Экспериментальная вариограмма аппроксимируется математической функцией (например, сферической, экспоненциальной и т.д.).

3. На регулярной решетке, покрывающей пространство месторождения, реализуются различные процедуры интерполяции (кригинг) или процедуры имитации (последовательная имитация, имитация отжигом и т.д.).

Следует отметить, что геологические или «субъективные» знания напрямую не входят в эти процедуры.

Кригинг основан на предположении, что интерполяционный параметр может быть представлен в качестве регионализированной переменной [14]. Так же, как и в методе обратных расстояний, при кригинге узлам присваиваются веса в зависимости от окружающих данных. Однако одним из основных преимуществ метода кригинга является то, что весовые значения вычисляются для того, чтобы минимизировать ошибку дисперсии.

Регионализированная переменная является промежуточной между действительно случайной переменной и полностью детерминированной переменной, в том смысле, что она непрерывно изменяется при переходе от одной позиции к другой, и поэтому точки, расположенные близко, имеют некоторую степень пространственной корреляции, в то время как удаленные друг от друга точки статистически независимы. Кригинг включает ряд процедур линейной регрессии, которые минимизируют оценку дисперсии для некоторой предопределенной модели ковариации.

Интерполяция по методу кригинга по сути является геостатистическим способом оптимизации среднеблочных оценок геолого-промышленных параметров месторождений – содержаний, метропроцентов, мощности рудных тел, плотности и, в конечном счёте, запасов полезного ископаемого и ценных компонентов. По сравнению с другими методами интерполяции дополнительная точность оценки в методе кригинга достигается на основе обработки информации о структуре пространственной изменчивости подсчётных параметров, геометрии разведочной сети, системы опробования и величины оцениваемых блоков.

Теории и практике применения кригинга в геологии и горном деле посвящено большое число работ (см. например, [15]). Краткий обзор теоретических моделей кригинга представлен, в частности, в работе [33].

Наиболее общепринятое теоретическое обоснование кригинга достигается в рамках теории стационарных случайных функций. Основной структурной характеристикой этой модели служит автоковариационная функция

$$C(h) = E\{[Z(x) - E_z][Z(x+h) - E_z]\}, \quad (3.31)$$

где  $Z(x)$ ,  $Z(x+h)$  – значения пространственной переменной  $Z$  в точках поля  $V$  с координатами  $x$  и  $x+h$ ;  $E\{\dots\}$  – оператор математического ожидания, обозначающий процедуру определения среднего значения;  $E_z = E\{Z(x)\}$  – среднее значение  $Z$  в пределах поля  $V$ .

В качестве обобщающей функции, синтезирующей свойства поля  $V$ , в геостатистике используется собственная функция рассеивания или вариограмма:

$$\gamma(h) = 0.5E\{[G(x+h) - G(x)]^2\} \quad (3.32)$$

Вариограмму можно выразить через автоковариационную функцию, т.к.

$$\gamma(h) = C(0) - C(h). \quad (3.33)$$

Для характеристики структуры поля пространственной переменной  $Z$  кроме вариограммы можно использовать и автокорреляционную функцию:

$$\rho(h) = C(h) / C(0) \quad (3.34)$$

и нормированную вариограмму:

$$\gamma'(h) = \gamma(h) / C(0), \quad (3.35)$$

что позволяет исключить из рассмотрения различные размерности и диапазоны изменения представленных пространственных переменных.

Для пластовых месторождений можно рассматривать точки в пределах двумерного геометрического поля на площади  $S$ . При этом атрибуты точек опробования, определяющие мощность, содержание и линейный запас или метропроцент стратиформной залежи, выступают в качестве пространственных переменных таким образом, что  $Z(x) > 0$  в поле  $S$  и  $Z(x) = 0$  за его пределами. В этом случае поле пространственных переменных месторождения обычно формируется за счёт двух практически независимых составляющих: глобальной (зональной или регионализированной) переменной, обусловленной трендом параметров, и локальной или случайной составляющей, образующейся, как правило, за счёт природной неоднородности массива горных пород.

$$Z(x) = f(x) + l(x), \quad (3.36)$$

где  $f(x)$  – региональная изменчивость геологического параметра (тренд), обусловленная изменением условий минерализации или осадконакопления при формировании залежей;  $l(x)$  – локальная изменчивость, образующаяся за счёт неоднородности горных пород и руд, случайной структурно-текстурной и физико-химической колеблемости свойств массива в точках опробования.

С учетом аддитивности случайной функции можно записать:

$$\gamma(h) = \gamma_f(h) + \gamma_l, \quad (3.37)$$

где  $\gamma_f(h)$  – вариограмма зональной изменчивости (тренда);  $\gamma_l = D_l^2$  – вариограмма локальной изменчивости, определяемая как ее дисперсия.

Основная идея кригинга заключается в определении наилучшей или оптимальной линейной оценки  $G_s$  подсчетного параметра (мощности, содержания металла), рассматриваемого как пространственная переменная  $G$  в пределах участка поля  $S$ :

$$G_s = \sum_{i=1}^n w_i g_i, \quad (3.38)$$

где  $n$  – общее количество участвующих в оценке разведочных пересечений;  $g_i$  – значение пространственной переменной  $G$  в точке, определяемой вектором координат  $x_i$ ;  $w_i$  – коэффициент кригинга для  $i$ -го разведочного пересечения.

Следует отметить, что оценка кригинга использует результаты опробования разведочных пересечений, расположенных как внутри, так и за пределами оцениваемого участка. Целесообразность этого вытекает из существующей пространственной корреляции переменной  $Z$  в пределах всего поля  $S$ . Из условия несмещенности оценки подсчетного параметра по отношению к данным разведочного опробования следует:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (3.39)$$

Используемые при подсчете запасов среднеарифметический и средневзвешенный способы вычисления оценок параметров могут рассматриваться как частные случаи наилучшей оценки кригинга, если принять  $w_i = 1/n$  для среднеарифметической оценки мощности и  $w_i = m_i / \sum_{i=1}^n w_i$  для средневзвешенной на мощность оценки содержания. Требование к несмещенности должно выполняться в любом случае.

Оценка  $G_s$  в узле сетки интерполяции разведочных данных, являясь специфической функцией поля пространственной переменной  $G$ , геометрии оцениваемого участка  $S$ , геометрии системы скважин ДН разведки и свойств алгоритма оценки, может рассматриваться одновременно как случайная величина. Эффект случайности при этом порождается пространственно независимым и априорно непредсказуемым расположением разведочной системы по отношению к фактическому положению оцениваемого объекта в недрах. С этих позиций основным критерием эффективности определения параметров залежи служит размер дисперсии оценивания  $\sigma_y^2$ , который при фиксированных результатах разведки может быть изменен, очевидно, только варьированием величины соответствующих коэффициентов кригинга  $w_i$ .

В этом случае дисперсия оценки

$$\sigma_y^2 = E\{[Y_s - G_s]^2\} \quad (3.40)$$

после преобразований, учитывающих свойства случайных функций и оператора  $E\{\dots\}$ , может быть выражена через автоковариационную функцию

$$\sigma_y^2 = D_s^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C(h_{ij}) w_i w_j - 2 \sum_{i=1}^n C_s(x_i) w_i, \quad (3.41)$$

где  $C(h_{ij})$  – ковариация  $i$ -го и  $j$ -го разведочных пересечений, расположенных на расстоянии  $h_{ij} = |x_i - x_j|$ ;  $D_s^2$  – дисперсия фактических средних значений  $G_s$  для участков, имеющих геометрическую форму  $s$ , в пределах поля  $S$ ;  $C_s(x_i)$  – ковариация  $i$ -го разведочного пересечения и оцениваемого участка  $s$ .

Два неизвестных параметра  $D_s$  и  $C_s$  в последнем слагаемом могут быть также выражены через автоковариационную функцию  $C$

$$D_S^2 = \frac{1}{S^2} \int_S \int_S C(u-v) du dv, \quad (3.42)$$

$$C_S(x_i) = \frac{1}{S} \int_S C(u - x_i) du \quad (3.43)$$

или через вариограмму, принимая во внимание вышеприведенные формулы её связи с автоковариацией.

Для определения коэффициентов  $w_i$ , обеспечивающих наименьшую дисперсию оценки геологических параметров с учетом равенства единице суммы всех коэффициентов, необходимо найти минимум выражения

$$F = \sigma_Y^2 + 2\lambda \sum_{i=1}^n w_i \quad (3.44)$$

где  $\lambda < 0$  – множитель Лагранжа. Подставляя в эту формулу ранее полученное выражение для дисперсии  $\sigma^2$  и последовательно дифференцируя по неизвестным коэффициентам, получим общую систему  $n+1$  уравнений стандартного кригинга

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n w_j C(h_{ij}) + \lambda &= C_S(x_i), \\ \sum_{j=1}^n w_j &= 1, \end{aligned} \quad (3.45)$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$  обозначает номер уравнения.

При известной вариограмме полученная система уравнений легко разрешима относительно коэффициентов кригинга  $k_i$ .

Процедуры кригинга в большинстве компьютерных пакетов горно-геологического моделирования основаны на библиотеке *Geostatistical Software Library (GSLIB)*. Поскольку кригинг является достаточно сложным методом интерполяции и включает многочисленные опции, полное описание кригинга выходит за рамки этого учебного пособия. Для получения более подробной информации рекомендуется ознакомиться со специальной литературой [15][13].

Для решения задач интерполяции геологических показателей были предложены многочисленные способы кригинга различной степени сложности, однако двумя наиболее известными способами являются *обычный кригинг* и *универсальный кригинг*.

#### Обычный кригинг

Первый шаг обычного кригинга состоит в расчёте экспериментальной вариограммы по рассеянным точкам и аппроксимации её некоторой моделью, предназначенной для интерполяции. Для кригинга можно использовать различные выражения вычислений дисперсии, но она обычно вычисляется как полуразность квадрата по формуле (3.44.а), как это было описано выше в разделе по оценке изменчивости геологических показателей.

Основное уравнение кригинга выглядит следующим образом:

$$G(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i g_i \quad (3.46)$$

где  $n$  – число рассеянных точек множества,  $g_i$  – значения рассеянных точек и  $w_i$  – веса, приписываемые каждой рассеянной точке.

Это уравнение аналогично выражению интерполяции по методу обратных расстояний за исключением того, что вместо использования весов на основе степенной функции расстояний выбор весов кригинга основан на модели вариограммы. Таким образом, для интерполяции на основе значений показателя  $g$  в трех рассеянных пробах  $p1$ ,  $p2$ , и  $p3$  в узле  $p$  должны быть найдены веса  $w_1$ ,  $w_2$  и  $w_3$ . Веса находятся через решение соответствующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) &= S(d_{p1}) \\ w_1 S(d_{21}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) &= S(d_{p2}) \\ w_1 S(d_{31}) + w_2 S(d_{32}) + w_3 S(d_{33}) &= S(d_{p3}) \end{aligned} \quad (3.44.a)$$

где  $S(d_{ij})$  есть модель вариограмма, оцененная на расстоянии  $d_{ij}$ , равном расстоянию между точками  $i$  и  $j$ . Например,  $S(d_{p1})$  есть модельная вариограмма, оцененная на расстоянии, равном удалению точек  $p1$  от узла  $p$ . Так как необходимо, чтобы сумма весов была равна единице, то добавляется следующее уравнение суммы весов:

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.0 \quad (3.44.б)$$

Поскольку введены четыре уравнения и три неизвестных, то в эту систему уравнений добавляется переменная  $\lambda$ . Окончательная система уравнений записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} w_1 S(d_{11}) + w_2 S(d_{12}) + w_3 S(d_{13}) + \lambda &= S(d_{p1}) \\ w_1 S(d_{21}) + w_2 S(d_{22}) + w_3 S(d_{23}) + \lambda &= S(d_{p2}) \\ w_1 S(d_{31}) + w_2 S(d_{32}) + w_3 S(d_{33}) + \lambda &= S(d_{p3}) \\ w_1 + w_2 + w_3 + 0 &= 1.0 \end{aligned} \quad (3.47)$$

Эти уравнения решаются относительно весов  $w_1$ ,  $w_2$  и  $w_3$ . Затем найденные веса используются для определения значения функции  $f(g)$  в интерполяционном узле:

$$f_p(g) = w_1 g_1 + w_2 g_2 + w_3 g_3 \quad (3.48)$$

Таким образом, при использовании вариограммы для расчета весов ожидаемая ошибка оценивания минимизируется по методу наименьших квадратов. По этой причине кригинг, как иногда говорят, дает наилучшую линейную несмещенную оценку. Однако, минимизация ожидаемой ошибки по методу наименьших квадратов не всегда самый лучший критерий и в некоторых случаях другие схемы интерполяции дают более приемлемые результаты.

Важной особенностью кригинга является то, что вариограмма может использоваться для вычисления ожидаемой ошибки оценивания в каждом узле интерполяции, так как ошибка оценивания есть функция расстояния до окружающих рассеянных точек. Дисперсия оценивания может быть вычислена как

$$S_g^2 = w_1 S(d_{p1}) + w_2 S(d_{p2}) + w_3 S(d_{p3}) + \lambda \quad (3.49)$$

Другими словами, дисперсия оценивания есть взвешенное среднее дисперсии расстояний от узла интерполяции до каждой точки, используемой в вычислениях, плюс вклад от переменной Лагранжа,  $\lambda$ . Можно вычислить дисперсию оценивания для каждого узла интерполяции вместе с интерполяцией текущего показателя для моделей типа MESH или GRID.

#### Универсальный кригинг

Одно из допущений обычного кригинга состоит в том, что оцениваемая поверхность считается стационарной. То есть среднее значение  $f$  рассеянных точек является постоянным во всех регионах множества. Это слабое утверждение, если имеется постепенный тренд или наклон поверхности. Универсальный кригинг рассчитывает тренды для этой поверхности.

Один из важнейших этапов универсального кригинга – вычисление дрефта. Дрифт представляет собой полиномиальную функцию, моделирующую среднее значение  $f$  для рассеянных точек. Остаток есть разность между дрефтом и фактическим  $f$  значениями рассеянных точек. Поскольку остатки должны быть стационарны, то кригинг выполняется на остатках и интерполяционные остатки добавляются в дрефт для вычисления оценки  $f$  значения. Для 2D кригинга полиномиальная функция дрефта представлена в следующем виде:

$$f(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy \quad (3.50)$$

Значения коэффициентов  $a_0 \dots a_5$  находят путем подгонки по методу наименьших квадратов в самом начале кригинга. При необходимости изменить порядок дрефта соответствующие коэффициенты приравниваются нулю. Например, наклон плоскости можно смоделировать, используя лишь коэффициенты  $a_0 \dots a_2$ .

#### Кригинг 3D

Имеется ряд различий между 2D и 3D версиями кригинга. Во-первых, если выполняется универсальный кригинг, то для расчёта *дрифта* используется больше коэффициентов. Дрифт в 3D версия кригинга находится следующим образом:

$$f(x, y, z) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5y^2 + a_6z^2 + a_7xy + a_8xz + a_9yz \quad (3.51)$$

где каждый из коэффициентов задаётся экспертом.

Основное различие между 3D и 2D версиями кригинга состоит в способе трактовки анизотропии. При вычислении экспериментальных вариограмм вектор направления задается двумя углами: азимутом и углом падения. Азимутальный угол измеряется в градусах по часовой стрелке из положительной оси Y; угол падения – отрицательными градусами от горизонтальной плоскости.

В типичном приложении анизотропия может быть смоделирована по трем ортогональным направлениям. Три экспериментальные вариограммы, соответствующие трем главным осям анизотропии, находятся путем тести-

рования нескольких комбинаций направляющего вектора. Комбинация, которая дает наибольшее различие диапазона для трех экспериментальных вариограмм, соответствует главным осям. Одна из осей должна быть выбрана пользователем как главная ось. Это обычно направление, вдоль которого экспериментальная вариограмма имеет наибольший ранг (наибольшую непрерывность).

После определения трех осей анизотропии они должны быть описаны посредством трех углов: простирания, падения и наклона, которые должны быть учтены при расчёте экспериментальной вариограммы и подбора моделей для кригинга.

#### Анизотропия

Некоторые показатели проявляют анизотропию, то есть корреляция между рассеянными точками изменяется с расстоянием. Например, при интерполяции в плоскости вертикального сечения геологического профиля такие параметры, как пористость и коэффициент фильтрации, обычно проявляют анизотропию. Это следствие того, что осадочные породы обычно отлагаются горизонтальными пластами, и некоторая рассеянная точка с приблизительно той же горизонтальной позицией, что и узел интерполяции, должна иметь больший вес, чем более близкая рассеянная точка выше или ниже узла интерполяции. Это выполняется путем геометрического шкалирования данных в одном из главных направлений анизотропии.

Анизотропия обычно выявляется методом проб и ошибок. Генерируются пары экспериментальных вариограмм, каждая пара сдвинута от каждой другой на азимутальный угол  $90^\circ$ . Если анизотропия существует, то ранги этих двух вариограмм будут отличаться. Если данные изотропны, то азимутальный угол будет оказывать незначительное влияние на результирующую экспериментальную вариограмму. Углы, при которых пары экспериментальных вариограмм имеют наибольшие различия по рангам, являются главными осями анизотропии. В этом случае пользователем должна быть выбрана одна из осей в качестве главной оси (обычно вариограмма с большим рангом) и указан азимутальный угол. Теоретические аспекты анизотропии при моделировании месторождений более детально см. в работе [16].

#### **3.10.6. Метод имитации кондиций**

Стохастическая или имитация кондиций или условное моделирование (термин *Conditional Simulation* иногда переводится как *условное моделирование* [13]), представляет собой процесс, который создаёт множественные, равновероятные пространственные распределения случайных переменных или «реализаций», соответствующих измеренным в определенных позициях данным. Хотя в таких алгоритмах может использоваться (ко)кригинг, имитацию состояний массива ячеек или блоков регулярных



решеток нельзя отождествлять с интерполяцией. С геологической точки зрения, 2D имитация состояния базовых элементов, таких, как пачки горных пород и фациальные последовательности, можно рассматривать как некий количественный подход к классической проблеме проведения геологических разрезов в промежуточной области между разведанными пересечениями и участками опробования, например, обнажения или буровые скважины.

На практике проведение геологических разрезов требует восстановления имеющихся данных на основании понимания соответствующих стратиграфических связей с целью получения правдоподобного описания геологического строения месторождения. Аналогичные требования должны предъявляться к ведению геостатистических расчётов, поэтому компьютерная методика должна быть способна восстанавливать структуру пространственной изменчивости по данным наблюдений и генерировать геологически правдоподобные гетерогенные структуры. В противном случае полученные реализации, хотя и являются равновероятными, могут оказаться практически недостоверными. Таким образом, задача кондиционного моделирования состоит в том, чтобы сгенерировать пространственные распределения, согласованные с надёжно измеренными данными и выявить действительную картину пространственной изменчивости.

Как ручное проведение разрезов, так и кондиционное моделирование могут в той или иной степени верно отражать гетерогенность геологической среды и являться, очевидно, источником моделирования потока и переноса вещества. Хотя ручной подход порой осуществим для 2-D случая, тем не менее, для решения объёмных 3-D задач определено требуются автоматизированные или компьютерные методы вычислений. Всё же в автоматизированных методах должна присутствовать некоторая доля геологической «интуиции», которую геолог субъективно вручную привносит в проведенный разрез. Когда подход на основе кондиций оказывается успешным для нахождения геологически правдоподобного результата, то сразу появляются два очевидных преимущества перед ручным построением: (1) применимость к 3-D задачам и (2) возможность создавать множество альтернатив для оценки неопределенности.

При разведке нефтяных месторождений кондиционное 3-D моделирование может служить в качестве строительных блоков моделирования коллекторов и ловушек нефти, с возможностью оценки неопределенности подсчета запасов и эффективности схемы их извлечения.

Соответствующим образом в гидрогеологии кондиционное моделирование оказывается весьма полезным для построения реалистичных моделей водоносных горизонтов для оценки влияния гетерогенности на течение подземных вод и перенос загрязняющих веществ. При решении задачи прогнозирования обогатимости данные малообъёмного геологического опробования по отдельным участкам месторождения

могут быть с высокой степенью надежности распространены на остальную область минерализации.

Определенный ключ к решению проблем практического применения индикаторной (категориальной) геостатистики можно получить на основе установления связи модельных параметров с базовыми наблюдаемыми атрибутами, которые в случае индикаторных переменных – следующие:

- объёмные пропорции или содержания;
- средние размеры или длины (например, средняя мощность в вертикальном направлении);
- тенденции к смежности (как одна из категорий пород имеет тенденцию локализоваться в пространстве относительно другой);
- направление анизотропии;
- пространственные вариации вышеприведенных параметров.

Понимание влияния модельных параметров на улучшение кондиционного моделирования обусловлено тем, являются ли данные избыточными или редкими. Главное упрощение процедуры блочного моделирования состоит при этом в использовании транзитивных вероятностей вместо индикаторных кросс-вариограмм как меры пространственной изменчивости.

Геостатистический подход к блочному моделированию на основе кондиционной имитации состояний ячеек массива пород включает три главных шага:

- расчёт транзитивных вероятностей по данным геологического опробования в разведочных пересечениях;
- моделирование пространственной изменчивости на основе Марковских цепей;
- имитация состояния блоков, моделирование строения массива.

Подход на основе транзитивных вероятностей и Марковских цепей был разработан для того, чтобы способствовать включению геологической интерпретации и улучшению учёта пространственных кросс-корреляций (тенденций смежности) при построении геостатистических моделей. Дальнейшие детали теории, примеры и сравнения с другими геостатистическими методами можно найти в специальной литературе [13].

### **3.11. Создание комплексных геологических моделей**

#### **3.11.1. Операции с множествами**

После создания различных типов моделей отдельных геологических объектов возникает задача их объединения в комплексную цифровую модель месторождения ЦММ и поддержания этой модели в актуальном состоянии. При последующей детализации геометрии залежи на отдельных небольших участках или после обнажения фрагментов рудных тел в результате ведения горных работ ЦММ не моделируется полностью заново, а обновляется только в тех зонах, где были получены новые уточнённые данные. Схематически основные операции с множествами геологических

объектов и различных типов точечных, линейных, полигональных, сеточных, каркасных и блочных моделей представлены на рис. 3.22.

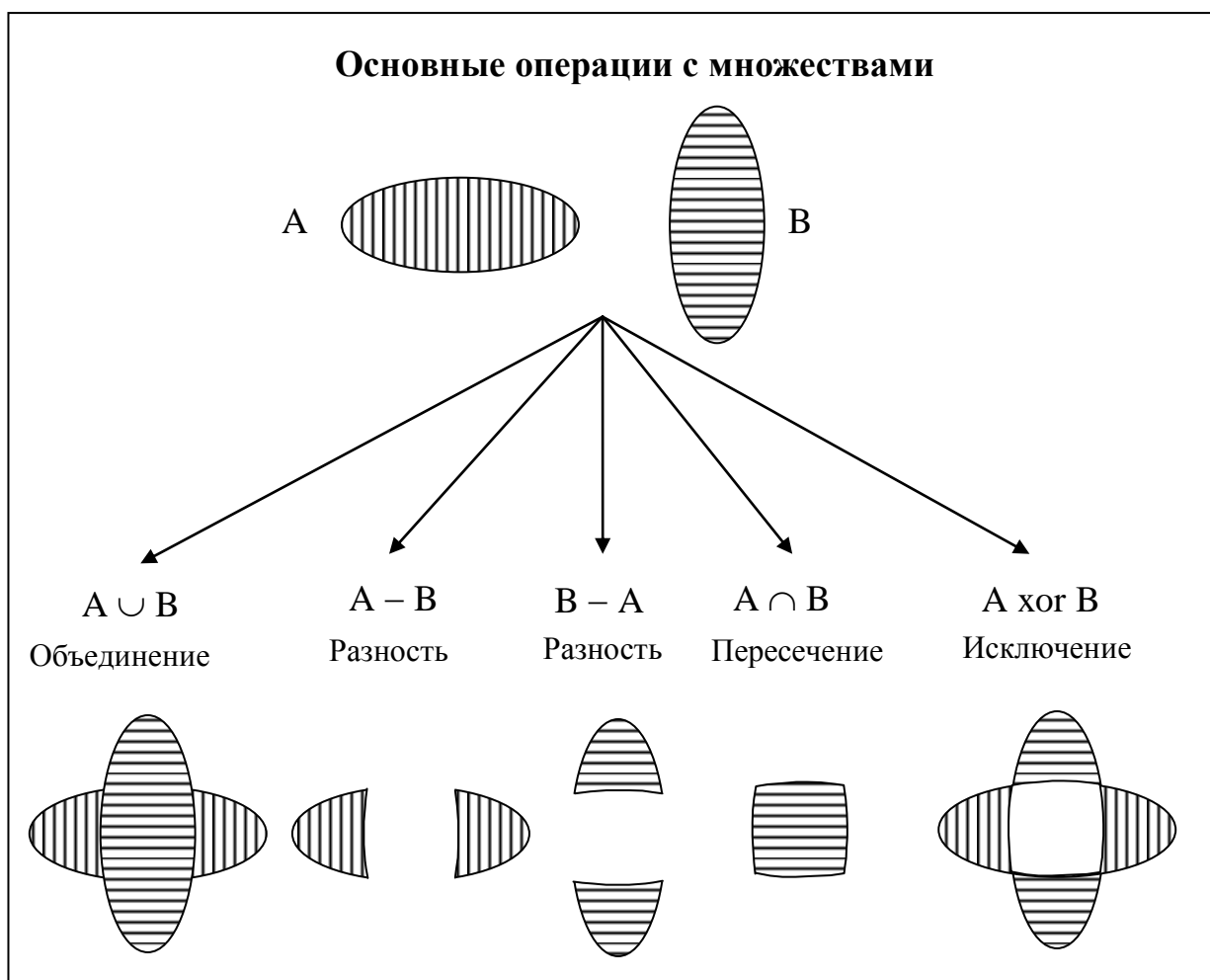


Рис. 3.23. Основные операции с множествами  
при работе с пространственными моделями рудных тел

Последовательное применение логических операций с множествами к двум пространственным геологическим моделям (A и B) позволяет объединять неограниченное число пространственных объектов в комплексную динамическую модель месторождения.

#### Требования к моделям

Если две модели, которые следует объединить, не имеют равных параметрических описаний, то необходимо изменить параметры одной из моделей. Можно использовать подходящую модель в качестве прототипа.

Любые поля атрибутов, таких, как литологические типы пород или содержание, обрабатываются согласно следующим правилам:

- если поля уникальны для каждой входной модели, то все эти поля записываются в выходную модель. Поля, в которых во входных моделях нет значений, считаются неопределенными;
- если в двух входных моделях есть одинаковые поля, то значения в полях второй модели B заносятся в поля первой модели A. Таким образом выполняется обновление модели A.

То есть для изменяющихся во времени геолого-маркшейдерских моделей в операциях объединения и пересечения более поздними по дате данными принято считать данные множества *B*. В результате этих операций модель *A* обновляется лишь в тех областях, где она пространственно совпадает с моделью *B*. Когда в базе данных моделей имеются специальные атрибутивные поля для даты или времени, то обновление модели *A* можно выполнять по дате внесения последних изменений в модель *B*.

Для объединения двух моделей типа GRID они должны иметь одинаковые параметрические описания (то есть общую точку привязки, одинаковый размер и число родительских ячеек). Блоки или ячейки должны быть также отсортированы по возрастанию значения индексов ИК.

При добавлении моделей лучше всего использовать первую модель в качестве прототипа для реструктурирования второй модели. При слиянии моделей результирующая модель обычно содержит больше блоков, чем их число во входных моделях. Если новая модель становится слишком большой для хранения на диске компьютера, то можно объединить блоки. Для этого может быть применена процедура переблокировки, при которой, однако, происходит усреднение показателей в более крупных блоках и часть информации теряется.

Последовательность объединения нескольких блочных моделей путём использования операций с множествами в итоговую комплексную блочную модель месторождения показана на рис. 3.23.

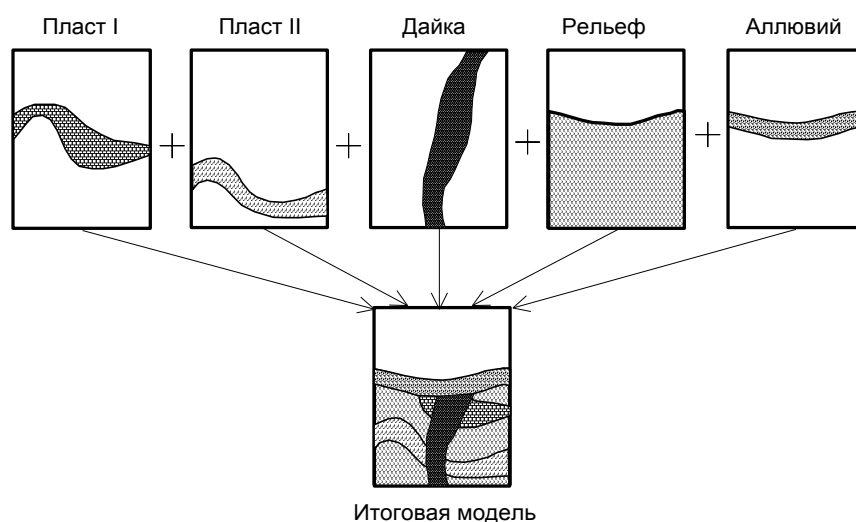


Рис. 3.24. Построение комплексной блочной модели залежи

### 3.11.2. Оценка сложности месторождений

Проблема оценки степени сложности месторождений рассматривалась многими исследователями. Так, проф. Букринский В.А. в [1] приводит формулу для экспертной оценки каждой ячейки регулярной блочной модели месторождения. Итоговый взвешенный параметр служит эвристической оценкой и может быть использован при классификации залежей,

однако результат значительно зависит от опыта экспертов. Для пластовых месторождений, например, угольных, им отмечается возможность применения такой характеристики, как отношения числа контактов руда – порода к общему числу контактов различных типов пород в разрезе.

В монографии Ломоносова Г.Г. [12] сложность месторождения увязывается с природной морфологией рудных тел и выбранной системой разработки. Однако отмечается, что для крупных залежей предложенная формула выявления сложности месторождения полностью определяется удельной поверхностью составляющих рудных тел.

Удельная поверхность рудной фазы – отношение площади поверхности к занимаемому объёму. Наиболее точно и достоверно определить величину удельной поверхности рудных тел в массиве можно путём проведения системы случайных секущих. Линейный метод стереологии случайных замкнутых множеств позволяет найти удельную поверхность руды по следующему простому соотношению [34] :

$$S_V = 4/\bar{l}_m, \quad (3.52)$$

где  $\bar{l}_m$  – средняя хорда (длина) пересечения рудного тела скважиной или случайно ориентированной линией.

Другими количественными мерами, которые чаще всего пользуются в стереологии, как разделе стохастической геометрии, являются  $P_P$  – удельная плотность точек,  $L_L$  – доля линий пересечений руды в общей длине линии,  $A_A$  – удельная доля площади рудных тел на плоском сечении,  $V_V$  – удельная доля объема рудных тел (содержание кондиционных тел полезного ископаемого в контуре месторождения). Причём для указанных мер справедливо соотношение Кавальери (3.18), на основе которого можно по определенным в сечениях или на случайных линиях значениям вычислить объёмные величины.

Моделирование стохастических процессов путём генерации рудных тел на компьютере показало [35] , что удельную поверхность рудных тел нельзя использовать как показатель сложности месторождений с переменной плотностью распределения рудных тел в пространстве. На *Рис.3.25* приведены примеры блочных моделей месторождений с одинаковым объёмом полезного ископаемого и равной удельной поверхностью рудных тел.

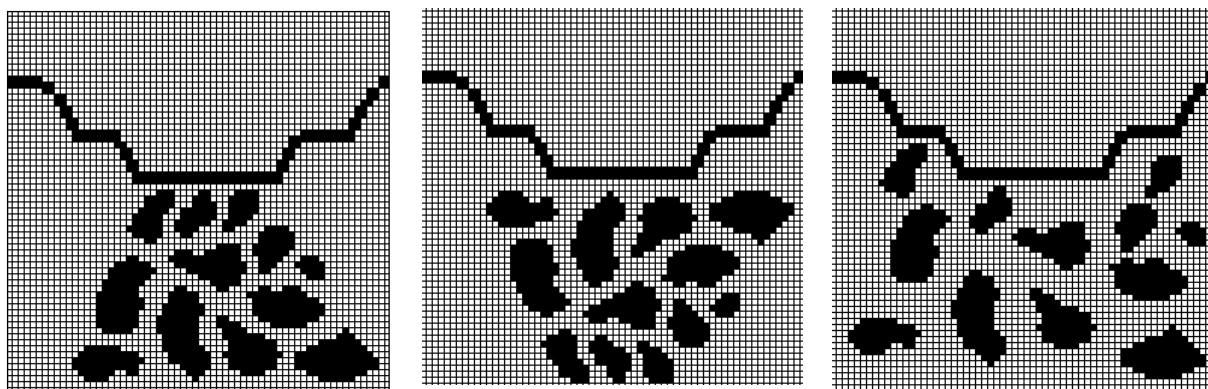


Рис.3.25. Варианты размещения запасов руд с одинаковым объёмом и удельной поверхностью рудных тел

Очевидно, что при вертикальной или горизонтальной зональности расположения рудных тел с одинаковой удельной поверхностью технологическая сложность извлечения кондиционных блоков будет разной. Поэтому необходимы дополнительные факторы учета топологии залежи, компактности рудных тел и глубины залегания оруденения, что в целом существенно влияет на энергопотребление при экскавации и транспортировке горной массы.

Для взорванной и дезинтегрированной горной массы наиболее полной характеристикой минерального сырья является нормированная дифференциальная функция плотности распределения объёма руды по крупности и качеству кусков  $\gamma(C, D)$ , где  $C$  – содержание полезного компонента;  $D$  – крупность фракции. В то же время для монолитного массива могут быть спрогнозированы спектры раскрытия рудных тел (по аналогии с раскрытием зерен ценного минерала в процессах дробления и измельчения) при варьировании размеров блоков. Для конкретного месторождения размер элементарных блоков целесообразно выбирать равным объёму селективности выемки, который определяется, главным образом, размером ковша погрузчика или экскаватора. В этом случае дифференциальная характеристика, условная функция плотности распределения блоков по качеству при заданной крупности  $\gamma(C_i|D)$  будет характеризовать качество руды месторождения или его участка. Теперь можно определить для каждого элементарного блока функцию переноса  $\tau(D_j|C$  в точку формирования рудопотока. По умолчанию точка выбирается в начале координат  $[0,0,0]$ . Тогда интегральный показатель сложности извлечения кондиционной руды может быть представлен формулой [35]:

$$\eta = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma(C_i|D) \tau(D_j|C). \quad (3.53)$$

Предполагается, что показатель сложности должен быть пропорционален удельной поверхности, объёму залежи и некоторой средней глубине залегания  $H$  различных участков оруденения. Таким образом, эксплуатационную сложность извлечения кондиционных блоков руды можно оценить по следующей формуле:

$$\eta = S_V \frac{H}{\sum_{i=1}^k m_i}, \quad (3.54)$$

где  $S_v$  – удельная поверхность рудных тел с содержанием полезного компонента выше минимально промышленного содержания;

$H$  – средняя глубина рудного тела;

$k$  – число технологических сортов руды;

$m_i$  – доля некоторого  $i$ -го технологического сорта в общем объеме добычи рудника.

Алгоритм оценки сложности включает следующую последовательность шагов:

1. На основе построенных каркасных моделей рудных тел и геостатистической интерполяции подготавливается 3D GRID – блочная модель месторождения со стандартным размером ребра в 1 км, которая затем преобразуется в 2D GRID модель методом «осаждения слитка».

2. Центр тяжести «слитка» помещается в точку с координатами  $(X_{\max} - X_{\min})/2, (Y_{\max} - Y_{\min})/2$ .

3. Эксплуатационная сложность извлечения запасов из месторождения твердых полезных ископаемых определяется произведением 1) дифференциальной функции раскрываемости рудных тел при заданных объемах селективности выемки на 2) функцию плотности распределения удельных энергетических затрат по перемещению каждого элементарного блока в условную точку начала формирования рудопотока.

4. Структурно-морфологическая геологическая сложность месторождения корректируется за счет учета гидрогеологических, геомеханических, энергетических, технологических и экологических факторов, повышающих или понижающих интегральную эксплуатационную сложность освоения недр месторождения.

Вопросы оценки технологической сложности встают при оптимизации контуров отработки месторождений открытым способом по максимуму прибыли в условиях геолого-экономических и экологических ограничений. Другой класс оценок сложности геологического строения залежи может быть основан на привлечении операций математической морфологии (эрозии, дилатации, вскрытия и замыкания) к оценке раскрываемости как рудных тел, так и сформированных минеральными фазами рудных текстур и структур. При добыче многокомпонентного минерального сырья и утвержденных кондициях на условный металл оценка технологической сложности залежи может быть получена по каркасной оболочке тела, поверхность которого соответствует бортовому содержанию условного металла.

### 3.12. Визуализация моделей и отображение карт

Визуализация пространственных 3D моделей осуществляется с помощью встроенных в ГИС современных графических средств, разрабатываемых на базе таких библиотек, как OpenGL ([www.opengl.org](http://www.opengl.org)) и DirectX. Для придания реалистичности отображению объемных горно-геологических моделей требуется иметь компьютер с высокопроизводительным процессором и мощной видеокартой.

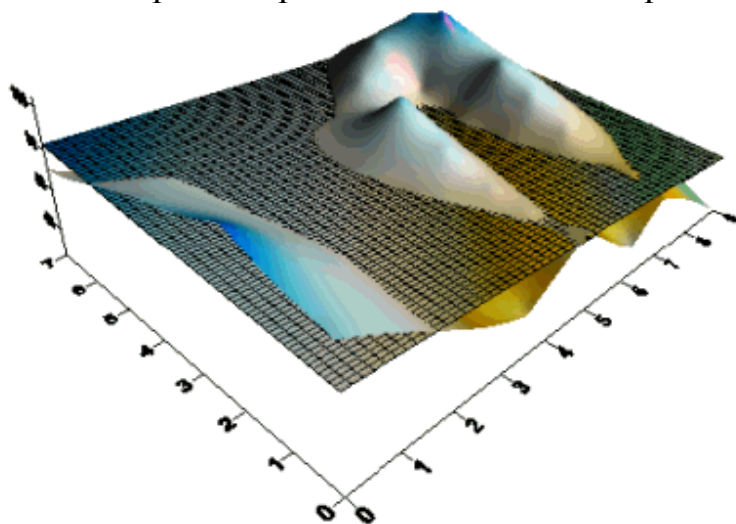


Рис.3.26. Пример модели рельефа с подземной геологической структурой

Соответствующее программное и аппаратное обеспечение позволяет превратить математическую модель месторождения в симулятор виртуальной реальности (рис.3.25). Это позволяет значительно расширить круг решаемых с помощью подобных НГИС задач, используя систему как тренажер транспортного оборудования для обучения технике

безопасности, автоматизации диспетчерского управления, построения телевизионных систем расширенной реальности (микшированной или аугментальной), перспективного планирования, демонстрации потенциальных возможностей горного производства и создания презентаций.

Комбинированная модель поверхности карьера с моделью рельефа представлена на рис. 3.26.

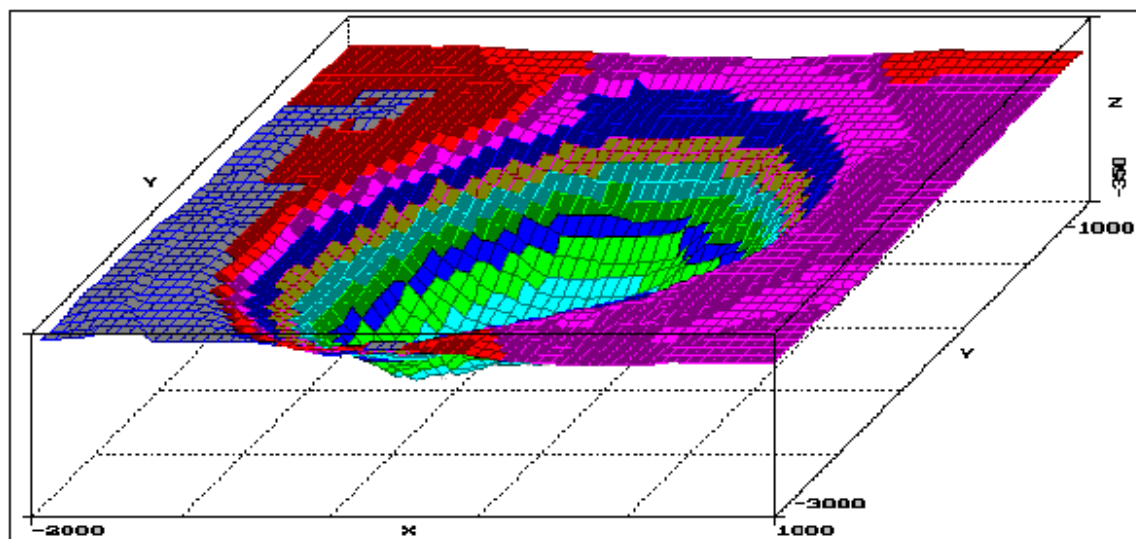


Рис. 3.27. Комбинированная цифровая модель проектной поверхности карьера и окружающего рельефа местности



При подсчете объемов выемки применяется булева операция вычитания моделей поверхностей рельефа до и после извлечения запасов из недр или проектных и рабочих контуров карьера. Визуализация модели разности объёмов представлена на рис. 3.27.

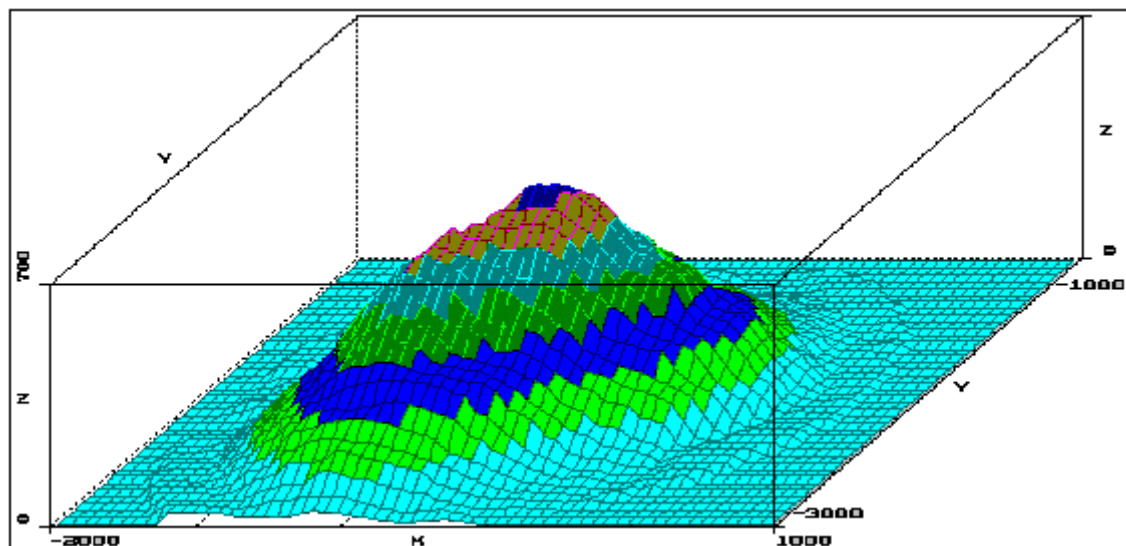


Рис. 3.28. Разность моделей поверхности рабочего и проектного карьеров

Рис. 3.28 иллюстрирует объединение модели скважин геологической разведки с моделью поверхности рельефа местности.

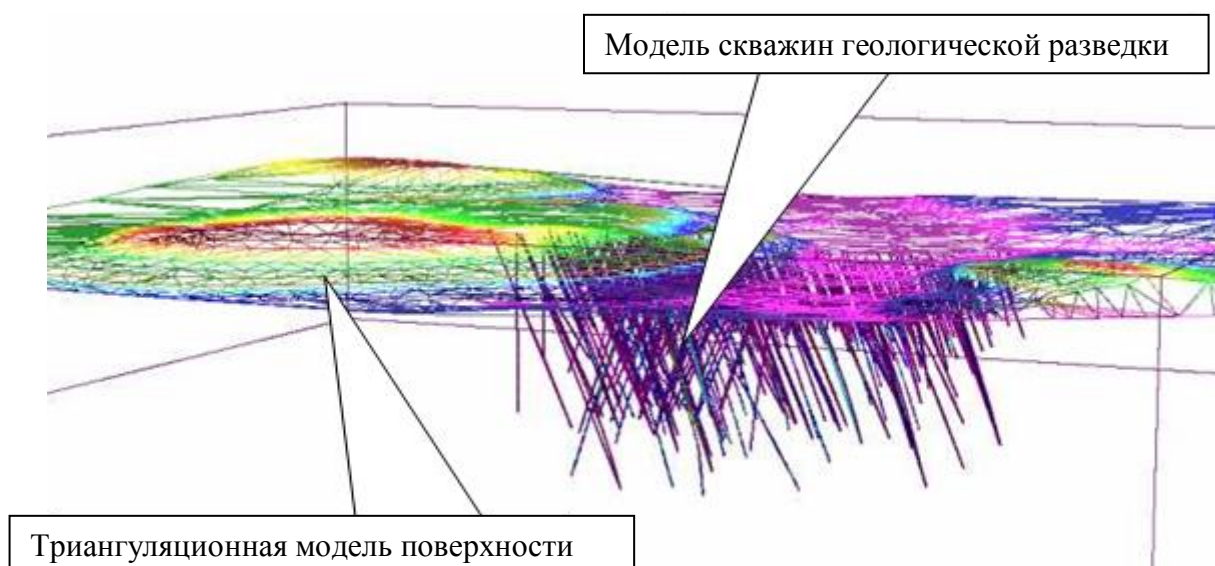


Рис. 3.29. Объединение модели скважин с триангуляцией рельефа

Пример визуализации трехмерной блочной модели (GRID 3D) рудной залежи показан на рис. 3.29.

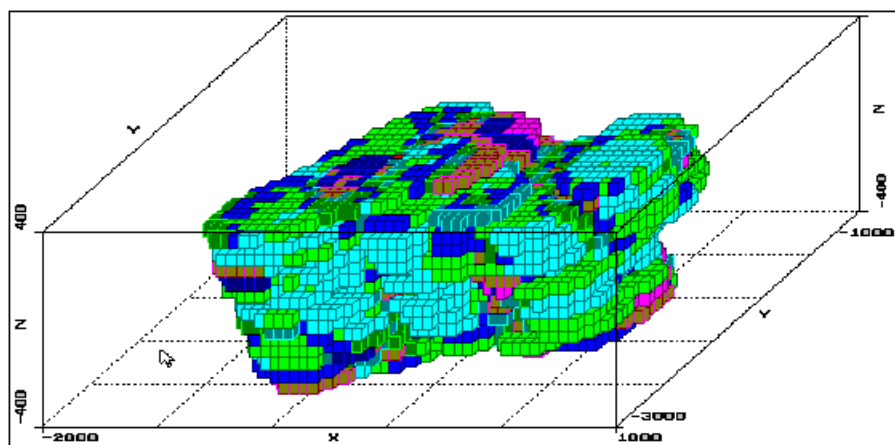


Рис. 3.30. Трехмерная блочная модель рудной залежи

На рис. 3.30 представлена итоговая комплексная модель рабочего карьера по добыче руды в горной местности.

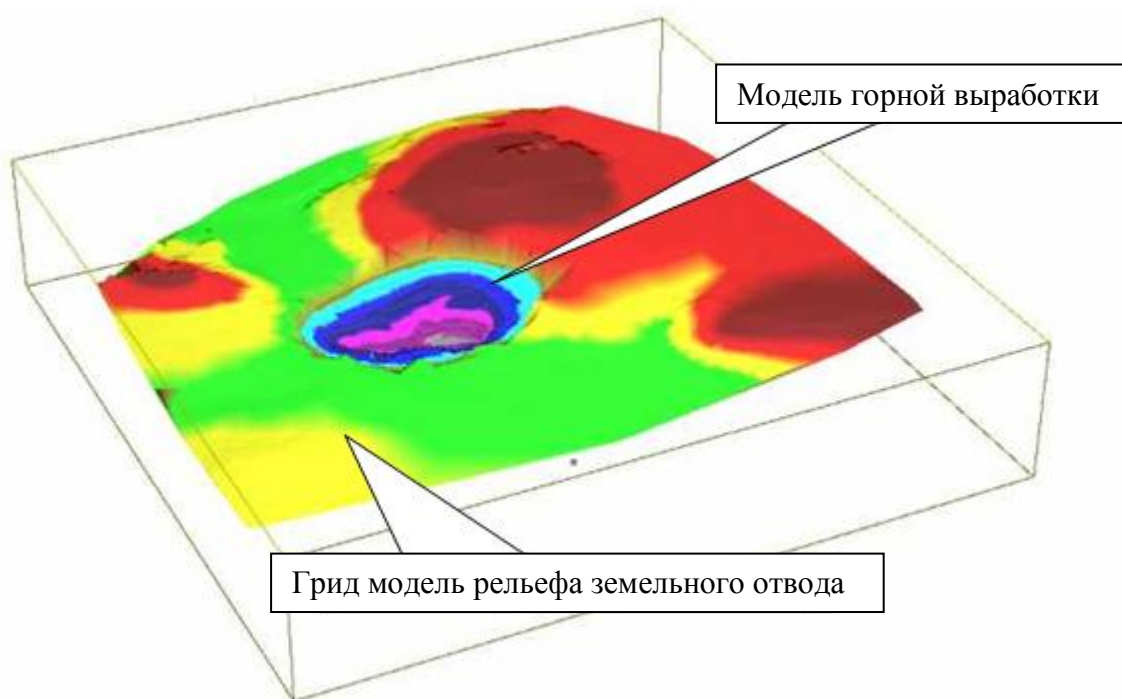


Рис. 3.31. Комплексная блочно-каркасная модель карьера и горного отвода

Двумерные карты, построенные по сечениям или совмещенным планам моделей, могут содержать множество слоев – точек, меток, ярлыков, изолиний и т.д. Изолинии карт создаются либо с использованием метода триангуляции, либо на основе построенных моделей регулярных решеток (GRID 2D/3D).

Плоские карты являются 2D картами, показывающими положение проб или поверхности (или подземной поверхности раздела), высоты, мощности, концентрации и т.д. Они включают точечные объекты, контур-

ные линии, закрашиваемые полосы между контурами, метки, маркеры и текстовые надписи (рис.3.31).

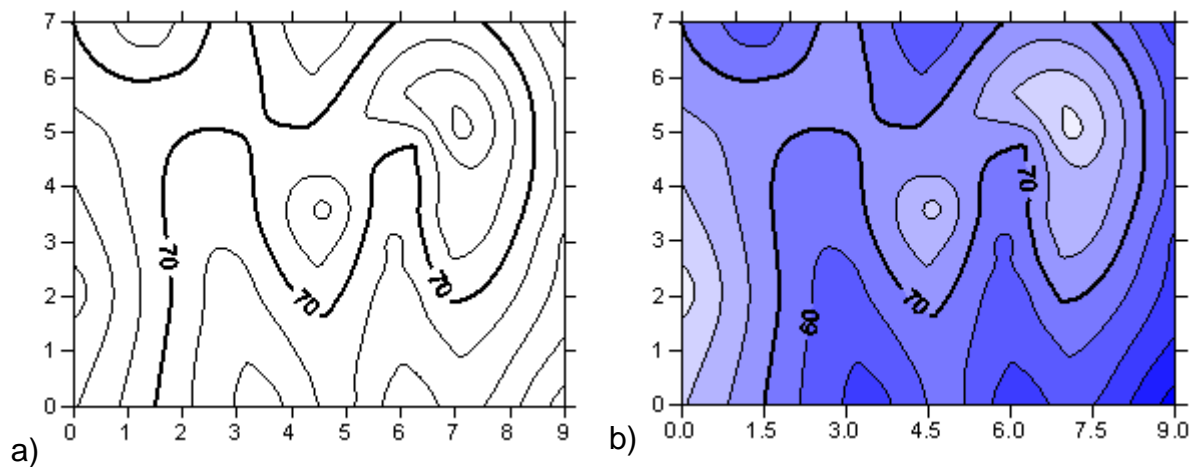


Рис.3.32. Построение карт изолиний по регулярной решетке:  
а) контуры значений показателя, б) закрашенные контуры изолиний

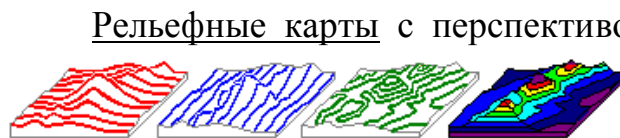


Рис.3.33. Пример рельефной карты горной местности

Рельефные карты с перспективой относятся к 3D картам, показывающим высоты, концентрации и т.д. в виде «плавающих» поверхностей. Они также могут быть представлены картами профилей или «сеточных» карт с рельефными линиями, закрашенными контурами, метками высотных отметок и текстовыми подписями (рис.3.32).

Совмещенные карты представляют собой покрытие модели рельефа (обычно триангуляционную или полигональную) растровыми и векторными тематическими слоями (рис. 3.33).



Рис. 3.34. Отображение 3D рельефа с наложением растрового тематического слоя (слева) и визуализация участка карьера по добыче строительных материалов (справа)

## Глава 4

### Подсчет запасов полезных ископаемых

Понятие «запас полезного ископаемого» включает весовое или объемное количество полезного и его компонентов, характеристику его формы, условий залегания, размещения свойств; технологию переработки и использования, а также степень изученности и подготовленности к добыче и условия ведения горных работ. Подсчетом запасов называется определение количества минерального сырья в недрах.

Подсчет запасов выполняется на основе моделирования залежи и является завершающим этапом геолого-промышленной оценки месторождения. Его результаты ложатся в основу строительства проектируемых горнодобывающих предприятий или планирования работы действующих рудников, шахт и карьеров. Разведанные и правильно учтенные запасы полезных ископаемых предоставляют надёжную основу для дальнейшего развития горнодобывающей отрасли, обоснования требуемых капиталовложений и привлечения новых инвестиций. В связи с этим подсчёт запасов всех видов полезных ископаемых имеет практическое значение не только для отдельных горнодобывающих компаний, но и для государства в целом.

Современные компьютерные технологии геологопромышленной оценки месторождений открывают возможность обработки больших массивов информации с помощью специализированных программных средств. Необходимые данные к подсчёту запасов должны включать: пространственное распределение элементов, минералов и горных пород; степень изменчивости показателей; содержание компонентов и мощности рудных тел; условия залегания и отработки полезного ископаемого; структурно-морфологические особенности минерализации; гидрогеологические и инженерно-геологические условия эксплуатации и т.д. В ходе детальной разведки месторождения первичные маркшейдерские замеры, геофизические измерения и результаты геологического опробования формируют базу данных, используемую для построения цифровой модели месторождения и оценки величины и качества запасов. Последующая эксплуатационная разведка и оперативное опробование на участках выемки позволяют постоянно дополнять имеющуюся базу данных и детализировать состав и структуру месторождения по мере его освоения.

Прежде чем выполнять непосредственно процедуры подсчёта запасов, в рамках принятой классификации разведанности или по степени подготовленности к добыче, для месторождения должны быть определены:

- кондиции на минеральное сырьё;
- параметры для подсчёта запасов;
- способы оконтуривания рудных тел;
- поправочные коэффициенты к исходным данным;

- наиболее подходящий метод подсчета запасов.

Без обоснования и точного определения промышленных кондиций, подсчётных параметров и поправочных коэффициентов результаты компьютерного подсчёта запасов не могут быть правильно оценены и приняты в качестве достоверных с допустимой погрешностью измерения.

Замечание. Хотя в ряде работ по геометризации месторождений для обозначения последовательности операций подсчета запасов используется слово «способ», однако в основополагающей отечественной геологической литературе по данному вопросу [[4]] и в современной мировой научной литературе по компьютерному моделированию месторождений большее распространение получил термин *метод* (англ. *method*), который используется нами для рассмотрения различных вариантов компьютерного подсчета запасов.

#### 4.1. Классификация запасов по степени разведанности

Все подлежащие учету запасы полезных ископаемых должны быть подсчитаны по категориям разведанности в соответствии с принятой классификацией запасов месторождений и прогнозных ресурсов полезных ископаемых<sup>1</sup>.

В зависимости от степени разведанности месторождений, изученности качества сырья и горнотехнических условий разработки запасы разделяются на четыре категории: **A**, **B**, **C<sub>1</sub>**, **C<sub>2</sub>**. Они подсчитываются в контурах рудных тел, месторождений и участков. Для выяснения потенциальных возможностей рудных зон, полей, районов и бассейнов на основе общих геологических представлений, кроме того, выделяют так называемые прогнозные запасы.

Категория запасов в подсчетном блоке определяется следующими условиями.

Категория A. Запасы подсчитываются в контуре разведочных выработок. Разведанность блока обеспечивает:

- полное выяснение условий залегания, формы и строения тела полезного ископаемого;
- выделение и оконтуривание природных типов и промышленных сортов сырья, рудных столбов, некондиционных и безрудных участков внутри тела полезного ископаемого;
- полное выяснение качества и технологических свойств сырья;
- полное выяснение горнотехнических условий разработки месторождения.

Категория B. Запасы подсчитываются в контуре разведочных выработок с включением ограниченной зоны экстраполяции при простом залегании, малой изменчивости залежи и качества сырья или надежно установ-

---

<sup>1</sup> Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых // Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых Министерства природных ресурсов Российской Федерации. – М., 1997. –16 с.

ленной их закономерной изменчивости. При указанных условиях допустима также подвеска запасов категории **B** к блокам с запасами категории **A**. Степень разведанности обеспечивает:

- выяснение особенностей залегания, формы и строения рудных тел;
- выявление рудных столбов, безрудных и некондиционных участков внутри рудного тела, природных типов и промышленных сортов сырья, а также определение закономерностей их распределения и пространственного соотношения, без точного их оконтуривания;
- выяснение качества и основных технологических свойств полезного ископаемого и основных горнотехнических условий его разработки.

Категории  $C_1$  и  $C_2$ . Запасы подсчитываются в контурах блоков, построенных на основе широкой интерполяции и экстраполяции данных разведочных выработок.

В зарубежной практике оценки месторождений в настоящее время применяется несколько различных систем классификации ресурсов и запасов. Для сближения позиций национальных систем в ООН была разработана так называемая рамочная классификация запасов для учёта степени освоения месторождений. Схематически она представлена на Рис. 3.35 в виде набора проиндексированных элементов в координатной системе с тремя осями изученности. По некоторым позициям международная классификация запасов пересекается с российской классификацией запасов твёрдых полезных ископаемых, поэтому при необходимости для российских категорий запасов можно найти соответствующую группу индексов рамочных запасов по осям геологической, технологической и экономической изученности месторождения.

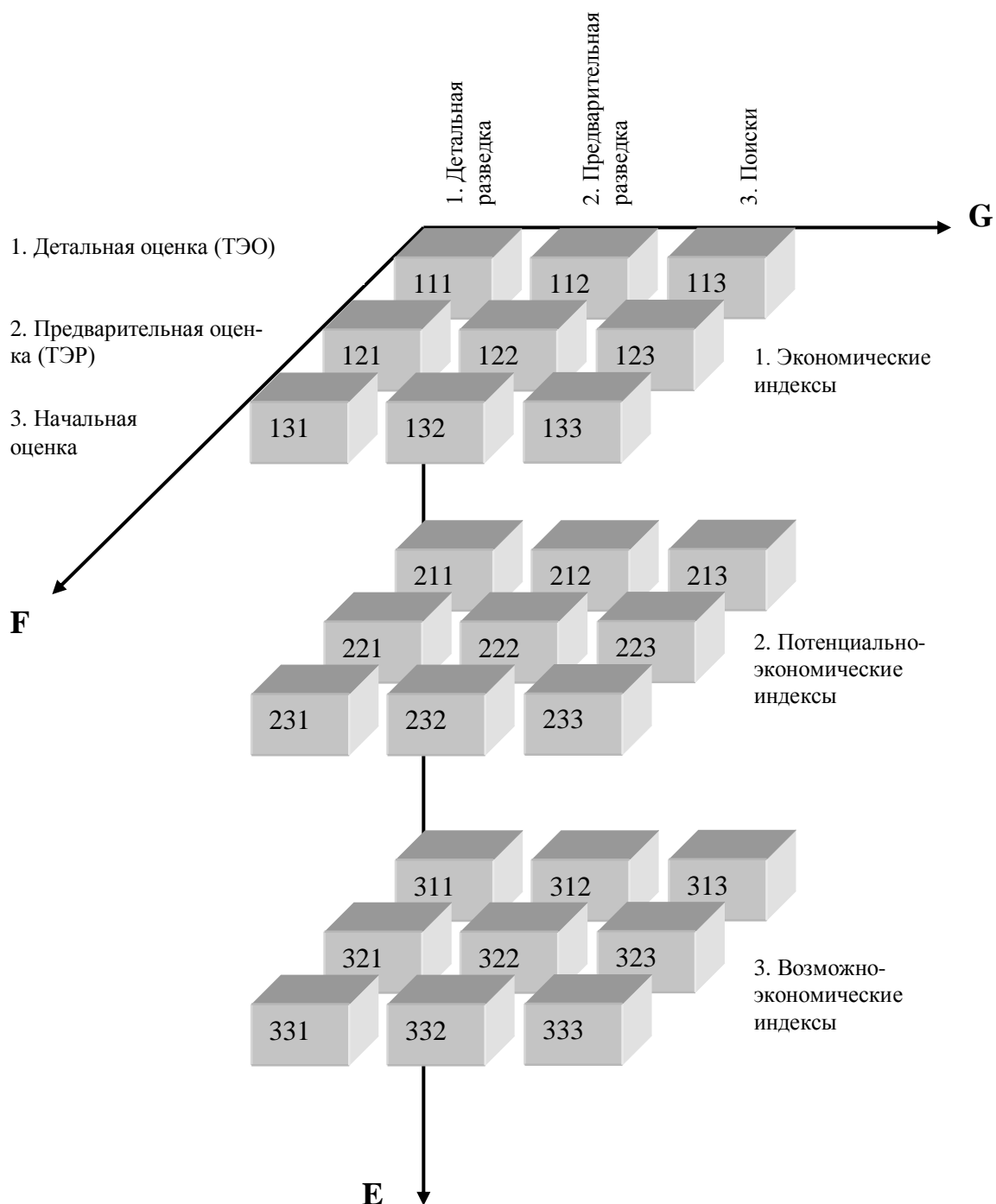


Рис. 3.35. Международная рамочная классификация запасов/ресурсов ООН: G – ось геологической изученности; F – ось технологической изученности; E – ось экономической изученности

В действующей западной классификации<sup>1</sup> идентифицированные минеральные ресурсы, в частности, подразделяются, на предполагаемые (Inferred), установленные (Indicated) и измеренные (Measured), а запасы – как вероятные (Probable) и достоверные (Proved). Соответствие западной и

<sup>1</sup> Code for Reporting of Mineral Exploration Results, Mineral Resources and Mineral Reserves // European Institution of Mining and Metallurgy and Institute of Geologists of Ireland. 2001. – 126 p



русской систем классификации может быть установлено по схеме [36], представленной на Рис. 3.36.

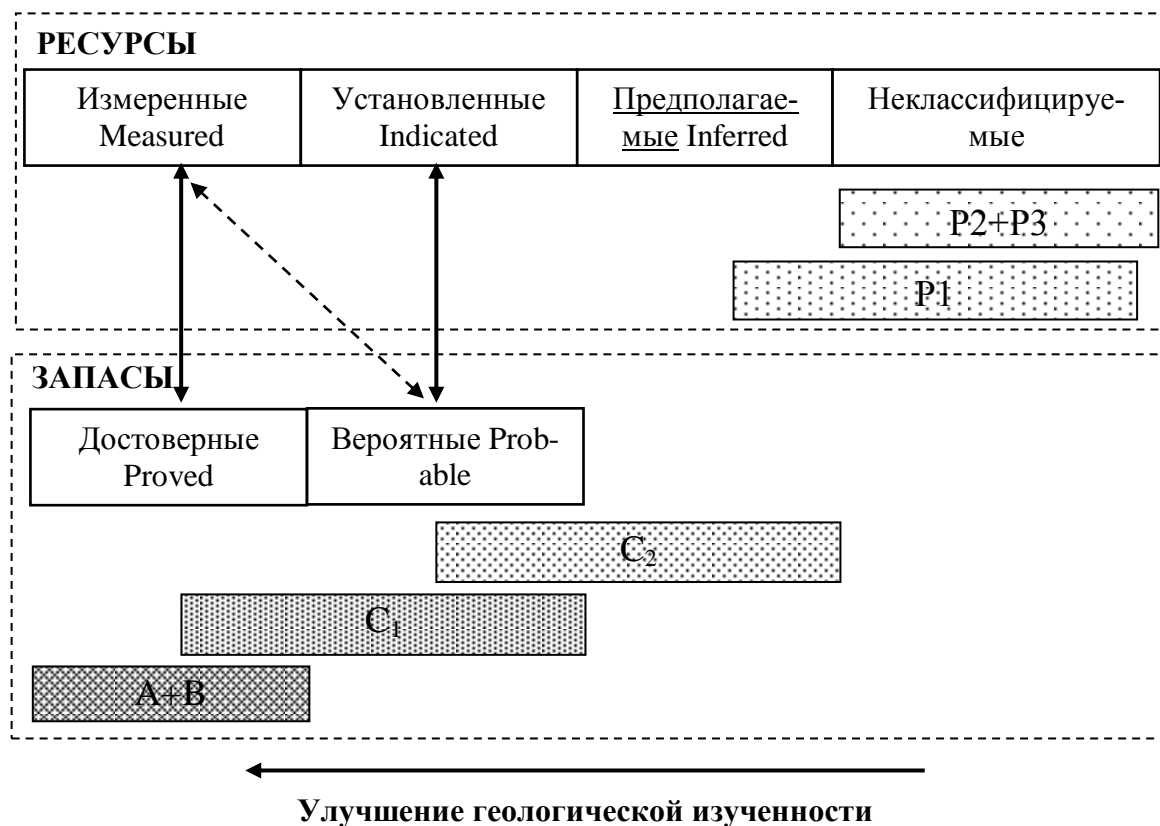


Рис. 3.36. Сопоставление русской и западной классификаций ресурсов и запасов

Для перевода полезных ископаемых из ресурсов в запасы, согласно западной классификации, требуется учесть ряд горно-металлургических, экономических, маркетинговых, законодательных, социальных и правительственных факторов. В результате проведения детального геологического изучения при составлении ТЭО (Feasibility study) и затем при эксплуатации месторождения ранее установленные (Indicated) и измеренные (Measured) прогнозные минеральные ресурсы переводятся в вероятные (Probable) и достоверные (Proved) запасы, которые частично соответствуют русским категориям запасов C, B и A. Необходимость знания русскими специалистами западной классификации обусловлена тем, что практически все коммерческие программные системы горно-геологического моделирования ориентированы на экспертов, применяющих именно эту классификацию ресурсов и запасов.

## 4.2. Кондиции для подсчета запасов

Кондиции в соответствии с этапами изучения и освоения месторождений разделяются на *разведочные* и *эксплуатационные*. В настоящее время обоснование кондиций выполняется в соответствии с «Временным ру-



ководством по содержанию, оформлению и порядку представления на государственную экспертизу технико-экономических обоснований (ТЭО) кондиций на минеральное сырьё».

**Разведочные** кондиции разрабатываются по результатам различных стадий разведки и геолого-экономической оценки месторождений для оконтуривания и подсчета запасов полезных ископаемых и определения их промышленной ценности.

**Эксплуатационные** кондиции разрабатываются в процессе отработки месторождения при необходимости уточнения граничных требований к качеству извлекаемого полезного ископаемого и условиям его залегания применительно к конкретным частям месторождения: этажам, подэтажам, эксплуатационным блокам, панелям, выемочным участкам и др., существенно отличающимся по геологическим, горнотехническим, технико-экономическим, технологическим и иным условиям отработки от средних показателей, принятых при обосновании разведочных кондиций, а также для обеспечения стабильной безубыточной работы предприятия в период резкого изменения рыночной конъюнктуры на минеральное сырьё, продукты его переработки и цен на энергоресурсы.

Разведочные кондиции разделяются на временные и постоянные.

**Временные** разведочные кондиции разрабатываются по материалам промежуточных стадий разведки месторождения и используются для предварительной оценки его масштабов, экономической значимости и обоснования целесообразности инвестирования на объекте дальнейших разведочных работ. В зарубежной практике этому понятию соответствует предварительное ТЭО.

**Постоянные** разведочные кондиции разрабатываются по материалам завершенных геологоразведочных работ и имеют своей целью установление на основе выполненного с достаточной степенью детальности технико-экономического обоснования масштабов и промышленной ценности месторождения для определения целесообразности и экономической эффективности его промышленного освоения. За рубежом этому понятию соответствует заключительное ТЭО.

#### **4.2.1. Параметры кондиций для балансовых запасов**

Параметры кондиций – предельные значения натуральных показателей для подсчета запасов – должны иметь геологическое, горнотехническое, технологическое, экологическое и экономическое обоснование.

В кондиции для подсчета балансовых запасов металлов и нерудного сырья включают следующие параметры:

- *минимальное промышленное содержание* полезного компонента, при котором извлекаемая ценность минерального сырья обеспечивает возмещение всех затрат на получение товарной продукции при нулевой рентабельности разработки. Оно должно устанавливаться применительно к подсчетному блоку. В отдельных случаях для месторождений дефицитных видов сырья при наличии специального геолого-экономического обоснования допускается использование величины минимального промышленного со-

держания для группы блоков или в целом по месторождению, если это не приведет к существенному ухудшению экономических показателей. Для месторождений твердых полезных ископаемых при соответствующих расчетных обоснованиях минимальное содержание полезного компонента в единичных блоках может устанавливаться меньшим, чем минимальное промышленное, установленное при нулевой рентабельности, если это не приведет к существенному ухудшению экономических показателей по месторождению в целом;

- *бортное содержание* полезных компонентов в пробе, устанавливаемое при отсутствии четких геологических границ рудного тела для оконтуривания запасов по его мощности (пересечению разведочной выработки) на основе повариантных технико-экономических расчетов. Число вариантов и их «шаг» должны обеспечивать выбор оптимальной величины этого параметра. Как правило, используется не менее трех вариантов со значениями большими и меньшими по отношению к рекомендуемому;

- *минимальное содержание* полезных компонентов по пересечению рудного тела (полезного ископаемого) выработкой для его оконтуривания по простиранию и падению, используемое наряду с бортовым и минимальным промышленным содержаниями во избежание неоправданного исключения из числа балансовых запасов краевых частей подсчетных блоков, содержание полезных компонентов в которых ниже минимального промышленного, но достаточно для покрытия предстоящих затрат по их добыче и переработке; определяется повариантными или прямыми технико-экономическими расчетами;

- *максимально допустимое содержание вредных примесей* в подсчетном блоке, по пересечению, интервалу или в пробе;

- *требования к выделению типов и сортов* полезного ископаемого, исходя из технологических свойств, определяющих различные способы переработки или различные области использования сырья. В необходимых случаях устанавливается минимальный выход товарной продукции и основного сорта сырья;

- *перечень попутных компонентов* (раздельно по технологическим типам полезных ископаемых), по которым необходимо подсчитывать запасы, в случае необходимости – минимальное содержание этих компонентов по пересечению или подсчетному блоку;

- *коэффициенты для приведения содержаний* полезных попутных компонентов к содержаниям условного основного компонента, минимальные содержания компонентов, учитываемые при таком приведении;

- *минимальный коэффициент рудоносности* в подсчетном блоке для месторождений с прерывистым или гнездовым распределением полезных компонентов, когда кондиционные руды по геологическим или горно-геологическим критериям не могут быть оконтурены и подсчет запасов

производится в контурах рудоносной зоны (залежи, тела) статистически; при этом должны быть обоснованы условия оконтуривания рудоносной зоны (залежи, тела), а также возможность и целесообразность селективного способа разработки рудных обособлений, учитываемых с помощью коэффициента рудоносности;

- *минимальные мощности тел* полезных ископаемых (пластов, залежей, жил и т.д.) или соответствующий минимальный метропроцент (метрограмм), при необходимости – минимальные мощности полезного ископаемого по типам, сортам (маркам);

- *максимально допустимая мощность прослоев* пустых пород или некондиционных руд, находящихся внутри контура полезного ископаемого и включаемых в подсчет запасов;

- *минимальные запасы в изолированных телах* полезных ископаемых, участках;

- *максимальная глубина* подсчета запасов, предельный коэффициент вскрыши или максимально допустимое соотношение мощностей вскрышных пород и полезного ископаемого; требования, предусматривающие проведение подсчета запасов в установленных ТЭО контурах разработки; границы участков первоочередной отработки;

- *границы* и основные параметры для подсчета запасов за намеченным ТЭО контуром разработки;

- *требования к физико-механическим и другим свойствам* для отдельных видов минерального сырья, регламентируемые действующими стандартами, техническими условиями или обусловленные результатами технологических испытаний;

- *требования к горнотехническим условиям* разработки, качеству сырья, технологическим свойствам для подсчета балансовых запасов совместно залегающих полезных ископаемых (перекрывающих, подстилающих или вмещающих пород), доступных для разработки.

При комплексной оценке нерудного сырья требования к его качеству и горнотехническим условиям разработки устанавливаются применительно к каждой из намеченных областей использования сырья; при определении параметров кондиций для полезных ископаемых, применяемых в производстве строительных материалов, необходимо соблюдать нормы радиационной безопасности.

В зависимости от геологического строения месторождения, горно-геологических условий его разработки, состава полезного ископаемого и требований промышленности кондициями устанавливаются только те из перечисленных показателей, которые необходимы для геолого-экономической оценки данного месторождения.

В кондиции для подсчета балансовых запасов углей (горючих сланцев) включаются следующие параметры:

- *минимальная истинная мощность пластов угля* (сланцев), а в пластах сложного строения – частей пласта, подлежащих самостоятельной разработке; для пластов сложного строения и селективно разрабатываемых частей этот параметр определяется по сумме угольных (сланцевых) внутрипластовых породных прослоев, а также неустойчивых пород кровли и почвы пластов, подлежащих совместной выемке;

- *максимальная мощность породных прослоев*, включаемых в пласт сложного строения при валовой его выемке, или минимальная мощность таких прослоев, предназначенных к селективной выемке и разделяющих пласт на части, подлежащие самостоятельному подсчету и разработке;

- *максимальная зольность угля* (для сланцев – минимальная теплота сгорания в пересчете на сухое топливо, для пластов сложного строения (или их частей, подлежащих селективной выемке) дополнительно – максимальная среднепластовая зольность с учетом засорения угля (сланца) внутрипластовыми породными прослоями и извлекаемыми при добыче неустойчивыми породами кровли и почвы пласта;

- *перечень попутных компонентов* (раздельно по технологическим типам полезных ископаемых), по которым необходимо подсчитывать запасы, в случае необходимости – минимальное содержание этих компонентов по пересечению или подсчетному блоку;

- *пласты, участки, блоки не будут отработаны* из-за особо сложных горно-геологических условий или вследствие малого количества запасов, разобщенности, интенсивной нарушенности и т.д.;

- *предельная глубина разработки запасов*: для открытого способа дополнительно – предельные коэффициенты вскрыши, границы подсчета запасов в экономически обоснованных контурах разработки и за пределами этих контуров, границы участков первоочередной отработки;

- *специальные требования к качеству углей* (сланцев) – спекаемость, выход смол, содержание серы, фосфора и т.д.

Кондициями для подсчета запасов рапы и озерных солей предусматриваются:

- *минимальные среднегодовые содержания полезных компонентов* (средние промышленные содержания) в рапе;

- *максимально допустимые содержания вредных примесей* в рапе;

- *требования к выделению всех компонентов рапы* (ее типов и сортов) при подсчете запасов исходя из технологических свойств, определяющих различные способы переработки или различные области использования сырья;

- *раздельный подсчет* балансовых динамических и статических запасов рапы.

Кондициями для подсчета эксплуатационных запасов промышленных вод, предназначенных для извлечения полезных компонентов, устанавливаются:

- *средние промышленные содержания полезных компонентов* в водах оцениваемого водоносного горизонта (участка);
- *максимально допустимые содержания вредных примесей* в водах оцениваемого водоносного горизонта (участка);
- *предельные положения динамических уровней* в эксплуатационных скважинах;
- *предельные глубины и дебиты* эксплуатационных скважин.

Кондициями для подсчета эксплуатационных запасов теплоэнергетических вод, предназначенных для теплоэнергетического использования, устанавливаются:

- *минимальная температура воды* (минимальное теплосодержание пароводяной смеси или пара) на устье скважин;
- *максимально допустимая минерализация*;
- *предельные положения динамических уровней* в эксплуатационных скважинах (минимальное избыточное давление пара на устье).

В кондициях для полезных ископаемых, по которым государственными и отраслевыми стандартами или специальными техническими условиями установлены требования к качеству минерального сырья, соответствующие параметры должны обеспечивать использование полезного ископаемого по назначению, предусмотренному стандартами (техническими условиями) в естественном виде или после переработки.

#### **4.2.2. Кондиции для подсчета забалансовых запасов**

Кондиции для подсчета забалансовых запасов устанавливаются для разведанных запасов, использование которых в настоящее время экономически нецелесообразно или технически и технологически невозможно, но в дальнейшем они могут быть переведены в балансовые. Эти запасы подсчитывают с подразделением по причинам их отнесения к забалансовым (экономическим, технологическим, гидрогеологическим, горнотехническим); в ТЭО кондиций должны быть доказаны возможность их сохранности в недрах для последующего извлечения или целесообразность попутного извлечения, складирования и сохранения для использования в будущем. Перечень параметров кондиций для подсчета забалансовых запасов аналогичен перечню, используемому для балансовых (исключая минимальное промышленное содержание).

В ТЭО кондиций рассматривается и обосновывается целесообразность подсчета и учета запасов, заключенных в охранных целиках крупных водоемов и водотоков, населенных пунктов, капитальных сооружений и сельскохозяйственных объектов, заповедников, памятников природы, истории и культуры. Для решения вопроса об их отнесении к балансовым или забалансовым выполняются специальные технико-экономические расчеты, где учитываются затраты на перенос сооружений или специальные способы разработки запасов. На месторождениях общераспространенных полезных ископаемых запасы в таких охранных целиках, как правило, не подсчитываются, обоснование необходимости их подсчета выполняется лишь при крайнем дефиците данного полезного ископаемого в экономическом районе, где находится месторождение.

### **4.3. Методы подсчета запасов**

В геолого-маркшейдерской литературе описано более двух десятков различных методов, которые в той или иной мере находили применение при традиционном ручном подсчёте запасов полезных ископаемых. Можно выделить следующие методы: среднеарифметический суммарный, геологических блоков, эксплуатационных блоков, вертикальных параллельных разрезов, горизонтальных параллельных разрезов, непараллельных разрезов, линейный, многоугольников, треугольников, четырёхугольников, изогипс, изолиний, статистический, среднего угла падения, средней образующей, объёмной палетки Соболевского, косинусов, геоморфологический и др.

При компьютерном подсчёте запасов многие из перечисленных методов объединяются на основе общности алгоритмов вычислений, в то время как другие оказываются полностью устаревшими ввиду использования в них ручных методов счета, номограмм или палеток. Поскольку компьютерное моделирование месторождений выполняется по базе данных геологического опробования и маркшейдерских замеров, то в этом случае автоматически отпадает необходимость подсчёта запасов не по первичным данным, а по отчётным графическим материалам, как это делалось, например, в методах изолиний, изогипс, объёмной палетки, средней образующей, среднего угла падения и некоторых других. Вместе с тем компьютерные технологии дают возможность использовать при подсчёте запасов такие методы, которые ранее считались слишком сложными и трудоёмкими. К ним относятся методы треугольников, многоугольников и четырёхугольников. Аналогами этих методов при построении полнофункциональных виртуальных моделей залежей являются соответственно методы тетраэдров, полиэдров и прямоугольных блоков.

Ниже приводится описание основных методов подсчёта запасов, которые ранее широко использовались при традиционных «ручных» способах подсчёта по планам и разрезам и сегодня в той или иной модификации применяются в составе компьютерных технологий геолого-промышленной оценки месторождений.

### 4.3.1. Метод среднего арифметического

Подсчёт запасов по методу среднего арифметического имеет несколько разновидностей, из которых основными являются *суммарный, геологических и эксплуатационных* блоков [4]. В суммарном методе блоком считается вся залежь внутри подсчётного контура. Формулы для подсчёта запасов для указанных разновидностей имеют следующий общий вид.

Среднюю *мощность* руды  $M$  в подсчётном блоке определяют как среднее арифметическое из мощностей по всем пересекшим его выработкам по формуле:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i, \quad (3.55)$$

где  $m_i$  – суммарные мощности по отдельным выработкам;  $n$  – количество выработок, пересекших блок и участвующих в подсчете запасов.

Среднее *содержание компонента*  $C$  в подсчётном блоке определяют также в виде среднего арифметического по замерам содержаний в отдельных выработках по формуле:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i, \quad (3.56)$$

где  $c_i$  – среднее содержание компонента в отдельных выработках, участвующих в подсчете.

Если каждой скважиной или выработкой вскрыто несколько разделенных породой рудных участков с разным содержанием компонента, то после выделения кондиционных рудных интервалов среднее *содержание компонента* вычисляется по формуле средневзвешенного среднего:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i c_i / L, \quad (3.57)$$

где  $L$  – суммарная мощность или длина всех рудных интервалов в подсчётном контуре или геологическом блоке, равная

$$L = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k l_{ij}, \quad (3.58)$$

где  $l$  – отдельный рудный интервал;  $k$  – количество рудных интервалов в выработке;  $n$  – количество разведочных выработок или скважин.

Далее находят *площадь*  $S$  геологического блока в пределах подсчетного контура или плоского полигона по формуле:

$$S = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n y_i (x_{i+1} - x_{i-1}), \quad (3.59)$$

где сумма вычисляется для всех  $n$  вершин подсчётного контура с текущими координатами  $(x_i, y_i)$ , при этом для первого слагаемого  $x_{1-1} = x_0$  – это  $x$  координата последней вершины полигона, а для последнего слагаемого  $x_{n+1}$  – это  $x$  координата первой вершины.

*Объем*  $V$  блока:

$$V = SM. \quad (3.60)$$

*Запасы*  $Q$  полезного ископаемого:

$$Q = SM\gamma, \quad (3.61)$$

где  $\gamma$  – плотность полезного ископаемого.

*Запасы компонента*  $P$ :

$$P=kQC, \quad (3.62)$$

где  $C$  может быть выражено как в процентах, так и в граммах на тонну. Если  $C$  даётся в процентах, то  $k = 0,01$ ; если в граммах на тонну, как при подсчёте запасов благородных металлов, то  $k = 0,001$ .

#### Суммарный метод

При подсчете запасов суммарным среднеарифметическим методом вся залежь месторождения рассматривается как один подсчётный блок. Тело залежи полезного ископаемого, ограниченное со всех сторон поверхностью его раздела с вмещающими породами, трансформируются в равновеликую по объёму многогранную призму, площадь которой равна площади залежи в пределах подсчетного контура, а толщина соответствует средней мощности залежи. Схема такого преобразования представлена на рис. 3.34

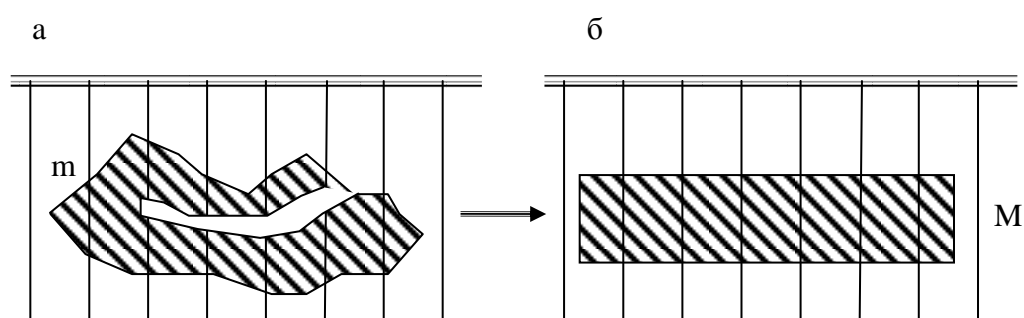


Рис. 3.37. Преобразование рудного тела (а) в многогранную призму (б)

Основные параметры запасов – среднюю мощность залежи и среднее содержание компонентов – находят как среднеарифметические значения из ряда определений их значений в отдельных пересечениях залежи. Общее выражение запасов для залежи в пределах подсчетного контура определяют по вышеприведенным формулам.

Когда полезное ископаемое приконтурной полосы резко отличается по мощности, содержанию компонентов или по другим показателям от полезного ископаемого основной части залежи, то в этой полосе запасы подсчитывают отдельно. В этом случае, кроме внешнего контура залежи, проводят внутренний контур, через крайние выработки, пересекающие залежь и показавшие значение мощности залежи и содержание компонента не ниже установленных кондиций с минимумом по мощности рудных прослоев и содержанию ценных компонентов.

Запасы в пределах внутреннего контура определяют отдельно по приведенным выше формулам. В половине межконтурной полосы, прилегающей к внутреннему контуру, запасы определяют по тем же данным, что и для основной части залежи. Эти запасы относят по степени разведанности и изученности на одну категорию ниже, чем запасы в пределах внутреннего контура. Запасы второй половины межконтурной полосы, прилегающей к внешнему контуру, определяют по минимальным данным, принятым при проведении внешнего контура. Эти запасы также относят по



степени разведанности и изученности на категорию ниже запасов основной залежи в пределах внутреннего контура.

Суммарный среднеарифметический метод может применяться при любых формах и размерах залежей и условиях их залегания, при любом распределении минерализации и любой системе разведки. Однако его применяют главным образом для получения предварительных данных об общих запасах залежи, а также для проверки подсчетов, сделанных другими методами. Метод дает достаточно точные результаты, когда число разведочных пересечений, на основании которых подсчитываются запасы, не менее 20 – 25 при любом размещении этих пересечений с более или менее равномерным их распределением по залежи и при любой изменчивости мощностей залежи и содержаний компонентов. При малой изменчивости содержаний компонентов и мощностей залежи число разведочных пересечений может быть и меньшим.

*Компьютерная реализация.* Исходная база данных (БД) включает: таблицу записей проб в разведочных пересечениях (скважины, борозды, шурфы) и заданный контур подсчёта запасов. Например, при разведке скважинами вначале необходимо построить модель данных: DHOLES с координатами интервалов опробования и модель данных POLYGONS с координатами вершин подсчётного контура. Последовательность операций подсчёта запасов выглядит следующим образом:

1) выполняется логическая операция пересечения двух множеств – моделей DHOLES и POLYGONS. Из БД выделяются только те скважины, которые попадают в подсчётный контур;

2) в массиве внутриконтурных скважин DHOLES определяются среднеарифметические значения мощности и содержания с учетом установленных кондиций. В результате этой процедуры на выходе формируется модель точек POINTS для устьев скважин с вычисленными для них средними значениями и линейными запасами ценных компонентов;

3) выполняется логическая операция объединения двух множеств – модели данных POLYGONS с моделью точек POINTS. Результатом работы данной процедуры становится модель POLYGONS с добавленными в таблицу полями атрибутов и их значений – площади, объёма, средней мощности, среднего содержания компонентов, запасов полезного ископаемого и ценного компонента в контуре;

4) составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно требуемому формуляру и выводится на экран или на печать.

Описанная последовательность шагов выполняется в большинстве интегрированных горно-геологических программ в автоматизированном режиме, достаточно указать лишь файл исходной базы данных опробования и файл контура или ввести подсчётный контур интерактивно на экране курсором мыши.

Достоинством суммарного среднеарифметического метода является простота вычислительных операций. Недостаток метода весьма существен

и заключается в том, что при таком подсчете запасов не вскрывается характер распределения компонентов, отдельных сортов и в целом невозможна дифференциация запасов полезного ископаемого.

#### Метод геологических блоков

Метод геологических блоков, детально описанный В.И.Смирновым [4], – наиболее распространённый и наименее трудоёмкий. Суммарный среднеарифметический метод является частным случаем метода геоблоков. В этом методе залежь полезного ископаемого в пределах подсчётного контура делят на отдельные геологические блоки по признакам:

- различной степени разведанности и изученности, по густоте разведочных пересечений, детальности опробования и т.п.;
- разных сортов полезного ископаемого, отличающихся различной технологией обработки или использования;
- разных сроков отработки горизонтов, участков, в каждом из которых возможна особая система отработки.

При таком делении залежи последняя как бы трансформируется в ряд сомкнутых многогранных призм, охваченных общим контуром залежи, в пределах которого подсчитывают запас (рис. 3.35). Толщина каждой многогранной призмы соответствует средней мощности залежи на этих участках.

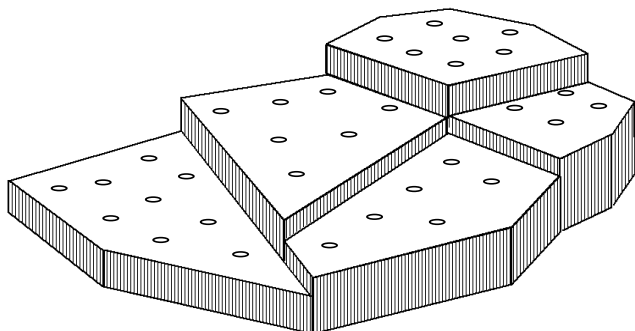


Рис. 3.38. Группа многогранных призм при подсчете запасов методом геологических блоков (по В.И.Смирнову)

Объем залежи, запас полезного ископаемого и компонента в каждом блоке подсчитывают по вышеприведенным формулам. Суммированием запасов по блокам получают общие запасы по залежи в пределах общего подсчетного контура.

*Компьютерная реализация* метода практически ничем не отличается от таковой для описанного выше суммарного

способа, за исключением того, что вместо одного контура в модели данных POLYGONS необходимо иметь все контуры полигонов геологических блоков. Контуры также могут вводиться интерактивно оператором на экране компьютера. Отчёт согласно формуляру метода геологических блоков будет представлен таблицей с результатами подсчёта по отдельным блокам и в целом по всему месторождению. В нём выводятся такие показатели, как площадь, средняя мощность, объём рудного тела, средняя плотность, запасы руды, среднее содержание ценного компонента и запасы ценного компонента или металла.

При данном варианте способа среднего арифметического необходимо, чтобы в каждом блоке было не менее 15 отдельных замеров мощности залежи и отдельных проб для месторождений с равномерным и весьма равномерным характером распределения минерализации и не менее 25 –

для прочих месторождений с более неравномерным характером распределения минерализации.

Ошибки в запасах отдельных блоков могут достигать при этом значительных размеров и будут тем больше, чем неравномернее характер распределения минерализации, но при случайном характере этих ошибок, суммарные запасы по всем блокам будут определены со значительно меньшими ошибками, чем ошибки запасов отдельных блоков. При достаточно большом числе блоков, более 10, суммарные запасы получаются с достаточной для практических целей точностью, не меньшей, чем при других способах подсчета запасов.

#### Метод эксплуатационных блоков

Этот метод как разновидность среднего арифметического наиболее распространён при подсчёте запасов жильных или маломощных пластовых месторождений, когда разведка месторождения производится в основном горными работами или когда на месторождении уже проведены горно-подготовительные выработки (штреки, восстающие и др.). Подсчет запасов путём усреднения и суммирования производят для каждого эксплуатационного блока, оконтуренного с четырех или менее сторон горно-подготовительными выработками.

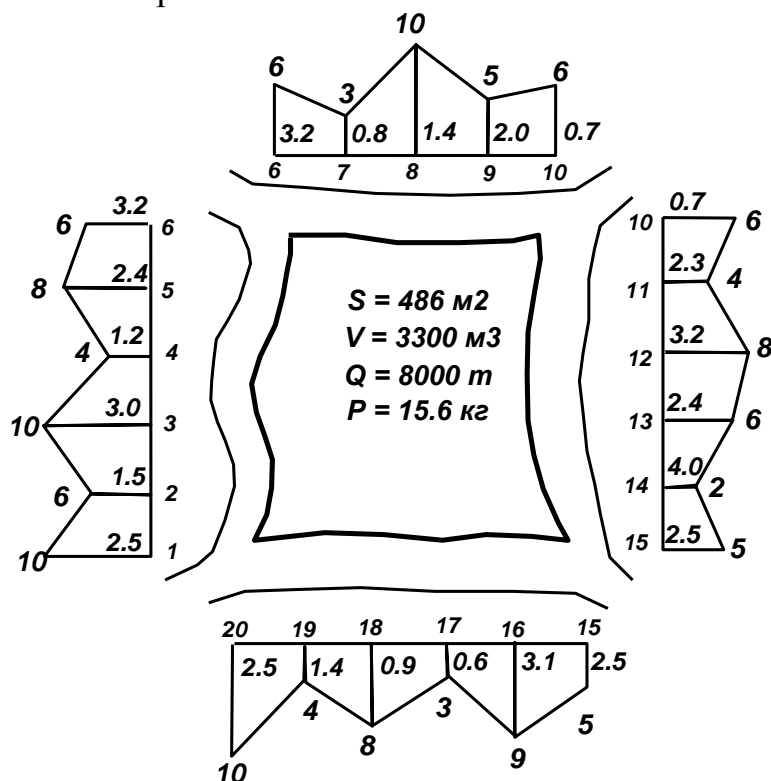


Рис. 3.39. Подсчёт запасов методом эксплуатационных блоков (по П.А.Рыжову)

Традиционно исходным документом для подсчета запасов методом эксплуатационных блоков служил маркшейдерский план выработок или их проекции на вертикальную или наклонную плоскость. В последнем случае плоскость проекции проводили параллельно средней линии простирания и средней линии падения залежи. В качестве иллюстрации на рис. 3.36 при-

веден план горных работ по одному из эксплуатационных блоков жильного золоторудного месторождения.

В данном примере точки опробования, показанные цифрами в кружках, расположены через одинаковые интервалы, и в них замерялась мощность жилы  $m$  и определялось содержание  $c$  компонента – золота. Подсчёт запасов производят по приведенным выше формулам в следующем порядке, определяя:

- 1) площадь блока,  $S = 486 \text{ м}^2$ ;
- 2) среднюю мощность жилы по блоку,  $M = 6,8 \text{ м}$ ;
- 3) объем полезного ископаемого по блоку,  $V = 486 \times 6,8 = 3300 \text{ м}^3$ ;
- 4) запас руды блока (тоннаж),  $Q = 3300 \times 2,42 = 8000 \text{ т}$ ;
- 5) среднее содержание золота по блоку как средневзвешенное по мощности,  $C = 1,95 \text{ г}$ ;
- 6) запас золота по блоку,  $P = 8000 \times 1,95 = 15,6 \text{ кг}$ .

Среднее значение плотности полезного ископаемого  $\gamma$  также определяют как среднее арифметическое из нескольких его определений опытной вырубкой или лабораторным определением.

*Компьютерная реализация.* Поскольку метод по существу представляет собой метод среднего арифметического, то последовательность операций компьютерного подсчёта запасов практически не отличается от последовательности для суммарного метода. Однако при этом необходимо учитывать, что основные точки опробования должны лежать на контурах смежных эксплуатационных блоков, а не снаружи, как на рис. 3.36. Тогда точки опробования попадут при выполнении логических операций с множествами в оба соседних блока и внесут свой вклад в суммарную оценку их показателей. При использовании компьютеров для проведения расчётов по этому методу достаточно иметь базу данных исходной геолого-маркшейдерской информации, а все графические построения могут быть выполнены впоследствии по мере необходимости подготовки материалов к отчёту о запасах или для планирования нарезки эксплуатационных блоков.

Достоинством подсчёта запасов по методу эксплуатационных блоков является то, что он выполняется в пределах существующих горно-добычных участков и может быть без пересчёта использован при планировании и проектировании эксплуатационных работ, поэтому этот метод применяется в подсчетах, связанных с учетом движения запасов при подземных способах добычи.

Недостаток метода – то, что он применим только при условии вскрытия горными выработками и оконтуривания относительно выдержанных залежей полезных ископаемых. Прерывистые и гнездовые тела могут подсчитываться этим методом с введением коэффициентов рудоносности, что несколько снижает достоверность подсчёта запасов.

### 4.3.2. Метод треугольников

В методе треугольных призм или треугольников оценка запасов ведется по элементам сети, представленным в виде трехгранных призм, в вершинах которых находятся точки опробования или точки привязки разведочных выработок (устья скважин, начала шурфов).

Подсчет запасов методом треугольников заключается в следующем. Построение сети треугольников осуществляется путём компьютерной триангуляции множества исходных или опорных точек. В плане или горизонтальном сечении для вертикальных разведочных выработок триангуляцией соединяют точки их пересечения с плоскостью, а у наклонных – точки их входа в полезное ископаемое, причем эти линии не должны пересекаться.

В полосе между внешним и внутренним контуром, в межконтурной полосе, треугольники близки к равнобедренным. Основанием таких треугольников служат линии, проведенные через крайние выработки, пройденные по полезному ископаемому, через которые проводят внутренний контур, а вершинами – точки, лежащие на внешнем контуре и равноудаленные от двух других вершин разведочных выработок треугольника (рис. 3.37).

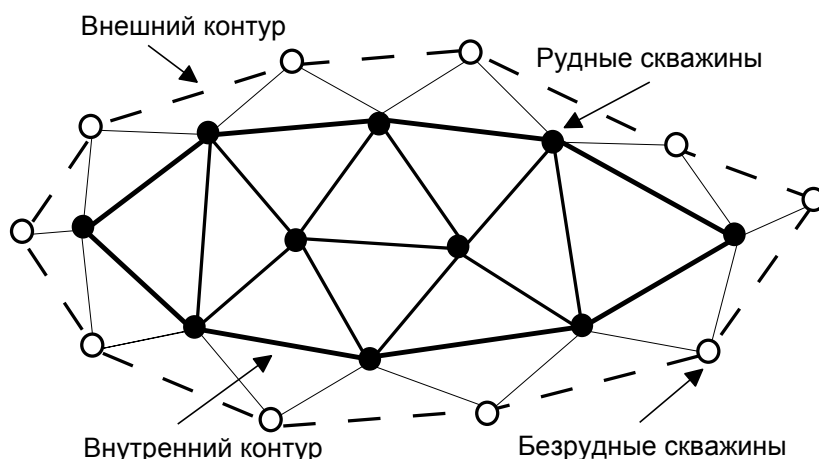


Рис. 3.40. Схема подсчета запасов методом треугольников

Вся залежь месторождения в пределах подсчетного контура в результате разбивается на трехгранные усеченные призмы, общий объем которых равен величине объема залежи полезного ископаемого.

Разбивка площади полезного ископаемого на треугольники

может быть произведена двумя вариантами: путём триангуляции Делоне или по триангуляции с бровками (структурными линиями), которые не должны пересекаться ребрами треугольников.

Построенные таким образом трехгранные призмы образуются треугольниками, вершины которых представляют собой точки входа разведочных пересечений, скважин в залежь для верхнего основания и точки выхода этих же пересечений из залежи для нижнего основания. Боковыми ребрами призм служат: при подсчете объема  $v_i$  полезного ископаемого – мощности  $m$  полезного ископаемого; при подсчете запаса  $q_i$  полезного ископаемого – произведение мощности  $m$  на плотность  $\rho$ ; при подсчете запасов  $p_i$  компонента – линейные запасы компонента в виде произведения  $m\rho x$ . Объем призмы определяется путём умножения основания на среднюю длину ребра.

В итоговом формуляре объем  $V$  полезного ископаемого в целом по месторождению выражается как сумма объемов отдельных призм. Запас  $Q$

полезного ископаемого выражается как сумма запасов по отдельным призмам и, наконец, запас компонента  $P$  выражается как сумма его запасов по отдельным трехгранным призмам.

Запасы по призмам, расположенным в межконтурном объеме, подсчитывают аналогично подсчету запасов призм, расположенных в пределах внутреннего контура.

Для вершин треугольников межконтурной полосы, расположенных на внешнем контуре, принимают значения мощности и содержания компонента внешнего контура – нулевое или минимальное кондиционное значение в зависимости от того, будет ли внешний контур линией полного выклинивания или он проведен по рабочей мощности или по минимальному кондиционному содержанию компонента.

*Компьютерная реализация.* По исходным точкам данных опробования скважин строится сеть триангуляции Делоне. Предварительно в каждой точке определяется суммарное значение мощности рудных прослоев и среднее значение извлекаемого показателя. Внешний контур подсчета запасов или несколько контуров запасов (по степени разведанности  $A$ ,  $B$ ,  $C_1$  или по степени готовности к выемке) выбирают в качестве структурных линий, ограничивающих триангуляцию. Подсчёт запасов получают суммированием значений в треугольных призмах внутри контуров.

*Достоинства и недостатки* метода треугольных призм. Считается, что при выборе в качестве вершин триангуляции точек опробования или скважин слишком редкой сети разведки трехгранные призмы не отвечают природным формам полезного ископаемого и не вписываются в эксплуатационные участки. Однако, если после построения триангуляции Делоне в качестве структурных линий или бровок использовать оцифрованные контуры рудных тел и выемочных единиц, которые не должны пересекаться треугольниками, то вышеприведенный недостаток метода треугольников легко устраняется. Это реализуется в современных ГИС для недропользования. При этом точность подсчёта запасов в границах рудных тел и эксплуатационных участков вполне может соответствовать предъявляемым требованиям.

#### **4.3.3. Метод многоугольников**

Метод многоугольных призм или многоугольников, ранее называвшийся методом ближайшего района, был предложен в 1914 г. профессором А.К. Болдыревым [8]. В математике сеть многоугольников близости известна как диаграмма Вороного или сеть полигонов Дирихле. Двумерная диаграмма Вороного определяет разбиение плоскости на многоугольники, а трехмерная – разбиение пространства на полиэдры. Наиболее важными свойствами диаграммы Вороного являются следующие [34]:

- для каждой точки  $p_i$  множества точек  $S$  в многоугольнике  $v_i$  (для трехмерного случая – в полиэдре) расстояние от любой точки  $p_{xyz}$  до  $p_i$  меньше, чем до любой другой точки множества  $S$ ;

- граф, двойственный диаграмме Вороного, является триангуляцией Делоне множества  $S$ .

Сущность метода многоугольников заключается в том, что оконтуренное тело полезного ископаемого разбивают на ряд прямых многогранных призм, запасы которых подсчитывают отдельно для каждой призмы. Общий запас полезного ископаемого и компонента по всей залежи получают суммированием запасов отдельных призм.

Многоугольники Вороного, служащие основанием призм, можно построить вручную без применения компьютера следующим образом:

- 1) каждая точка опробования или выработка (скважина, шурф) соединяется с ближайшими точками опробования или выработками прямыми линиями;

- 2) через центры линий, соединяющих точки опробования, проводят перпендикуляры, которые, пересекаясь между собой, образуют многоугольники Вороного.

Произвольная точка многоугольника Вороного ближе к опорной точке, чем к другим, поэтому этот метод иногда называют методом ближайшего района. В результате такого построения тело полезного ископаемого как бы преобразуется в группу сомкнутых многогранных призм, основаниями которых являются построенные вышеуказанным способом многоугольники, а высотой – мощности тела по скважинам, как это показано на рис. 3.38.

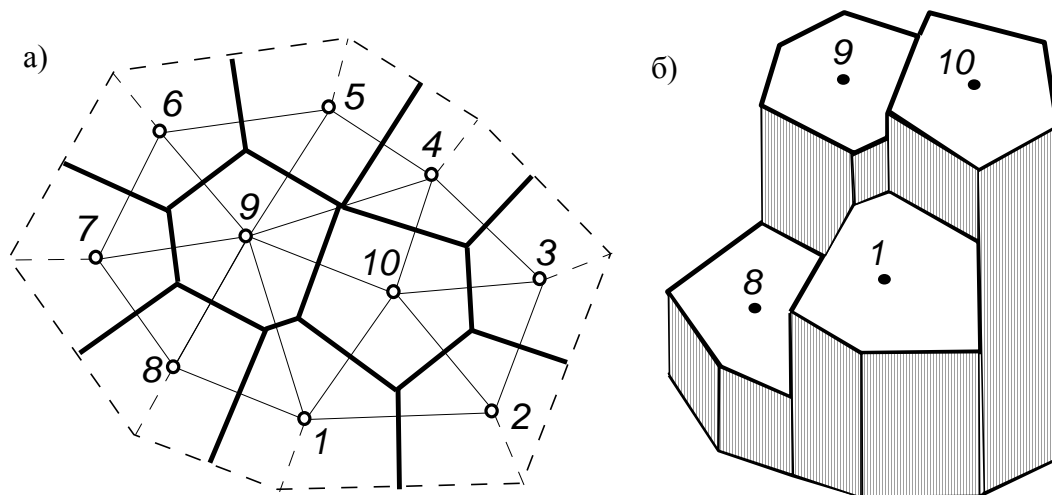


Рис. 3.41. К подсчёту запасов методом многоугольников:

а) фрагмент плана; б) перспективный вид участка тела, преобразованного в сеть многогранных призм

До появления вычислительной техники метод многоугольников считался крайне трудоёмким и использовался редко, главным образом для оценки запасов пластовых и россыпных месторождений. С помощью компьютеров процесс построения диаграммы Вороного полностью автоматизирован. Вначале выполняется триангуляция Делоне исходных точек данных, а затем строится двойственный ей граф диаграммы Вороного для получения множества многогранных призм.

Последовательность подсчета запасов по методу многоугольников следующая. Вначале определяется объём призмы по формуле:

$$v_i = s_i m_i. \quad (3.63)$$

Затем находится запас полезного ископаемого, имеющего плотность  $\rho$ , в объёме  $i$ -й призмы:

$$q_i = v_i \rho. \quad (3.64)$$

Вычисляется запас полезного компонента в призме по формуле:

$$p_i = q_i c_i. \quad (3.65)$$

Общие объём  $V$ , запас  $Q$  полезного ископаемого и запас  $P$  полезного компонента в залежи получаются суммированием соответствующих частных величин для призм во внутреннем контуре и в междоконтурной полосе.

При использовании этого метода выделение внутреннего и внешнего контуров не рекомендуется, так как периферийные многоугольники перекрывают полосу, расположенную между внутренним и внешним контурами подсчета запасов. Если же провести внешний контур, то междоконтурная полоса разделится на участки, тяготеющие к выработкам.

*Компьютерная реализация* метода многоугольников при наличии базы данных разведочных выработок в виде модели скважин DHOLES и внешнего контура подсчёта запасов POLYGON\_CON выполняется следующим образом.

1. Модель скважинных данных DHOLES интервального опробования залежи преобразуется в модель точек POINTS с координатами устьев скважин. В результате в таблицу атрибутов для каждой скважины записываются суммарная мощность кондиционных рудных прослоев, средние содержания компонентов, средняя плотность и линейные запасы компонентов.

2. Для модели точек POINTS вызывается процедура триангуляции Делоне и по ней строится диаграмма Вороного, которая и является сетью многоугольников близости. Атрибуты точек POINTS приписываются каждому многоугольнику, массив которых сохраняется как модель данных POLYGONS\_VOR.

3. Выполняется логическая операция объединения подсчётного контура POLYGON\_CON с сетью POLYGONS\_VOR многоугольников Вороного. В результате в таблицу атрибутов подсчётного контура помимо значения площади записываются все показатели подсчета запасов – средняя мощность, объём рудного тела, средняя плотность, запасы руды, среднее содержание ценного компонента и запасы ценного компонента или металла.

4. Составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно формulary и затем выводится на экран или на печать.

Подсчёт по методу многоугольников с применением компьютеров достаточно прост и точен. Он выполняется на основе разбивки площади одним способом, поэтому пересчёт запасов производится однозначно при



изменении параметров путём суммирования запасов соответствующих призм. Метод применим при наличии достаточно плотной сети разведочных пересечений и значительных колебаниях мощностей, плотностей и содержаний. Основным недостатком метода является то, что сами многоугольники, как правило, не отражают природной морфологии залежи, не увязываются с эксплуатационными участками и зонами деления полезного ископаемого на сорта.

#### 4.3.4. Метод разрезов

Метод разрезов применяется для месторождений, разведанных вертикальными или горизонтальными разведочными линиями, по которым можно построить геологические разрезы этих месторождений [1]. Различают две разновидности рассматриваемого метода: линии разрезов параллельные и линии разрезов непараллельные.

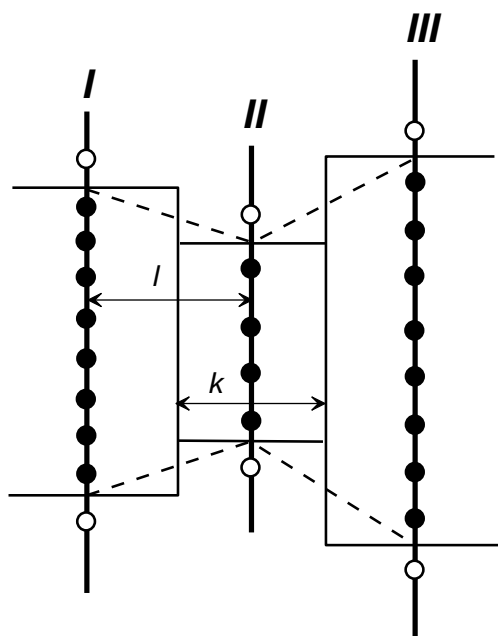


Рис. 3.42. Два варианта подсчета запасов по методу разрезов

При подсчете методом разрезов предварительно подсчитывают запас в разрезах залежи по разведочным линиям или профилям, мощность по которым принимают равной 1 м, а произведение полусуммы запасов в разрезах на расстояние между ними определяет запас в блоках между двумя разрезами (рис. 3.39). Суммирование запасов по блокам определяет общий запас месторождения (или его разведанной части).

На рис. 3.40 показан вертикальный разрез через разведочные выработки, расположенные на параллельных линиях.

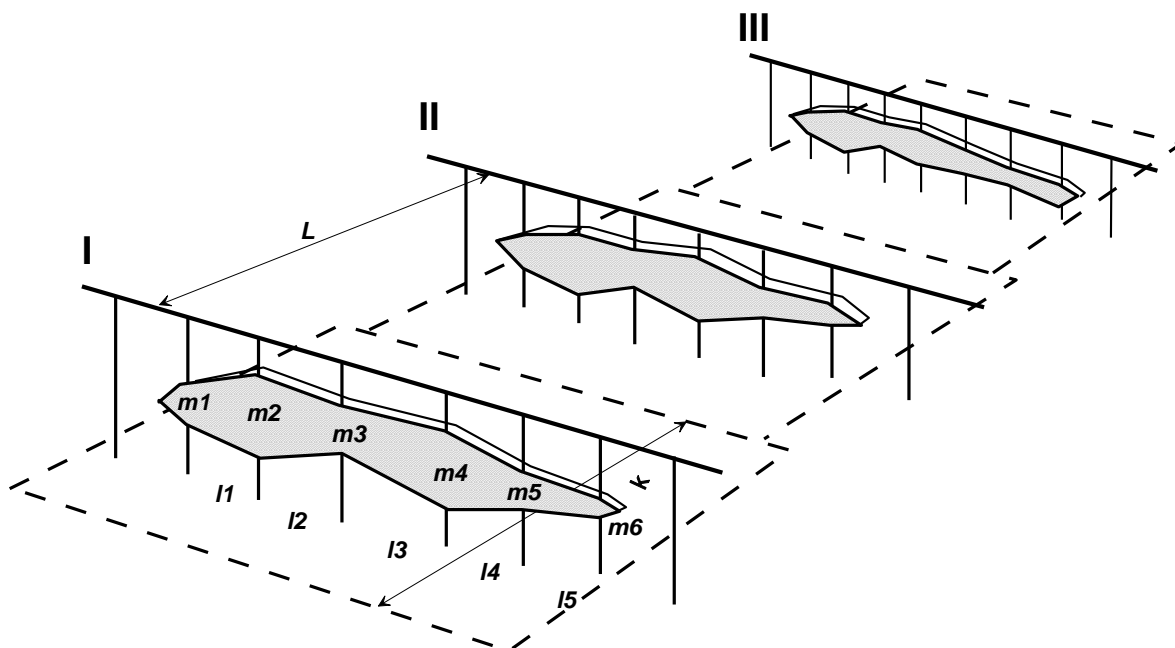


Рис. 3.43. Схема подсчета запасов методом вертикальных параллельных разрезов (по В.И. Смирнову)

Закрашенные точки – выработки, пересекающие тело залежи. Сплошные линии блоков – контуры подсчёта по площади влияния, пунктирные линии – контуры подсчёта по площади между линиями профилей. При построении блоков, опирающихся на две разведочные линии, тело полезного ископаемого преобразуется в ряд сомкнутых параллелепипедов с высотой  $l$ , тогда как при построении блоков, опирающихся на одно разведочное сечение, последнее рассматривается как среднее сечение и высота параллелепипедов считается равной  $k$ . Применение последнего способа разбивки на блоки подсчёта запасов не рекомендуется для месторождений с неравномерным распределением полезных компонентов. В этом случае количество выработок чаще всего бывает недостаточным для получения надёжных данных о действительном среднем содержании компонентов в блоках.

Параллельные разрезы. Площадь вертикального разреза полезного ископаемого по линии I профиля равна сумме площадей трапеций:

$$S_1 = \frac{m_1 + m_2}{2} l_1 + \frac{m_2 + m_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n + m_{n+1}}{2} l_n, \quad (3.66)$$

где  $m_1, m_2, \dots, m_{n+1}$  – мощность по отдельным скважинам;  $l_1, l_2, \dots, l_n$  – расстояния между соседними скважинами.

Запас полезного ископаемого  $Q$  в слое разреза I с горизонтальной мощностью  $l$  равен:

а) в случае, когда плотность полезного ископаемого  $\rho$  варьирует в пределах более  $\pm 50\%$  от среднего его значения,

$$Q = \frac{m_1 \rho_1 + m_2 \rho_2}{2} l_1 + \frac{m_2 \rho_2 + m_3 \rho_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n \rho_n + m_{n+1} \rho_{n+1}}{2} l_n; \quad (3.67)$$

б) в случае, когда  $\rho$  – величина постоянная или варьирует в пределах менее  $\pm 50\%$  от среднего его значения,

$$Q_1 = \rho \left( \frac{m_1 + m_2}{2} l_1 + \frac{m_2 + m_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n + m_{n+1}}{2} l_n \right). \quad (3.68)$$

Линейный запас компонента в объеме слоя разреза  $V_1$  по разведочной линии профиля I будет равен:

$$P_1 = k \left( \frac{m_1 \rho_1 c_1 + m_2 \rho_2 c_2}{2} l_1 + \frac{m_2 \rho_2 c_2 + m_3 \rho_3 c_3}{2} l_2 + \dots + \frac{m_n \rho_n c_n + m_{n+1} \rho_{n+1} c_{n+1}}{2} l_n \right), \quad (3.69)$$

где  $c_1, c_2, \dots, c_n$  – содержание компонента по скважинам;  $k$  – коэффициент, зависящий от единиц измерения содержания:

- если  $c$  выражено в весовых процентах, то  $k = 1/10^2$ ;
- если  $c$  выражено в граммах на тонну, то  $k = 1/10^6$ .

Общий объем  $V$ , запасы полезного ископаемого  $Q$  и компонента  $P$  всего месторождения определяются суммами призм по формулам:

$$\begin{aligned} V &= \frac{S_1 + S_2}{2} L_1 + \frac{S_2 + S_3}{2} L_2 + \dots + \frac{S_n + S_{n+1}}{2} L_n, \\ Q &= \frac{Q_1 + Q_2}{2} L_1 + \frac{Q_2 + Q_3}{2} L_2 + \dots + \frac{Q_n + Q_{n+1}}{2} L_n, \\ P &= \frac{P_1 + P_2}{2} L_1 + \frac{P_2 + P_3}{2} L_2 + \dots + \frac{P_n + P_{n+1}}{2} L_n, \end{aligned} \quad (3.70)$$

где  $L_1, L_2, \dots, L_n$  – расстояния между соседними разрезами.

Если площади параллельных разрезов, ограничивающих блок, по величине отличаются друг от друга более чем на 40%, то вместо формулы призмы для объема блока берется формула усеченной пирамиды:

$$V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 \cdot S_2}}{3} L. \quad (3.71)$$

По приведенным формулам объемы и запасы месторождения в целом определяются суммированием по всем разрезам. Объем и запасы межконтурных полос подсчитываются как полусумма площади разреза по внутреннему контуру и площади разреза по внешнему контуру, умноженная на расстояние между ними. По аналогичным формулам производят подсчет запасов по горизонтальным параллельным разрезам залежи (рис. 3.41).

### Непараллельные

разрезы. Если угол между разведочными линиями превышает  $10^\circ$ , то разрезы принято считать непараллельными. В этом случае запасы полезного ископаемого между двумя непараллельными разведочными линиями профилей I и II можно определить по формуле:

$$Q = \frac{\beta}{\sin \beta} \frac{(Q_I + Q_{II})}{2} \quad (3.72)$$

а объём по формуле

$$V = \frac{\beta}{6} [R_I(2S_I + S_{II}) + R_{II}(2S_{II} + S_I)] \quad (3.73)$$

или при малых углах  $\beta$ , когда  $R_I = H_I / \sin \beta$ ;  $R_{II} = H_{II} / \sin \beta$ :

$$V = \frac{\beta}{6 \sin \beta} [H_I(2S_I + S_{II}) + H_{II}(2S_{II} + S_I)] \quad (3.74)$$

где  $\beta$  – угол между разведочными линиями в радианах;  $S_I$  и  $S_{II}$  – площади сечений;  $R_I$  и  $R_{II}$  – расстояния от центров тяжести площадей разрезов до точки пересечения разведочных линий в вершине угла  $\beta$ ;  $H_I$  и  $H_{II}$  – длины перпендикуляров, восстановленных из центров тяжести разрезов I и II на противоположные разведочные линии.

*Компьютерная реализация.* Исходная информация представлена таблицами базы данных опробования по разведочным пересечениям и внешним контуром подсчёта запасов. Последовательность шагов по подсчёту запасов методом вертикальных или горизонтальных параллельных разрезов следующая.

1. Выполняется операция запроса к базе данных скважин DHOLES для извлечения разведочных пересечений по каждому разрезу или геологическому профилю (поле PROFILE).

2. Для каждого вертикального или горизонтального разреза выполняется автоматическое оконтуривание всех рудных блоков в пределах внешнего контура подсчёта запасов в соответствии с установленными промышленными кондициями. Визуализация на экране компьютера позволяет осуществлять контроль построения полигонов кондиционных руд. Готовые рудные полигоны сохраняются в модели данных POLYGONS, со-

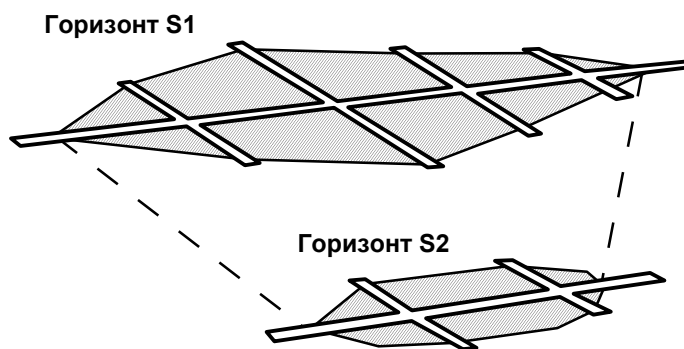


Рис. 3.44. Подсчет запасов методом горизонтальных разрезов

стоящей из массива вершин по контактам между рудой и породой в пробах или литологическим границам в скважинах.

3. Шаги 1 и 2 повторяются для всех разрезов вдоль разведочных профилей, и новые полигоны рудных тел заносятся в таблицу базы данных POLYGONS.

4. Выполняется операция пересечения полученной модели контуров рудных блоков на разрезах POLYGONS с моделью скважин DHOLES. В процессе пересечения для каждого контура рассчитывается средневзвешенное среднее значение содержания ценного компонента и запас руды в слое толщиной в один метр.

5. Вычисляются запасы для всего месторождения по формулам для метода разрезов.

6. Полигоны на разрезах POLYGONS объединяются в общую каркасную модель тела залежи SOLID, поверхность которой разбивается на треугольники. Определяется средневзвешенное значение содержания компонента и величина запасов руды в залежи. Для проверки проводится сопоставление с результатами, полученными на шаге п.5.

7. Данные выводятся в отчёт.

Итоговая геометрия залежи визуализируется на экране компьютера в виде каркасного тела, которое может быть теперь представлено в виде блок-диаграмм по произвольным вертикальным или горизонтальным разрезам.

#### **4.3.5. Метод осаждения слитка**

Суть метода осаждения или прессования слитка состоит в следующем [8]. Рудное тело, ограниченное со стороны висячего и лежащего бока сложными поверхностями, в контуре подсчета запасов преобразуется в равновеликое по объему тело, ограниченное, с одной стороны, плоскостью основания, а с другой – сложной поверхностью накопленной массы. Таким образом, рудное тело как бы осаждается на плоскость в виде слитка (рис. 3.42).

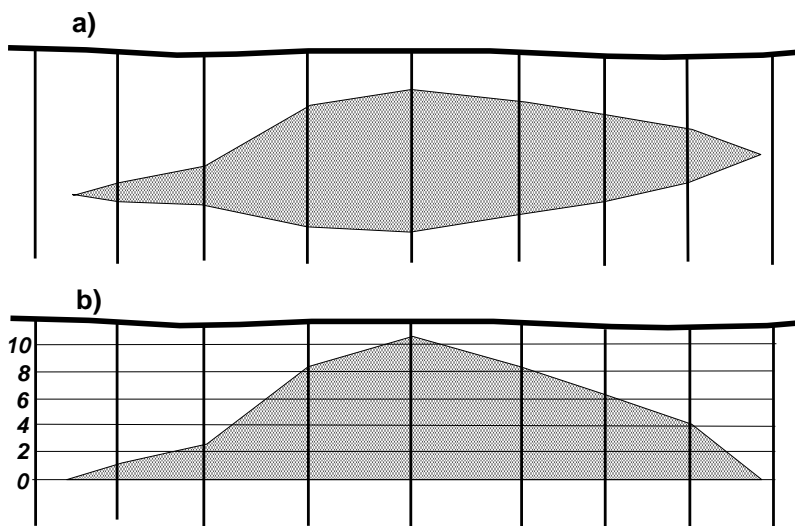


Рис. 3.45. Подсчёт запасов методом осаднения:

- a) разрез рудного тела с разведочными выработками;
- b) разрез равновеликого тела, осаджённого на плоскость с отметкой максимальной глубины залежи

Для определения объема тела полезного ископаемого методом осаднения при традиционном ручном способе строится его план в изолиниях мощности. Интерполяция данных геологической съемки и разведочных выработок выполняется с использованием, по возможности, геофизических данных. При определении объема такого тела применяется

способ объемной палетки проф. Соболевского. Способ объемной палетки состоит в том, что на план тела в изолиниях мощностей при произвольной ориентировке накладывается палетка из прозрачной бумаги с нанесенной на ней сеткой квадратов со стороной квадрата, например, 1 см. Для центра каждой клетки по плану определяется средняя мощность рудопоявления в виде отметки  $z_i$ . Затем простым суммированием находят значение  $\sum_{i=1}^N z_i$ , которое после умножения на площадь основания палетки в масштабе плана даёт искомый объем залежи. Объем тела определяется как минимум при двух положениях палетки, и при допустимых расхождениях в 1-2% вычисляется среднее значение. Переход от объема к массе полезного ископаемого производится, как обычно, умножением объема на среднюю плотность руды. Далее масса компонента рассчитывается как произведение массы полезного ископаемого на среднее содержание в нём ценного компонента.

Применение компьютеров позволяет полностью заменить операцию наложения палетки на план в изолиниях прямым суммированием запасов в ячейках или столбиках двумерной решетки (2D GRID) модели месторождения. Собственно для подсчёта запасов нет необходимости строить изолинии. Расчёты объема и массы выполняются непосредственно по ячейкам блочной модели, треугольным призмам или полигональным оболочкам отдельных рудных тел. Однако карты изолиний мощности и содержаний необходимы для иллюстрации интерполяции соответствующих геологических показателей и представления их в виде контурных карт в отчетной геолого-маркшейдерской документации.

Значения в ячейках двумерной решетки 2D GRID модели осаднения можно представлять не как мощности и содержания, а как произведения мощности и плотности или мощности, плотности и содержания, чтобы

сразу получать данные о запасах в массовом выражении руды или количестве ценного компонента.

*Компьютерная реализация.* Исходные данные так же, как и в методах среднего арифметического, включают БД опробования по разведочным пересечениям и контур подсчёта запасов. Последовательность шагов следующая.

1. Выполняется операция с множествами по пересечению модели данных скважин и модели данных подсчётного контура.

2. По скважинам подсчитываются суммы по рудным интервалам и вычисляются линейные запасы.

3. Генерируется решетка двумерных прямоугольных блоков.

4. Выполняется интерполяция показателей.

5. Суммируются значения в узлах решетки для подсчёта запасов.

6. Данные выводятся в отчёт.

Для отчета подготавливается карта в изолиниях.

Подсчет запасов методом осаждения слитка и обработки изолиний объёмной палеткой ранее широко применялся при подсчёте запасов железных руд, россыпных месторождений золота, угля, месторождений огнеупорных глин, известняков и др. Затем метод стал применяться редко.

*Недостатки* метода: 1) трудности применения на месторождениях с нарушениями сплошности рудного тела, так как он основан на прямой интерполяции разведочных данных; 2) сложность выделения большого числа участков блоков по степени разведанности и сортам сырья. Метод ограничен в своем применении в основном месторождениями крупных ненарушенных и детально разведанных тел. Он малопригоден для подсчета запасов по данным предварительной разведки по редкой сети, так как при этом имеется слишком мало информации для построения изолиний путем интерполяции между далеко расположенными друг от друга выработками. Изолинии в этом случае плохо отражают формы тела и строение деталей. Кроме того, этот метод неприменим для небольших месторождений, например, гнездовых, а также месторождений, разбитых сбросами и со слабовыраженным изменением мощности и равномерным распределением компонентов.

*Преимущество* метода состоит в том, что он дает наглядную, хотя и преобразованную, картину изменения мощности залежи и содержания полезного ископаемого. Это важно для проектирования открытых разработок, когда кроме плана залежи в изолиниях мощности необходим еще план в изолиниях коэффициента вскрыши и гипсометрические планы кровли и почвы залежи. Метод осаждения слитка рекомендуется использовать для оперативного подсчета запасов однокомпонентного сырья с залежами линзообразной формы, например, для некоторых типов месторождений песчано-гравийного материала, бурых углей, железных руд, бокситов, россыпей и других ископаемых, особенно разрабатываемых открытым способом.

#### 4.3.6. Статистический метод

При этом методе по результатам статистической обработки данных разведки и эксплуатации оценивается количество полезного компонента на единицу площади и определяется продуктивность участка месторождения путём расчёта объёма выхода кондиционной руды. Для подсчёта запасов месторождения эту величину распространяют на всю продуктивную площадь или объём тела полезного ископаемого.

Метод часто применяют для ориентировочного определения запасов. Иногда он является единственно возможным для определения запасов полезных компонентов при крайне неравномерном их распределении (например, горного хрусталя, слюды, некоторых месторождений урана). Кроме того, статистическим методом подсчитывались запасы фосфоритов и железных руд пластовых месторождений. Наконец, этот метод применяется для оценки запасов крупных региональных территорий – районов, бассейнов – по данным выхода полезного ископаемого при отработке части их площади.

Статистический метод скорее можно рассматривать как метод определения запасов товарной части полезного компонента. Действительно, зная общую площадь распространения сырой руды и выход ее с  $1 \text{ м}^2$ , можно подсчитать общие запасы фактически обогащенной руды или полезного компонента, которые могут быть получены после их извлечения. Но, кроме общих цифр запасов концентрата, для целей проектирования и эксплуатации месторождения необходимо знать и общие запасы минерального сырья, которые подлежат выемке и обогащению. Поэтому при статистическом методе, наряду с подсчётом запасов концентрата, подсчитываются запасы и общей массы минерального сырья.

*Практическая реализация.* По разведочным или эксплуатационным выработкам определяют выход сырья на единицу площади или объёма рудного тела. Полученные показатели продуктивности распространяют на установленную или предполагаемую площадь оруденения. Продуктивность определяется на всю мощность оруденения или на 1 м углубки. При расчёте средней продуктивности для блоков месторождения или района по геологическим соображениям иногда вводятся поправочные коэффициенты. Таким образом, сущность метода – определение продуктивности оруденения и площади, на которую ее следует распространить. Количество сырья в подсчетном блоке определяется по формуле  $P = Sp$ , где  $S$  – площадь блока в метрах,  $p$  – продуктивность оруденения в килограммах или тоннах на  $1 \text{ м}^2$ .

Статистический метод применяется для подсчёта запасов сырья с неравномерным распределением по площади и мощности залежи: пьезокварца, исландского шпата, некоторых типов месторождений слюды, валунного строительного материала, валунных железных руд, желваковых фосфоритов и т.д. Метод подсчёта запасов по продуктивности широко применяется при подсчёте прогнозных запасов.



#### **4.3.7. Метод стохастической имитации**

Основным отличием метода стохастической имитации геологического строения от различных оценочных методов (полигонального, кригинга) является способ получения значений содержаний в точках между известными пробами. При оценочных методах большее значение придается моделированию непрерывности распределения содержаний, тогда как при имитации сохраняется статистическая и пространственная вариации данных для любого масштаба.

В отличие от любого вида кригинга цель имитации – получение серии равновероятностных значений, называемых реализациями или образами рудного тела [13]. Эти образы характеризуют статистическую и пространственную изменчивость рудного тела или месторождения. Условная стохастическая имитация или симуляция является специфическим методом, при котором реальные пробы (точнее, их местоположение и содержание) используются для создания различных образов строения месторождения. В этом смысле модель обусловлена исходными данными, т.е. зависит от состояния в известных зонах опробования.

В отличие от оценочных методов, результат которых – одно значение оценки содержания в блоке, результатом условной симуляции является целый набор возможных значений, представленных в виде функции условного распределения. Путем комбинации набора симулированных моделей определяется вероятностное значение содержания в каждой отдельно взятой точке. Таким образом, имитационные модели имитируют реальные закономерности распределения содержаний.

#### **4.3.8. Метод регулярных блоков**

При подсчете запасов методом регулярных блоков все пространство месторождения предварительно разбивается на ячейки заданного размера – блоки в виде параллелепипедов или кубов. Формируется модель типа 3D GRID. В ряде программ геологического моделирования ячейки могут быть дополнительно разбиты на более мелкие ячейки – парцели, что позволяет в некоторых случаях более точно моделировать границы контактов руды с пустой породой. В целом, однако, при современной вычислительной мощности компьютеров, практически всегда может быть построена достаточно детальная однородная регулярная модель залежи с размером блоков, удовлетворяющим предъявляемым требованиям по точности. Кроме того, при необходимости на более разведанных участках месторождения всегда можно построить локальную модель с меньшим шагом решетки и включить её при окончательных подсчетах запасов в основную блочную модель.

Результирующая блочная модель залежи с несколькими рудными телами в пределах одного из участков месторождения представлена на рис. 3.43.

Разбиение пространства залежи на регулярные блоки практически стало возможным лишь при использовании компьютеров. Блочная модель

с заданными размерами или параметрами прототипа может быть создана после генерации решетки 3D GRID несколькими способами:

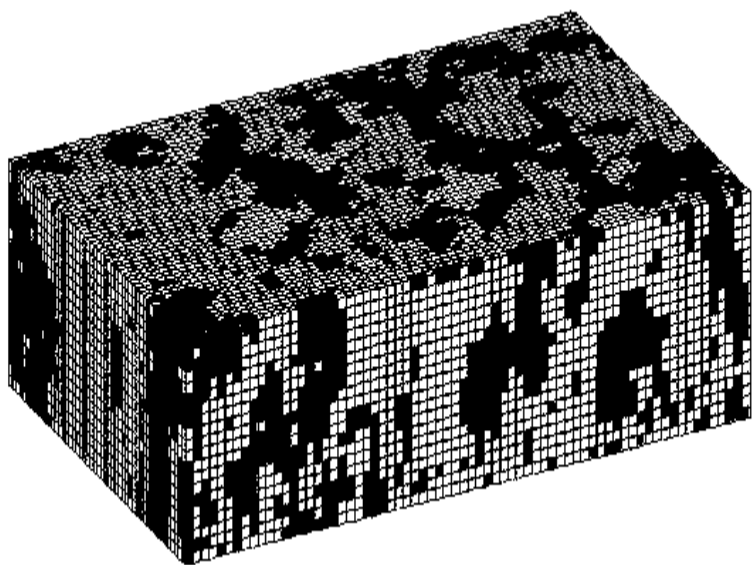


Рис. 3.46. Блочная модель с зонами рудопроявления

1. Выполняется операция пересечения решетки 3D GRID с подготовленной заранее каркасной моделью рудных тел. Происходит заполнение оболочек каркасов блоками с пометкой блоков атрибутами принадлежности к соответствующему геологическому объекту.

2. Для узлов решетки 3D GRID выполняется интерполяция значений показателей по имею-

щимся точкам данных в целом по месторождению. Модель заполняется блоками со значениями геопоказателей для каждого блока. Затем эта модель дополняется другими блочными моделями. В первую очередь в неё вводят топографическую блочную модель, а блоки «воздуха» в качестве идентификатора приобретают соответствующий атрибут, обычно равный 0. В другом варианте из регулярной решетки 3D GRID просто удаляются все «воздушные» блоки.

3. Для каждого из вертикальных или горизонтальных слоев решетки 3D GRID интерактивно производят оконтуривание зон минерализации полигонами. Это выполняется обычно вручную с помощью курсора мыши на экране компьютера, по данным опробования. Полигоны заполняются блоками заданного размера. После этого запускается процедура интерполяции, которая определяет показатели качества блоков по исходным точкам данных внутри контуров минерализации или в границах различных рудных тел.

Компьютерная реализация. Пошаговая последовательность операций подсчёта запасов методом регулярных блоков следующая.

а. Для модели скважин DHOLES и пространственной решетки (прототипа блочной модели) GRID 3D выполняется интерполяция геопоказателей в пределах контура подсчёта запасов POLYGONS. Основными методами интерполяции выбираются инверсный метод или кригинг. В качестве контуров могут быть также выбраны полигоны геологических блоков или участки различных технологических сортов руд. Блочная модель данных GRID 3D пересчитывается для получения прогнозных значений технологических показателей обогащения и сохраняется в БД.

б. Для модели данных POINTS 2D и поверхностной решетки (прототипа) GRID 2D выполняется интерполяция маркшейдерских замеров высотных отметок в пределах контура подсчёта запасов POLYGONS.

с. Выполняются логические операции объединения, вычитания и пересечения модели данных GRID 3D с моделью данных GRID 2D. Результатом работы данных процедур становится комплексная блочная модель месторождения.

д. Выполняется суммирование геопоказателей по каждому блоку модели с учетом установленных кондиций, определяются итоговые показатели с определенной статистической погрешностью.

е. Выполняется логическая операция объединения двух множеств – модели данных POLYGONS с моделью точек POINTS. Результатом работы процедуры становится модель данных POLYGONS с добавленными в таблицу полями атрибутов и их значений – площади, объёма, средней мощности, среднего содержания компонентов, запасов полезного ископаемого и ценного компонента в контуре.

ф. Составляется отчет о количестве и качестве запасов согласно требуемому формуляру и выводится на экран или на печать.

#### 4.4. Оценка стоимости запасов

На завершающем этапе моделирования геолого-технологическая блочная модель должна быть преобразована в стоимостную блочную модель. Это необходимо для проведения расчётов по определению наиболее выгодных границ карьера и контуров этапов разработки на весь срок эксплуатации месторождения в соответствии с заданными критериями оптимизации. При этом содержание полезного компонента в каждом блоке должно пересчитываться в соответствии с текущей рыночной ценой компонента и удельными затратами на переработку руды в показатель стоимости. То есть для каждого блока модели вычисляется экономическая оценка, равная разности между стоимостью извлеченного из руды металла и затратами на его разработку и обогащение. В общем виде ценность запасов блока  $Q_i$  равна:

$$Q_i = V_i - C_i \quad (3.75)$$

где  $V$  – ценность полезных компонентов в блоке, руб.;

$C$  – производственные затраты на извлечение компонентов;

$i = 1, 2, \dots, N$  – номер блока.

Эти величины рассчитываются по математической модели месторождения и карьера с использованием следующих зависимостей [27].

Если продукцией является полезное ископаемое среди пород  $k$ -го технологического сорта ( $k = 1, 2, \dots, K$ ), которое продается по цене  $P_k$ , руб./т, то ценность всего полезного ископаемого в блоке равна:

$$V_i = \sum_{k=1}^K [\nu_k \rho_k P_k (1 - \Delta_k)], \quad (3.76)$$

где  $\nu_k$  – объем руды (пород)  $k$ -го сорта в блоке,  $\text{м}^3$ ;

$\rho_k$  – объемная плотность руды (пород),  $\text{т/м}^3$ ;

$\Delta_k$  – потери при добыче, доли ед.

Затраты на разработку пород блока равны:

$$C_i = \sum_{k=1}^K \{ \nu_k [C_k + D_k (1 - \Delta_k) \rho_k] \}, \quad (3.77)$$

где  $C_k$  – стоимость разработки  $1 \text{ м}^3$  пород  $k$ -го технологического сорта, руб., эта величина различна для полезного ископаемого и пустых пород, но не включает в себя погашение вскрышных работ;

$D_k$  – общерудничные расходы, относимые на  $1 \text{ т}$  полезного ископаемого  $k$ -го типа. Для пустых пород  $D_k=0$ .

Если продукцией являются металлы, извлекаемые из руды в результате обогащения и последующей переработки, то ценность блока определяется формулой:

$$V_p = \sum_{k=1}^K \left\{ \nu_k \rho_k (1 - \Delta_k) \sum_{l=1}^L [\alpha_{kl} \varepsilon_{kl} (1 - \Delta_{kl}) P_{kl}] \right\}, \quad (3.78)$$

где  $\alpha_{kl}$  – содержание  $\ell$ -го металла в руде  $k$ -го сорта;

$\varepsilon_{kl}$  – извлечение  $\ell$ -го металла из руды  $k$ -го сорта;

$\Delta_{kl}$  – потери металла при металлургическом переделе;

$P_{kl}$  – цена единицы  $\ell$ -го металла, извлеченного из руды  $k$ -го технологического сорта.

Затраты на извлечение ценных компонентов из блока будут равны:

$$C_i = \sum_{k=1}^K \nu_k \left\{ C_k + \rho_k [D_k (1 - \Delta_k) + C_k^0 (1 - \Delta_k + \delta_k) + (1 - \Delta_k) \sum_{l=1}^L \left( \alpha_{kl} R_{kl} (1 - \Delta_{kl}) C_{kl}^M + \frac{C_{kl}^{TP}}{\beta_{kl}} \right) ] \right\}, \quad (3.79)$$

где  $C_k^0$  – стоимость обогащения  $1 \text{ т}$  руды  $k$ -го технологического сорта, руб.;

$\delta_k$  – разубоживание руды  $k$ -го технологического сорта;

$C_{kl}^M$  – стоимость металлургического передела  $\ell$ -го металла из руды  $k$ -го технологического сорта, руб./т;

$C_{kl}^{TP}$  – стоимость транспортировки продукта до металлургического завода;

$\beta_{kl}$  – содержание  $\ell$ -го металла в концентрате из руды  $k$ -го сорта.

Для выполнения расчетов оптимальных контуров карьера для стоимостной модели в качестве основных входных параметров используются: бортовое содержание полезного компонента; геомеханическое обоснование предельно допустимых углов наклона бортов; рыночные цены на металл; себестоимость добычи и переработки руды; норма дисконтирования.

Задача геолого-промышленной оценки запасов с применением компьютерных технологий состоит в том, чтобы обеспечить экономически выгодную стратегию эксплуатации месторождения на весь жизненный срок работы шахты или карьера. В рыночных условиях стоимость металла и, соответственно, конфигурации наилучших контуров отработки запасов с течением времени могут существенно меняться, поэтому стоимостная блочная модель должна постоянно переоцениваться и использоваться для прогнозирования наиболее выгодной последовательности (секвенции) этапов разработки месторождения. Результаты таких научно обоснованных экономических прогнозов становятся основой перспективного планирования горных работ. Более подробная информация о стратегическом планировании отработки запасов месторождений с применением современных компьютерных технологий изложена в монографии [29] .

#### **4.5. Погрешность подсчета запасов**

От достоверности подсчета количества запасов зависит объем капиталовложений на строительство или реконструкцию горного предприятия, сроки окупаемости капиталовложений. То есть точность определения запасов напрямую определяет экономическую составляющую разработки месторождения.

Подсчет величины запасов выполняется с той или иной степенью точности, на которую в первую очередь влияют: степень сложности геологического строения месторождения; вид разведочной сети и детальности разведки; погрешность измерения параметров, входящих в подсчет; методика измерений и анализа проб; методы компьютерного моделирования рудных тел. В связи с эти погрешности, возникающие при подсчете запасов, разделяют на три группы:

1) технические погрешности измерений или опробования, связанные с техникой замеров и определением исходных параметров для подсчета запасов, к которым относятся также инструментальные погрешности замеров мощности, аналитические погрешности химических анализов, определяющих содержание полезных компонентов, точность определения плотности, влажности и др.;

2) геологические погрешности или ошибки аналогий, связанные с распространением фактических данных замеров и опробования, полученных по отдельным разведочным пересечениям, выработкам и скважинам на близлежащие участки месторождения;

3) методические погрешности, связанные с применением различных традиционных или компьютерных технологий моделирования и выбором тех или иных методов оценки запасов.

*Технические погрешности измерений* и опробования связаны как с несовершенством приборов опробования, геофизической разведки и маркшейдерской съёмки, так и с человеческим фактором. Правильно вы-

бранная оператором техника и приёмы измерений позволяют минимизировать эти погрешности.

Основные измерительные ошибки имеют обычно следующий порядок величин.

1. Ошибка определения плотности пород в некоторых случаях может достигать 5-10%. Большие ошибки обычно связаны с малым выходом керна при интервальном опробовании скважин.

2. Погрешность экспертного оконтуривания и определения площадей на планах определяется в 2-3%.

3. Маркшейдерская погрешность составления планов, которая вызывает влияние на точность замеров площадей и расстояний между выработками, находится в пределах 0,5-1,0%.

4. Погрешность замеров мощностей определяется в 2-10%, а иногда по скважинам без контрольного каротажа скважин доходят до 20-30%. При этом максимальные ошибки обычно относятся к маломощным телам, тогда как для мощных залежей относительные погрешности всегда меньше.

5. Согласно действующим инструкциям, погрешность химических анализов для руд черных, цветных и редких металлов может составлять от 1 до 20%, а в ряде случаев, например, ртути или ванадия при низком их содержании в руде, достигать 30% и выше. Большие погрешности обычно получаются для руд с низким содержанием полезного компонента, тогда как для богатых руд относительная погрешность химических анализов обычно меньше.

6. С геологическими погрешностями, как правило, связаны значительные ошибки в подсчете запасов. Величина погрешности, зависящая от распространения показателей (мощности, плотности и содержания) отдельных разведочных выработок на весь подсчитываемый объем полезного ископаемого является, как правило, больше, чем погрешности измерений. При подсчете запасов высоких категорий (А и В) погрешность может доходить до 10-15%. Иногда, особенно при неправильном представлении геологического строения месторождения и просчётах в определении параметров оценки запасов, она может быть и выше, что в общем случае недопустимо.

Среди методических погрешностей наибольшее влияние на результаты оценки запасов могут оказывать способы оцифровки рудных тел, приёмы оконтуривания и методы интерполяции при построении цифровой модели месторождения. Здесь также многое зависит от опыта оператора и умения выбрать правильный метод подсчёта. Развитие компьютерной технологии автоматизированного моделирования залежи и подсчёта запасов на основе теории нейронных сетей с элементами искусственного интеллекта позволит полностью устранить влияние субъективного фактора.

Все типы указанных погрешностей могут быть как случайными, так и систематическими. Случайные погрешности с противоположным знаком могут взаимно погашать друг друга и не оказывают серьезного влияния на конечные результаты оценки запасов. Вероятность получения резко преобладающего количества случайных погрешностей с одним знаком весьма незна-

чительна. Однако систематические погрешности с одинаковым знаком оказывают одностороннее влияние на результаты подсчета и искажают их.

При подсчете запасов по блочной модели, построенной с применением интерполяции методом кригинга, погрешность оценки геопоказателей, дисперсия вычисляются автоматически. Это даёт преимущество в применении таких геостатистических методов, как кригинг или имитация условий перед другими методами.

#### **4.6. Выбор метода подсчета запасов**

Характер распределения полезных или вредных компонентов в теле полезного ископаемого, минералогический состав и физические свойства сырья оказывают большое влияние на методы разведки и опробования и через них на выбор способа определения и метод подсчета средних содержаний компонентов.

План разведочных работ определяется в основном расположением разведочных выработок или требованиями к плотности сети скважин. Сам тип разведочных выработок мало влияет на выбор метода подсчета запасов. Подсчётные профили могут быть представлены скважинными данными колонкового и ударного бурения, результатами опробования шурфов. Планы для каждого горизонта составляются по данным из ортов и горизонтальных скважин подземного бурения, результатов геофизического каротажа скважин.

Конфигурация сети разведочных выработок и буровых скважин в максимальной степени обуславливает выбор и возможность использования того или иного метода подсчета запасов. С этой точки зрения все методы разведочных работ могут быть разбиты на следующие основные группы.

1. Разведочные выработки пересекают тело полезного ископаемого через определенные интервалы по мощности и расположены на разведочных профилях, расстояния между которыми значительно превышают расстояния между выработками на профилях. Такое расположение дает возможность построить геологические разрезы, пересекающие тело полезного ископаемого в одном направлении. Так выполняется разведка пластов, линз, слоистых и плащеобразных тел, жил, россыпей и других тел, которые в пространстве имеют одно короткое измерение (мощность) и два длинных. В этом случае одно из двух направлений значительно отличается по своей величине от другого и тело полезного ископаемого в плане или в плоскости падения имеет вытянутую форму.

2. Разведочные выработки пересекают тело полезного ископаемого по мощности через определенные интервалы и расположены по определенной сетке (квадратной, прямоугольной, треугольной, ромбической). Подобное расположение выработок дает возможность построить равноточные геологические разрезы в двух и более направлениях. Такой системой ведётся разведка пластов, линз, слоистых тел, жил, россыпей и других тел, которые в пространстве имеют одно, более короткое измерение, мощ-

ность, и два более длинных. Если оба последних измерения равновелики, то тело полезного ископаемого в плане или плоскости падения имеет практически изометрическую форму.

3. Разведочные выработки пересекают рудную залежь как в направлении простирания, так и падения. При этом мощность тела полностью вскрывается разведочными скважинами или горными выработками. Чаще всего этим способом ведется разведка крутопадающих пластовых тел и жил, причем разведочные горные выработки разрезают тело на эксплуатационные блоки и являются одновременно подготовительными выработками.

Когда разведочные работы проводятся только на выборочных горизонтах залежи полезного ископаемого без нарезки на блоки, тогда подсчет запасов может быть осуществлён методом *горизонтальных разрезов*. Комбинированные системы разведки обычно требуют и комбинирования методов подсчета запасов. Если, например, верхние горизонты тела полезного ископаемого разведаны горными выработками, то запасы этой части можно подсчитать методом *эксплуатационных блоков*; нижние горизонты, разведанные скважинами, в зависимости от расположения последних могут быть подсчитаны методом разрезов либо методом *геологических блоков*.

Практика геометризации месторождений свидетельствует о том, что каждому приему разведки соответствует некий оптимальный метод оценки запасов. Так, методу вертикальных разрезов – разведка месторождений вертикальными профилями, методу горизонтальных сечений – горизонтальными разведочными выработками; методу эксплуатационных блоков – разведка, при которой тело расчленяется на эксплуатационно-подготовительные блоки; методу геологических блоков – расположение выработок по регулярной сетке. Согласно классификации, приведенной в работе [37], все месторождения можно разделить на четыре группы, потенциально пригодные для применения тех или иных методов оценки запасов.

1. Месторождения, которые могут быть разведаны до высоких категорий разведанности бурением без применения горных работ. Буровые скважины располагаются по разведочным линиям или по сетке.

2. Месторождения, которые могут быть разведаны до высоких категорий путём комбинирования буровых и горных работ. Основная роль в разведке принадлежит буровым работам. Скважины и выработки располагаются по разведочным линиям, по сетке, по определенным горизонтам.

3. Месторождения, которые могут быть разведаны до высоких категорий разведанности лишь с помощью горных работ. Если горные выработки пересекают тело полезного ископаемого по простиранию и падению, то при условии вскрытия выработками полной мощности разведочные работы, как правило, являются одновременно горно-подготовительными и нарезают тело на эксплуатационные блоки. Если же тело полезного иско-



паемого пересекается разведочными выработками (скважинами) без вскрытия полной мощности, то для этого требуются проходка специальных горных выработок (ортов, расщелей) или применение подземного бурения. Часто глубокие горизонты тел этой группы месторождений разведываются до низких категорий буровыми скважинами.

4. Месторождения, которые обычно разведываются только горными выработками, располагающимися по определенным горизонтам, что обуславливает применение для подсчета запасов метода разрезов или геологических блоков, а при нарезке эксплуатационно-подготовительных блоков – метода эксплуатационных блоков.

Традиционно считается, что наиболее универсальным является *метод разрезов*. Обязательным условием возможности применения этого метода является расположение разведочных выработок по определенным разведочным линиям, профилям или горизонтам, дающее возможность строить геологические и подсчетные разрезы. Для всех четырех групп месторождений может быть применен также метод геологических блоков. Его можно использовать как при геометрически закономерном, так и при не закономерном распределении разведочных выработок. Компьютерные варианты методов разрезов и блоков в целом основаны на традиционной методике, однако помогают существенно увеличить оперативность подсчетов при работе напрямую с большими массивами баз данных геологической информации.

Применение в настоящее время компьютерных технологий позволяет полностью модернизировать *метод разрезов* до уровня построения полноценной каркасной модели оболочек рудных тел и автоматизированного подсчета объемов и оценки запасов месторождения. Методы изолиний или объемной палетки Соболевского соответственно заменяются подсчетом запасов по регулярной блочной модели.

Особенности выбора компьютерной методики. Выбор неадекватного метода оценки запасов обычно приводит к высокой погрешности результатов и негативно влияет на результаты проектирования и эксплуатации. В этой связи геостатистические процедуры интерполяции обеспечивают более достоверные результаты, поскольку они в значительной степени зависят от качества исходной базы данных и дают возможность рассчитать погрешность оценки извлекаемых запасов.

*Обычный кригинг* (Ordinary Kriging, ОК) может с успехом применяться для построения блочных моделей, когда наблюдается четкая закономерность в распределении содержаний в 3D пространстве. Если экспериментальную вариограмму не удастся аппроксимировать моделью одного из принятых в геостатистике законов распределения, то следует применять иные методы интерполяции: обратных расстояний, ближайшей пробы или соседних регионов. Тем не менее, выборочные оценки, полученные мето-

дом кригинга, следует контролировать методом обратных расстояний IDW. Метод ОК успешно применяется на месторождениях вкрапленных руд, в коре выветривания, для моделирования стратиморфных месторождений, гидротермально-метасоматических, медно-порфировых, скарновых месторождений железистых кварцитов и алмазов. Однако там, где проявляется высокий эффект самородков, метод ОК заменяют интерполяцией по методу IDW.

Интерполяция методом *индикаторного кригинга* (Indicator Kriging, IK), хотя и является достаточно трудоемкой операцией, однако успешно применяется на ряде метасоматических месторождений, где факторы рудопроявления известны лишь в общих чертах. Для таких месторождений характерна смешанная минерализация и невозможность четкого разделения составных компонентов в пространстве. Геологические границы устанавливаются только по данным опробования, поэтому геологическая интерпретация обычно представляет собой достаточно субъективный и трудоемкий процесс.

Интерполяция по методу IDW лучше подходит для месторождений, где наблюдается четкий структурный контроль оруденения, а также для тех случаев, где разбивка на блоки проводится преимущественно по геологическим критериям.

Полигональный метод РМ хорошо подходит для оценки узких жильных рудных тел. Оценка сводится к простой процедуре взвешивания содержания на мощность рудного тела. Метод РМ хорошо проявляет себя там, где нет корреляционной связи между мощностью и содержанием и где в расчет принимается истинная мощность. В других случаях основываться только на результатах полигонального метода нельзя.

Отмеченные основные оценочные методы целесообразно применять на стадии предварительного и полного технико-экономического обоснования. Достаточные для оценки экономической целесообразности проекта эти методы, тем не менее, не обеспечивают связи между долгосрочным планированием и краткосрочными операционными требованиями. Последние требуют детального знания геологии участка рудного тела. В этом случае для оценки риска важно использовать серию образов рудного тела, например, для оценки эффекта изменчивости содержания на месторождении на выбор эксплуатационной стратегии. В этом смысле на стадии эксплуатации месторождения метод имитации кондиций является наиболее подходящим.

На сложноструктурных месторождениях с различным типом минерализации, выбор метода оценки запасов должен быть обоснован как с геологических, так и геостатистических позиций.

## Глава 5

### Управление и оптимизация извлечением запасов

#### 5.1. Классификация запасов по степени подготовленности к добыче

##### Открытый способ разработки

Классификация запасов в карьерах по степени подготовленности их к выемке предусматривает три категории запасов: вскрытые, подготовленные и готовые к выемке.

Вскрытыми запасами считаются балансовые запасы участка уступов, подсеченных выездной траншеей, пройденной на отметку рабочего горизонта до границ рудного тела, поверхность которых освобождена от покрывающих пород или руды вышележащих уступов или обнажена вследствие естественных условий залегания. При этом должно обеспечиваться безопасное ведение эксплуатационной разведки и горно-подготовительных работ.

Границы вскрытых запасов принимаются: на глубину – горизонт, подсеченный выездной траншеей, в плане – контур обнаженного рудного тела.

Запасы руды, находящиеся в предохранительных бермах, под заездами и сооружениями, учитываются особо и переводятся во вскрытые только после оформления в надлежащем порядке разрешения на их выемку.

Вскрытые запасы характеризуют перспективу добычных работ и позволяют определить срок существования карьера при остановке вскрышных работ. Уменьшение вскрытых запасов при неизменной вскрываемой площади рудной залежи указывает на снижение интенсивности вскрышных работ. Содержание полезного компонента в контурах вскрытых запасов должно быть выше минимального промышленного.

При разработке разобщенных рудных залежей небольшой мощности иногда может быть получено содержание полезного компонента ниже минимального промышленного в результате включения вскрышных пород в контуры вскрытых запасов. В этом случае карьер практически не имеет вскрытых запасов, так как добыча руды в нем не может осуществляться без производства вскрышных работ. Количество вскрытых запасов – это резерв добывающего предприятия, который может быть реализован при закрытии карьера по причине нерентабельности производства.

По степени разведанности к вскрытым запасам могут относиться запасы категорий А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>, удовлетворяющим перечисленным условиям.

Подготовленными запасами считаются балансовые запасы из числа вскрытых на участках уступов с обнаженной верхней и боковой поверхностями, для разработки которых выполнены горно-подготовительные работы, предусмотренные техническим проектом. Границами подготовленных запасов являются: сверху – верхняя обнаженная поверхность уступа; снизу – горизонт подошвы уступа; сбоку со стороны добычных работ – обнаженная поверхность откоса уступа; сбоку со стороны массива руды – поверхность, построенная от границ предохранительной бермы вышележащего уступа под углом откоса, предусмотренным техническим проектом.

Подготовленные запасы характеризуют ближайшую перспективу добычных работ в карьере на подготовленных к разработке рудных уступах. Содержание полезного компонента в подготовленных запасах должно быть заданным, но выше минимального промышленного.

Для отнесения запасов уступа или его части к подготовленным запасам требуется выполнение горно-подготовительных работ, предусмотренных планом разработки месторождения или техническим проектом, как-то: проведение разрезной траншеи, дренажных, водоотливных и водопроводящих выработок, зачистка уступа от вскрышных пород и др.

Готовыми к выемке запасами считаются балансовые запасы из числа подготовленных, для разработки которых выполнены вспомогательные работы, и они могут быть отработаны независимо от передвижения смежного верхнего уступа. При этом должна обеспечиваться необходимая величина резервной полосы, ширина ее равна разности фактической и минимально необходимой ширины рабочих площадок. Границами готовых к выемке запасов являются границы резервной полосы на уступах: сверху – верхней обнаженной поверхностью уступа; снизу – горизонтом подошвы уступа; сбоку со стороны добычных работ – обнаженной поверхностью откоса уступа; сбоку со стороны массива руды – поверхностью откоса уступа, построенной от границы рабочей площадки вышележащего уступа под углом откоса, предусмотренным техническим проектом. К готовым к выемке запасам относятся также запасы, отбитые от массива руды.

Готовые к выемке запасы учитываются при текущем планировании горных работ. На готовых к выемке запасах производятся основные операции технологического процесса добычи: зачистка рабочих площадок, бурение, взрывание и выемка рудной массы. Среднее содержание полезного компонента в готовых к выемке запасах должно быть выше или равно минимально промышленному.

Обычно готовые к выемке запасы включают сумму взорванных, обуренных и готовых к бурению запасов руды. Готовыми к бурению запасами считаются запасы во взрывных блоках, имеющих утвержденный локальный

проект бурения, готовые рабочие площадки, подъезды и необходимый парк буровых станков. Готовые к выемке запасы должны обеспечивать стабильную работу предприятия по объемам добычи и качеству руды. Учет движения готовых к выемке запасов по степени их подготовленности: взорванных, обуренных, подготовленных к бурению – производится маркшейдерской службой горного предприятия.

Примеры выделения запасов по степени подготовленности для карьеров представлены на рис. 1.5.

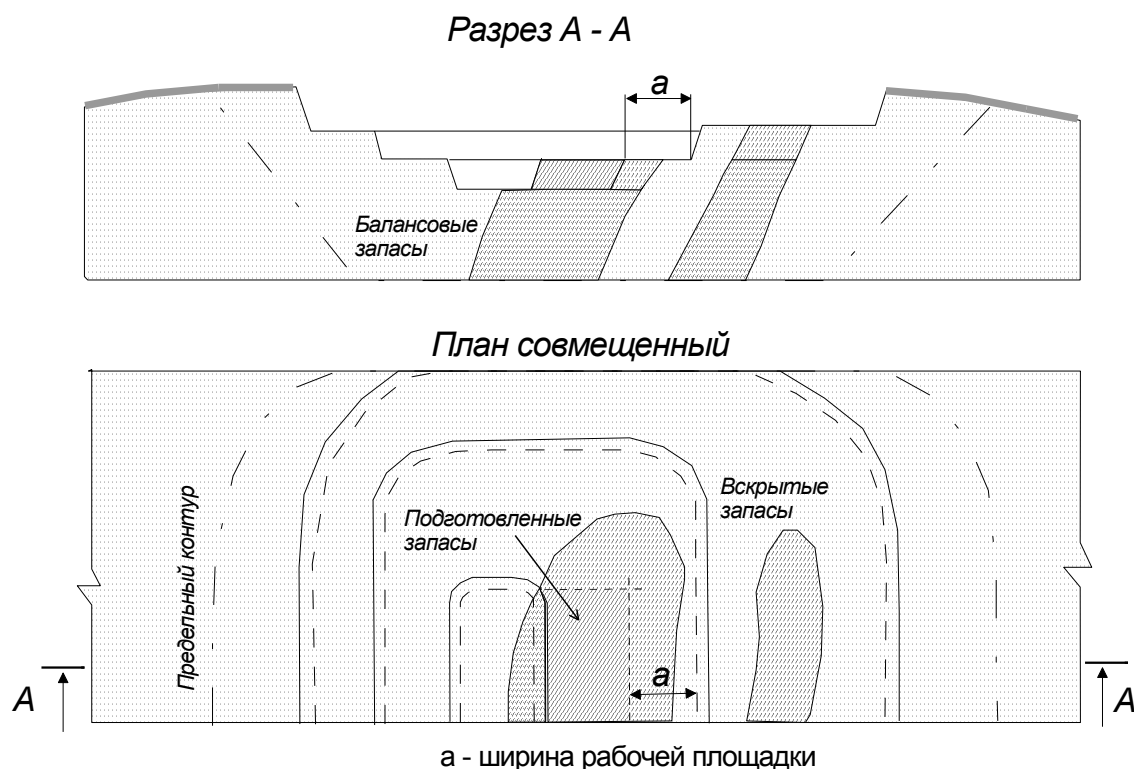


Рис. 5.1. Вскрытые и подготовленные запасы руды в карьере

### Подземный способ разработки

Вскрытыми считается часть балансовых запасов месторождения, для разработки которых выполнены все горно-капитальные работы, предусмотренные техническим проектом. Кроме того, для отнесения запасов к группе вскрытых необходимо подсечение горной выработкой контакта висячего или лежащего бока залежи. Если месторождение представлено несколькими отдельными залежами, к вскрытым относятся запасы тех залежей, где контакты подсечены горными выработками. Перевод части балансовых запасов предприятия во вскрытые производится участками, для которых выполнены горно-капитальные работы, предусмотренные техническим проектом. Границами вскрытых запасов являются:



3) в раздавленных и заваленных участках, нарезка или выемка которых временно невозможна.

Подсчет подготовленных запасов ведётся по системам разработки.

Готовыми к выемке считаются запасы блоков и участков (из числа подготовленных запасов), где пройдены все нарезные выработки, необходимые для начала очистной выемки полезного ископаемого в соответствии с принятым техническим проектом.

Запасы во временных целиках (потолочине, днище, междукammerном целике) считаются готовыми к выемке при следующих условиях:

1) проведены необходимые нарезные выработки, предусмотренные проектом отработки этих целиков;

2) выполнены нарезные работы в том блоке (панели), запасы которого будут отработаны совместно с запасами во временных целиках.

Подсчет готовых к выемке запасов производится по системам разработки с учетом состояния горных работ в блоках (панелях).

## **5.2. Учет движения запасов руд**

Правилами охраны недр предусматривается, что горнодобывающие предприятия при разработке месторождений обязаны обеспечить предусмотренное проектом комплексное извлечение запасов из недр; регулировать отработку различных по качеству запасов полезных ископаемых; устанавливать планы развития горных работ и контролировать полноту выемки запасов; не допускать потерь запасов; вести систематические геолого-маркшейдерские наблюдения в горных выработках; своевременно пополнять горнографическую документацию с целью использования ее для оперативного руководства; вести геолого-маркшейдерский учет состояния и движения запасов, учет добычи, показателей извлечения ПИ из недр.

Учет движения запасов полезного ископаемого производит геолого-маркшейдерская служба с целью контроля за правильным и более полным использованием недр путём систематического наблюдения за своевременным обеспечением горного предприятия вскрытыми и подготовленными запасами для предупреждения перебоев в работе [38].

Учет движения запасов производится на основе геолого-маркшейдерской документации периодически в сроки, утвержденные вышестоящими организациями (ГКЗ, ТКЗ).

Запасы полезных ископаемых в государственных и территориальных балансах учитываются по месторождениям (площадям, участкам, шахтным и карьерным полям, залежам, горизонтам и другим объектам учета) в соответствии со степенью их промышленного освоения и способом отработки пользователями недр. Учёт ведётся по месторождениям, добывающим предприятиям, рудным районам, бассейнам, регионам, субъектам Российской Федерации и в целом по России. Учет состояния и движения запасов выполняется

совместно геологической и маркшейдерской службами горного предприятия. Полученные данные являются основой государственного учета запасов. Они обеспечивают проектирование и реконструкцию предприятий, планирование и контроль геологоразведочных и эксплуатационных работ.

### 5.3. Формы учёта движения запасов

Согласно действующему «Положению о порядке учёта запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов»<sup>77</sup>, списание запасов отражается организацией по добыче в формах государственного федерального статистического наблюдения № 5-гр, 70-тп, 6-гр, 11-шрп, 71-тп, 2-тп, 31-тп. Для рудных месторождений принята обязательной отчётность по формам № 5-гр, 70-тп и 71-тп.

Требования по учету состояния и движения запасов, потерь и разубоживания полезных ископаемых включают<sup>8</sup>:

- учет числящихся на государственном балансе запасов полезных ископаемых и запасов, оперативно учтенных пользователем недр по результатам геологического изучения;
- запасы полезных ископаемых учитываются по категориям: А, В, С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub> отдельно по месторождениям, участкам, пластам, залежам, отдельным рудным телам, шахтным полям, выемочным единицам, способам и системам разработки, основным промышленным (технологическим) типам и сортам полезных ископаемых;
- запасы полезных ископаемых учитываются по наличию их в недрах независимо от возможного разубоживания и потерь при добыче и переработке;
- списание балансовых и забалансовых запасов полезных ископаемых с учета организации в результате их добычи и потерь производится по формам федерального государственного статистического наблюдения. При утрате полезными ископаемыми промышленного значения при геологоразведочных работах и разработке месторождения списание производится в соответствии с технико-экономическим обоснованием при положительном заключении экспертизы охраны недр;
- списание запасов отражается в геологической и маркшейдерской документации отдельно по элементам учета и вносится в специальную книгу учета списанных запасов;
- горные выработки, служащие для подхода к участкам месторождения, запасы которых намечены к списанию как утратившие промышленное

---

<sup>77</sup> Положение о порядке учета запасов полезных ископаемых, постановки их на баланс и списания с баланса запасов / Приказ МПР России 09.06.1997. – М., 1997. – № 122

<sup>8</sup> Правила охраны недр: ПБ 07-601-03 // Приказ Госгортехнадзора России 06.06.03. – Москва, 2003. – №71. – 60 с



значение или не подтвердившиеся, погашаются после окончательного решения вопроса о списании запасов;

- прирост и перевод запасов как основных, так и совместно с ними залегающих полезных ископаемых и содержащихся в них компонентов в более высокие по степени изученности категории производятся на основе их подсчета по фактическим геологическим материалам и утверждаются в установленном порядке.

#### **5.4. Определение потерь и засорения**

Запасы полезных ископаемых, оцененные на стадии разведки, в процессе разработки не могут быть полностью извлечены из недр по многим причинам. Часть добытой руды попадает в отвалы, теряется при транспортировке и складировании. Разница между количеством подсчитанных и извлеченных балансовых запасов образует потери. Коэффициент потерь при добыче – это отношение количеств потерянных и погашенных при добыче балансовых запасов.

Разубоживание (потери качества) – это происходящее в процессе разработки снижение содержания полезного компонента в добытом полезном ископаемом по сравнению с содержанием его в массиве вследствие примешивания пустых пород и некондиционного полезного ископаемого, а также потерь части полезного ископаемого. Количественно потери качества выражаются коэффициентом разубоживания.

В настоящее время наряду с потерями и разубоживанием рекомендуется использовать показатели полноты и качества извлечения полезного компонента из недр.

Учет и нормирование потерь и разубоживания полезных ископаемых выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- первичный учет ведется по каждой выемочной единице, соответствующей минимальному участку месторождения с относительно однородными геологическими условиями, отработка которого согласно проекту осуществляется одной системой разработки, технологической схемой выемки (карьер, уступ, блок, лава, камера, залежь, месторождение и т.п.). В пределах выемочной единицы с достаточной достоверностью оценены запасы и возможен достоверный первичный учет добычи (извлечения) полезных ископаемых и компонентов;

- сводный учет осуществляется по участкам и месторождению в целом;

- ежегодный отчетный баланс запасов составляется на основе первичного и сводного учета запасов, потерь и разубоживания полезных ископаемых по состоянию на 1 января каждого года.

При разработке месторождений потери и разубоживание руды должны определяться прямым методом по замерам объемов теряемой ру-

ды или вовлекаемых в добычу пустых пород на месте возникновения потерь и разубоживания или расчетам их количества с использованием геолого-маркшейдерских планов и разрезов, составленных по результатам съемки очистного пространства. Применение косвенного метода определения потерь полезных ископаемых при их добыче допускается при обеспечении необходимой точности оценки их объемов в технологическом процессе добычи, выявлении сверхнормативных потерь и причин их образования.

Нормативы потерь руды при добыче рассчитываются самим предприятием, согласовываются с органами Ростехнадзора и утверждаются главным инженером предприятия по каждой выемочной единице (горизонту).

Добыча полезного ископаемого на горных предприятиях сопровождается разубоживанием. С учётом этого количество потерянного полезного ископаемого  $\Pi$  рассчитывается по формуле [5]:

$$\Pi = B - D + B, \quad (5.1)$$

где  $B$  – балансовые запасы;  $D$  – добыча полезного ископаемого;  $B$  – количество разубоживающей породы, попавшей в полезное ископаемое при добыче.

Количество разубоживающей породы  $B$  и потерь  $\Pi$  может быть определено по результатам непосредственных замеров (мощности и площади рудных тел, ширины, длины и сечения горных выработок) или же косвенным путем, если известно содержание компонента в процентах или граммах на тонну (кубометр) в полезном ископаемом, в массиве  $c$ , в добытом ископаемом  $a$  и во вмещающей (разубоживающей) породе  $b$ .

Зная  $D$ ,  $c$ ,  $a$  и  $b$ , определяют  $B$  из равенства

$$B = D \frac{c-a}{c-b}. \quad (5.2)$$

При известных значениях  $a$ ,  $b$  и  $c$  потери полезного ископаемого в процентах вычисляют по формуле:

$$\Pi = \left[ 1 - \frac{D(a-b)}{B(c-b)} \right] 100. \quad (5.3)$$

Потери полезного ископаемого и компонента в абсолютных величинах определяют по формулам:

а) полезного ископаемого

$$\Pi = \frac{B \cdot \Pi\%}{100}; \quad (5.4)$$

б) полезного компонента

$$\Pi = \frac{B \cdot c \cdot \Pi\%}{100}. \quad (5.5)$$

Формулы определения потерь по данным о содержании полезного компонента в недрах, добытой руде и разубоживающих породах основаны на допущении, что потери полезного ископаемого пропорциональны потерям содержащихся в нем полезных компонентов.

При подсчете потерь полезного компонента принимают средневзвешенное содержание его по данным опробования участков, отработанных за отчетный период. Погрешность подсчета потерь при таком методе может оказаться значительно больше погрешности непосредственного определения потерь в целиках и в отбитом состоянии в пределах погашенного участка залежи. Поэтому не следует определять потери на основе приведенных формул в тех случаях, когда они могут быть вычислены непосредственно как сумма запасов, оставленных в целиках и в отбитом состоянии в пределах погашенного участка залежи. Формулы в этих случаях используют для приближенного контроля с целью выявления грубых ошибок вычислений. Только при полной невозможности непосредственного замера количества потеряннного полезного ископаемого (при этажном обрушении и др.) вычисляют фактические потери по приведенным формулам.

В общем случае для определения потерь и разубоживания полезного ископаемого в пределах погашенного участка залежи должны быть известны следующие данные:

а) При методе косвенных определений (по приведенным выше формулам):  $B$  – количество погашенных балансовых запасов полезного ископаемого в массиве;  $D$  – количество добытого полезного ископаемого;  $c$  – содержание компонента в полезном ископаемом в массиве;  $a$  – содержание компонента в добытом полезном ископаемом;  $b$  – содержание компонента в породах, разубоживающих добытое полезное ископаемое.

б) При методе непосредственных определений (по данным замеров):  $B$  – балансовые запасы полезного ископаемого, потерянные в целиках и в отбитом состоянии,  $c$  – содержание полезного компонента, потерянного в целиках и в отбитом полезном ископаемом.

Разубоживание полезного ископаемого  $P$  при добыче определяют:

а) по соотношению веса разубоживающей породы  $B$  к весу добытого полезного ископаемого  $D$ :

$$P = \frac{B}{D} 100; \quad (5.6)$$

б) по данным о содержании полезного компонента: в добытом полезном ископаемом  $a$ , полезном ископаемом в недрах  $c$  и в разубоживающей породе  $b$ :

$$P = \frac{c-a}{c-b} 100 = \left(1 - \frac{a-b}{c-b}\right) 100. \quad (5.7)$$

Определение количества разубоживающей породы в добытом полезном ископаемом (рудной массе) возможно при наличии данных о количестве отбитого из массива полезного ископаемого ( $O$ ). Для этого определяют по замеру выработанного пространства общее количество отбитой горной массы и исключают из нее количество породы, отбитой из вмещающих пород, а также содержащейся в виде прослоек и включений внутри рудной залежи.

Разность весовых значений добытого  $D$  и отбитого полезного ископаемого  $O$  (за вычетом потерь) составит вес породы  $B$ , в добытом полезном ископаемом  $D$  (рудной массе).

$$B = D - O. \quad (5.8)$$

В случае невозможности непосредственно определить значение  $O$  вычисление величины  $B$  выполняется по формуле:

$$B = \frac{D \cdot P\%}{100} \quad (5.9)$$

Оценку разубоживания производят по основному компоненту, содержащемуся в полезном ископаемом. Фактическое разубоживание сопоставляют с разубоживанием, принятым в проекте разработки месторождения или в годовом плане развития горных работ. В случае превышения фактического разубоживания над проектом принимаются меры к его уменьшению путем более тщательной сортировки полезного ископаемого или изменения технологии добычи.

Плановые потери могут несколько отличаться от нормативных вследствие того, что их рассчитывают только на определенный период (год, квартал), в течение которого выемочные единицы могут быть отработаны лишь частично и не все элементы потерь, предусмотренные нормативами, окажутся в контуре, намеченном к отработке.

При отсутствии установленных нормативов потерь и разубоживании полезного ископаемого для той или иной системы разработки определяют плановые потери и разубоживание на основе технического проекта или рассчитывают по элементам систем разработки, принятым для тех или иных горнотехнических условий. Плановые потери включают суммарное количество намечаемых потерь всех видов:

а) связанных с системой разработки (в междокамерных и междуэтажных целиках, в днищах камер, потолочинах, при открытых разработках – в кровле, почве и в приконтактных участках);

б) в закладке выработанного пространства и от неполноты выпуска при системах с обрушением. Суммарные абсолютные цифры плановых потерь, подсчитанных для каждой системы разработки в пределах намеченного к отработке участка согласно годовому плану развития горных работ, «выражают в процентах в целях сопоставления с проектными, а также с фактическими потерями, зависящими от системы разработки.

Компьютерная методика расчёта потерь и засорения по блочной модели (сетке GRID 3D) на примере золоторудного месторождения описана в работе [29].

Для расчета нормативов потерь и разубоживания сначала определяют экономически целесообразный объем перемешивания руды и породы, который зависит от формы и геометрии контактных зон, эффективности и оперативности методов геологического опробования массива, ценности полезного

ископаемого, применяемой системы разработки и размеров горного оборудования. Затем экономически оптимизируют граничное значение между потерями и разубоживанием, то-есть определяют, какую часть шихты целесообразно направлять в отвал, а какую – на переработку. Таким образом, получают 3 параметра:

- а) ожидаемые потери руды при добыче или извлечении;
- б) ожидаемое разубоживание добываемой руды пустой породой;
- с) содержание полезных компонентов в примешиваемой породе.

Извлекаемые запасы товарной руды при планировании обычно рассчитывают следующим образом:

- 1) определяется тоннаж товарной руды, поставляемой на фабрику;
- 2) определяется количество металла, содержащегося в товарной руде;
- 3) рассчитывается среднее содержание полезного компонента в товарной руде.

В рассмотренной методике предусматриваются 3 варианта отработки ячейки блочной модели, когда блок представляет собой:

- 1) богатую руду;
- 2) руду среднего качества;
- 3) руду с низким содержанием полезного компонента.

Элементарным блоком при планировании потерь и разубоживания считается основная ячейка (блок) блочной модели. Элементарным рудным блоком, предназначенным к выемке, считается рудный блок, тяготеющий к взрывной рудной скважине с геометрическими параметрами, зависящими от расстояния между взрывными скважинами.

### **5.5. Учет запасов по степени готовности к выемке**

Эффективность разработки месторождений в значительной мере зависит от наличия в необходимых соотношениях вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов. Недостаток, например, готовых к выемке запасов нарушает ритмичность работы горного предприятия, снижает производительность горного предприятия и соответственно его прибыль.

Для каждого горнодобывающего предприятия должны быть установлены определенные нормативы в качестве критериев правильного планирования горных работ. Нормативы представляют собой резервы подготовленных и готовых к выемке запасов, которыми должно располагать предприятие при заданном в данный момент размере добычи и принятых систем разработки.

Нормативы запасов по степени их подготовленности к добыче должны обеспечивать выполнение планов по работе предприятия; отражать технический прогресс в горном деле; учитывать специфику горно-геологических, а в необходимых случаях – и климатических условий; способствовать наиболее рациональному использованию запасов минерального сырья; соответствовать принципу максимальной экономии трудовых и материальных ресурсов.

Наличие нормативов позволяет своевременно оценивать состояние горных работ – отставание подготовительных выработок, которое может привести к выполнению плана добычи, или, наоборот, необоснованное их опережение, ведущее к преждевременным затратам.

Норматив готовых к выемке запасов руды определяется как среднее количество руды, находящееся в одновременной разработке, необходимое для обеспечения требуемой производственной мощности в конкретных геологических условиях при наличной (фактической) технической оснащенности производства.

Технологически необходимое количество готовой к выемке руды ( $P_{тг}$ ) может быть определено по количеству запасов, находящихся в одновременной разработке, на основе выемочной единицы – расчетного, технологически номинального, добычного блока.

Компьютерная методика учёта и нормирования запасов по степени подготовленности к выемке включает следующие операции.

1. Путём интерполяции маркшейдерских точек рельефа строится грид-модель (GRID 2D) топоповерхности земельного отвода на период до начала отработки месторождения.

2. С помощью процедур двумерной интерполяции строится модель решетки поверхности рабочего карьера по базе данных маркшейдерских пикетов и точек, которая объединяется с моделью рельефа. При комбинировании используется опция обновления узлов поверхности рельефа узлами модели поверхности карьера.

3. Путём интерполяции данных геологического опробования скважин и борозд (методами дистанционного взвешивания и геостатистики) выполняется построение трехмерной блочной модели (GRID 3D) рудной залежи.

4. Выполняется автоматизированное или интерактивное оконтуривание выемочных единиц и участков подсчета геологопромышленных запасов руд, в том числе контуров вскрытых, подготовленных и готовых к выемке запасов.

5. Строятся триангуляционные модели всех выемочных единиц со структурными линиями берм, бровок и съездов. Выполняется объединение триангуляционной и блочной моделей. При этом треугольникам, попадающим в определенные геологические блоки трехмерной блочной модели, присваиваются соответствующие идентификаторы типов пород и содержания полезного компонента.

6. Осуществляется окончательный подсчёт запасов по степени подготовленности путем суммирования значений микроблоков с определенными показателями и размерами  $D_x$ ,  $D_y$ ,  $D_z$  в заданных контурах.

Экономически обоснованное необходимое количество готовых к выемке запасов  $P_{г}$  может быть найдено по формуле:

$$P_{\Gamma} = \frac{P_{\Gamma\Gamma} K_1 K_2}{\sum_{i=1}^k m_i} \quad (5.10)$$

где  $P_{\Gamma\Gamma}$  – технически необходимый норматив запасов;

$K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты резерва, обеспечивающие подтверждение ожидаемых объемов соответственно руды и содержания в ней полезного компонента;

$k$  – число технологических сортов руды;

$m_i$  – доля некоторого  $i$ -го технологического сорта в общем объеме добычи рудника.

В пределах каждой категории готовности (готовые, подготовленные и вскрытые запасы) выделяют технологически необходимую составляющую и резервную части, страховую массу, предназначенную для компенсации возможного неподтверждения геологических данных или влияние других объективных обстоятельств (климатических условий, усреднения руды и др.)

Под технологически необходимым нормативом в данном случае понимается минимально необходимое для выполнения предприятием плана количество готовых к выемке запасов, находящихся в процессе разработки, при технологически благоприятных условиях производства и полной подтверждаемости геологических данных.

Для нескольких выемочных единиц технологически необходимое количество запасов  $P_{\Gamma\Gamma}$  (в тыс. т) каждой категории готовности зависит от количества и размеров выемочных единиц, находящихся в одновременной разработке:

$$P_{\Gamma\Gamma} = f(N, q, m), \quad (5.11)$$

где  $N$  – число выемочных единиц, одновременно находящихся в разработке (выемке, бурении и др.);

$q$  – масса запаса балансовой руды в выемочной единице;

$m$  – число одновременно разрабатываемых технологических сортов.

Требование учета количества руд различных технологических сортов вытекает из необходимости разделения руд по условиям обогащения, передела или транспортировки. В этих случаях не вся добытая руда может представлять товарную продукцию. Например, когда на уступе карьера имеются три технологических сорта в соотношении 0,25:0,35:0,40, а состав товарной руды требуется обеспечить в соотношении 0,50:0,30:0,20, то, исходя из этих условий, на горизонте можно добыть руды заданного состава в количестве 0,25+0,15+0,10 = 0,50, т.е. 50% общего количества запасов. Оставшиеся 50% запасов должны быть или переработаны отдельно, или складированы. В этом случае сумма долей технологических сортов равна 0,50.

Окончательное оформление отчетной документации к подсчету запасов по степени готовности к выемке ведется в соответствии с формами стандартной отчетности, утверждёнными Ростехнадзором.

## **5.6. Информационно-методическое обеспечение экологической безопасности рационального освоения недр**

Одним из главных требований, реализуемых в отечественном недропользовании, является обеспечение рационального использования недр и содержащихся в них минеральных ресурсов. Под рациональным использованием недр большинство исследователей понимают систему мероприятий научного, производственно-технического и организационного характера, обеспечивающих полное и комплексное использование ресурсов недр для удовлетворения материальных и духовных потребностей общества.

Усиливающаяся хозяйственная деятельность на активно разрабатываемых месторождениях твердых полезных ископаемых оказывает негативное влияние на окружающую среду, вызывая ее загрязнение и деградацию. Поэтому, как подчеркивается в работе [39], дальнейшее хозяйственное освоение минерально-сырьевых ресурсов необходимо осуществлять с учетом всех экологических проблем и причин их вызывающих. Это невозможно сделать только «устранением экологических угроз», т.е. закрыть, переместить, перепрофилировать многие экологически небезопасные производства. Основой развития экологической безопасности должна выступать такая стратегия развития экономики, которая максимально соответствовала бы природно-хозяйственным и экологическим условиям. Для этого требуется создание эффективного эколого-экономического механизма, отвечающего требованиям оптимального использования природных ресурсов и одновременно – природоохранным требованиям, направленным на снижение или стабилизацию экологических рисков, обусловленных вероятностью появления сверхнормативных воздействий и нагрузок на природные системы.

В условиях существующего экологического риска и негативных последствий освоения минерально-сырьевых ресурсов проблема рационального недропользования приобретает особую актуальность. Для решения этой проблемы выполняется координация усилий исполнительной, законодательной и природоохранной власти, а также всех заинтересованных организаций и специалистов, занимающихся вопросами экологии, охраны окружающей среды, природопользования, разработкой мероприятий экономического и социального развития региона, промышленной безопасности, гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций.

*Пример учета требований геоэкологии в ГИС недропользования*

Картосхема ареалов геоэкологической ситуации для бассейна КМА представлена на Рис. 5.3.



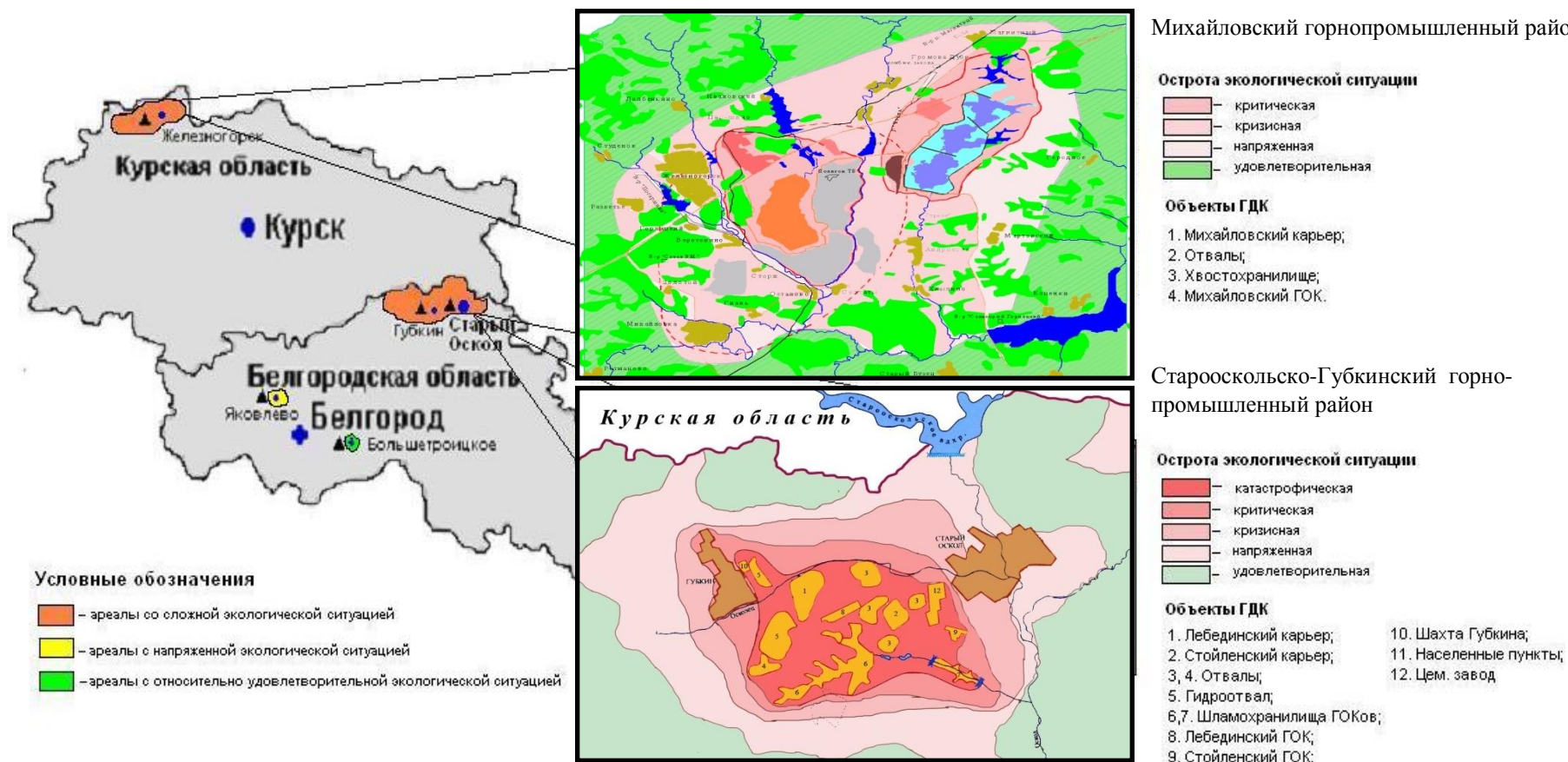


Рис. 5.3. Картосхема ареалов экологических ситуаций в горнопромышленных районах КМА:

а) Михайловском, б) Старооскольско-Губкинском

Известно [40], что на территории КМА сосредоточены два основных геолого-промышленных типа руд: железистые кварциты и богатые железные руды. Залежи кварцитов представлены пластами мощностью до 200-500 м моноклинального или сложноскладчатого залегания. Падение их крутое до субвертикального. Среднее содержание Fe в балансовых запасах железистых кварцитов колеблется по отдельным месторождениям от 31,2 до 38,6 %. Богатые железные руды залегают в коре выветривания железистых кварцитов. Они представляют собой остаточные и переотложенные продукты доверхневизейского латеритного выветривания железистых кварцитов. Остаточные руды образуют на «головах» железистых кварцитов покровные линейно-площадные залежи мощностью от 3 до 200 м и более. Переотложенные (остаточные) руды приурочены к пониженным формам рельефа кристаллического фундамента, располагаясь на остаточных рудах, или встречаются в виде прерывистых мелких тел, окаймляющих залежи остаточных руд. Средняя мощность залежей богатых руд по отдельным месторождениям бассейна варьирует от 10-20 м в Оскольском и Михайловском рудных районах до 50-125 м – в Белгородском. Содержание железа в богатых рудах колеблется от 45 % в существенно карбонатных разновидностях до 69 % в маритовых. Балансовые запасы железных руд КМА на 01.01.2001 г. по категориям  $A+B+C_1+C_2$  составляют 66,17 млрд т, в том числе железистых кварцитов – 36,82 млрд т (55,65 %) и богатых железных руд 29,35 млрд т (44,4 %). Основная доля (78 %) разведанных запасов руд всех типов сосредоточена в Белгородской области (14 из 18 крупных месторождений). На Курскую область приходится 21,8 %, на Орловскую – 0,2 % всех балансовых запасов железных руд бассейна КМА. Прогнозные ресурсы железных руд КМА оцениваются в 123,6 млрд т. Основная их масса (60 %) находится также в Белгородской области, остальные – в Курской (23 %) и Орловской (17 %). Прогнозные ресурсы КМА составляют 82,2 % от прогнозных ресурсов руд России.

В Белгородской области железные руды сосредоточены в двух железорудных районах – Оскольском и Белгородском. Оскольский рудный район хорошо изучен. Здесь, начиная с 1923 г. бурением и геофизическими методами выявлено и разведано 11 железорудных месторождений и исследовано с разной степенью детальности более 30 участков и геофизических аномалий. Глубина залегания руд под толщей обводненных осадочных отложений составляет 55-200 м. Наиболее крупные из них – Коробковское, Лебединское, Стойло-Лебединское, Стойленское, Приоскольское, Салтыковское, Осколецкое, Погромецкое и Чернянское месторождения, балансовые запасы которых представлены главным образом легкообогатимыми магнетитовыми железистыми кварцитами в количестве 18,05 млрд т категорий  $A+B+C_1$  и 5,07 млрд т категории  $C_2$ . Общие запасы богатых руд всех категорий составляют 0,75 млрд т. К наиболее перспективным для прироста железистых кварцитов относятся Северо-Волотовский и Панковский участки.

Белгородский рудный район расположен в западной части Белгородской области и приурочен к юго-западной части Михайловско-Белгородской металлогенической зоны. Здесь на относительно небольшой по площади территории сосредоточены крупнейшие и уникальные по качеству месторождения богатых железных руд – Яковлевское, Гостищевское, Разуменское, Большетроицкое, Шемраевское, Ольховатское, Висловское, Мелиховское, Шебекинское, Олимпийское. Три последних месторождения помимо железной руды содержат алюминиевое сырье – бокситы. В пределах Белгородского рудного района железные руды располагаются на глубинах от 450 до 800 м и глубже, они перекрыты значительной толщей обводненных пород осадочного чехла, поэтому промышленное значение имеют только богатые руды.

В Курской области на учете Государственного баланса стоят три месторождения – Михайловское, Курбакинское и Дичнянско-Реутское, наиболее крупное из них – Михайловское. Его балансовые запасы всех категорий составляют 13,6 млрд т железистых кварцитов и около 300 млн т богатых руд. Запасы Курбакинского месторождения – 92,1 млн т богатых руд, Дичнянско-Реутского месторождения богатых руд – 193 млн т. Весьма перспективны для прироста запасов железистых кварцитов Лев-Толстовский, Яценский и Щигровский участки. Глубина залегания железных руд на этих месторождениях составляет 50-250 м.

В Орловской области разведано одно – Новодятловское месторождение богатых руд с балансовыми запасами А+В+С<sub>i</sub> 117,6 млн т. Кроме того здесь выявлены перспективные Нарышкинский, Орловский и Воронежский участки железистых кварцитов. Глубина залегания железных руд в этом районе составляет 260-300 м.

В настоящее время Лебединское, Стойло-Лебединское, Стойленское и Михайловское месторождения разрабатываются традиционным открытым способом, Коробковское – подземным (шахтным), Яковлевское – подготовлено к подземной эксплуатации и Гостищевское месторождение, начиная с 2004 г., – методом скважинной гидродобычи, остальные же месторождения составляют государственный резерв.

Широкомасштабное освоение железных руд бассейна КМА, начавшееся в начале 60-х годов XX столетия, привело к возрастанию техногенной нагрузки на геологическую среду (ГС) в горнодобывающих районах и дестабилизации их экогеосистем. В настоящее время экологическая обстановка в густонаселенном железорудном бассейне Курской магнитной аномалии (КМА), где функционируют шахты и карьеры по открытой добыче железной руды, ГОКи (Лебединский, Стойленский и Михайловский), Оскольский электрометаллургический комбинат и сопутствующие им предприятия стройиндустрии, весьма напряженная. К сожалению, долгосрочные программы и мероприятия по охране окружающей среды, принятые и разработанные в системе КМА за последние десятилетия, не дали желаемых результатов.

Для горнопромышленных районов КМА как территориальной совокупности предприятий по добыче и переработке железных руд характерно многостороннее и крупномасштабное воздействие инженерно-хозяйственной деятельности и технологических процессов на все сферы окружающей природной среды: атмосферу, литосферу, гидросферу и биосферу. Источниками техногенного воздействия на геологическую среду, и прежде всего недр, являются предприятия и объекты, связанные с добычей, обогащением и хранением руд: шахты, рудники, карьеры, отвалы пустых пород, склады полуфабрикатов и готовой продукции, шламохвостохранилища, пруды-отстойники, гидроотвалы; водозаборы подземных вод и дренажные системы горных выработок, водоотливные установки, трубопроводы и каналы сбора рудничных, шахтных и дренажных вод; горнодобывающие механизмы, взрывные работы и др.

Ежегодно горнодобывающими предприятиями КМА выдается «нагора» более 170 млн т руды и околорудных пород. Только один Лебединский ГОК ежесуточно добывает около 300 тыс. т горной массы. Количество отходов при обогащении руды составляет около 60 %, а с учетом металлургического передела достигает 80 %. Принимая во внимание объем попутно добываемой «пустой» породы, получаем, что утилизация всей извлекаемой горной массы в районе не превышает 10 %. В связи с этим к настоящему времени на территории накоплено около 1,5 млрд т вскрышных пород и отходов обогащения, складированных в отвалы и хвостохранилища. Горнодобывающая отрасль – важнейший фактор современного рельефообразования на территории КМА, так как в процессе деятельности ГОКов существенно изменяется естественный рельеф, возникают новые, не свойственные для данного региона искусственные (техногенные) формы рельефа – карьеры, отвалы, хвостохранилища и т.д. Вновь образованные техногенные формы рельефа по своим размерам сопоставимы с естественными формами и даже превосходят их. Так, глубины Лебединского и Стойленского карьеров составляют соответственно более 350 и 200 м, а их площади – 10 и 7 км<sup>2</sup>. Высоты отвалов варьируют от 60 до 100 м. Вследствие этого вертикальный градиент трансформации рельефа в горнорудных районах превысил 350-400 м, что, естественно, отражается на интенсивности проявления экзогенных геологических процессов. В пределах горных отвалов коэффициент техногенной переработки рельефа оценивается в 40-50 %, что соответствует IV классу деградации. Интенсивность эрозии почв характеризуется высокими показателями – до 100 т/га в год.

При открытом способе разработки железорудных месторождений помимо изменения первичной структуры приповерхностной литосферы, обусловленной нарушением целостности массивов горных пород (ГП) и изъятием рудной массы, уничтожается почвенный и растительный покров. Он полностью снят в контурах карьеров или погребен под отвалами и хвостохранилищами. Так, площадь зоны прямого нарушения земель карьерами и шахтами в районе составляет около 170 км<sup>2</sup>. Суммарная площадь земель, занятых от-

валами и хвостохранилищами, составляет 85 км<sup>2</sup>. Негативное воздействие горнодобывающих предприятий региона не только привело к глубоким и необратимым техногенным деформациям внешней и внутренней структуры приповерхностной части литосферы, но и отразилось на особенностях функционирования гидросферы, количественном и качественном состоянии ее поверхностных и подземных вод.

Значительные изменения в состоянии геологической среды, в особенности подземных вод, наблюдаются в результате водопонижающих работ дренажных систем карьеров. Так, в результате откачек из дренажных систем Лебединского, Стойленского и Михайловского карьеров был нарушен естественный гидродинамический режим подземных вод в Белгородской и Курской областях. На территории КМА общая воронка депрессии подземных вод, сформировавшаяся в архейско-протерозойских трещиноватых породах, занимает площадь почти 40 тыс. км<sup>2</sup>. Отдельные воронки депрессии, образовавшиеся в сеноман-альбском и юрско-девонском горизонтах, а также в обводненной зоне архейско-протерозойских пород, взаимодействуют между собой как по площади, так и в вертикальном разрезе. Поэтому на большей части Белгородской и Курской областей заметно изменились условия питания и разгрузки подземных вод, их качество. Известно, что степень экологической опасности предприятий горнометаллургического цикла определяется их интенсивным и во многом геохимическим воздействием на окружающую среду. В плане техногенного загрязнения основными видами негативного геохимического воздействия являются:

- загрязнение атмосферного воздуха газами и пылевыми выбросами при буровзрывных, погрузочно-разгрузочных работах, при дроблении руды и ее переделе, а также при пылении отвалов, хвостохранилищ, складов готовой продукции и т.д.;
- загрязнение гидросферы дренажными и сточными водами;
- загрязнение почв отходами добычи и переработки руд.

На территории действующих горнорудных предприятий КМА наиболее весомый вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят периодически осуществляемые массовые взрывы в карьерах с мощностью заряда более 400 т взрывчатых веществ (ВВ). В процессе взрывов в газопылевое облако в расчете на 1 кг взрывчатого вещества поступает от 80 до 300 г пылевого аэрозоля с частицами размером менее 20 мкм. Результаты исследований свидетельствуют, что все природные источники поставляют в атмосферу от 1000 до 10000 млн т, а техногенные – от 1 до 600 млн т пылевого аэрозоля.

Установлено также, что при типичном взрыве 1000 т ВВ высота облака газопылевой смеси достигает 700 м, а масса пыли с частицами размером менее 20 мкм – 80-300 т. Исследования, выполненные на Лебединском карьере, показывают, что при массовых взрывах 1000 т ВВ ареал выпадения частиц размером 100 мкм (с учетом розы ветров) составляет 15-20 км, а время нахождения этих частиц в атмосфере – 1 ч. Частицы пыли диаметром до 10 мкм

могут находиться в атмосфере до 2 – 3 суток и в зависимости от силы ветра опускаться на землю на максимальном расстоянии от места взрыва – до 1000 км. Средние многолетние газопылевые выбросы Лебединского и Стойленского ГОКов оцениваются примерно в 30 тыс. т/год. Дополнительными источниками загрязнения атмосферного воздуха являются ОЭМК, ДОФ, фабрики окомкования, а также склады готовой продукции, отвалы и хвостохранилища. Разнос пыли из открытых складов руды наблюдается в радиусе 1 км, а зона пыления хвостохранилищ и отвалов может достигать десятков километров. Сухие вскрышные породы, особенно мел и песок, подвержены ветровой эрозии и при сильных ветрах пыль вскрышных пород разносится на значительные расстояния. Сильно загрязняют воздушный бассейн гидротехнические сооружения. В процессе эксплуатации на их поверхности образуются так называемые «сухие пляжи», занимающие до 25% площади. Сухая поверхность хвостохранилищ – источник пылевого загрязнения окружающей среды даже при незначительных скоростях ветра.

Главные источники поступления элементов-токсикантов на земную поверхность территории КМА – пылевые выбросы промышленных предприятий, особенно связанные с буровзрывными работами. Согласно эколого-геохимическим исследованиям НИИКМА, в результате пылевыбросов формируются условно три зоны техногенного воздействия на агроландшафт: центральная зона максимального воздействия с радиусом влияния до 3 км и модулем техногенной нагрузки 750-1050 кг/га и более в год (до 150-450 кг/га в зимний период); периферическая зона умеренного воздействия с радиусом от 3-7 до 12-15 км и модулем техногенной нагрузки 165-750 кг/га в год (30-150 кг/га за зимний период); удаленная зона слабого влияния, по всей вероятности, включающая выбросы ОЭМК, цементного завода и других предприятий городов Губкин и Старый Оскол с радиусом 25-40 км и модулем техногенной нагрузки менее 165 кг/га в год.

Совместное негативное влияние пылевых выбросов и сброса сточных вод, обогащенных токсичными веществами, привело к существенному загрязнению почв территории КМА, в том числе используемых в сельскохозяйственном обороте. В этом отношении особенно неблагоприятная ситуация сложилась в зонах влияния Лебединского и Стойленского ГОКов, общая площадь которых превышает 500 км. В частности, исследования И.И. Косиновой, изучавшей эколого-геохимическое состояние территории г. Старый Оскол и горного отвода Стойленского ГОКа, показали высокую степень загрязненности почв элементами-токсикантами ( $Z_c > 32$ ), в число которых обычно входят (в порядке уменьшения частоты встречаемости): Cr, Pb, Zn, Mo, Cu, гораздо реже фиксируются Be, Sb, Sr, As, Cd, Mn и Hg. Максимальный уровень загрязнения с  $Z_c$  от 64 до 100 и более единиц (зона чрезвычайного экологического бедствия) установлен непосредственно в пределах Стойленского карьера и его отвалов. Здесь в почве и фунтах зафикси-

рованы устойчивые и интенсивные патогенные аномалии Zn, Pb, Be (I класс опасности), Cu, Mo, Cr, Sb, Ni (II класс опасности). Это эпицентр техногенного загрязнения. Вторая, центральная, зона загрязнения с радиусом в 1,5 км характеризуется Zn более 32, но менее 64 единиц. Здесь в почве наиболее часто устанавливаются патогенные аномалии Pb, Mo, Cu, Ni.

Весьма неблагоприятным по экологии оценивается состояние почв и фунтов большей части (около 75%) городской территории Старого Оскола (центр, правобережный и левобережный участки застройки). Здесь Zс достигает 30. Среди элементов-токсикантов наиболее часто фиксируются Pb, Zn, Bi, Cr, Mo, Cu, Ni. Проведенные Х.А. Джувеликяном дополнительные исследования показали, что в черноземных почвах вокруг Лебединского ГОКа и карьера на удалении до 10 км количество подвижных форм тяжелых металлов ТМ (Cr, Ni и Cu) местами превышает ПДК в 2 раза, а Cd, Pb и Zn остается на уровне срона зональных почв. На гидроотвалах количество ТМ не превышает ПДК.

Разработка железорудных месторождений, интенсивное промышленное и гражданское строительство привели к выраженному изменению природного ландшафта, создали сложную гидрологическую и гидрогеологическую обстановку, что обусловило здесь напряженную медико-экологическую ситуацию. Здесь высок уровень заболеваний, связанных со спецификой горнодобывающего комплекса.

Оптимальное функционирование горнопромышленных регионов требует регионального управления комплексным освоением недр, охватывающим наряду с горнотехнической также социально-экономическую, экологическую и производственную сферы. При этом в региональной самоорганизации, как необходимом этапе на пути долговременного и экологически сбалансированного недропользования, должно выделяться несколько первоочередных взаимосвязанных направлений.

Как на местном, так и областном уровнях необходимы: совершенствование экологического управления; повышение научно-технического уровня добычи и переработки полезных ископаемых; экологически ориентированное развитие инфраструктуры области; развитие законодательной и нормативно-правовой базы; совершенствование финансово-кредитной и налоговой политики; развитие информационно-аналитического обеспечения рационального недропользования и создание интегрированных ГИС для поиска оптимальных решений по управлению социально-технологическими процессами в регионе.

Таким образом, степень изменения окружающей природной среды горнодобывающего комплекса КМА достигло такой фазы, когда дальнейшее хозяйственное освоение минерально-сырьевых ресурсов рассматриваемого региона невозможно без учета всех экологических проблем и причин, их вызывающих. Экологически безопасное развитие горнодобывающих районов

КМА должно быть направлено на достижение благоприятного для человека состояния окружающей среды. Это невозможно сделать только «устранением экологических угроз», т.е. закрыть, переместить, перепрофилировать многие экологически небезопасные производства. Основой экологической безопасности региона должна выступать такая траектория развития его экономики, которая максимально соответствовала бы природно-хозяйственным и экологическим условиям. Данная концепция не может быть реализована без создания эффективного эколого-экономического механизма, отвечающего требованиям оптимального использования природных ресурсов, с одной стороны, и природоохранным требованиям, направленным на снижение или стабилизацию экологических рисков, обусловленных вероятностью появления сверхнормативных воздействий и нагрузок на природные системы – с другой.

#### *Мониторинг геосистемы рационального недропользования*

Для решения общей проблемы информационно-аналитического обеспечения управления природопользованием необходим комплексный подход, включающий не только финансовые и законодательные мероприятия, но и создание в регионе постоянно действующего мониторинга состояния недр и интеграцию данных в составе комплексной ГИС недропользования региона КМА.

Важнейшим направлением рационального недропользования в железорудной провинции КМА, обеспечения экологической безопасности в регионе и принятия эффективных управленческих решений является создание системы постоянно действующего комплексного геоэкологического мониторинга природно-технических систем.

Основные направления по рационализации недропользования на примере железорудной провинции КМА отражены в предложенной ниже схеме (Рис. 5.4).





Рис. 5.4. Схема рационального недропользования в железорудной провинции КМА

Комплексный геоэкологический мониторинг рассматривается как инструмент реализации механизмов обеспечения геоэкологической безопасности освоения железорудных месторождений КМА.

Мониторинг месторождений твердых полезных ископаемых (ММТПИ) является подсистемой Государственный мониторинга состояния недр или геологической среды (ГМСН). Система ГМСН служит для информационного обеспечения управления государственным фондом недр. Функционально она представляет собой систему регулярных наблюдений, сбора, накопления, обработки и анализа информации, оценки состояния геологической среды и прогноза ее изменений под влиянием естественных природных факторов, недропользования и антропогенной деятельности горнопромышленных районов. В свою очередь, ГМСН является подсистемой Единой государственной системы экологического мониторинга (ЕГСЭМ). Государственный мониторинг состояния недр осуществляется на федеральном, региональном, территориальном и локальном (объектном) уровнях.

Комплексный геоэкологический мониторинг природно-технических систем горнодобывающего комплекса КМА базируется на детальном анализе критериев техногенеза и современных информационных технологий [41][42], позволяющих в условиях возрастающих темпов освоения железорудных месторождений рассматриваемого региона минимизировать негативные последствия воздействия на окружающую природную среду.

Региональную систему геоэкологического мониторинга можно укрупненно представить в виде совокупности отдельных взаимосвязанных подсистем, отображенных на Рис. 5.5.



Рис. 5.5 Структурная схема комплексного геоэкологического мониторинга природно-технических систем горнопромышленных районов КМА

Ядром системы геоэкологического мониторинга, обеспечивающим согласованное функционирование указанных в схеме подсистем, является автоматизированная информационная система и база данных, получаемая с наблюдательной сети локального и регионального уровней.

При создании системы геоэкологического мониторинга горнопромышленного региона помимо сети наземных, подземных, аэрологических измерений чрезвычайно эффективным является применение средств и методов аэрокосмического зондирования поверхности Земли для целей современного и ретроспективного анализа состояния компонентов и геосистем окружающей природной среды.

Среди многообразия ГИС перечисленным выше требованиям, чрезвычайно важным для обработки космической информации отвечает система обработки изображений ERDFS (ERDAS Inc), которая наряду с системами векторного формата (например, ARC/INFO фирмы ESRI) может составить

ГИС – основу систем геоэкологического мониторинга горнопромышленного региона.

В рамках повышения научно-технического уровня добычи и переработки полезных ископаемых, помимо традиционных мер по снижению техногенной нагрузки горного производства на природную среду необходимо шире использовать разработанные с участием автора диссертации технологии площадного пылеподавления, защиты подземных вод от загрязнения, новые технологии по скважинной гидродобыче богатых железных руд и другие технологии, подтвержденные патентами, а также внедрить мероприятия по оптимизации структуры землепользования в пределах горного отвода и на прилегающих к нему территориях с целью рационального размещения вскрышных пород и отходов обогащения руд без экстенсивного расширения земель.

## **5.7. Требования рационального недропользования**

### Соблюдение правил охраны недр

При компьютерном проектировании и информационной поддержке эксплуатации объектов недропользования должны безусловно соблюдаться действующие правила по охране недр. Основные положения, которым следует руководствоваться при создании ГИС недропользования (НГИС):

1. Обеспечить эффективное использование всех запасов при их выемке без потерь за счет разубоживания руды вмещающими породами;

2. Одновременно с эксплуатацией месторождения геологической службой предприятия должно производиться геологическое изучение недр с целью получения достоверной оценки промышленных запасов и доразведки месторождения, включающее:

- опережающую разведку недоразведанных блоков для уточнения границ и строения месторождения;

- сопровождающую эксплуатационную разведку, объектами которой являются блоки, находящиеся в отработке. Должно предусматриваться систематическое эксплуатационное опробование, сопровождающее вскрышу и добычу минерального сырья до полной отработки блока.

3. Погашение запасов оформляется актом погашения выемочной единицы (добычного блока, геологического блока) за подписью геолога, маркшейдера и начальника участка. Акт утверждается главным геологом.

4. Исключается выборочная отработка более богатых участков месторождения. Ведется сплошная выемка запасов по всей ширине россыпи последовательными добычными блоками.

5. Должно предусматриваться использование попутно добываемых галечно-щебенистых и скальных пород в качестве строительных материалов для сооружения объектов ГТС, дорог и др.

6. Ежегодное проведение рекультивации земель, относимых на текущем этапе эксплуатации к отработанным.

### Учет влияния добычи минерального сырья на экологию

Интегрированные ГИС для недропользования должны иметь встроенные средства прогнозирования возможных воздействий горнодобывающих технологий на окружающую среду в долгосрочной экологической перспективе. В связи с этим рядом компаний по созданию НГИС предлагаются дополнительные программные модули по ведению баз данных и анализу состояния горного отвода на основе принятых нормативных документов и действующих СНИПов.

При освоении новых месторождений на этапе проектирования горных работ по добыче и переработке руд разделы «Охрана окружающей среды» и «Оценка воздействия на окружающую среду» выполняются во всех случаях в контролирующих органах (прохождение государственной экспертизы). Составная часть указанных разделов – «Проект нормативов предельно допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу» (проект ПДВ) оформляется отдельным томом.

До начала разработки разделов ООС и ОВОС при освоении новых территорий в обязательном порядке проводятся инженерно-экологические изыскания согласно СП 11-102-97. Параллельно предписывается проводить историко-архитектурные, санитарно-эпидемиологические и социально-экономические изыскания.

Разделы ООС и ОВОС должны быть выполнены согласно СНИП 11-01-95 и «Инструкции по экологическому обоснованию хозяйственной и иной деятельности», утвержденной приказом Минприроды России от 29 декабря 1995 г. №539, СП 11-101-95, а также согласно «Положению об оценке воздействия намечаемой хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду в РФ», утвержденному приказом №372 ГК РФ по охране окружающей среды от 16 мая 2000 г., зарегистрированному МЮ РФ 04.07.2000 регистр. № 2302.

В указанных разделах должны в обязательном порядке рассматриваться воздействие на период строительства и эксплуатации проектируемого объекта. В них также отражаются выбросы, отходы, сбросы, дается характеристика современного состояния окружающей среды (ОС), делается прогноз воздействия на ОС по всем составляющим: недра, подземные воды, атмосфера, криолитосфера, ландшафты, поверхностные водоемы и гидробионты, почвы, растительность, наземный животный мир и т.д.

Структура разделов (ООС и ОВОС) и глубина рассмотрения воздействий на конкретные составляющие экосистемы может существенно изменяться в зависимости от специфики конкретного проекта и от специфики района реализации проекта: земли гослесфонда, поселений, промышленности, степени техногенной трансформации территории, наличия или отсутствия водоемов и т.д.

Комплекс работ по охране окружающей среды в период разработки месторождения и после ее завершения включает:

- рекультивацию земель, занятых горнодобывающим предприятием;

- предотвращение истощения и загрязнения подземных вод, служащих и могущих служить для различных нужд народного хозяйства;
- предотвращение загрязнения и нарушения режима поверхностных водотоков и бассейнов, заболачивания территории;
- предотвращение оседания земной поверхности и деформации поверхностных сооружений на прилегающих территориях;
- мероприятия по борьбе с водной и ветровой эрозией почвы, отвалов вскрышных пород, шлаков, отходов обогащения (хвостов), отвалов бедных и забалансовых руд;
- мероприятия по защите от загрязнения почв в районе расположения горнодобывающего предприятия;
- мероприятия по защите атмосферы от загрязнения пылью и газами;
- мероприятия по сокращению количества складироваемых отходов горного производства путем их частичной переработки и использования для нужд народного хозяйства;
- сокращение времени экспозиции геохимически активной (т.е. содержащей токсичные элементы, переходящие в водорастворимое состояние), минеральной массы в зоне аэрации.

Планирование мероприятий по охране окружающей среды должно осуществляться на основе:

- топографического плана местности с указанием границ охраняемых территорий, ценности земель, границ и размеров водоемов с указанием их хозяйственного использования;
- сведений об агрохимических свойствах вмещающих и вскрышных пород, их пригодности к рекультивации;
- сведений о геохимических свойствах руд и вмещающих пород, возможности геохимического загрязнения почв и водных источников в районе расположения горнорудного предприятия;
- сведений о составе дренажных вод, поступающих из горных выработок и отвалов;
- сведений о размерах депрессионной воронки, образующейся в результате осушения месторождения;
- ландшафтно-геохимической схемы района месторождения масштаба 1:10000 с указанием вероятных направлений потоков геохимического рассеивания (гравитационных, золовых и водных);
- данных о загрязнении атмосферы (фоновые концентрации).

Выбор места расположения объектов поверхностного комплекса, трасс коммуникаций в разделе «Генплан» необходимо производить с учетом ценности земель и ущерба от их нарушения:

- Предусматривать в проекте поэтапный отвод территорий в земельный и горный отвод при строительстве объекта по очередям.

- При выборе места расположения отвалов вмещающих пород, забалансовых и бедных руд учитывать размеры зон их геохимического влияния и его интенсивность.

- Недопустимо использование в качестве балласта при строительстве дорог поверхностного комплекса, оснований под здания и сооружения скальных вскрышных пород, содержащих тяжелые металлы и соединения серы в количествах, превышающих установленные для дорожно-строительных материалов.

- Мероприятия по предупреждению рудничных эндогенных пожаров следует разрабатывать с учетом степени склонности к самовозгоранию руды и вмещающих пород.

В частности, при создании геолого-географических информационных систем на горнодобывающих предприятиях специалистами проводится дополнительная адаптация стандартных геоинформационных систем для решения специальных геологических, горных и гидротехнических задач, в частности:

- в области биологической очистки сточных вод с выдачей исходных данных на проектирование биологических очистных сооружений промышленных, хозяйственных и ливневых сточных вод;

- в области технологий локальной биологической очистки малых объемов промышленных сточных вод с использованием микрофлоры активных илов и специфических штаммов-деструкторов;

- в области очистки промышленных стоков от ионов металлов, взвешенных веществ, органических соединений методами сепарации, электрохимической деструкции и озонирования;

- в области обезвреживания газовых выбросов, содержащих хлор, хлористый водород, сернистый ангидрид, хлористый тионил, оксиды азота, четыреххлористый углерод, метилхлорид сорбционными и каталитическими методами, а также с помощью центробежных барботажных аппаратов;

- в области взрыво-пожаробезопасности технологических процессов с разработкой рекомендаций по снижению уровня опасности производства;

- при разработке экологических паспортов, проектов ПДС и ПДВ и специального водопользования с выполнением инструментальных замеров и необходимых химических анализов;

- при инженерно-технических мероприятиях гражданской обороны, мероприятиях по предупреждению чрезвычайных ситуаций;

- при выполнении взрывных работ по рыхлению мерзлых грунтов, на болотах, по разрушению льда, при подводных взрывных работах и уничтожении взрывоопасных устройств на земной поверхности.

### Рекультивация нарушенных земель

При создании масштабируемых ГИС в области недропользования для крупных добывающих предприятий необходимо предусмотреть возможность оценки результатов проведения мероприятий по восстановлению земель и прогноза последствий рекультивации на весь срок отработки запасов и после ликвидации рудника. Необходимо учитывать следующее.

1. Рекультивацию нарушенных земель необходимо выполнять в обязательном порядке, если есть необходимость в оформлении земельного отвода для реализации проекта и при сдаче земель постоянному пользователю.

2. Восстановление (рекультивацию) земель, утративших в связи с их нарушением первоначальную хозяйственную ценность и являющихся источником отрицательного воздействия на окружающую среду, при разработке месторождений цветных металлов должно осуществляться в соответствии с «Основными положениями по восстановлению земель, нарушенных при разработке месторождений полезных ископаемых, проведении геологоразведочных, строительных и других работ», «Основами земельного законодательства РФ», ГОСТами, «Рекомендациями по снятию плодородного слоя почвы при производстве горных, строительных и других работ» и иными нормативными документами.

3. Рекультивации подлежат нарушенные земли всех категорий горнопромышленной деятельности, а также прилегающие земельные участки, полностью или частично утратившие продуктивность в результате отрицательного воздействия нарушенных земель.

Рекультивация земель является частью горных или земляных технологических процессов при строительстве промышленных предприятий, разработке месторождений и переработке полезных ископаемых.

1. Приведение нарушенных земель при разработке месторождений полезных ископаемых в состояние, пригодное для использования их по назначению, производится по проекту рекультивации земель, разработанному в соответствии с требованиями ГОСТа 17.5.3.04–83. Этот проект входит в проект отработки месторождения и утверждается в установленном порядке. Проект рекультивации земель составляется в увязке с проектом горных работ. Затраты на производство работ по восстановлению нарушенных земель, предусмотренные проектом, относятся на себестоимость продукции предприятия (рудника, карьера и т.п.).

2. Выбор направлений рекультивации определяется в соответствии с требованиями ГОСТа 17.5.1.02–78, а требования к рекультивации земель по направлениям их использования должны отвечать ГОСТу 17.5.3.04–83.

3. Рекультивация нарушенных земель должна осуществляться в два последовательных этапа: технический и биологический, в соответствии с требованиями ГОСТа 17.5.1.01–78.

4. Технический этап рекультивации земель, включающий их подготовку для последующего целевого использования в народном хозяйстве, является составной частью проекта на разработку карьера. Основные рабо-



ты, которые необходимо выполнить при проведении технического этапа рекультивации земель, определены ГОСТом 17.5.3.04–83.

5. Проект биологического этапа рекультивации должен выполняться специализированными проектными организациями с учетом требований ГОСТа 17.5.1.03–86. Биологический этап рекультивации земель должен осуществляться после полного завершения технического этапа по очередям строительства.

6. В проекте технического этапа рекультивации отвалов, сложенных токсичными породами, следует предусматривать мероприятия, предотвращающие загрязнение окружающей среды (нанесение экранирующего слоя, мелиорация токсичных пород и загрязненных почв и т.п.).

7. Размещение временных складов снятого плодородного слоя почвы определяется проектом с указанием сроков хранения.

8. Восстановление земель, утративших в связи с их нарушением первоначальную хозяйственную ценность и являющихся источником отрицательного воздействия на окружающую среду, при отработке месторождений должно осуществляться в соответствии с Законом Российской Федерации «Об охране природной окружающей среды», Законом Российской Федерации «О недрах» от 21 февраля 1992 г. № 2395-1 (в редакции от 3 марта 1995 г.) (с изменениями от 10 февраля 1999 г., 2 января 2000 г., 14 мая, 8 августа 2001 г., 29 мая 2002 г., 6 июня 2003 г., 29 июня, 22 августа 2004 г.), Земельным кодексом Российской Федерации от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (с изменениями и дополнениями от 30 июня 2003 г., 29 июня, 3 октября, 21, 29 декабря 2004 г., 7 марта, 21, 22 июля, 31 декабря 2005 г.), Постановлением СМ СССР от 2 июня 1976 г. № 407 «О рекультивации земель, сохранении и рациональном использовании плодородного слоя почвы при разработке месторождений полезных ископаемых и торфа, проведении геологоразведочных, строительных и других работ» (с изменениями от 21 октября 1983 г., 13 июня 1988 г.), Методическими указаниями по организации и осуществлению контроля за горнотехнической рекультивацией земель, нарушенных горными разработками РД 07-35-93, требованиями ГОСТ 17.5.3.04 – 83 «Охрана природы. Земли. Общие требования к рекультивации земель» и ГОСТ 17.5.1.02 – 85 «Охрана природы. Земли. Классификация нарушенных земель для рекультивации с учетом их последующего целевого назначения», ГОСТ 17.5.1.01 – 83 «Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения», ГОСТ 17.4.2.02 – 83 «Номенклатура показателей пригодности нарушенного плодородного слоя почв на землевание», ГОСТ 17.3.5.06 – 85 «Охрана природы. Земли. Требования к определению норм снятия плодородного слоя почвы при производстве земляных работ», а также на основе приказа Министерства охраны окружающей среды и природных ресурсов Российской Федерации по земельным ресурсам и землеустройству от 22.12.1995 г. и в соответствии с другими нормативными документами.

9. Требования, предъявляемые к плодородному слою почвы при выполнении землевания, должны соответствовать ГОСТ 17.5.1.03 – 86 «Ох-

рана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель».

10. Размещение временных складов снятого плодородного слоя почвы определяется проектом с указанием сроков хранения.

11. Для организации приемки (передачи) рекультивированных земель, связанных с восстановлением нарушенных земель, решением органа местного самоуправления создается специальная Постоянная Комиссия по вопросам рекультивации земель, если иное не предусмотрено нормативными правовыми актами субъектов Российской Федерации и актами органов местного самоуправления. В состав Постоянной Комиссии включаются представители землеустроительных, природоохранных, водохозяйственных, лесохозяйственных, сельскохозяйственных, архитектурно-строительных, санитарных, финансово-кредитных и других заинтересованных органов. Председателем Постоянной Комиссии рекомендуется назначать: представителя органа местного самоуправления, а его заместителем – председателя районного (городского) комитета по земельным ресурсам и землеустройству.

12. Организационно-техническое обеспечение деятельности Постоянной Комиссии возлагается на районный (городской) комитет по земельным ресурсам и землеустройству, если иное не предусмотрено решением органа местного самоуправления.

13. Приемка-передача рекультивированных земель осуществляется в месячный срок после поступления в Постоянную Комиссию письменного извещения о завершении работ по рекультивации, к которому прилагаются следующие документы:

а) копии разрешений на проведение работ, связанных с нарушением почвенного покрова, а также документов, удостоверяющих право пользования землей и недрами;

б) выкопировка с плана землепользования с нанесенными границами рекультивированных участков;

в) проект рекультивации, заключение по нему государственной экологической экспертизы;

г) данные почвенных, инженерно-геологических, гидрогеологических и других необходимых обследований до проведения работ, связанных с нарушением почвенного покрова, и после рекультивации нарушенных земель;

д) материалы проверок выполнения работ по рекультивации, осуществленных контрольно-инспекционными органами или специалистами проектных организаций в порядке авторского надзора, а также информация о принятых мерах по устранению выявленных нарушений;

е) сведения о снятии, хранении, использовании, передаче плодородного слоя, подтвержденные соответствующими документами;

ж) отчеты о рекультивации нарушенных земель по форме № 2-тп (рекультивация) за весь период проведения работ, связанных с нарушением почвенного покрова, на сдаваемом участке.

14. Перечень указанных материалов уточняется и дополняется Постоянной Комиссией в зависимости от характера нарушения земель и дальнейшего использования рекультивированных участков.

15. Объект считается принятым после утверждения Председателем Постоянной Комиссии акта приемки-сдачи рекультивированных земель.

#### Учет требований геоэкологии

Любое освоение минеральных ресурсов сопровождается изменением геологической среды и экологии местности [40]. При создании геоинформационных систем недропользования для крупного горнодобывающего региона необходимо учитывать комплексные последствия техногенного воздействия добычи и переработки на окружающую среду [30]. В этой связи задача построения систем управления базами данных (СУБД) в ГИС недропользования и последующая поддержка их актуальности связаны с обработкой больших массивов информации, поэтому должны решаться на современной программно-аппаратной базе. Оперативно необходимо учитывать все текущие изменения не только в пределах горного отвода отдельных ГОКов, но и в совокупности всех действующих на территории региона горнодобывающих предприятий.

При комплексном подходе к проблеме рационального недропользования, описанном в работе [43], общее многомасштабное взаимодействие методов анализа, моделирования и управления процессами добычи может быть представлено схемой Рис. 5.6.

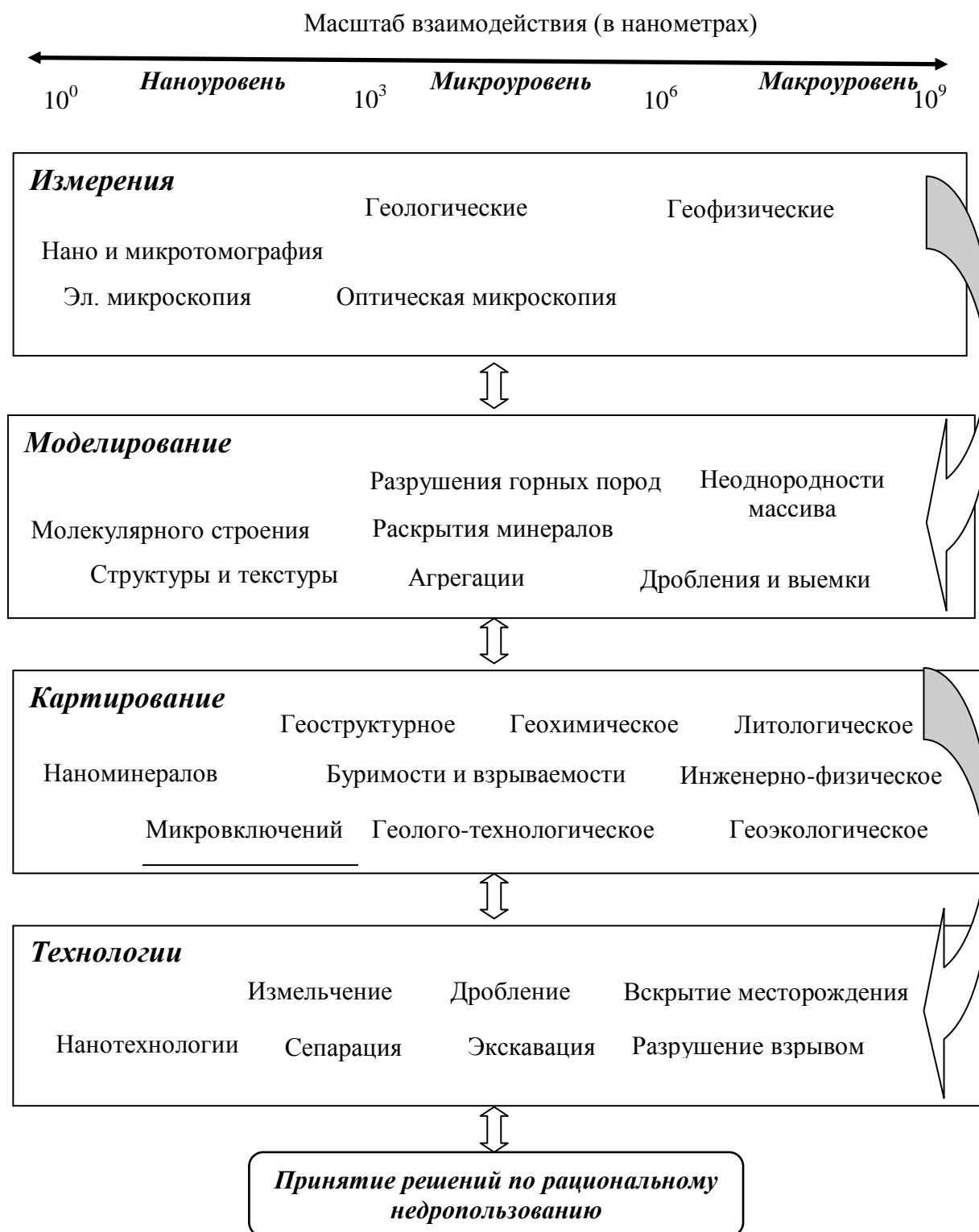


Рис. 5.6 Схема методического обеспечения многомасштабного рационального недропользования

Накопленные за длительный период исследований геолого-технологические данные должны составлять основу региональной геоинформационной системы недропользования. В системе обобщаются полученные сведения о месторождении и хранится информация о распределении запасов и текущей геоэкологической обстановке, включая не только цифровую, аналитическую, но и описательную часть.

## Глава 6

### **Программное обеспечение рационального недропользования**

#### **6.1. Обмен пространственными данными через Интернет**

При размещении геоданных в Интернет они становятся доступными широкому кругу потребителей и позволяют обсуждать проблему, находясь на разных концах планеты. Поэтому вопрос их публикации весьма актуален. Публикация картографической информации в Интернет, как правило, сопровождается определенными трудностями, главные из них: большой объем информации и отсутствие специальных программ у широкого круга потребителей.

Картографическая информация в сети может быть представлена в основном тремя видами: растровое изображение (gif, jpg и др.); векторное; геоинформационное. Отличие геоинформационного представления от векторного изображения состоит в том, что помимо непосредственно векторного изображения геоинформационный файл содержит атрибутивную информацию. Векторные и геоинформационные изображения имеют разный формат, поэтому обычно не отображаются в стандартных браузерах Интернет.

Наиболее распространенными в сети являются растровые изображения. Это обусловлено простотой их размещения. Однако при размещении таких файлов необходимо найти компромисс между размером и информативностью изображения. Другими словами, если создан файл маленького размера, то могут быть потеряны мелкие детали карты; если же большое – возникает трудности передачи его по каналам связи.

Размещение векторного изображения в сети невозможно, поэтому его все равно придется переводить в растровое. Также дело обстоит с файлами геоинформационных систем. Но атрибутивная информация в такой карте может быть привязана средствами HTML. Разумеется, такая карта уже не будет обладать всеми возможностями ГИС, но будет более информативна, чем обычное изображение на странице, и станет доступна широкому кругу людей.

HTML-документ может быть разработан в любом редакторе, позволяющем создавать веб-страницы. Такой документ представляет собой текстовый файл, содержащий текст, рисунки, гиперссылки и т.д. В результате созданная информация может быть получена пользователем, просматривающим карту, если он щелкнет в интересующем его месте изображения левой или правой кнопкой мыши или же просто подведет указатель мыши

к этому месту. Браузер может ответить на такой «запрос», показав информацию в выбранном виде.

Как уже отмечалось, представление пространственных данных в Интернет, особенно созданных с применением геоинформационных систем, – весьма актуальная задача. Поэтому одним из ключевых вопросов является вопрос стандартизации представления пространственной информации в сети. Этот вопрос широко обсуждается как специалистами, так и административными органами.

В Великобритании выполняется проект по сбору всей известной геологической информации о каждой стране в мире. Сделав данные общедоступными и позволив исследователям проследить геологические особенности в национальных границах, этот проект облегчит планирование международных проектов, предсказание землетрясений и локализацию природных ресурсов, таких, как нефть и газ.

В проекте, названном OneGeology, можно будет находить и визуализировать данные в Интернет. «Геология не придерживается национальных границ», – говорит координатор проекта Ian Jackson из British Geological Survey (BGS). «Данные существуют, но ключом к ним должна являться их доступность». Проект запущен на конференции с представителями из 55 стран. Одна из первых задач – конвертация данных в специальный формат, разработанный специально для этого проекта. Первые данные из UK, US, Canada, Sweden и France, как ожидается, будут доступны в 2008 году.

## **6.2. Программы для создания НГИС**

Бурное развитие геоинформационных технологий привело к тому, что сегодня на российском рынке действует большое число организаций и фирм, распространяющих программное обеспечение ГИС-проектов. Можно выделить несколько классов программного обеспечения, различающихся по своим функциональным возможностям и технологическим этапам обработки геоинформации.

Следует различать системы, распространяемые коммерчески, и заказные разработки, выполненные под индивидуальные проекты и не обладающие необходимой универсальностью, поддержкой развития, изданной и популярно написанной документацией и рядом других свойств, характерных для рыночного товара.

Программные обеспечения делятся на пять основных используемых классов. Первый, наиболее функционально полный класс программного обеспечения – это инструментальные ГИС. Они могут быть предназначены для самых разнообразных задач: для организации ввода информации (как картографической, так и атрибутивной), ее хранения (в том числе и распределенного, поддерживающего сетевую работу), отработки сложных информационных запросов, решения пространственных аналитических задач (коридоры, окружения, сетевые задачи и др.), построения производных карт и схем (оверлейные операции) и, наконец, для подготовки к выводу на

твёрдый носитель оригинал-макетов картографической и схематической продукции. Как правило, инструментальные ГИС поддерживают работу как с растровыми, так и с векторными изображениями, имеют встроенную базу данных для цифровой основы и атрибутивной информации или поддерживают для хранения атрибутивной информации одну из распространенных баз данных: Paradox, Access, Interbase, Oracle, MySQL, PostgreSQL и др. Наиболее развитые продукты имеют системы run time, позволяющие оптимизировать необходимые функциональные возможности под конкретную задачу и удешевить тиражирование созданных с их помощью справочных систем.

Второй класс – так называемые ГИС-вьюеры, то есть программные продукты, обеспечивающие пользование созданными с помощью инструментальных ГИС базами данных. Как правило, ГИС-вьюеры предоставляют пользователю (если предоставляют вообще) крайне ограниченные возможности пополнения баз данных. Во все ГИС-вьюеры включается инструментарий запросов к базам данных, которые выполняют операции позиционирования и зуммирования картографических изображений. Естественно, вьюеры всегда входят составной частью в средние и крупные проекты, позволяя сэкономить затраты на создание части рабочих мест, не наделенных правами пополнения базы данных.

Третий класс – это справочные картографические системы (СКС). Они сочетают в себе хранение и большинство возможных видов визуализации пространственно распределенной информации, содержат механизмы запросов по картографической и атрибутивной информации, но при этом существенно ограничивают возможности пользователя по дополнению встроенных баз данных. Их обновление (актуализация) носит циклический характер и производится обычно поставщиком СКС за дополнительную плату.

Четвертый класс программного обеспечения – средства пространственного моделирования. Их задача – моделировать пространственное распределение различных параметров (рельефа, зон экологического загрязнения, участков затопления при строительстве плотин и другие). Они опираются на средства работы с матричными данными и снабжаются развитыми средствами визуализации. Типичным является наличие инструментария, позволяющего проводить самые разнообразные вычисления над пространственной информацией (сложение, умножение, вычисление производных и другие операции).

Пятый класс, на котором стоит заострить внимание, – это специальные средства обработки и дешифрирования ДЗЗ. Сюда относятся пакеты обработки изображений, снабженные в зависимости от цены различным математическим аппаратом, позволяющим проводить операции со сканированными или записанными в цифровой форме снимками поверхности Земли. Это довольно широкий набор операций, начиная со всех видов коррекций (оптической, геометрической) через географическую привязку снимков вплоть до обработки стереопар с выдачей результата в виде актуализированного топографического плана.

Кроме упомянутых классов имеются еще разнообразные программные средства, манипулирующие с пространственной информацией. Это такие продукты, как средства обработки полевых геодезических наблюдений (пакеты, предусматривающие взаимодействие с GPS-приемниками, электронными тахеометрами, нивелирами и другим автоматизированным геодезическим оборудованием), средства навигации и ПО для решения еще более узких предметных задач (изыскания, экология, гидрогеология и пр.). Отдельно следует остановиться на наиболее универсальных классах программ. Естественно, возможны и другие принципы классификации программного обеспечения: по сферам применения, по стоимости, поддержке определенным типом (или типами) операционных систем, по вычислительным платформам (ПК, рабочие Unix-станции) и т.д.

Прогрессирующая тенденция – модульность систем, позволяющая оптимизировать затраты для конкретного проекта. Сегодня даже пакеты, обслуживающие какой-либо технологический этап, например векторизаторы, можно приобрести как в полном, так и в сокращенном наборе модулей, библиотек символов и т.п. В настоящее время целый ряд отечественных разработок вышел на «рыночный» уровень. Такие продукты, как GeoDraw/GeoGraph, Sinteks/Tri, GeoCAD, EasyTrace, обладают не только значительным количеством пользователей, но и имеют уже все атрибуты рыночного оформления и поддержки.

ГИС-системы выросли из технологий, развитых в системах автоматизированного проектирования, и многие пользователи продолжают использовать продукты САПР при решении геоинформационных задач. Среди систем, зародившихся в недрах САПР, показательное применение AutoCAD Map – ГИС приложения на базе AutoCAD, которые позволяют использовать этот продукт не только в качестве графического инструмента рисования карт и схем, но и в связке с атрибутивными базами и с поддержкой корректной топологии объектов. Этими же особенностями обладают соответствующие модульные системы CADdy, ARC/Info, MapInfo GeoDraw/GeoGraph (разработанная в Центре геоинформационных исследований Института географии РАН под руководством Н.Н. Казанцева) и некоторые другие.

Одним из наиболее функциональных и производительных продуктов является система ARC/Info, предназначенная как для работы в ОС Windows, так и под Linux на RISC-платформах или под управлением ОС Unix. Продукты этого класса поддерживают распределенное хранение, имеют мультиплатформенную основу и снабжены целым букетом географического аналитического инструментария, включая специализированные средства пространственного моделирования. Следует отметить, что общая стоимость включает все рабочие модули ARC/Info и может быть снижена за счет оптимизации модульной поставки.

Большая группа коммерческих программ зарекомендовала себя на мировом рынке как надежные системы для создания ГИС: MapInfo, CADby, PC ARC/Info, PROCART, TNTmips, SPANS GIS, GIS ILVIS. Здесь



же и некоторые отечественные системы, в частности CAD Credo, ГИС-ПАРК. Эти системы реализуют поддержку топологии, связывания с целым набором атрибутивных баз, позволяют выполнять сложные пространственные запросы, работать с растровой подложкой, обеспечивают большой выбор экспортно-импортных форматов.

За последние годы появилось большое число программ для создания ГИС, решения задач геофизики, геологии и горного дела. В таких известных геоинформационных системах, как ARCInfo, MapInfo, AutoCAD Map и многие другие дополнительно появились расширения и модули для геостатистики, геоэкологии, горно-геологического моделирования и трехмерной визуализации пространственных объектов.

Среди программного обеспечения выделяют следующие категории программ по стоимости и доступности:

- 1) общедоступные программы, которые можно получить бесплатно (freeware) или с символической оплатой (shareware) по сети Интернет;
- 2) недорогие коммерческие программы, предлагаемые небольшими специализированными компаниями, такими, как Rockware, Golden Software и т. п.;
- 3) интегрированные системы, которые позволяют выполнить полный набор операций от первичной обработки исходных данных до подсчета запасов ПИ и выдачи отчетной геолого-маркшейдерской графики.

Получить информацию о функциональных возможностях и загрузить общедоступные или недорогие геологические и геотехнологические программы можно на соответствующих сайтах <http://www.ggsd.com> и <http://www.geologicresources.com/>.

#### Свободно распространяемые ГИС и системы для Интернет

Большой список свободно распространяемых программ и ГИС с открытым исходным кодом представлен на сайте <http://www.freegis.org/> (на сентябрь 2011 г. – 353 программы, 25 баз геоданных). Там представлена лента новостей о создании и выходе новых версий геоинформационных систем для различных сфер применения.

*Google Map* – [maps.google.ru](http://maps.google.ru)

Карты Google [3i] – это служба Google, которая предлагает удобную для пользователя технологию поиска по карте и локальные данные о компаниях, включая адрес, контактную информацию и маршруты проезда. Карты Google поддерживают следующие уникальные функции:

- Интегрированные результаты поиска данных по компаниям – поиск адресов компаний и их контактной информации в одном месте на карте. Например, если ввести запрос [АЗС в Москве], то на карте появятся адреса автозаправочных станций. Также можно просмотреть дополнительную информацию: телефоны, часы работы, способы оплаты и отзывы о компании.

- Перемещаемые карты – быстрый просмотр соседних участков (без перезагрузки новых областей).

- Спутниковые изображения – просмотр спутниковых изображений (или спутниковых изображений с наложенными картографическими данными) для выбранного местоположения с возможностью изменения масштаба и перемещения в любом направлении.

- Просмотр улиц – просмотр и навигация по изображениям на уровне улиц.

- Подробные маршруты проезда – необходимо ввести адрес, по которому Карты Google определяют для Вас местоположение и/или маршрут проезда. Спланируйте маршрут, добавляя многочисленные пункты назначения, и перетащите линию маршрута, чтобы проложить свой маршрут. С помощью символа «+» можно разворачивать или сворачивать пошаговые указания к маршруту проезда на левой панели, также можно нажать на отдельный участок маршрута, чтобы просмотреть для него увеличенную карту. Чтобы изменить свой маршрут, перетащите пункты назначения на левой панели. Вы также можете выбрать функцию, позволяющую избегать шоссе, установив флажок в верхнем левом углу.

- Быстрые клавиши – передвижение влево, вправо, вверх и вниз с помощью клавиш со стрелками. Расширение области изображения с помощью клавиш Page Up, Page Down, Home и End. Увеличение и уменьшение масштаба изображения с помощью клавиш с символами плюс (+) и минус (-).

- Двойное нажатие кнопки мыши для увеличения или уменьшения масштаба – при двойном нажатии левой кнопки мыши изображение увеличивается, при двойном нажатии правой кнопки мыши – уменьшается (Ctrl + двойное нажатие для пользователей Macintosh).

- Колесо прокрутки для увеличения или уменьшения масштаба – с помощью колеса прокрутки мыши можно увеличить или уменьшить масштаб изображения карт.

*Google Earth* – сервер картографических данных и космических снимков для отображения в 3D [3i]. С помощью этого ресурса каждый пользователь Интернет может не просто рассмотреть покрытие земного шара космическими снимками с любой технически доступной на сегодняшний день детальностью, но и определить точные географические координаты любого объекта с точностью до одного – двух метров, а также отображать трехмерные модели объектов с учетом истинного рельефа местности.

Программа [earth.google.com](http://earth.google.com) дает возможность отображать покрытие земного шара картами и космическими снимками в географически достоверном и, самое главное, удобном для пользователя «быстром» интерфей-

се. На *Рис. 6.1* представлен спутниковый снимок карьерного поля Лебединского ГОКа.



*Рис. 6.1.* Спутниковый снимок карьера ЛГОКа, КМА

Пользователь ресурса фактически получает доступ ко всем самым современным географическим технологиям. Становятся возможными изучение трехмерных моделей рельефа, городов и объектов и виртуальные «полеты» над ними. Но самое главное – пользователь может создавать собственные картографические слои в любом удобном для него виде тематической классификации и в любой топологии (линейной, точечной, полигональной), наполнять их семантическими (атрибутивными) данными, а также обмениваться ими. Создание, уточнение и обновление карт отныне доступно каждому желающему.

Таким образом, основная работа со снимками осуществляется с помощью программы Google Earth – клиентское ПО для работы с трехмерной моделью Земли, созданной на основе спутниковых фотографий высокого разрешения. Широкие возможности по изменению масштаба изображений (иногда вплоть до отдельных домов) и многое другое, включая определение координат объекта. Карту можно просматривать под любым углом; большая часть карты – это обычные 2D-фотографии, но некоторые объекты (населенные пункты) представлены в виде трехмерных моделей.

Программа объединяет мощные возможности поиска в Google со спутниковыми фотографиями, картами, ландшафтами и трехмерными зданиями, чтобы можно было получать географическую информацию о мире всего лишь одним нажатием кнопки мыши.

- Перелет к своему дому. Введите адрес, нажмите «Поиск», и Вы окажетесь в заданном месте.

- Поиск школ, парков, ресторанов и гостиниц. Планирование маршрутов автомобильных поездок.
- Изменение угла наклона и поворот изображения при просмотре трехмерных ландшафтов и зданий; вид неба.
- Сохранение результатов поиска и избранного содержания; обмен ими с другими пользователями.

С момента появления программы Google Earth ее пользователи дополняют базу данных нашего мира и создают собственное содержание (в виде файлов KML), которым они делятся с другими, например, рельефа местности показанного на *Рис. 6.2.*



*Рис. 6.2. Трёхмерные карты рельефа в Google Earth 3D*

Созданные пользователями файлы KML публикуются каждую неделю в новой Галерее Google Earth. Для этой галереи имеется панель Google, которую можно добавить на свою страницу iGoogle.

*MS Virtual Earth* является аналогом компании Microsoft сервису Google Earth и точно так же, как Google Earth, в ней имеется «карманная» версия – *Virtual Earth Mobile*. Мобильная версия – бесплатное приложение, демонстрирующее карты, а также снимки поверхности Земли со спутников и расположение некоторых бизнес-объектов, отсортированных по названию или категориям в рамках географических регионов. На данный момент доступны картографические и спутниковые данные на территорию США и, частично, Европы, но сервис в дальнейшем будет расширяться. Все необходимые данные приложение подгружает с сервера MSN Virtual Earth. В отличие от других подобных программ, картографический материал подгружается по мере необходимости, что позволяет сэкономить память, а также самостоятельно указать, карта какой местности необходима Вам в конкретный момент. После загрузки карты *Virtual Earth Mobile* по-

зволит ее просмотреть и сохранить, так что для дальнейшей работы с ней Вам не потребуется снова устанавливать Интернет-соединение. Возможности Virtual Earth Mobile: – навигация по карте джойстиком КПК или коммуникатора (север, юг, восток, запад) – масштабирование выбранного участка карты с помощью центральной кнопки джойстика – поиск по адресу (в городах США) или по названию местности, поиск объектов (ресторанов, достопримечательностей, магазинов и т. д.) – поддержка работы в паре с GPS-приемником (позиционирование, наложение координат объекта на карту местности) – поиск адреса по контакту в записной книжке и многое другое

Результаты пространственного поиска географических объектов выдаются в картографическом контексте, что дает возможность получать изображение нужных регионов в виде двумерных или трехмерных моделей с разрешением не хуже одного метра. Это приложение показывает как обычные карты, так и спутниковые снимки, а также позволяет находить организации в указанном географическом регионе.

*World Wind.* В феврале 2007 г. вышла новая версия карты World Wind, разработанной под руководством NASA. Она является высокоточной трехмерной картой Земли и дает возможность исследовать поверхность планеты в трех измерениях.

В основу программы легли изображения, полученные с космических кораблей Shuttle, на которых делались снимки поверхности Земли. В процессе работы было собрано 12 терабайт данных в формате raw.

В последней версии в программу добавлен эффект рассеивания атмосферы, благодаря чему восходы и закаты стали более реалистичными. Кроме этого появилась возможность управления временем, используя которую можно Землю вращать быстрее или начать вращаться в другом направлении. Также в программу добавлен режим двухцветной стереограммы (анаглиф).

### Профессиональные ГИС

*MapInfo Professional.* Наиболее развитая, мощная и простая в использовании система настольной картографии, позволяющая решать широкий спектр задач в различных сферах деятельности. Основные особенности:

- связь с удаленными базами данных Oracle, Informix, MySQL, PostgreSQL;
- усовершенствованный интерфейс;
- создание и редактирование карт высокого качества;
- пространственные данные, поставляемые с программным обеспечением;
- простота интеграции карт – несколько строк кода внедряют окно MapInfo в приложения Windows (Excel, Access, Word);
- анимационный слой – быстрая перерисовка при частых изменениях на слое (полезна для систем слежения за движущимися объектами);



- приложение «Поверхность» – для работы с трехмерными поверхностями, построения изолиний и триангуляции Делоне.

MapInfo включает профессиональную поддержку оцифровки. Поддерживаются драйверы Wintab так же, как VTI (Virtual Tablet Interface). Теперь можно использовать инструменты для рисования без ограничений. MapInfo Professional поставляется на CD-ROM, который содержит примеры: карты России и г. Москвы, карты Австралии, США, Канады. Сертификация для Windows гарантирует, что инсталлятор при столкновении со специфическими требованиями к автоматизации и поддержке в операционной системе сможет их выполнить. Файлы, которые необходимы для создания защиты в среде Windows, ограничены для доступа. Файлы, которые пользователь всегда использует, могут быть размещены в удобном для каждого конкретного пользователя директории. Это позволяет пользователям получить доступ к их настройкам и данным с различных компьютеров и получать доступ к вспомогательным файлам различных версий MapInfo Professional и различных продуктов MapInfo. Местоположение некоторых файлов может зависеть от того, установлена ли сетевая версия MapInfo или рабочая станция. К последней русской версии MapInfo добавлены новые версии утилит, расширяющих стандартные возможности MapInfo.

*ARCView.* Программа ARCView GIS широко применяется по всему миру, и этот программный продукт стал одной из наиболее популярных систем настольного картографирования и создания ГИС. ARCView GIS включает сотни функций работы с электронными картами и выполнения пространственного анализа, которые легко применять. ARCView GIS делает простым и удобным процесс создания карт и добавления к ним собственных данных. При помощи мощных средств визуализации можно обратиться к записям существующих баз данных и отобразить эти объекты на карте. При помощи ARCView GIS можно создать печатные карты высокого качества или интерактивные изображения, связав их с диаграммами, таблицами, чертежами, фотографиями, снимками и другими файлами. Новые возможности ARCView, внесенные в настольную ГИС ARCView 8,1 и более поздних версий, предоставляют пользователям широкие возможности редактирования, улучшенную среду управления данными, дружелюбный Windows-интерфейс и ряд других полезных особенностей. Средства организации и управления данными в ARCCatalog и редактирования информации с использованием инструментов и функций ARCMap – это лишь часть новой функциональности, которую обеспечивает новая архитектура ARCView.

*WinGIS.* Разработчик – Progis (Австрия). Название – 3-уровневый комплекс ГИС WinGIS. Дата внедрения первой версии в эксплуатацию – 1993 г.

В настоящее время – простая и одновременно мощная, инструментальная система для картографирования, анализа пространственных данных, создания производственных ГИС-проектов. Программа имеет в своем

наборе широкие функциональные возможности для создания карт, для интеграции и обмена информацией, для редактирования карт, для формирования запросов, а также инструментарий для высококачественного представления результатов. Продукты PROGIS – WinGIS, WinMAP имеют одно графическое ядро, которое включает широкий набор функций и команд для удобной работы картографов и специалистов в области ГИС, а также простой интерфейс организации связи графических объектов с информацией внешних баз данных. Программа поддерживает большинство существующих форматов баз данных, включая Microsoft Access, dBASE, FoxPro, Excel, Paradox и другие. WinGIS имеет все необходимые атрибуты, обеспечивающие удобство работы пользователя:

- полностью локализован, включая справочную систему (HELP) и руководство пользователя;
- привычный офисный интерфейс, легко подстраиваемый под определенный тип решаемых задач;
- посредством входящей в поставку библиотеки AxCWinGIS пользователь может на любых языках программирования (Visual Basic, Visual C, Delphi и т.д.) создавать собственные приложения, дополнять и изменять стандартные команды;
- отображает в специальном окне структуру проекта, позволяющую в любой момент получить информацию обо всех составляющих создаваемого проекта;
- работа в многозадачной среде MDI, позволяющей работать с несколькими проектами одновременно и быстро переключаться между ними;
- обладает всеми возможностями мощного графического редактора;
- позволяет вводить графические данные посредством оцифровки раstra и с помощью дигитайзера, в процессе выполнения оцифровки возможно динамическое присвоение атрибутивной информации вводимым объектам;
- поддерживает основные растровые форматы: bmp, psx, jpg, gif, tif и т.д., а также собственный формат (Progis Raster Image- \*.PRI), позволяющий ускорить загрузку больших изображений (больше 200 Мб) до 2-3 секунд;
- с помощью встроенного модуля OmegaTool возможна предварительная трансформация изображения по опорным точкам полиномиальным (аффинным) методом. После загрузки изображения в систему возможна его точная привязка и дополнительная трансформация методом Хельмерта;
- манипулирует векторными объектами, такими, как точка (символ), полилиния, полигон, окружность, дуга, текст. С помощью окна функции «Свойство объектов» предоставлена возможность быстрого изменения свойств множества объектов;
- имеет послойное представление графических данных, возможность объединения слоев в группы. Каждому слою или группе слоев мож-

но присвоить такие собственные атрибуты, как стиль линии, штриховка, свойства отображения и т.д.

Мощный редактор условных знаков (точечных, линейных, площадных) позволяет создавать символы любой сложности, используя комбинацию растровых, векторных и текстовых объектов. Символами также можно заполнять площадные объекты, используя их в качестве штриховок. С помощью универсального встроенного редактора линий и штриховок можно создать практически их любые типы, что качественно повышает уровень представления картографического материала. Условные знаки, линии и штриховки могут быть как масштабируемые, так и немасштабируемые. А специальный менеджер дает возможность легко обмениваться библиотеками условных знаков или подключать внешние библиотеки из файлов.

Имеются средства импорта/экспорта с форматами ESRI (Shape), ESRI (E00), MapInfo (MIF/MID), AutoDesk (DXF). Поддержка драйверов dBase, FoxPro, GeoDraw. Разработчик – Центр геоинформационных исследований Института географии Российской академии наук (ЦГИ ИГ РАН).

Области применения – геология и недропользование, органы федерального и регионального государственного управления, городское хозяйство, экология и природопользование, земле- и лесоустройство, транспорт и связь, коммерция и реклама, геодезия и картография, образование. GeoDraw – система для создания цифровых карт с векторным топологическим редактором. Основными функциями являются:

- ввод пространственных объектов с дигитайзера;
- векторизация по растру;
- импорт, экспорт с других систем (ARC/Info, MapInfo, Idrisi. Поддерживаемые растровые форматы BMP; TIFF; GIFF; PSX и векторные SFX; DX90);
- редактирует коретные топологические структуры;
- производит идентификацию пространственных объектов. Осуществляет их связь с атрибутивными данными, редактирует в автоматическом режиме таблицы;
- производит разнообразные запросы выборки по картам и табличным данным.

Кроме того, GeoDraw обладает возможностью работы в системе координат WGS84.

*ГИС БелГИС.* Разработчик – ФГУП ВИОГЕМ. Состоит из ядра системы и программных компонентов, решающих прикладные задачи. Ядро системы имеет следующую структуру: система управления базами данных (СУБД) и электронными таблицами *NetBase*, растровый редактор (*Elastic*), векторный картографический редактор (*MapProj*). На основе этого ядра создаются практически любые модули. Например, в настоящее время созданы Геологический и Маркшейдерский модули, Генплан и Кадастровый модуль, Сельскохозяйственный модуль.

Для обработки исходной информации в виде планшетов был разработан растровый редактор *Elastic*, который позволяет минимизировать ис-



кажения, получаемые при сканировании и склеить отдельные фрагменты изображения в единую карту. После обработки растровые изображения переносятся в векторный картографический редактор *MapProj*, где происходит его векторизация. Векторизация может производиться как вручную, так и в автоматизированном режиме. Дружественный интерфейс программы и удобные инструменты сокращают время на векторизацию изображений в 2-3 раза, по сравнению с другими аналогичными программами, что напрямую влияет и на стоимость выходной векторной карты. Кроме традиционного метода ввода информации – векторизации предусмотрены также и другие: импорт данных геодезических съемок из электронных тахеометров, с подготовкой стандартных отчетных журналов и автоматизированной обработкой результатов съёмок; ввод объектов с известными координатами непосредственно с клавиатуры; импорт координат из текстовых файлов. Также поддерживаются многие векторные и растровые обменные форматы, в том числе: *MapInfo* (\*.mif), *ArcView* (\*.shp), *AutoCAD* (\*.dxf), *OCAD map* (\*.ocd), *ObjectLand* (\*.gdb), *SFX* (\*.sfx), *KDR* (\*.kdr), (\*.emf), (\*.wmf), (\*.bmp).

Поддерживается работа с картами масштабов от 1:10 до 1:2000000 в прямоугольной системе координат. Программа позволяет создавать и работать с векторными картами как однослойными, так и многослойными. Важной особенностью *MapProj* является возможность создания и редактирования трехмерных карт. Программа поддерживает следующие типы карт:

- план (все объекты на карте имеют координаты X и Y, отличные от нуля, координата  $Z = 0$ );
- поверхность (все координаты объектов могут отличаться от нуля);
- специально разработанные для моделирования месторождений полезных ископаемых типы карт: сечение, тело.

Помимо вышеперечисленных возможностей БелГИС включает в себя инструмент анализа картографических и атрибутивных БД. Базовый комплект (ядро) БелГИС обладает следующими функциями: полигональная статистика с автоматическим подсчетом площадей, построение профилей, поверхностей, изолиний, создание ведомостей координат и геоанных по выбранным объектам и др. Дополнительные возможности для анализа, как правило, включаются в тематические прикладные модули – сравнительно небольшие программы, расширяющие возможности БелГИС в той или иной области.

Для служб быстрого реагирования (МВД, ГИБДД, ГО и ЧС, скорая помощь, пожарные службы, аварийно-ремонтные службы ЖКХ) создан прикладной ГИС-модуль на основе электронной карты города, который позволяет не только принять и упорядочить поступление заявок, но и делать их анализ, распределять по службам, а также выводить на печать в виде стандартного отчета.

Программный пакет БелГИС позволяет также производить обработку материалов дистанционного зондирования Земли (космических снимков

и аэрофотоснимков), создавать на их основе цифровые модели местности и топографические карты различного масштаба.

Кроме таких широко распространенных программ, как ARC/Info/ARCVIEW и MapInfo, в области геоинформатики для недропользования используются программы ERDAS, AutoCAD Map, отечественные программы Интегро, ГИС ПАРК и БелГИС [19i].

### 6.3. Геолого-географические интегрированные системы

Каталог большого числа специализированных программ, для геологов представлен на сайте фирмы Rockware [9i], с которого можно загрузить демонстрационные или рабочие версии многих программ, таких, как *Rockworks* (геологическое моделирование, картографирование и визуализация), *GMS* (гидрогеология, геостатистика), *Surfer* (моделирование поверхностей и подсчёт объемов) и другие.

Интегрированные системы. Подсчет запасов полезных ископаемых, как правило, входит в состав крупных интегрированных геоинформационных систем недропользования (НГИС) моделирования месторождений. Это обусловлено тем, что итоговый подсчёт запасов выполняется обычно на завершающей стадии цифрового моделирования залежи и предоставляет все необходимые данные для проектирования горного предприятия и планирования ведения горных работ. В связи с этим интегрированные НГИС имеют в своём составе множество математических процедур обработки пространственной информации и графических функций визуализации геологических объектов. Широкий набор программных инструментов обеспечивает гибкость при моделировании разнообразных генетических типов месторождений.

Разработка отечественных интегрированных систем горно-геологического применения ведётся в Москве (МГГУ, *Интегра*), Апатитах (Горный институт РАН, *Framework*), Белгороде (ВИОГЕМ, *Геомикс*; ГЕТОС Geoblock) и ряде других городов. Для подсчёта запасов из отечественных систем могут быть использованы, в частности, такие программы:

#### Зарубежные пакеты программ решения задач рационального недропользования

Среди коммерческих интегрированных систем геологического и горного моделирования месторождений наиболее распространёнными в мире являются следующие программы.

*Datamine Studio* [21i] – интегрированная горно-геологическая система компании DATAMINE. Включает многочисленные модули для решения различных горно-аналитических задач от разведки до эксплуатации и планирования добычи. Реализовано тесное взаимодействие с известной программой расчета контуров карьеров при максимизации прибыли NPV Scheduler. Широко используется крупными горнодобывающими компа-

ниями мира. Первой интегрировала полную систему виртуальной реальности в ядро своей системы управления базой данных и подсчета запасов.

Для наглядной визуализации геологии, фаз планирования горных работ, схем обеспечения безопасности и рекультивации на территории земельных отводов в комплексных проектах построения виртуальных сцен в системе Datamine Studio применяется модуль InTouch с реализацией технологии Virtual Reality.

Пользователь может визуализировать фабрику по переработке руды вместе с передвижным оборудованием в карьере или шахте и проверить горный проект с точки зрения экономической эффективности решений, соблюдения требований безопасности и экологии. Можно из кабинета администратора управлять оборудованием в качестве оператора и наблюдать то, что он видит во время работы. При имитации управления грузовым транспортом Вы получаете возможность визуально контролировать пересечение траектории движения на съездах с выступами пород и углами трассы движения.

Модуль *InTouchGPS* предоставляет возможность получать живую телеметрическую информацию от мобильного оборудования в карьере с помощью GPS и сотовой телефонии, чтобы показать его положение в реальном времени при остановках, выполнении заданий и погрузке. Смешивание или микширование различных типов данных, таких, как топографические, геохимические, геофизические, структурные, геотехнологические и связанные с ними данные о планировании горных работ, контроле качества, складировании отходов и экологии, позволяет пользователям оценивать путём прямой визуализации процессов экономичность горнодобывающего предприятия и прогнозировать вероятное воздействие технологии на окружающую среду. Модели совмещения виртуальной и естественной реальностей используются при создании презентаций для акционеров, аудиторов, инвесторов, общественных организаций и органов государственного контроля.

*Vulcan* [22i] – система горно-геологического моделирования австралийской компании Maptek/KRJA Systems Ltd. Имеет интеграцию с программой трехмерного лазерного сканирования поверхностей горных выработок.

*Micromine* [24i] – модульная система горно-геологического моделирования австралийской компании Micromine Pty Ltd. Одна из немногих, локализованных для российского рынка. Документация переведена на русский язык. Используется в ряде вузов страны при обучении студентов-географов, геологов и горняков основам моделирования и подсчета запасов месторождений полезных ископаемых.

*Gems и Surpac* [25i] – интегрированные системы моделирования месторождений и планирования добычи канадской компании Gemcom Inc. Вместе с ними поставляется одна из наиболее распространенных в мире

программ оптимизации границ карьеров Gemcom Whittle по максимуму прибыли на основе алгоритма Лерчса-Гроссмана [26i].

Стандартный набор функций интегрированных систем включает:

- Управление базами данных.
- Маркшейдерские расчеты.
- Статистика и геостатистика.
- 3D моделирование геологических объектов и поверхностей.
- Интерактивная 3-мерная графика и картирование.
- Проектирование открытых и подземных горных работ.
- Планирование развития рудников и календарное планирование добычи.
- Оптимизация этапов отработки по максимуму прибыли с учетом ограничений (технологических, экономических, законодательных, налоговых и экологических).

### 6.3.1. Горно-геологическая информационная система Geoblock.

Система *Geoblock*: [7i] является интегрированной программой горно-геологического моделирования и подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых с открытым исходным кодом по лицензии MPL. Репозиторий исходного кода программы находится в сети Интернет на сайте SourceForge к которому для разработчиков имеется доступ по SVN. Программа общедоступна и бесплатна при скачивании из Интернет.

В работе [44] описана комплексная система моделирования и оценки запасов месторождений твердых полезных ископаемых Geoblock. Схема взаимодействия входящих в комплект программ представлена на Рис. 6.3.

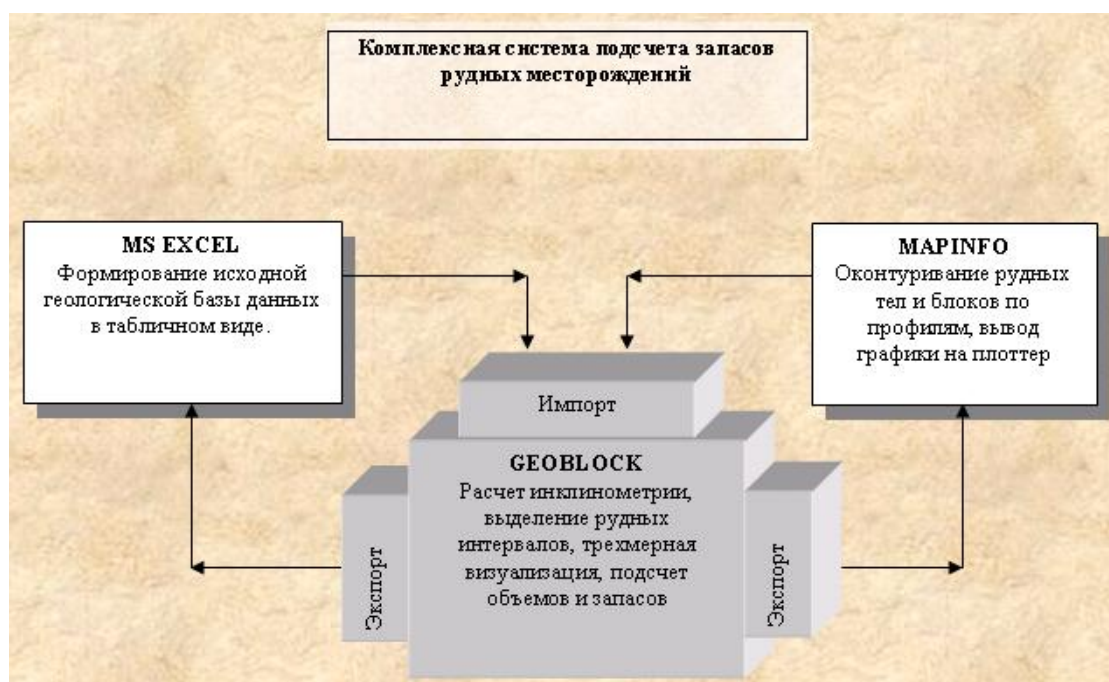
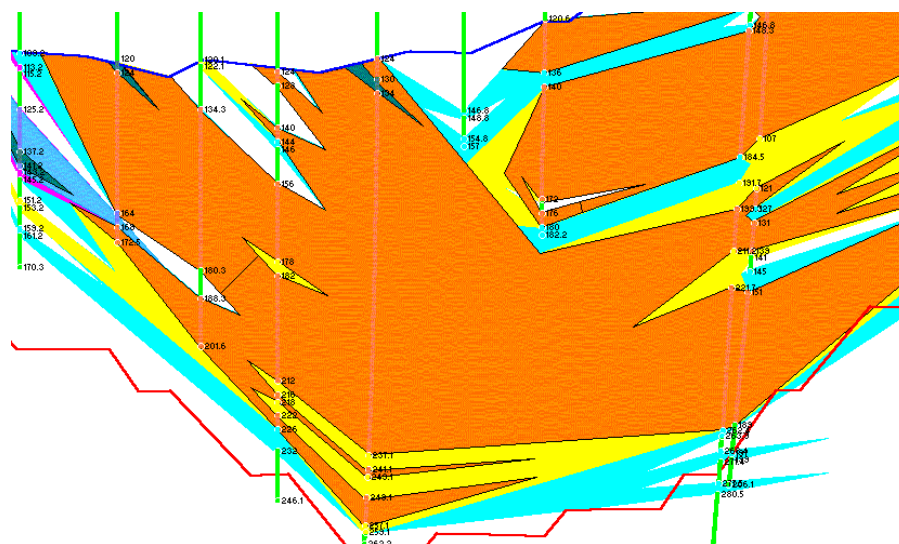


Рис. 6.3. Комплексная ГИС «Горный отвод»

При формировании базы данных детальной и эксплуатационной геологических разведок наиболее трудоемким процессом является ввод первичной информации с колонок скважин и оцифровка полевых журналов. Для хранения первичных табличных геолого-маркшейдерских данных часто используются общедоступные программы MS Excel или Access. В этом случае исходную информацию группируют в трех отдельных таблицах: «Устья», с координатами начала скважин или борозд; «Инклинометрия», с замераами искривления стволов скважин; «Опробование», с результатами анализов проб и литологией. Названия полей данных при импорте первичных таблиц в программу моделирования могут быть переименованы в соответствии с требованиями.

Таким образом, например, организован импорт таблиц из вышеупомянутых общедоступных программ, включая ГИС ARCInfo и MapInfo, в реляционные таблицы программы Geoblock. При этом структура таблиц пространственных данных программы Geoblock формируется заранее или для этого очищается от записей копия уже имеющейся таблицы. Визуализация одного из вертикальных геологических разрезов рудного месторождения представлен на *Рис. 6.4*.



*Рис. 6.4.* Геологический разрез месторождения с разными технологическими сортами руд

В целом система НГИС «Geoblock» позволяет: вести базу данных маркшейдерской и геологической информации; составлять композитные пробы и выделять рудные интервалы в соответствии с установленными кондициями; рассчитывать координаты скважинных проб по данным интервального опробования и инклинометрии; оконтуривать рудные тела и подсчетные блоков; определять средневзвешенные показатели в заданных контурах; вести подсчет запасов руд и компонентов различными методами.

В качестве примера внедрения Интернет-технологий в практику недропользования можно отметить разработанную в БелГУ базу данных гидротехнических объектов и сооружений [45].

### 6.3.2. Геолого-маркшейдерская система для горных работ ГЕОМИКС

Горно-геологическая информационная система *Геомикс* [19i], (разработанная ФГУП ВИОГЕМ) применяется для построения горно-геологических моделей месторождений полезных ископаемых при открытой и подземной разработке и решения на их основе горно-геологических задач: подсчет запасов, автоматизация геолого-маркшейдерских задач, проектирование буровзрывных работ, текущее и перспективное планирование. *Геомикс* представляет собой интегрированную систему, состоящую из ядра и функциональных модулей: ведения геологических работ; ведения маркшейдерских работ; ведения буровзрывных работ и решения геолого-структурных задач.

Система представляет собой совокупность двух функциональных модулей (геологического и маркшейдерского), каждый из которых включает одинаковое для всех ядро и программный компонент, характерный для конкретного модуля. Программный компонент – набор специальных программ, создающих интерфейс ядра с пользователем и реализующих алгоритмы решения определенных задач.

*Геологический модуль* системы предназначен для формирования и ведения баз данных геологоразведочной и геолого-эксплуатационной информации (данных первичной документации скважин и горных выработок, результатов опробования, карт, геологических подсчетных разрезов и планов, слоевых качественных планов и так далее), моделирования месторождения и отдельных его участков, подсчета запасов методом вертикальных сечений и пересчета запасов по горизонтальным слоям (этажам), оценки пространственной изменчивости оруденения, построения геологических планов и разрезов, планов в изолиниях содержания компонентов, регламентирующих качество руд, подсчета запасов в эксплуатационных блоках, для годового и оперативного планирования добычи руд.

*Маркшейдерский модуль* служит для автоматизированной обработки маркшейдерских журналов и данных стереофотографической съемки карьера. С его помощью осуществляются формирование и редактирование базы данных пунктов опорного и съемочного обоснования, ввод данных маркшейдерской съемки из полевых журналов, решение маркшейдерских задач (прямая и обратная засечки, обратная геодезическая задача, обработка журналов тахеометрической съемки, расчет высотной отметки, расчет и уравнивание тахеометрического и нивелирного ходов и других). Кроме того, маркшейдерский модуль обеспечивает ведение погоризонтных маркшейдерских планов, сводного плана горных работ, моделирование поверхности карьера по состоянию на любую дату, проектирование буровзрывных работ в карьере (совместно с *буровзрывным модулем* системы). Модификация модуля для условий подземной разработки обеспечивает ведение маркшейдерской модели шахты (применяется на Донском ГОКе, Казахстан), в том числе проектирование горных выработок и обработку результатов исполнительной съемки пройденных выработок с автоматическим построением фактического их положения на маркшейдерском плане.

Текущая работа геолого-маркшейдерских служб на ряде крупнейших железорудных предприятий России (Лебединский, Ковдорский, Стойленский ГОКи) выполняется с применением ГЕОМИКС. Применение НГИС ГЕОМИКС позволяет повысить производительность труда геологов и маркшейдеров предприятий, улучшить технико-экономические показатели горных работ, поднять на современный уровень методику геолого-маркшейдерского обеспечения.

### 6.3.3. Программное обеспечение Roxar

Roxar Software Solutions разрабатывает программное обеспечение, позволяющее комплексным группам специалистов извлекать максимум информации из имеющихся данных о месторождении, на сбор которых часто затрачивается много сил и средств, и принимать за счёт этого оптимальные решения в короткие сроки. Технологии, реализованные в программных продуктах, применимы на всех стадиях жизненного цикла месторождения, начиная от детальной разведки и заканчивая извлечением остаточных запасов.

Roxar — норвежская компания, специализирующаяся на трёхмерном геологическом моделировании, применении стохастических технологий моделирования месторождений, в области оперативного мониторинга добычи и в измерениях многофазных потоков. Имеет богатый практический опыт и современные технологии анализа рисков, проектирования разработки месторождений, её оптимизации, а также перманентного мониторинга работы скважин и высокоточных измерений многофазных потоков в режиме on-line

Передовые технологии Roxar дают компаниям — операторам лучший контроль над эксплуатацией месторождений и более глубокое понимание проблем и процессов их разработки. Получив с помощью наших технологий компьютерного моделирования картину процессов разработки залежи, операторы могут установить широкий комплекс датчиков, позволяющих измерять и отслеживать эти процессы. Такие измерения в свою очередь позволяют получить фактическую информацию об изменениях в составе продукции и пластовых давлениях, и сопоставить её с долгосрочными производственными планами. Непрерывный мониторинг добычи позволяет также получить 'ранее предупреждение' о возможных проблемах. Это позволяет компаниям повысить эффективность управления как отдельными скважинами, так и залежью в целом.

Ключевым компонентом работы является увеличение отдачи пластов. Специалисты компании помогают клиентам находить, проектировать и применять наиболее эффективные мероприятия по оптимизации добычи с их месторождений. Увеличение отдачи пластов является результатом итеративного процесса, в который могут быть вовлечены знания геологов, промысловых и полевых геофизиков, инженеров — разработчиков, инженеров — технологов и экономистов. Roxar имеет инструменты и опыт, необходимые для проведения таких работ и оценки любых планов увеличения отдачи пласта.

Цель - предоставление интегрированных услуг, покрывающих все аспекты оценки и разработки месторождения, от предварительного геологического моделирования до проектирования, инсталляции и сопровождения измерительных систем. Благодаря уникальной комбинации средств гидродинамического и геологического моделирования, мониторинга скважин и измере-



ния многофазных потоков компания Roxar стала одной из первых, предоставляющих интегрированные решения в области управления разработкой. Квалифицированные и опытные сотрудники работают над решением самых сложных задач, стоящих перед специалистами, занимающимися управлением разработкой во всём мире. Кооперация — важная составляющая успеха практически любого проекта в нефтегазовой отрасли: специалисты Roxar сотрудничают со своими коллегами в компаниях-клиентах. Кроме технического опыта для этого требуются коммуникабельность и широкое знание процессов управления разработкой месторождения.

RMS — интегрированная модульная система построения, анализа и сопровождения трёхмерных адресных постоянно действующих геолого-технологических моделей месторождений. Пакет имеет модульную структуру и соответствующую систему лицензирования. Это позволяет пользователям пакета:

- Оптимизировать решения с точки зрения стоимости за счёт исключения неиспользуемых или редко используемых им функций.
- Увеличить производительность своих систем путём распределения вычислений между разными рабочими станциями в сети с меньшими затратами средств на приобретение лицензий.
- Дополнить имеющиеся решения третьих фирм продуктами Roxar с меньшими затратами за счёт исключения дублирующихся функций.

Tempest — интегрированный программный комплекс для создания и сопровождения трёхмерных постоянно действующих гидродинамических моделей месторождений. Компоненты комплекса реализованы с помощью самых современных технологий программирования, что обеспечивает им уникальную производительность и масштабируемость.

DACQUS — это контроль месторождения в реальном времени и возможность оперативного реагирования на все события. Уменьшается риск простоев и аварий, так как возможные опасные ситуации контролируются на ранней стадии. Наличие удалённого мониторинга позволяет ключевым экспертам осуществлять мониторинг нескольких месторождений одновременно, что позволяет сократить количество персонала на месторождении. Как результат увеличение добычи значительно перевешивает стоимость внедрения программы.

ResVIEW-II — Программный комплекс ResVIEW-II предназначен для специалистов, использующих геологические и гидродинамические модели в управлении разработкой месторождения.

#### **6.4. Оптимизаторы границ открытых разработок**

Основы методов и компьютерных систем оптимизации применительно к открытой разработке рудных месторождений достаточно подробно рассматриваются в работе [29], следуя которой далее излагаются наиболее важные положения теории и практики оптимизации.

При использовании компьютерных технологий в недропользовании в мире главным образом применялись два алгоритма оптимизации предельных контуров карьеров – метод лавающего конуса и метод Лерча-Гроссмана. Не касаясь деталей математического аппарата этих методов можно отметить, что в основном они дают не слишком расходящиеся результаты. Однако в настоящий момент второй метод, благодаря в основном компании Whittle Programming (которая сейчас входит в компанию Gemcom), завоевал лидирующее положение в мире.

Помимо упомянутой компании Whittle Programming, выпустившей на рынок такие широко известные продукты оптимизации, как Three-D, Four-D, OptiCut, Four-X, появилась новая компания Earthwork, которая выпустила несколько горных приложений высокого уровня и в том числе программу оптимизации карьеров по методу Лерча-Гроссмана – MaxiPit, которая вошла в состав пакета (системы) NPV Sheduler компании Datamine. Этот пакет предлагает сегодня набор высокотехнологичных компьютерных инструментов для проектирования и планирования открытых горных работ с широким использованием различных методов оптимизации. Он имеет удобный интерфейс пользователя, и мы остановимся на его рассмотрении чуть позже.

### **Программа оптимизации Gemcom Whittle**

Программный пакет Gemcom Whittle на протяжении многих лет является лидером в решении задач, связанных с оптимизацией границ карьеров [25i]. Многие проектные организации и консультационные фирмы пользуются в работе этим пакетом по всему миру. Ниже в качестве примера приведена последовательность шагов при оптимизации одного из карьеров.

В примере рассматривается зона минерализации, имеющая нерегулярную форму, развитая на глубину 110 м, и простирающуюся на 108 м с Севера на Юг и на 240 м с Запада на Восток. Поверхность зоны слабо опускается на Запад. В ней были установлены 2 типа минерализации:

- Руда А с высоким содержанием, которая содержит 120.0 тыс. т запасов руды; содержания в этой зоне, имеющей форму колпака над зоной с низкими содержаниями, распределены логнормально со средним значением 7.95 г/т и максимумом 9.66 г/т;
- Руда В с низким содержанием, содержащая 1 058.9 тыс. т запасов руды (она распространяется главным образом на глубину); содержания распределены также логнормально со средним значением 3.18 г/т и максимумом 3.75 г/т.

Для оптимизации была использована блочная модель месторождения с блоками 6х6х10 м. Вся модель содержит  $59 \times 41 \times 12 = 29\,028$  блоков, что обеспечивает приемлемое время расчетов. Плотность руды – 2.2 т/куб.м.

Были использованы 3 угла откоса борта карьера из табл. 1.1. В целом программа позволяет задавать до 160 различных углов откоса. Наклон вос-

точного борта позволяет разместить на нем дороги при последующем детальном проектировании карьера.

Таблица 6.1. Параметры углов откоса карьера

Азимут, град.	Угол откоса от горизонтали, град.
80.0	43.0
180.0	58.0
280.0	53.0

Для оптимизации требуется построить экономическую модель месторождения, добавив в имеющуюся геологическую модель соответствующие параметры. В данном примере были использованы следующие показатели:

- Цена золота – 12.5 доллара за грамм.
- Затраты на выемку 1 тонны горной массы – 1.5 доллара.
- Затраты на обогащение 1 тонны руды – 10.5 доллара.
- Годовая начальная производительность карьера – 1 млн. тонн горной массы.
- Начальная производительность ОФ – 200 тыс. тонн в год.
- Компании, владеющей месторождением, необходимо получить значение Net Present Value (NPV) на основе 10% учетного процента.

После ввода исходных данных программа выдает для данного примера информацию о 48 «вложенных» карьерах, которые получаются, если последовательно уменьшать цену металла до какого-то минимума с заданным интервалом. Лучший карьер выбирается по максимуму NPV, и в данном случае – это карьер № 37. Рассчитывается также график, где для каждого карьера приводятся два значения оценки: наилучшая, когда углы рабочего и нерабочего бортов карьера равны и наихудшая, когда угол рабочего борта минимален. Расчетный предельный контур карьера представлен на Рис. 6.5

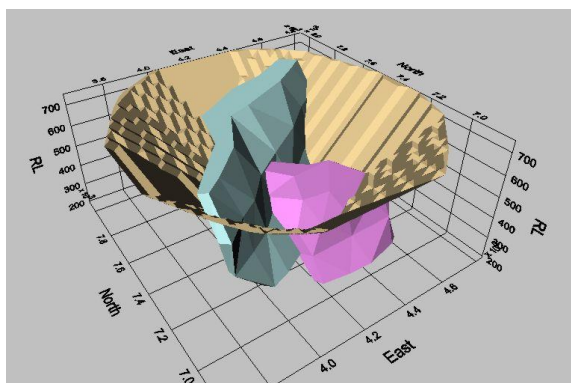


Рис. 6.5. Оптимальный предельный контур карьера

Реальная оценка, как и карьер, находится где-то посередине. На выходе также формируется таблица, в которой приводятся все характеристики (в т.ч. и экономические) для каждого из «вложенных» карьеров. Вы можете повторить запуск программы сколько угодно раз с новыми экономическими параметрами для того, чтобы оценить возможные ситуации, связанные с колебаниями цен металлов, не подтверждением информации о качестве и количестве руды и т.п.

В итоге анализа эксперт может выбрать предельный карьер, который позволит получить максимальную величину NPV в результате отработки запасов месторождения при не очень высоком уровне риска от возможного снижения мировых цен на металлы и не подтверждения геологической информации.

Далее Вы сможете импортировать полученную блочную модель выбранного Вами карьера в одну из горных графических систем (например, в Датамайн) и по ней спроектировать детальный карьер с дорогами, который не должен существенно отличаться по форме от оптимального карьера.

В пакете имеется возможность вести стратегическое планирование с использованием оптимизации бортовых содержаний по критерию максимума NPV. Этот модуль оперирует на основе расчета оптимальной последовательности выемки запасов месторождения. Дополнительные модули, расширяющие основное ядро, увеличивают производитель и практические возможности пакета.

В частности Модуль **Multi-element** позволяет использовать при оптимизации модели месторождения до десяти различных элементов (их содержаний). Этот модуль весьма полезен для анализа рудников по добыче многокомпонентного сырья. Каждый из продуктов может иметь независимую функцию извлечения для одного или более способов переработки. Каждый элемент может иметь различную структуру затрат и ограничений. С помощью модуля Multi-element моделируются и отслеживаются также вспомогательные минералы или вредные примеси.

Можно существенно улучшить экономические характеристики «оптимального» карьера за счет использования поэтапной отработки, т.е. выбора такой последовательности этапов (англ. аналог «этапа» – pushback) с установленными углами откоса бортов в каждой из оболочек карьера, которые обеспечивают максимум NPV.

Программа включает в себя возможность разделения жизни карьера на этапы с учетом оптимальной последовательности их отработки и соблюдения горнотехнических ограничений.

### Программа NPV Scheduler

Программный комплекс NPV Scheduler включает в себя ряд функций, автоматизирующих процессы проектирования и планирования карьеров. Комплекс имеет развитый современный интерфейс пользователя и

имеет возможность разностороннего импорта и экспорта информации, а также развитую современную графику с 3-х мерным визуализером.

Первой частью комплекса является программа Maxipit, которая так же как и Gemcom Whittle использует алгоритм Лерча-Гроссмана. Оптимизация может быть произведена по одному из 3-х критериев:

**Максимум потока наличности (cash flow).** Программа будет создавать стандартный предельный карьер. Здесь же можно использовать ограничения, связанные с определением границ перехода на подземные работы.

**Максимум извлекаемых запасов.** Программа будет создавать карьер, включающий всю руду и породу, которая должна быть для этого удалена. Этот случай может встретиться при отработке месторождений очень ценного сырья (алмазов, драгоценных камней и т.п.).

**Работа в заданных границах карьера.** Вместо создания нового карьера программа будет использовать имеющиеся границы карьера. Необходимо предварительно импортировать в программу поверхность Вашего карьера. Такая ситуация может случиться, если вам, например, потребуется проверить (и улучшить) экономические параметры уже спроектированного карьера.

Кроме того, в процессе оптимизации может быть определена оптимальная (по критерию максимума NPV или ЧДД – чистого дисконтированного дохода) последовательность извлечения блоков модели по одному из 2-х критериев:

**Максимум NPV.** Программа будет искать последовательность извлечения блоков (внутри всех оболочек карьеров), которая дает самый высокий NPV.

**Оптимизация усреднения руд.** Программа будет искать последовательность извлечения блоков (внутри всех оболочек карьеров), которая позволяет выполнить установленные Вами ограничения по качеству добываемой руды (однородность, содержание вредных примесей и т.п.).

На выходе из программы для каждого «вложенного» карьера рассчитывается:

- Экономическое бортовое содержание для всех полезных ископаемых
- Поток денежных средств (CashFlow), \$
- Количество горной массы в контуре карьера, тонн
- Количество руды разных видов с учетом разубоживания, потерь и бортового содержания, тонн
- Количество всех извлекаемых металлов после переработки руды
- Оценка NPV, \$
- Время работы карьера, лет

Рассмотрим работу программы NPV Scheduler на примере оптимизации одного из золоторудных карьеров, следуя последовательности операций, приведенной в работе [29].

### **Ввод исходных данных о месторождении**

Месторождение золота расположено в холмистой местности и представляет собой свиту крутопадающих рудных тел и зон (11) мощностью от 2 до 20 и более метров. Верхняя часть залежи представляет собой окисленную зону мощностью до 30-50 м, в которой золото находится в несвязанной форме. Ниже располагаются основные запасы металла, где золото связано с сульфидами. Месторождение разведано до глубины почти 350 м от поверхности. Среднее содержание золота в окисленной зоне – 2.5 г/т, сульфидной – 3.5 г/т, содержание серебра соответственно – 0.7 и 2.5 г/т. Месторождение разведано скважинами колонкового и шарошечного бурения, канавами и подземными горными выработками.

Предварительным Технико-экономическим обоснованием предусматривается раздельная во времени отработка разных типов руд; сначала будут извлекаться и перерабатываться кучным выщелачиванием окисленные руды, а затем – сульфидные – с предварительным использованием биологического выщелачивания.

Моделирование месторождения начиналось с создания каркасных моделей 11 рудных тел, которые затем заполнялись ячейками (блоками). Размер основного блока модели – 10(вкрест простирания) x 20 x 20 м. На контактах рудных зон с целью соблюдения реальных их очертаний блоки делились на суб-блоки со значительно меньшими размерами.

Трехмерная интерполяция содержаний золота и серебра производилась обычным кригингом и (в некоторых случаях) методом обратных расстояний с показателем степени 3. Чтобы исключить влияние подземных геологоразведочных работ, на блочную модель месторождения была наложена трехмерная модель разведочных выработок, внутри которой значения содержаний золота и серебра были приняты равными 0.

### **Создание экономической модели месторождения**

Все оптимизационные расчеты проводятся на блочной модели месторождения, которая обычно импортируется в специализированную программу из горной компьютерной системы, где она была создана. При импорте из Датамайн, например, модель, имеющая подъячейки, становится регулярной.

Программа-оптимизер, используя исходные данные, рассчитывает для каждой ячейки модели дополнительную экономическую характеристику. Это – величина чистой прибыли, которую получит предприятие, если оно добудет руду данного блока, переработает ее и продаст все извлеченные полезные компоненты по установленным ценам на рынке. Затраты на вскрышные работы здесь пока не учитываются.

Оценка блока может быть как положительной, так и отрицательной (пустые и вмещающие породы, бедные руды).

Программа с помощью входной информации (цены – затраты) рассчитывает экономическое бортовое содержание (для предельного карьера), при котором можно добывать руду с нулевой прибылью. Далее по блочной модели оцениваются все запасы с содержанием выше бортового (руда) и

количество пустой породы. Эта модель будет использоваться во всех процессах оптимизации.

Если на входе заданы несколько полезных компонентов, содержащихся в комплексных рудах, то программа оценит полную экономическую ситуацию, и для каждого блока модели рассчитает полную экономическую характеристику. Естественно, что в этих условиях не могут быть рассчитаны отдельно экономически бортовые содержания для каждого полезного компонента.

#### **Определение производительности карьера**

Для запуска программы оптимизации (точнее – определения предельных контуров карьера) необходимо предварительно оценить размер ежегодной добычи руды. Этой проблеме посвящено так много работ в отечественной и иностранной литературе, что мне остается только направить интересующегося этим вопросом читателя к любому справочнику по открытым горным работам, где он найдет ответы на свои вопросы и обширную библиографию.

Хотя теоретически возможно точно рассчитать оптимальную производительность рудника, однако чтобы сделать это, необходимо иметь точные сведения о тоннаже и содержаниях в извлекаемой в разные периоды времени руде (с учетом изменений борта во времени), производственных затратах и ценах на материалы и металлы в течение всего срока работы предприятия. Эта информация не может быть получена полностью, особенно на ранних стадиях освоения месторождения.

Даже, если вся эта информация имеется, то все равно теория оптимизации не может дать однозначного ответа. Использование разных критериев приводит к различным оптимумам, а в условиях неопределенности исходной информации единого оптимума существовать не может. Речь может идти лишь об оптимальной зоне. Следовательно, точные математические методы редко применяются для решения данной задачи. Для этой цели должны быть использованы другие способы.

Самый простой метод расчета состоит в прогнозировании потребностей рынка в планируемой продукции и делении на эту величину объема кондиционных запасов месторождения с учетом всех возможных потерь и извлечения на всех стадиях производства.

Более точный и популярный на западе метод был разработан в 80-х годах Тейлором, который предложил полезный практический способ определения срока существования горного предприятия. Слишком низкая производительность рудника отодвигает получение возможной прибыли от проекта далеко в будущее. С другой стороны, слишком большая производительность приводит к риску не возвращения чрезмерно больших капиталовложений в короткое время работы предприятия. Чрезмерно большое предприятие в ряде ситуаций не сможет полностью продать свою продукцию на рынке, а короткий срок работы его может быть не приемлем по социальным мотивам.

Необходимо учитывать еще одну особенность расчета для предприятия с коротким сроком жизни. Цикл изменения цен на цветные металлы составляет 4–7 лет. Поэтому при сроке отработки запасов 4 года можно остаться в проигрыше, оказавшись в пределах “провала” цикла.

В реальной жизни размеры конечной продукции горного предприятия находятся под строгим ограничением различных производственных факторов. Одним из наиболее важных из них является размер рабочего пространства карьера или шахты. Рудник реально может увеличить свою производительность за счет расширения рабочего пространства. На карьерах рабочее пространство для оборудования (а следовательно и производительность) измеряется единицами площади (кв. метры), в то время как тоннаж связан с объемами руды (куб. метры).

Следовательно, можно ожидать, что производительность для рудных тел с более или менее одинаковой формой будет пропорциональна запасам руды в степени  $2/3$ . Следовательно, срок отработки будет пропорционален кубическому корню из этого тоннажа. Исследования Тейлора в 1977 г показали, что производительность рудников примерно пропорциональна запасам в степени  $3/4$ , а не  $2/3$ , как это могло казаться. Проектные сроки работы предприятия  $T_m$  оказались пропорциональны корню 4-ой степени от запасов руды  $Q_r$ .

Таким образом, Тейлором получена простая и полезная формула для расчета срока отработки запасов:

$$T_m \cong 0.2 \sqrt[4]{Q_r} \quad (6.1)$$

Однако в этих расчетах удобнее оперировать с запасами, выраженными в млн. тонн. Кроме того, оказалось, что практический интервал значений находится в пределах 0.8 - 1.2, поэтому формула может быть переписана в виде

$$T_m \cong (1 \pm 0.2) \sqrt[4]{Q_r} \quad (6.2),$$

где  $Q_r$  выражено в млн.т

На предварительной стадии количество руды может оказаться недостаточным для получения приемлемых результатов расчета, однако на последующих стадиях в эти объемы могут полностью войти все категории запасов, включая  $C_1$ .

Данное правило обеспечивает приемлемые результаты для приблизительных расчетов интервала производительности рудника на предварительной стадии оценки месторождения. В этом интервале затем может быть выбрано одно из реальных значений, которое далее будет использовано в ТЭО и проекте.

#### **Исходные параметры оптимизации карьера**

В приведенном примере было выполнено в общей сложности 4 серии расчетов с различными параметрами:

- Цены золота.
- Углов откоса бортов карьеров.



- Производственных затрат на обогащение руды.
- Извлечения золота при переработке руды.
- Потерь и разубоживания руды при добыче.
- Годовой производительности рудника и нормы дисконтирования.

Окончательный вариант исходных данных для оптимизации карьеров приведен в нижеследующей таблице. Углы откоса борта карьера приняты с учетом расположения карьерных автодорог на западном борту.

Таблица 6.2. Входные параметры для оптимизации карьера

Параметры	Ед. измерения	Карьер окисл. руд	Карьер сульф. Руд
Угол откоса – запад	Градусы	38.00	38.00
Угол откоса – восток	Градусы	45.00	45.00
Цена на золото	\$/унц.	275.00	350.00
Цена на серебро	\$/унц.	5.00	5.00
Извлечение серебра	-	0.50	0.50
Роялти	%	3.00	3.00
Потери руды при добыче	-	0.05	0.10
Разубоживание (Au в пустой породе= 0.2 г/т)	%	5.00	10.00
Стоимость добычи руды	\$/т	1.10	1.16
Стоимость переработки	\$/т	4.51	13.30
Извлечение золота	-	0.80	0.88
Стоимость выемки пустых пород	\$/т	0.90	0.92
Накладные расходы	\$/т	3.00	3.00
Количество рабочих дней в году	Дни	350	350
Затраты на продажу металла	\$/т	0.01	0.01
Производительность	Млн.т/год	1.50	2.50

#### Определение допустимых углов откоса бортов карьера

Это один из важнейших этапов подготовки исходных данных для оптимизации. Оценка углов выполняется приблизительно и с некоторым запасом, т.к. нельзя совершенно точно привязать к карьере дороги, бермы и т.п. Однако, если отойти от реальности, то проектный карьер будет сильно отличаться от оптимального, а значит, он уже не будет таковым. Обычная процедура задания этих параметров состоит из:

- изучения геомеханических характеристик горных пород и расчета устойчивой формы и углов наклона бортов карьера;
- исследования вариантов транспортной схемы карьера для разных этапов его развития;
- корректировки полученных ранее бортов с учетом размещения на них трасс внутренних транспортных потоков;
- привязка полученной информации в пространстве и формирование исходных данных в табличной форме, как этого требует оптимизационная программа.

Зная устойчивые расчетные углы откоса для разных участков бортов карьера, необходимо проверить, насколько соответствуют этим параметрам принятые для проектирования углы откоса уступов, число объединяемых уступов, размеры и конструкция предохранительных и транспортных берм. Это делается с помощью простых геометрических построений или расчетов в программе Excel.

Далее необходимо оценить, на каком борту будут размещаться транспортные магистрали и еще раз откорректировать с учетом их ширины и уклона тот или иной участок борта.

Для квалифицированного использования программы оптимизации необходимо располагать следующей информацией:

- координаты, ограничивающие каждый регион, где Вы хотите использовать особые углы откоса борта карьера;
- азимуты направлений и углы откоса борта в каждом направлении.

Для большого карьера со сложной геомеханической ситуацией может быть задано несколько регионов (как правило, по высоте или для отдельных фаз развития), в каждом из которых для многих направлений могут быть установлены особые углы откоса борта, учитывающие характеристики вмещающих пород и конструкцию борта.

В рассматриваемом примере для относительно неглубокого карьера предусмотрены одинаковые углы откоса бортов для окисленных и скальных пород. Размещение съездов, автодорог планируется на западном борту карьера, поэтому он выполнен более пологим.

### **Выполнение расчетов**

Программа оптимизации NPVScheduler (как и пакет Gemcom Whittle) рассчитывает заданное количество «вложенных» оболочек оптимальных карьеров, каждый из которых характеризуется своей величиной рыночных цен на металлы, содержащиеся в руде. Задаются минимальное значение цены и шаг, с которым будет увеличиваться цена. Для каждого шага процесс находит свой оптимальный карьер. Затем по графикам (обычному и кумулятивному) изменения объемов горной массы и руды, а также извлекаемых металлов, потока наличности и NPV эксперт выбирает наиболее соответствующую его представлениям об оптимальном карьере оболочку.

В данном случае рассчитывались 10 оболочек, а выбраны наибольшие контуры карьеров, которые давали максимальные значения экономи-

ческих параметров. Блочные модели этих карьеров были импортированы в систему Datamine для последующего проектирования и подсчета извлекаемых запасов руды. Интерактивное построение карьеров снизу вверх (на этом этапе пока без встраивания съездов) производилось в графическом редакторе системы.

Параметры предполагаемых карьеров:

- Высота уступов – 12 м.
- Угол наклона бортов уступов: карьер окисленных руд -  $70^\circ$ ; карьер сульфидных руд -  $75^\circ$ .
- Ширина бермы безопасности – 5 м.

В процессе предварительного (укрупненного) проектирования карьеров были рассчитаны объемы и качество извлекаемых запасов руды с учетом разубоживания и потерь. Это позволило оценить экономические параметры проекта и выполнить календарное планирование горных работ.

Карьер сульфидных руд был разделен программой на 3 этапа обработки, которые примерно равны по объемам производства, позволяют учесть все горные ограничения и имеют такую последовательность извлечения запасов руды, которая дает максимальный экономический эффект. Примерная продолжительность одного этапа – 5 лет.

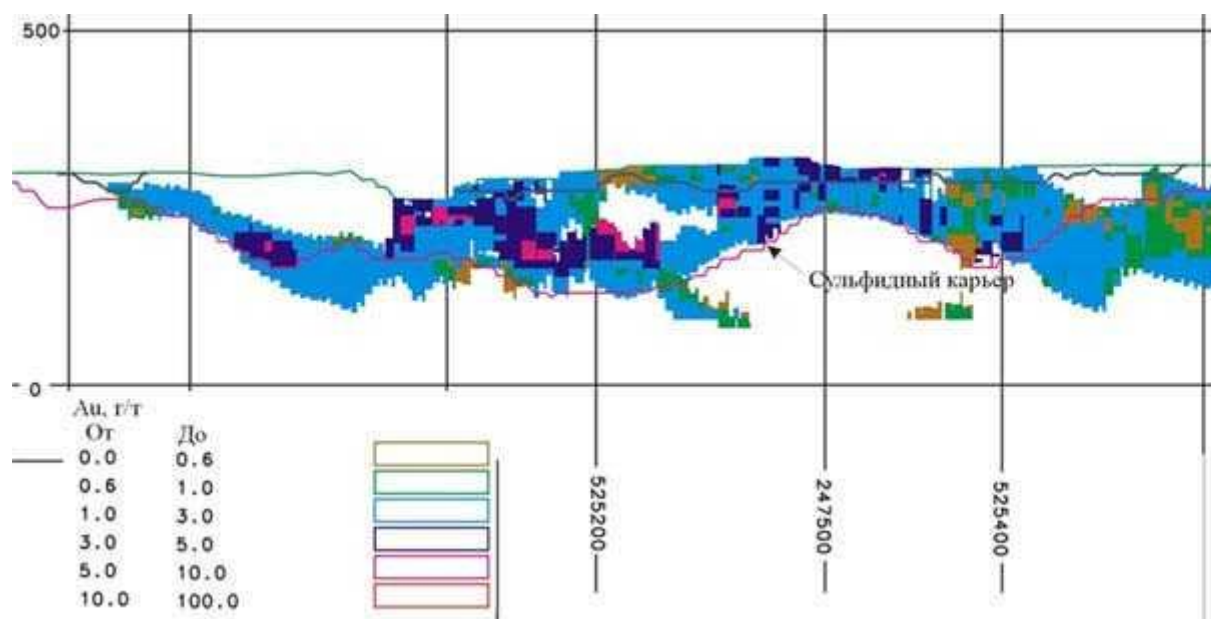


Рис. 6.6. Разрез геологической модели с контурами оптимальных карьеров

Как отмечается в работе [29] при перспективном (стратегическом) планировании не ставится задача точного календарного планирования горных работ в карьере, поэтому в примере приведены результаты предварительных расчетов только для карьера сульфидных руд. В качестве критерия для используемого программой процесса динамического программирования был выбран наиболее простой – минимальное отношение объемов горной массы к объему руды всех типов. В принципе может быть исполь-

зован любой другой критерий, который может быть вычислен из показателей, имеющихся в экономической модели месторождения. Программа рассчитывает наиболее выгодный (по критерию максимума NPV) реальный вариант последовательности отработки месторождения с учетом введенных ограничений.

План был составлен на весь период отработки сульфидного карьера в течение 16 лет. На нижеследующем рисунке показан график изменения основных показателей для этого варианта исходных данных, критериев и ограничений.

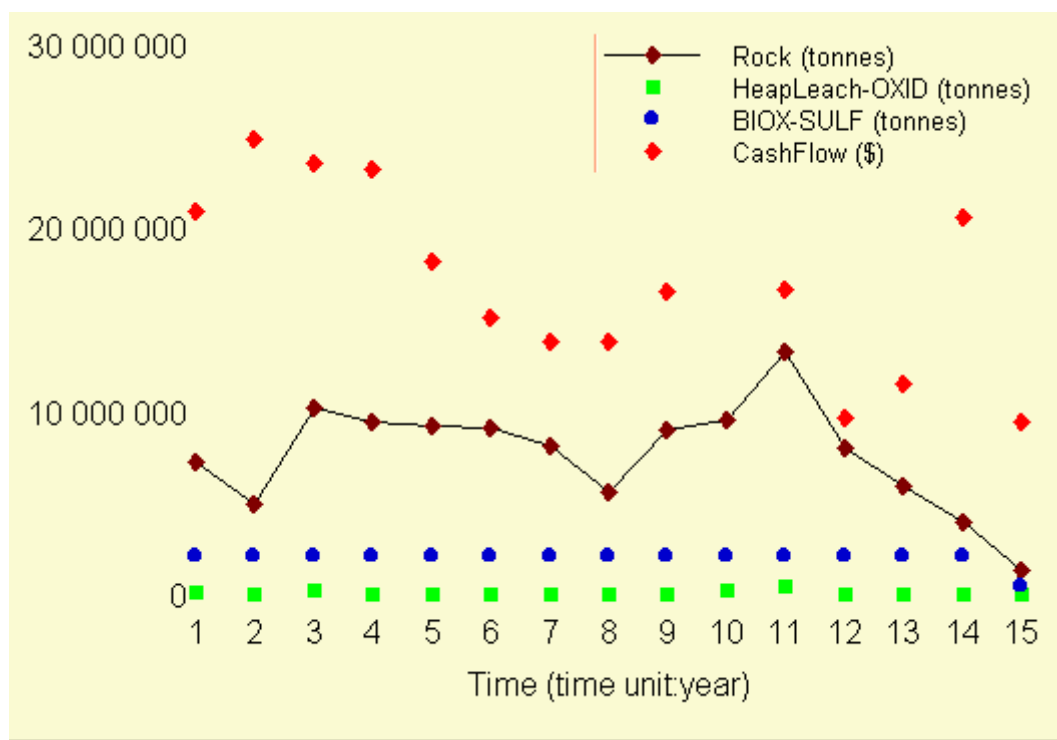


Рис. 6.7. График изменения во времени (по годам) объемов добываемой горной массы, руды и денежной наличности.

### Временные этапы развития карьера

Следующей важной стадией оптимизации карьера является разбиение всего срока его отработки на этапы. Основная разница между фазами (или «вложенными» оболочками) карьера и этапами (pushback) заключается в том, что фаза это условная, а не реальная стадия развития карьера, какой является этап. Фазы создаются без всякого учета горных ограничений, могут размещаться в разных местах месторождения, иметь различные размеры, нереальные границы. Они создаются просто как набор оптимальных карьеров, которые получаются при изменении цен металлов.

В свою очередь, этапы отображают реальную последовательность отработки запасов и следуют всем введенным Вами ограничениям и условиям, например – наилучшему усреднению руды.

Программа NPV Scheduler создает этапы делением (и небольшой последующей корректировкой) оптимальной последовательности извлечения блоков модели месторождения. Она объединяет в этап те блоки после-

довательности, которые близки территориально, позволяют удовлетворить ограничения по доступу горной техники и другие введенные пользователем условия.

Для начала работы надо ввести в программу исходные данные:

- Число этапов: от 1 до 20 (программа может откорректировать это число, если оптимальный карьер не позволяет иметь столько этапов).
- Можно указать на необходимость совмещения последнего этапа с контуром ранее рассчитанного предельного карьера.
- Минимальное расстояние между границами смежных этапов для свободного размещения горной техники.
- Минимальное количество блоков в остатке, допустимое между границей последнего этапа и предельным контуром карьера.
- Указать, если необходимо, чтобы каждый следующий этап полностью включал в свои границы все предыдущие.
- Можно ограничить последний этап одним из блоков оптимальной последовательности их извлечения.

Программа позволяет задать еще целый ряд дополнительных параметров, которые производят более точную настройку процесса. В частности можно контролировать взаимное расположение этапов, их форму и последовательность.

Ниже в качестве примера приведен расчет этапов работы карьера на одном из золоторудных месторождений.

### **Планирование работы карьеров с помощью пакета NPV Scheduler**

Пакет программ NPV Scheduler позволяет решать целый комплекс задач, начиная от оптимизации предельных контуров карьера и кончая оптимизацией системы рудопотоков крупного предприятия или группы производств. Пакет непрерывно развивается, в него включаются все новые задачи, которые решаются современными эффективными математическими методами.

После того, как получены предельные границы карьера и этапы его развития, производится детальное проектирование карьера, т.е. создается его 3-х мерная модель (каркас) на конец каждого этапа отработки. Методология этих операций описана в главе 1.2. Затем эти поверхности снова импортируются в пакет NPV Scheduler, где создается календарный план отработки запасов, выбираются и оптимизируются системы рудопотоков предприятия, а также – его производительность и бортовые содержания основных компонентов.

### **Календарное планирование**

В работе [29] принят за основу тестовый пример «Copper Gold Mine», поставляемый вместе с программой NPV Scheduler. Предварительно на основе экономической модели должен быть создан предельный карьер (или импортирован, например, из системы Датамайн) и разбит на этапы отработки (pushbacks).

Предельный карьер в данном примере содержит около 50 млн т сульфидной руды, что при производительности обогатительной фабрики

(ОФ) 14 тыс т в день обеспечивает ее запасами на 10 лет. Руда в среднем содержит 0.68 г/т золота и 0.28 % меди. Забалансовые руды (имеется 2 сорта таких руд) планируется отправлять на кучное выщелачивание (КВ). Наша цель – обеспечить производительность карьера по горной массе в разумных пределах, поэтому мы вводим ограничение на коэффициент вскрыши, который в данном случае определяется как (Порода+Руда на КВ)/(Руда на ОФ).

В качестве исходных данных для составления оптимального (по NPV) календарного плана будем использовать следующие:

1. Максимальная производительность ОФ – 14 тыс. т в день или 5.11 млн т в год.
2. Максимально допустимая производительность карьера по горной массе – 33.6 тыс т в день (что соответствует коэффициенту вскрыши – 1.4 т/т) при плановой – 29.0 тыс т в день.

Далее следует заполнить все необходимые ячейки установочной таблицы.

3. Установить годовую производительность ОФ. Здесь можно задать только 1 вариант этого параметра.
4. Целевые переменные для оптимизации. Можно выбрать в качестве такой переменной любую из переменных, имеющих в экономической модели. В данном случае мы создаем новую переменную «MiningRatio», которая определяется, как описано выше, т.е.  $\text{MiningRatio} = (\text{Порода} + \text{Руда на КВ}) / (\text{Руда на ОФ})$ . Далее необходимо указать программе, как рассчитать эту переменную. Это делается установкой коэффициентов в нижеследующей таблице.

Таблица 6.3 . Установка коэффициентов для задания целевой переменной

Переменные блочной модели	Коэф. в числителе (Numerator)	Коэф. в знаменателе (Denominator)
Прибыль (Profit)	0	0
Горная масса (Rock )	1	0
Руда на ОФ (SULF1-Mill)	1	1
Руда 1 на КВ (SULF1-Leach)	0	0
SULF2-Leach (Руда 2 на КВ)	0	0
Запасы Au в массиве (AU insitu)	0	0
Запасы Cu в массиве (CU insitu)	0	0
Запасы Au извлеченные (AU recov.)	0	0
Запасы Cu извлеченные (CU recov.)	0	0

Установленная формула выглядит следующим образом:

$$\text{MiningRatio} = (1 * \text{Rock} + (-1) * \text{Mill}) / (1 * \text{Mill}) = (\text{Rock} - \text{Mill}) / \text{Mill}$$

Эта формула соответствует вышеприведенной, поскольку « $Rock=Waste+Mill+Leach1+Leach2$ ». Задав  $Rock=33.6$  и  $Mill=14.0$ , получим  $MiningRatio=1.4$  т/т.

1. Установить значения целевой переменной:

- Номер последнего года (End time ) -  $100^1$
- Плановое значение (Target ) - 1.07
- Минимум (Minimum ) - 0.0
- Максимум (Maximum ) - 1.4

Устанавливая плановое значение = 1.07 т/т, мы диктуем программе, чтобы она выбрала такую (наиболее эффективную по NPV) последовательность отработки запасов, чтобы полностью обеспечить ОФ рудой и при этом выдерживать коэффициент вскрыши возможно ближе к плановой величине. При невозможности достичь такой цели в течение всего периода жизни карьера, этот показатель не может быть выше 1.4 т/т. Таким же образом, можно задать сколько угодно целевых переменных и периоды времени, в течение которых они будут действовать.

Далее надо установить порядок отработки рассчитанных ранее этапов отработки карьера (pushbacks). Конечно, лучшим вариантом по NPV будет последовательная отработка всех этапов, но с практической точки зрения в таких жестких рамках трудно выдержать ограничения по коэффициенту вскрыши, усреднению руд и экологии. Поэтому программа рассчитана на поиск оптимальной стратегии с возможностью одновременной работы в границах 2-х и более этапов.

На этой же стадии можно указать программе, чтобы она создала оптимальную последовательность извлечения запасов, которая затем будет использоваться на следующем этапе оптимизации. Установим для данного примера возможность одновременной работы в пределах границ 3-х смежных этапов. Кроме того, введем:

- "Maximum tree size" (Максимальный размер дерева графа) = 250,000.
- "Number of atoms" (Число узлов) = 5.

Изменять эти параметры, установленные по умолчанию, имеет смысл, если Вы хорошо знакомы с теорией динамического программирования. Остальные исходные параметры оставляются по умолчанию.

После ввода исходных параметров программа начинает работать. Чтобы найти оптимальное решение для установленной целевой функции и ограничений, программа делит модель месторождения на элементарные объемы, называемые атомами и строит дерево (граф) возможных решений. Узлы этого графа иллюстрируют положение горных работ в данный мо-

---

<sup>1</sup> В примере задан заведомо больший срок действия данных ограничений. Программа будет распространять их на весь срок отработки запасов. Однако при необходимости можно задать любой период или несколько, в каждом из которых будут действовать свои целевые переменные и ограничения.

мент времени, а дуги соответствуют атомам. Информация, полученная из первого дерева, используется для построения второго, где дуги связаны с временем больше чем атомы. Этот граф включает все решения, которые удовлетворяют поставленным условиям оптимизации. Если решений не существует, а такое случается достаточно часто, то ограничения несколько ослабляются. Оптимальный план рассчитывается методом динамического программирования.

После окончания работы программа (если решение найдено) создает таблицу календарного плана, в которой для каждого года (отдельно и в нарастающем итоге) приведены все показатели движения объемов горной массы и каждого сорта руды.

Если решение не существует, попробуйте увеличить максимальное значение целевой функции. В данном примере решение было найдено, и оценка NPV для него составила 132.5 млн долларов.

На следующем рисунке приведен график ежегодных объемов пустых пород и руды на ОФ, включенных в оптимальный календарный план.

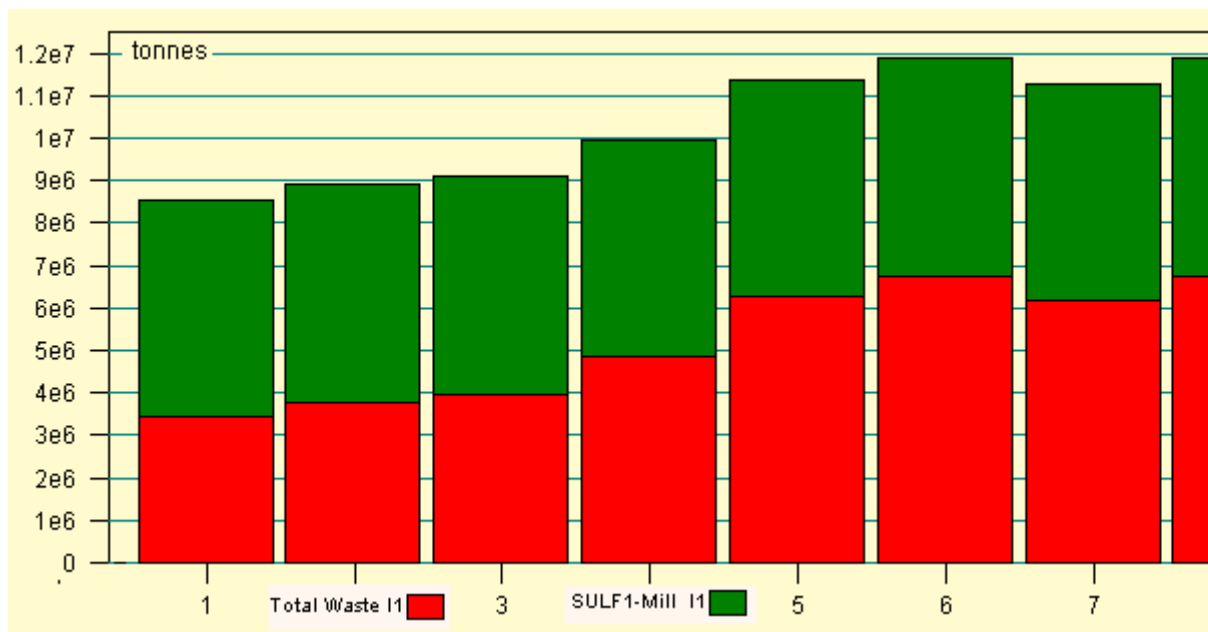


Рис. 6.8. График изменения объемов горной массы по годам работы карьера.

Если параметры плана не удовлетворяют оператора, то, задав новые исходные данные, его легко пересчитать. В результате, кроме таблицы, программа рассчитывает также новую модель карьера, в которой для каждого блока вписаны номера его начального и конечного годов отработки.

Программа создает несколько альтернативных планов:

- вариант с максимумом NPV без учета целевых переменных.
- лучшие варианты для каждой целевой переменной.

Если имеется несколько решений, удовлетворяющих всем необходимым требованиям, то на выходе можно получить набор практически идентичных планов.



Совмещенная поверхность карьера в конце каждого этапа отработки отображается в окне визуализера. Там же можно просмотреть и отдельные разрезы.

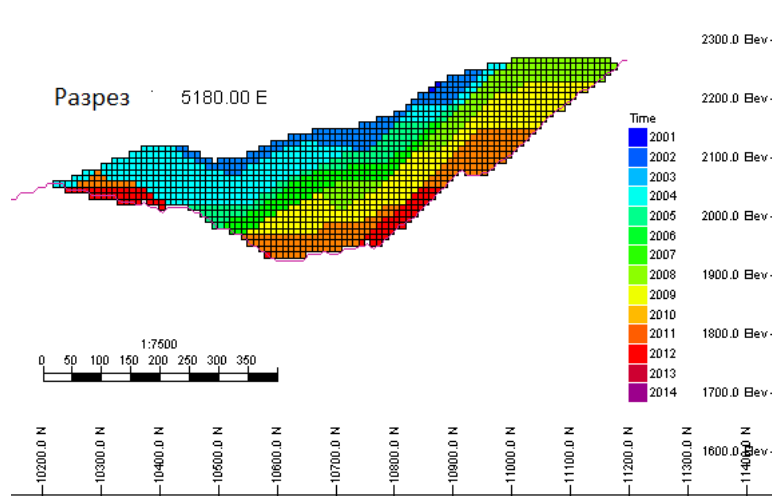


Рис. 6.9. Вертикальный разрез оптимального карьера с выделением цветом границ отработки по годам.

Прогнозируемый окончательный вид оптимальной поверхности карьера на конечной стадии отработки через 16 лет ведения горных работ представлен на Рис. 6.10.

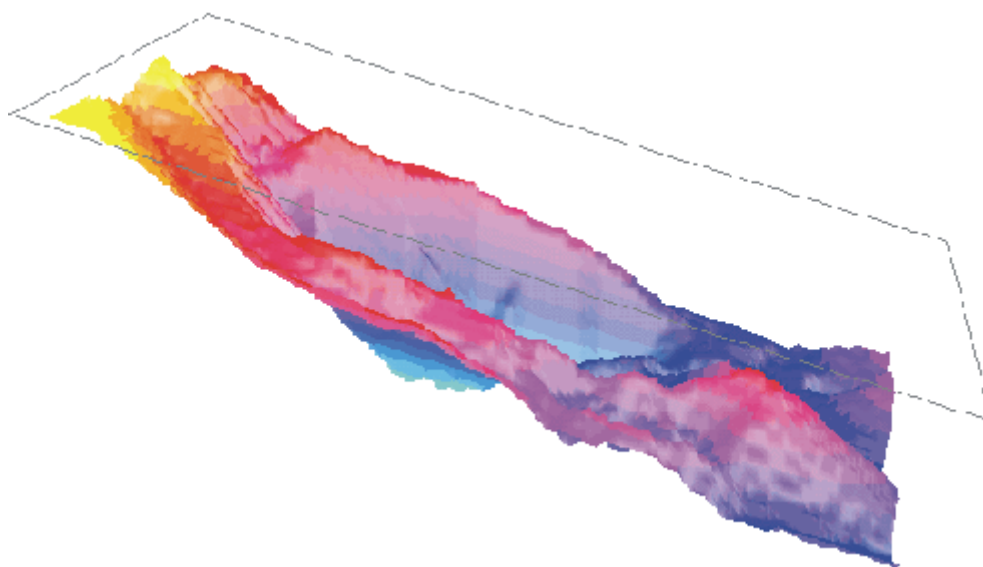


Рис. 6.10. Вид поверхности контура карьера на конечной стадии отработки

Следует подчеркнуть, что период планирования может быть каким угодно: недели, месяцы, кварталы и т.д. Но выполняя очень детальные расчеты надо учитывать размер блоков используемой экономической модели. Если он очень большой, то трудно гибко управлять запасами в небольших объемах, т.к. каждая ячейка модели имеет одинаковое качество и экономическую оценку. Для краткосрочного планирования следует работать на специально созданной модели с небольшим размером основного блока.

**Оптимизация работы с рудными складами в NPV Scheduler**

В монографии [29] рассматривается базовый пример проекта «Copper Gold Mine», который реализует оптимальные последовательности извлечения блоков модели с учетом складирования руды. Данный модуль оптимизирует распределение этих рудопотоков по вариантам переработки и имеющимся складам. В этом случае программа использует метод линейного программирования (ЛП). Оценки прибыли и NPV делаются на основе геологической модели и модернизированных экономических параметров в соответствии со временем реальной переработки и продажи произведенной продукции. Модуль учета складов работает совместно с модулем оптимизации календарного плана, чтобы увеличить эффективность горного проекта. В процессе работы программа рассматривает последовательно каждый период времени (временные единицы – те же, что и в календарном планировании), начиная от первого и заканчивая последним. В каждом периоде программа определяет и рассчитывает:

- текущие экономические условия,
- бортовые содержания (при этом материал, который в геологической модели был рудой, в процессе этих расчетов может становиться породой и наоборот),
- все входы материала: из карьера, складов, внешних источников.

Далее с помощью симплексного метода она находит оптимальное (по прибыли и NPV) распределение полученной руды по возможным направлениям использования: ОФ, КВ, рудные и породные склады. В некоторых случаях руда с содержанием выше экономического бортового может быть направлена в отвал, если имеющиеся мощности переработки и складирования уже полностью использованы.

Полученный из предыдущего модуля календарный план соответствует производительности ОФ – 14.0 тыс т в день и производительности карьера по горной массе – 33.6 тыс т в день. При этом формируется различный во времени (и по объему) рудопоток на установку КВ. Руда перед укладкой требует дробления. Производительность дробильной установки 2.2 тыс т в день. Часть добываемой руды (для КВ), которая не сможет быть сразу измельчена, будет временно складироваться на рудном складе SULF2. На реальных предприятиях таких складов может быть несколько.

Установка параметров склада начинается с ввода нормы дисконтирования (в нашем примере – 10%) и производительности карьера по капитальной вскрыше (5 млн. т/год). Далее можно внести корректировки в прогнозируемые параметры:

- Цены металлов.
- Себестоимость добычи и переработки руды.
- Норма дисконтирования.

Все планируемые изменения вносятся в нужные периоды планирования (в нашем примере – годы) с помощью коэффициентов. В данном примере эти параметры не будут изменяться во времени, т.е. все множители равны 1.0.

Теперь следует задать условные названия складов. Введем – S2. Выберем для складирования только тип руды SULF2. Далее устанавливаются вместимость склада (10 млн т), затраты на перелопачивание руды (0.1 \$/т) и производительность отгрузки руды со склада (803.0 тыс т/год). Здесь же Вы можете изменять во времени производительность склада и извлечение металлов, содержащихся в руде.

Теперь задаются бортовые содержания (для всех компонентов), выше которых руда будет поставляться на переработку. Необходимо установить также начальное состояние склада перед планированием (в данном случае – 0.0 т с содержание 0.0).

Далее задаются параметры производительности ОФ (5.11 млн т/год) и КВ (0.803 млн т/год), куда в принципе может поставляться руда со склада. В нашем примере эти цифры не будут изменяться во времени. Здесь же можно ввести пределы содержаний компонентов в поставляемой на переработку руде и требуемые объемы выхода металлов после переработки в единицу времени.

Если Вы используете комплексные показатели качества, то они будут высвечиваться в соответствующей таблице ниже перечисленных единичных показателей (содержаний). Минимальные и максимальные значения для них задаются так же как и для содержаний. Например, если надо установить для какого-то показателя значение, равное 0, то можно записать: минимум= -0.0001, а максимум= 0.0001.

В отдельной таблице устанавливаются контролируемые параметры усреднения руды. Этим способом определяется доля определенного типа руды в каком-то процессе. Если задано более одного типа, то установленное ограничение будет относиться к их суммарному тоннажу.

При нажатии кнопки Add или Edit будет открыто окно для ввода параметров. Для максимального удобства параметры усреднения задаются в виде отношения A/B:

$$A = v1 + v2 + \dots$$

$$B = u1 + u2 + \dots$$

где  $v1, v2, \dots$  комбинации типа руды и метода переработки,  
 $u1, u2, \dots$  методы переработки

Например, если есть 3 типа руд: R1, R2, R3 и 2 метода их переработки: M1 и M2, то в этом случае мы получим 6 переменных типа  $v$  (R1-M1, R2-M1, R3-M1, R1-M2, R2-M2, R3-M2) и 2 переменных типа  $u$  (M1, M2). Таким образом, функция A может быть равна сумме одной, двух...и шести переменных, а функция B может быть равна M1, M2 или M1+M2.

Следующая установка связана с выбором критерия оптимизации. Поскольку мы выполняли оптимизацию календарного плана по критериям MiningRatio и NPV, то здесь мы также устанавливаем эти показатели. В данном примере выберем опцию «Произвести оптимизацию для заданной производительности карьера»

Далее можно разделить типы руды по классам содержаний. Для оптимизации складов с заданной производительностью карьера это делать

необязательно, но часто бывает полезным, т.к. позволяет программе увеличивать NPV, смешивая разные сорта добываемой руды. В следующем разделе мы покажем, как используется эта опция.

При выборе меди в качестве главного компонента в руде, программа рассчитывает условное содержание меди по формуле:

$$\text{Условная медь} = \text{Cu} + (\text{Cu борт} / \text{Au борт}) * \text{Au}$$

Установки включают также максимальные бортовые содержания для двух типов руды и число классов содержаний.

Таблица 6.4. Параметры содержания условной меди

Тип руды	Максим. борт	Число классов
SULF1	CENTER>1,0	20
SULF	1,0	20

Классы содержаний для каждого типа руды определяются самым высоким бортовым содержанием и числом классов. Например, предположим, что самый высокое бортовое содержание равно 10 г/т, количество классов – 11, а минимальное экономически рентабельное бортовое содержание – 0.4 г/т. Тогда верхний класс руды будет включать руду с содержаниями выше 10 г/т, второй класс 9-10 г/т, третий 8-9 г/т и т.д. Последний класс будет включать интервал 0.4-1 г/т. Для каждого типа руды можно задать необходимое количество классов содержаний. Если требуется для каких-то технологических сортов определить классы, то следует определить максимальное бортовое содержание = 0, а число классов = 1.

После запуска программы оптимизации на выходе получается итоговая картина рудопотоков карьера с учетом прохождения руды через склады по годам:

- объемов поставки руды на склад;
- отгрузки руды со склада на КВ;
- объемов руды на складе.

В формируемой программой NPV Scheduler таблице содержаться подробнейшие характеристики всех рудопотоков карьера для каждого планового периода, а также экономические оценки принятой стратегии. В нашем примере суммарная величина NPV составила 132.56 млн долларов.

Следует отметить, что программа позволяет учитывать в системе рудопотоков руду (или другие компоненты), поставляемую из посторонних источников (например, из подземного рудника, входящего в состав горного предприятия). В этом случае необходимо указать дополнительно:

- Количество поставляемой извне руды во времени.
- Цена единицы руды.
- Содержание в руде всех важных компонентов.

### 3.3. Оптимизация бортовых содержаний и производительности рудника

Следующий шаг при работе с пакетом NPV Scheduler – оптимизация бортовых содержаний или производительности карьера, что в принципе одно и то же.

Этот процесс будет рассчитывать оптимальные борта (которые должны быть выше, чем экономические) с целью улучшения параметра NPV. При заданной производительности стадий переработки руды повышение производительности карьера приводит к возрастанию борта ОФ, а вся оставшаяся не переработанной руда будет временно складироваться или вывозиться в отвал.

Решающее значение в процессе оптимизации бортового содержания играет самый важный тип руды и выбранный процесс его переработки. Учитывая тесную связь бортового содержания и производительности карьера по горной массе, проблема может быть также сформулирована, как оптимизация производительности карьера или его рудопотоков. Такая формулировка более подходит для данного случая, т.к. здесь одновременно оптимизируются множество бортовых содержаний, связанных с разными типами руды и различными процессами их переработки.

Решение задачи оптимизации рудопотоков карьера предполагает определение их производительности для каждого из этапов жизни карьера, применения разных методов переработки с учетом всех ограничений, усреднения и т.д., что позволяет максимизировать NPV. Задача оптимизации бортовых содержаний решается автоматически при оптимизации производительности рудопотоков.

Процесс использует метод динамического программирования и позволяет в ряде случаев существенно повысить эффективность составления календарного плана и графика управления рудными складами. По сути дела – это оптимизация складов, в которой дополнительно рассчитываются наилучшие значения бортовых содержаний для каждого процесса переработки руды. При этом оптимальная последовательность извлечения блоков модели, полученная в ходе работы программы календарного планирования, остается неизменной. Вариации касаются лишь скорости извлечения запасов руды.

При дальнейшем рассмотрении того же пример добавляется второй склад с большей ёмкостью хранения руды SULF1. Так как производительности ОФ и КВ остаются прежними, то появление нового склада большей ёмкости позволяет варьировать производительность карьера и изменять бортовое содержание с целью достижения максимума NPV. Программа оптимизации бортового содержания основана на алгоритме Lane. В новом проекте сохраняются предыдущие установки, использованные для оптимизации работы складов. Задаются параметры нового дополнительного склада: тип руды - SULF1; ёмкость (capacity) – 25 млн т; затраты на перегрузку (rehandling cost) – 0.1\$/т. Возможности по переработке руды остаются неизменными: производительность (basic rate) – 5.11 млн т/год, КВ – 0.803 млн т/год.

Далее устанавливается число возможных оценок производительности карьера (по горной массе) за единицу времени, т.е. максимальное число различных значений этого параметра, используемых в оптимизации для любого момента времени и любого состояния добычных работ в это время. Это число должно находиться в интервале 10-500 (по умолчанию –100). В данном примере используется – 80.

Аналогичный параметр задается для числа оценок NPV в процессе оптимизации, например, равный 100. Здесь же можно задать предельную производительность карьера по горной массе и изменения этого параметра во времени. Для сокращения времени работы программы рекомендуется вводить хотя бы одно значение максимальной производительности, взяв, например, значение 20 млн т/год для всего срока жизни карьера. Для выбора режима оптимизации рудопотоков надо отметить в установочной таблице опцию "Optimize mining rates and cutoff grades".

После окончания работы программы как и в предыдущем расчете на выходе получается таблица со всеми параметрами каждого рудопотока (включая рекомендуемый борт для каждого процесса), а также – набор всевозможных графиков для иллюстрации результатов вычислений. На рис. 1.15. показан график оптимальных бортов по годам работы карьера для руды, поставляемой на ОФ и КВ.

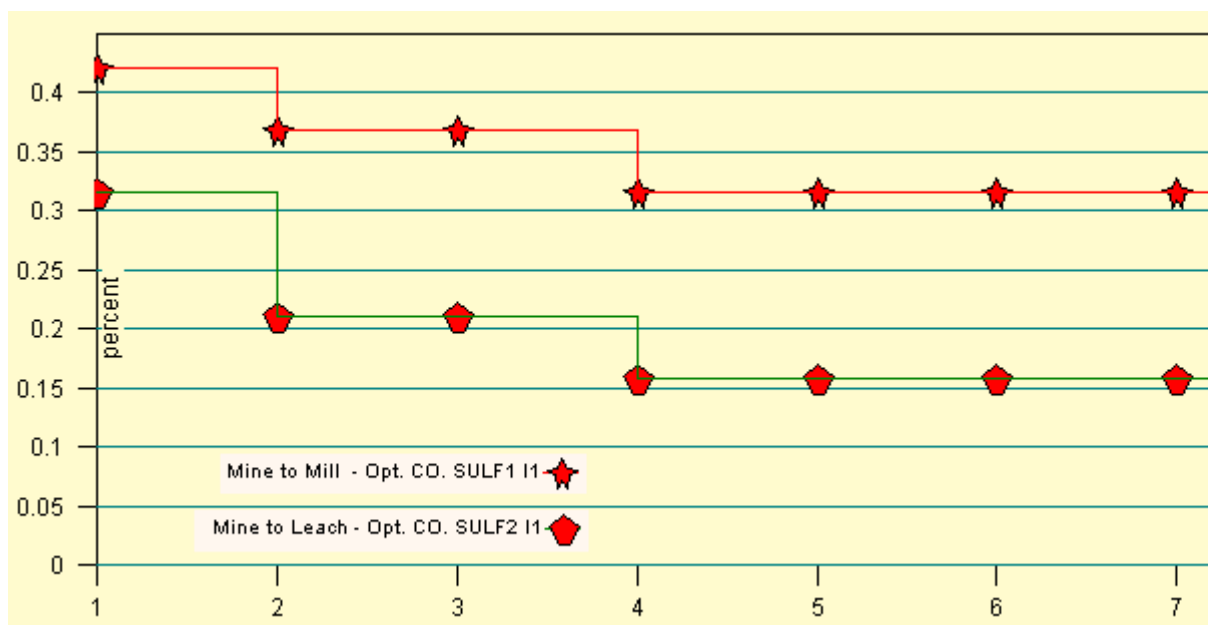


Рис. 6.11. Результаты оптимизации бортовых содержаний условной меди для рудопотоков на ОФ и КВ.

Отмечается, что в результате дополнительной оптимизации производительности рудопотоков получена величина NPV = 136.5 млн долларов, что на 4 млн больше, чем в предыдущем расчете.

Пакет программ NPV Scheduler – мощный набор инструментов, дающий в руки грамотного пользователя массу возможностей для получения действительно оптимального проекта или плана. Но для того, чтобы хорошо «играть» на этом инструменте надо знать, что он делает, где он

может ошибиться, а что вообще не умеет делать. Поэтому специалист должен иметь понятия о целом ряде дисциплин: экономике, горном деле, геологии и технологии.

Пакет может использоваться для разных стадий планирования горных работ, поэтому каждый раз надо оценивать, подходит ли Ваша блочная модель для той или иной стадии. Первичная геологическая модель (на основе детальной разведки) будет идеально соответствовать календарному плану по годам отработки, создаваемому на стадии проектирования. Для месячного и недельно-суточного планирования больше подойдет модель с небольшими блоками по данным эксплоразведки.

В некоторых случаях можно использовать этот пакет и для подземных рудников, представляя, например, очистные забои в виде рудных складов.

Применяя эти программы всегда следует иметь в виду, что в них специально не вводятся капитальные затраты (это не предусмотрено используемыми теоретическими основами применяемых алгоритмов), поэтому, если это необходимо, их всегда можно ввести, как составляющие затраты по другим «легальным» статьям.

Если требуется, то можно вводить в программу реальные этапы отработки карьера (в виде поверхностей) и далее, минуя стадии оптимизации конечных контуров карьера и создания этапов, сразу переходить к календарному планированию и оптимизации рудопотоков.

Критерий оптимизации карьеров по величине дохода (profit - устанавливается при создании экономической модели) используется редко. Полученный, таким образом, карьер нельзя в будущем использовать для календарного планирования, т.к. там нужны производственные затраты.

Пакет непрерывно совершенствуется и развивается. Уже появилась программа, позволяющая оптимизировать рудопотоки, поступающие от нескольких горных предприятий, у каждого из которых имеется своя модель месторождения со своим прототипом и т.д.

### **Оптимизатор карьеров в НГИС MineFrame**

Разработанная в Горном институте Кольского научного центра РАН (г.Апатиты) интегрированная геолого-маркшейдерская система моделирования месторождений и планирования горных работ *Framework*, включает в себя оптимизатор границ карьеров.

Как отмечают в работе [46] разработчики программы Майнфрейм метод Лерчса-Гроссмана имеет ряд недостатков, в том числе, не всегда приемлемые затраты времени на оптимизацию. Поэтому в рамках создания системы MineFrame был разработан модуль оптимизации, получивший название OptiKor .

обладает приемлемыми временными характеристиками расчета и предоставляет пользователю удобный механизм управления углами откосов бортов карьеров [24i]. За основу был взят предложенный С.Д. Коробо-

вым метод распределенных оценок в модификации, предложенной Р.А. Dowd и А.Н. Onur.

Процедуру нахождения границ оптимального карьера в программе MineFrame разделяют на три основных части:

- построение обратного конуса, для каждого блока модели с положительным весом;
- оптимизация на основе алгоритма Коробова;
- добавление блоков, входящих в обратный конус к оптимальному карьере.

В процессе поиска границ оптимального карьера важно учитывать переменные углы наклона борта, на которые влияют два фактора: физическо-механические свойства горных пород и особенности их залегания, используемые технологии добычи и транспортирования.

У каждого блока модели угол откоса зависит от направления (азимута), в котором он размещается. Вся область блочной модели разбивается на субрегионы. Субрегион представляет собой прямоугольный параллелепипед. Для каждого из них задается список углов наклонов борта и соответствующих им азимутов, исходя из вышеупомянутых факторов. Блоки модели, которые лежат внутри некоторого субрегиона, будут добываться под углами, определенными для этого субрегиона. Для снижения времени, затрачиваемого на получение конуса для каждого субрегиона, строится конус, который будет являться шаблоном для данного субрегиона и по контуру которого будут построены все другие необходимые конуса в данном субрегионе.

В связи с тем, что пользователь определяет углы наклона лишь по нескольким направлениям, возникает задача восполнения недостающей информации об углах откоса в промежуточных секторах. В рамках OptiKor она была решена за счет ведения дополнительных по сравнению с Whittle Three-D интерполирующих функций: синусоида и эллипс.

На Рис. 6.12 представлены два варианта оптимизированных с помощью системы MineFrame границ карьеров.

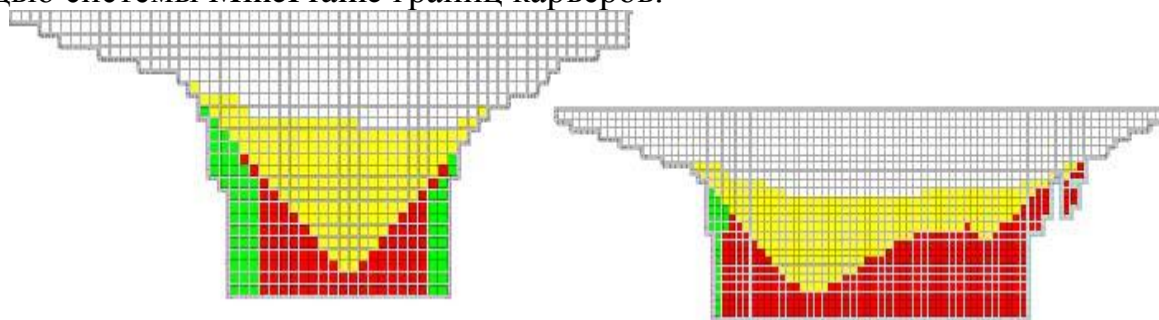


Рис. 6.12. Модели границ карьера: а) текущий и  
в) предельный на завершение отработки

С помощью инструментов оптимизатора границ карьеров MineFrame может быть осуществлен горно-геометрический анализ сложных карьерных полей и определен экономически наиболее выгодный вариант развития горных работ.



## **Выводы**

Ведущие интегрированные системы по своей функциональности во многом аналогичны друг другу и отличаются, главным образом, интерфейсной частью и особенностями взаимодействия с пользователем. В них используются оригинальные или распространенные форматы данных, развитые средства управления базами данных, имеются расширенные графические возможности редактирования карт и 3D моделей, организованы импорт и экспорт стандартных форматов хранения пространственных данных для геодезии, картографии, геологии, горного дела и CAD/CAM систем. В настоящее время из зарубежных систем наиболее полно локализованную версию для русскоязычных специалистов в области недропользования и решения горно-геологических задач имеет система Micromine. Она имеет модульную структуру и используется как в горно-геологической практике, так и для обучения компьютерной методике моделирования месторождений полезных ископаемых.

## **6.5. Применение ГИС в геоэкологии**

В связи с быстрым развитием информационных технологий применение ГИС в геоэкологии в последние годы становится повсеместным. Все больше появляется работ разного уровня (федерального, регионального, локального), посвященных опыту применения ГИС. Коротко остановимся на некоторых проектах, основанных на применении ГИС.

Региональная ГИС «Недропользование» Алтайского края. Главными задачами системы являются создание и ведение картографической и описательной базы данных распределенного и нераспределенного фонда недр, обслуживание типовых запросов на получение информации по выбранным объектам, а также запросов на создание тематических карт, отражающих текущее состояние фонда недр. Цель создания системы – повышение эффективности управления региональным фондом недр на базе актуальной информации об имеющихся запасах полезных ископаемых и текущем распределении фонда недр.

ГИС «Недропользование» предназначена для ведения учета месторождений и проявлений, учета лицензий, выданных на пользование недрами, а также учета всех недропользователей, ведущих разработку или разработку полезных ископаемых на территории края.

ГИС «Недропользование» состоит из следующих подсистем.

- Подсистема ведения картографической и описательной базы данных, в функции которой входит:
  - ведение картографической базы данных месторождений и лицензионных участков;
  - ведение паспортов месторождений и проявлений;
  - ведение базы лицензий и недропользователей.

- Подсистема обслуживания пространственно-логических информационных запросов, в функции которой входит:

- выдача справок по указанному на карте или выбранному в списке территориальному объекту (месторождению, лицензионному участку);

- определение местоположения на карте географических объектов, входящих в топографические и тематические слои картографической базы;

- ведение БД месторождений, проявлений, лицензионных участков, горнодобывающих и перерабатывающих предприятий.

- Подсистема подготовки и создания тематических карт распределения фонда недр для печати.

- Подсистема генерации отчетов.

- Подсистема ведения картографической и описательной баз данных.

ГИС «Недропользование» разработана на цифровой картографической основе Алтайского края масштаба 1:500 000. В соответствии с требованиями к формированию карты распределенного и нераспределенного фонда недр, картографическая база данных Алтайского края включает следующие топографические слои: административное деление; населенные пункты; гидрография; пути сообщения; рельеф.

Кроме того, картографическая база данных недропользования содержит такие тематические слои: горные отводы месторождений и лицензионных участков; рудные районы; особо охраняемые территории; горнодобывающие и перерабатывающие предприятия.

Все объекты картографических слоев представляются одним из трех графических типов: точечный объект, линейный объект и полигональный объект. Подсистема ведения баз позволяет пользователю наполнять и корректировать тематические картографические слои и описательную информацию, связанную с графическими объектами, входящими в эти слои.

Для ведения картографической базы подсистема предусматривает три способа создания графических объектов:

- ввод объектов через текстовые файлы их координат;
- ввод объектов с растровых подложек с последующим преобразованием их координат в систему координат цифровой топоосновы Алтайского края;
- ввод и корректировку объектов с экрана непосредственно в системе координат цифровой топоосновы Алтайского края.

Пользователю предоставляется возможность вести несколько отдельных картографических баз, что, в частности, временно решает проблему ввода и корректировки данных в территориально распределенной системе без сервера пространственной информации. Предусмотрены средства слияния нескольких баз в одну.

Ведение описательной базы разбивается на два основных блока:

- ведение паспортов месторождений и проявлений;
- ведение информации по лицензиям.

Паспорт месторождений и проявлений включает их основные характеристики: учетные данные, степень освоения, категорию крупности, запасы по каждому виду основных и сопутствующих полезных ископаемых, данные о местоположении.

База лицензий содержит основные сведения о лицензиях и недропользователях. Подсистема обслуживания пространственно-логических информационных запросов позволяет получать информацию по различным географическим объектам, а также производить пространственно-логический поиск географических объектов, входящих как в топографические, так и в тематические слои.

ГИС «Недропользование» реализована как расширение пакета ARCVIEW GIS. Интерфейс и все функции системы написаны на языке Avenue. Модуль генерации стандартных отчетов реализуется в среде MS Access (в настоящее время он находится в стадии разработки).

ГИС «Росводресурсы». Важнейшая функция Федерального агентства водных ресурсов – управление водными ресурсами страны. Для достижения эффективности такого управления необходима информация об управляемых объектах (т.е. собственно о водных ресурсах и водопользователях). Так как управление реализуется на различных уровнях: федеральном, бассейновом, территориальном, местном, объектовом, то и соответствующее информационное обеспечение должно быть построено по иерархическому принципу с разной степенью детализации и обобщения информации.

Особенностью рассматриваемых водных, водохозяйственных и других объектов (реки, озера, каналы, водохранилища, гидротехнические сооружения) является их существенная протяженность и распределенность по всей территории России и сопредельных государств. Причем наличие информации о точном местоположении объектов, их взаимном расположении и взаимосвязи существенно влияет на качество управленческих решений, принимаемых и реализуемых на различных уровнях.

В связи с этим при выборе подходов к созданию современного информационного обеспечения предприятий, учреждений и органов Федерального агентства водных ресурсов всех уровней необходимо ориентироваться на геоинформационные технологии.

Цель создания ГИС «Росводресурсы» – обеспечение руководства агентства и его структурных подразделений полной, достоверной и оперативной пространственной информацией (справочной и аналитической) с целью информационной поддержки принятия стратегических и оперативных решений по управлению водными ресурсами на территории РФ за счет автоматизации обработки картографических данных на основе современных ГИС-технологий, систем обработки космических данных и GPS-технологий.

### Основные задачи ГИС «Росводресурсы»:

- ввод, систематизация, хранение, обеспечение актуальности и достоверности картографической, атрибутивной, графической и текстовой информации о водных объектах;
- обеспечение пользователям возможности формирования запросов, поиск, извлечение информации из баз данных (атрибутивных, картографических, текстовых, графических), предоставление пользователям информации, релевантной запросам, в виде, удобном для содержательного анализа;
- создание информационной базы для решения информационно-аналитических задач (например, построение карт загрязненности водных объектов; зонирование территории по показателям количества и качества водных ресурсов, риска вредного воздействия вод; контроль прохождения паводков и др.).

В составе корпоративной информационной системы Федерального агентства водных ресурсов ГИС Росводресурсы строится как трехуровневая система с уровнями – федеральным, бассейновым и территориальным.

Информационные потоки системы связаны с основными функциональными обязанностями и классами задач, решаемых Федеральным агентством.

При создании ГИС разработчики ориентировались на то, что значительная часть информационных ресурсов, прежде всего атрибутивных, уже имеется – это государственный водный кадастр, государственный регистр гидротехнических сооружений и др. и задача ГИС, прежде всего, выполнить интеграцию пространственных и существующих атрибутивных данных. В работе используются традиционные технологии для создания стабильной, корпоративной информационной системы, состоящей из нескольких крупных блоков.

Разработаны концепция системы, технические задания. Вся работа ведется в соответствии с этими документами. Приобретено лицензионное программное обеспечение фирмы ESRI. Созданы базы пространственной информации, которые могут работать как под управлением SDE, так и для работы с ArcIMS.

Из анализа информационных потребностей сотрудников Центрального аппарата Росводресурсы было определено, что база геоданных (БГД) ГИС «Росводресурсы» должна содержать картографическую, атрибутивную, текстовую и графическую информацию, архивы космических снимков. Взаимодействие между БГД ГИС и базами данных других автоматизированных систем, внедренных в Росводресурсы, осуществляется через интерфейс обмена данными.

Картографическая составляющая БГД должна содержать следующую векторную информацию различных масштабов:

- карту масштабов от 1:10 000 000 до 1:2 500 000, включающую все общегеографические и специализированные объекты территории Российской

ской Федерации и сопредельных государств для работы Росводресурсов на федеральном уровне;

- карту масштабов от 1:1 000 000 до 1:200 000, включающую все общегеографические и специализированные объекты для работы подразделений Росводресурсов на бассейновом и территориальном уровнях;
- карту масштаба менее 1:200 000, включающую все общегеографические и специализированные объекты для работы Росводресурсов на территориальном уровне;
- карты масштабов от 1:50 000 до 1:1 000 для специализированных объектов (гидротехнические сооружения, населенные пункты, предприятия и др.).

При этом общегеографические слои содержат: федеральные округа, хозяйственные районы, территориальное деление (субъекты РФ), районы административного деления субъектов РФ, населенные пункты, отметки высот, изолинии, растительность, автомобильные дороги, сооружения при автодорогах, железные дороги, сооружения при железных дорогах, грунты, хозяйственные строения, трубопроводные магистрали (газопроводы, продуктопроводы, нефтепродуктопроводы), станции и пункты связи, линии связи и ЛЭП.

Картографическая информация о водных объектах включает: моря, озера, пруды, реки, водохранилища, бассейны морей, бассейны рек, посты гидрологического и гидрохимического контроля, бассейны подземных вод, пристани, колодцы, маяки, болота, ледники, дополнительную гидрографию (ключи, родники, гейзеры, источники), изобаты.

Слои, имеющие отношение к гидротехническим сооружениям, содержат: гидротехническое сооружение, сведения об авариях, органы госнадзора, зоны ответственности органов госнадзора.

Группа слоев окружающей среды (по отношению к водным объектам) содержит информацию о водопользователях, объектах капитального ремонта, строящихся объектах. Слой по охраняемым территориям включает: земли водного фонда, водоохранные зоны, прибрежные полосы. Слой административно-территориальных органов управления водными ресурсами содержит информацию о бассейновых управлениях и зонах их ответственности, территориальных органах и зоны их ответственности.

В состав системы включены также некоторые специальные слои, такие, как места аварий. Атрибутивная информация должна содержать сведения об общегеографических и специализированных объектах, важных с точки зрения оперативного и стратегического управления водными ресурсами.

Графическая информация содержит растровые файлы в следующем составе: электронные копии карт, электронный архив всех документов Росводресурсов, авиационные и космические снимки, информация, важная с точки зрения оперативного и стратегического управления водными ресурсами.

Текстовая информация содержит описательные сведения об объектах базы данных. На этапе разработки технического задания на ГИС «Росвод-ресурсы» были выработаны: перечень информации, входящей в состав БГД; иерархия информации в БГД по масштабам; взаимосвязь организационной структуры и функциональных задач с информацией в составе БГД. Была построена информационная модель базы геоданных. Затем БГД была наполнена картографической информацией масштабов 1:8 000 000, 1:4 000 000, 1:2 500 000 и 1:1 000 000.

Помимо перечисленных выше задач, система обеспечивает информационную поддержку стратегических решений и позволяет выполнять:

- анализ эффективности расходования бюджетных средств и мероприятий, направленных на снижение риска вредного воздействия вод;
- создание тематических подборок картографических материалов для информационной поддержки стратегического управления водными ресурсами;
- оптимизацию размещения распределенных объектов (дамб, плотин, сети пунктов наблюдений, эксплуатационных служб, инженерных сетей и др.);
- моделирование и прогнозирование последствий аварий (при разрушении гидротехнических сооружений, при крушениях танкеров, разгерметизации трубопроводов и др.);
- моделирование зон затопления и подтопления при строительстве гидротехнических сооружений и в паводковых ситуациях;
- подготовку в установленном порядке противопаводковых мероприятий, мероприятий по проектированию и установлению водоохранных зон водных объектов и их прибрежных защитных полос, а также мероприятий по предотвращению и ликвидации вредного воздействия вод;
- проведение в установленном порядке государственной экспертизы схем комплексного использования и охраны водных ресурсов, а также предпроектной и проектной документации на строительство и реконструкцию хозяйственных и других объектов, влияющих на состояние водных объектов;
- определение объемов экологических допусков и безвозвратного изъятия поверхностных вод для каждого водного объекта;
- разработку перспективных планов эксплуатации водохранилищ и водохозяйственных систем комплексного назначения;
- разработку перспективных планов эксплуатации защитных и других гидротехнических сооружений, находящихся в ведении агентства;
- обеспечение в пределах компетенции агентства мероприятий по рациональному использованию водных объектов;
- контроль паводковых ситуаций и осуществление оперативных мероприятий по снижению их негативных последствий;

- эксплуатацию защитных и других гидротехнических сооружений;
- эксплуатацию водохранилищ и водохозяйственных систем комплексного назначения;
- мониторинг и контроль над распределением и расходованием бюджетных средств;
- оптимизацию маршрутов (передвижения по речной сети; перераспределения водных ресурсов по сети водотоков; проезда аварийных бригад к месту аварии и др.);
- моделирование распространения опасных загрязнений (например, нефти и нефтепродуктов) в водных объектах и при угрозе попадания в водные объекты;
- установление режимов специальных допусков, наполнения и работы водохранилищ, пропуска паводков на водных объектах, находящихся в федеральной собственности;
- обследование технического состояния, инвентаризацию и декларирование безопасности [1i].

#### ГИС природно-технического комплекса Крайнего Северо-Востока России.

Система была создана для прогнозирования результатов антропогенного воздействия на существующие экологические комплексы. Фактографической основой геоинформационной системы является банк данных с информацией, отражающей как геоэкологическое состояние территории, так и ее хозяйственно-экономический потенциал.

В основу создания банка данных положен значительный объем картографического, научно-исследовательского и статистического материала. Фактографическая информация представлена в виде цифровых слоев по каждому компоненту организационной структуры природной и антропогенной составляющей среды обитания. Каждый информационный слой имеет самостоятельное значение и представлен как отдельная картографическая структура.

Цифровой банк данных обеспечивает следующие функции: ввод фактографической информации об аспектах функционирования регионального природно-технического комплекса; пространственную привязку к местности каждого хранящегося информационного объекта независимо от топологии; визуализацию исходной информации и результатов вычислений в удобной графической форме; визуализацию атрибутивной информации, содержащейся в базе данных; совмещение информационных слоев; фактографическую поддержку модели прогнозирования результатов хозяйственной деятельности на территории; получение статистической информации о параметрах любого цифрового слоя; просмотр состояния территории одновременно на нескольких слоях и привязанных к ним баз данных.

Первичное формирование информационных слоев осуществлялось средствами EasyTrase (оцифровка картографической информации), ARCView и ARC/Info (сверка, корректировка, создание топологии), Exsel и

Access (заполнение электронных таблиц и баз данных), Surfer (построение изолиний по отдельным точкам). Впоследствии все информационные слои были оформлены в виде тем ARCVIEW.

Структурно в базе данных выделяются четыре логически обособленных раздела, каждый из которых отражает определенный аспект процедуры прогнозирования геоэкологического состояния территории.

Раздел 1. Компоненты ландшафта и природные комплексы: данные о рельефе местности; гидрографическая сеть; почвенный покров; природная растительность территории с выделением древесной и кустарниковой; особо охраняемые территории.

Раздел 2. Техногенные объекты: существующие и ликвидированные населенные пункты; хозяйственная инфраструктура региона: объекты электроэнергетики, коммунального хозяйства, горнопромышленного производства, ЛЭП, автомобильные дороги всех категорий.

Раздел 3. Воздействия: данные геохимической съемки по потокам рассеяния масштаба 1:200000; статистические данные многолетнего мониторинга окружающей среды по широкому спектру загрязняющих веществ, содержащихся в атмосферном воздухе, водных объектах; статистические данные о выбросах в атмосферу и сбросах в водоемы, осуществляемые предприятиями коммунально-энергетического комплекса и горнодобывающего комплекса; экспертно-прогнозные оценки вероятности эндогенных и экзогенных процессов; многолетние климатические и метеорологические данные; статистические сведения о лесных пожарах на территории региона.

Раздел 4. Ресурсы: данные о территориальном расположении, запасах и масштабах разведанных месторождений полезных ископаемых, отработанных рудных и россыпных месторождений полезных ископаемых; информация о землях сельскохозяйственного назначения; прогнозные запасы биоресурсов.

В качестве инструмента для проведения расчетов и прогнозирования результатов техногенного воздействия на геоэкологическое состояние территории используется программно-вычислительный комплекс, который предоставляет возможность интерактивного просмотра результатов промежуточных и окончательных вычислений на любом этапе расчетов. Он дает общую картину геоэкологической обстановки в регионе [56].



## Заключение

Рассмотренные методы компьютерного моделирования месторождений полезных ископаемых, оценки геолого-промышленных запасов, формирования качества руды и оптимизации извлечения ценных компонентов из недр позволяют эффективно решать многие задачи проектирования, планирования и управления современным горным производством. Прогресс в области средств вычислительной техники и их применения для автоматизации моделирования месторождений продолжается как за счет развития традиционных методов, их совершенствования, так и за счёт создания более эффективного программного обеспечения на новой алгоритмической основе.

Существующие программные системы для геологии и подсчёта запасов реализуют интегрированные решения на базе методического, математического и информационного обеспечения для персональных компьютеров. Организация работы таких систем ориентирована на выполнение многошаговой и многопоточной компьютерной технологии, где каждый шаг последовательности обработки данных представляет собой решение той или иной функциональной геологической задачи.

Выбор той или иной методики моделирования и определение состава процедур, обеспечивающих реализацию функциональных задач геолого-промышленной оценки месторождений с применением компьютерных технологий, во многом зависит от квалификации пользователя и включает:

- анализ состояния горно-геологических объектов в недрах с использованием геоиндикаторных свойств различных типов руд как типоморфных ассоциаций минералов и их модельных технологических комбинаций в рудопотоках и продуктах обогащения;
- моделирование пространственного размещения горно-геологических объектов в массиве по совокупности геолого-технологических показателей с учётом промышленных кондиций и путём трансформации статических моделей объектов в динамические модели формирования рудопотоков;
- анализ геометрических, статистических и стохастических параметров технологии рудоподготовки как взаимосвязанных процессов разделения (дробление, измельчение, сепарация) и объединения (усреднение на складах и в рудопотоках, для стабилизации качества), которые проходят при добыче руд;
- прогнозирование геолого-технологических и экономических показателей отработки запасов месторождения (дифференциация массива на объемные элементы по значениям прогнозных показателей, определяющих типы, сорта руд или однородные участки по содержанию) с оценкой ожидаемой степени изменчивости качества продуктов в зависимости от состава исходного добываемого сырья;

- геолого-технологическое, минералогическое и геометаллургическое картирование месторождений с целью выделения зон определенной целевой направленности извлечения и использования складированных отходов как дополнительного техногенного сырья.

В целом схема компьютерной технологии имеет структуру, соответствующую стадиям геологоразведочных работ (предварительная разведка, детальная разведка, эксплуатационная разведка, малообъемное технологическое опробование) и этапам освоения месторождения (проектирование, эксплуатация), которые характеризуются одинаковыми способами обработки геотехнологической информации при аналогичных модельных ситуациях. Это позволяет выделить следующие основные комплексы функциональных задач геолого-промышленного обеспечения управления качеством руд [2]:

- статистический анализ показателей вещественного состава минерального сырья и оценка типоморфных ассоциаций минералов в недрах и технологических комбинаций минералов в рудопотоках и продуктах обогащения как основы экологической диагностики руд;

- выделение однородных геотехнологических зон месторождения (природные типы руд, технологические сорта руд, технологические зоны складированных отходов рудообогащения), их геометризация и оконтуривание;

- оценка горно-геологической сложности месторождения по значимым параметрам, характеризующим вещественный состав, текстурно-структурные, физико-химические и технологические свойства руд, оценка изменчивости и контрастности руд с учетом горно-геологической сложности месторождения;

- оценка объемно-качественных параметров руд в заданных границах горно-геологических объектов;

- распознавание геотехнологических зон в границах отработки месторождения;

- прогнозирование изменчивости вещественного состава в рудопотоках;

- статистический анализ и контроль качества добываемых руд;

- прогнозирование качества руд в пределах геотехнологических зон по проектируемым или планируемым направлениям добычи и стадиям рудоподготовки;

- статистическое регулирование качества добываемых руд.

При реализации компьютерной технологии геолого-промышленного обеспечения на практике необходимо учитывать всю имеющуюся информацию, позволяющую определить оптимальный способ достижения цели оценки запасов на основе принятых кондиций и критериев интерпретации результатов. Это достигается за счет многовариантного решения задач моделирования на базе применения различных алгоритмов интерполяции, расчёта совокупных характеристик и использования наиболее информативных из них. При этом наглядная визуализация различных типов данных (табличными,

графическими, картографическими и виртуально-сценическими средствами) помогает сопоставлять и интерпретировать результаты.

Многообразие математических методов, рассмотренных выше и рекомендуемых для применения при реализации компьютерной технологии геологического обеспечения, позволяет с формальных позиций свести геологические задачи к последовательности выполнения таких математических задач, как распознавание, классификация, имитационное моделирование и прогнозирование состояния объектов во времени и пространстве. Указанная декомпозиция геологического обеспечения управления качеством руд с позиций формализации функциональных задач дает возможность провести синтез математических методов, используемых в компьютерной информационной технологии по целевой направленности. Такой подход дает возможность создавать математическое обеспечение автоматизированных систем для горно-геологических приложений на основе типовых процедурных модулей, интегрируемых в общий программный пакет. Оптимизация задачи оценки геолого-промышленных запасов на базе заданной целевой функции, граничных условий, экспертных знаний геолога и поиска кратчайшего пути решения позволяет внести в систему элементы искусственного интеллекта. Дальнейшее развитие геоматики рационального недропользования и совершенствование программного обеспечения должны способствовать улучшению оперативности, надежности и объективности комплексной геолого-промышленной оценки месторождений и более полному извлечению запасов недр.

# Приложения

## Программное обеспечение рационального недропользования

- [ESRI ArcGIS](#): распространенная ГИС платформа
- [Feature Data Objects \(FDO\)](#): библиотеки пространственных данных открытого доступа
- [Google Earth](#): визуализатор 3D поверхности Земли в Интернет
- [GRASS](#): кроссплатформенная ГИС с возможностью обработки растровых и векторных данных, использующая библиотеку GDAL для экспорта и импорта файлов растровых форматов
- [ILWIS](#): настольная ГИС обработки данных дистанционного зондирования.
- [Leica TITAN](#): среда обработки геопространственных данных и визуализации
- [MapGuide](#): web-сервер для картографии с открытым исходным кодом.
- [UMN MapServer](#): приложение для web картографирования с поддержкой функций библиотеки GDAL
- [MapWindow](#): управляющие элементы ActiveX с функциями ГИС
- [MicroImages TNT products](#): программное обеспечение для геопространственного анализа (для Windows, Mac OS X, LINUX и UNIX).
- [Quantum GIS \(QGIS\)](#): кроссплатформенная GIS с открытым исходным кодом
- [ScanMagic](#): приложение Windows для обработки данных дистанционного зондирования, анализа и визуализации данных
- [Scenomics](#): программа построения баз данных земной поверхности с возможностью выбора различных проекций Земли и импорта/экспорта данных
- [SpaceEyes3D](#): система 3D визуализации картографических данных
- [SpatialAce](#): среда быстрой разработки ГИС приложений
- [StarSpan](#): программа растрового и векторного анализа
- [Thuban](#): интерактивный кроссплатформенный визуализатор географических данных
- [vGeo](#): интерактивный инструмент обработки и анализа данных
- [vrGIS64](#): система анализа и 3D визуализации пространственных данных с открытым исходным кодом

## Предметный указатель

Анализ данных		
аппроксимация .....	81	
прогнозирование .....	81	
Анализ данных		
вариограммы .....	77	
расчет эмпирических вариограммы	77	
Анализ данных		
квалиметрия запасов .....	83	
Анализ данных		
прогноз технологических показателей		
.....	86	
Анализ данных		
прогноз оруденения .....	92	
Анализ данных		
стереология.....	93	
Анализ данных		
оконтуривание.....	94	
Анизотропия.....	112	
Геологическая документация .....	32	
Интерполяция		
линейный метод .....	101	
метод ближайшей точки .....	100	
метод естественных соседей .....	103	
метод кригинг.....	105	
метод обратных расстояний .....	101	
метод условной имитации .....	112	
Карты		
двумерные карты.....	122	
плоские .....	122	
рельефные.....	123	
совмещенные.....	123	
Классификация запасов		
по степени подготовленности.....	163	
по степени разведанности.....	125	
Комбинированная модель карьерного		
поля.....	120	
Комплексные модели		
операции с множествами .....	114	
оценка сложности месторождений	116	
Кондиции для подсчета запасов		
кондиций для балансовых запасов	129	
кондиции для забалансовых запасов		
.....	133	
Линейный метод.....	117	
Моделирование месторождений		
блочное.....	96	
визуализация .....	120	
интерполяция .....	100	
каркасное.....	95	
Первичная обработка данных		
композитные пробы.....	54	
учет ураганных значений .....	56	
Первичная обработка данных		
расчет траектории скважины .....	53	
Подсчет запасов.....	124	
выбор метода .....	159	
метод многоугольников.....	142	
метод осаждения слитка .....	149	
метод разрезов .....	145	
метод регулярных блоков.....	153	
метод среднего арифметического .	135	
метод стохастической имитации...	153	
метод треугольников .....	141	
оценка погрешности .....	157	
оценка стоимости блоков .....	155	
статистический метод.....	152	
Потери и разубоживание....	93, 169, 172	
Программное обеспечение		
геолого-географические		
информационные системы .....	210	
профессиональные ГИС .....	205	
свободно распространяемые ГИС.	201	
Сбор данных		
декластеризация.....	52	
растеризация .....	51	
Сбор данных		
векторизация .....	50	
Типы моделей .....	63	
оболочки тел SOLID .....	68	
решетки GRID.....	70	
сетки MESH .....	71	
сетки TIN.....	65	
скважины DHOLES .....	64	

## Ссылки в Интернет

- 1i. Карты и программы компании Data+: <http://www.dataplus.ru>
- 2i. Программы и ГИС-компании Эсти-Мап: <http://www.esti-map.ru/>
- 3i. Google Earth – виртуальная Земля: <http://www.google.ru/earth/>
- 4i. ГИС-Ассоциация РФ: <http://www.gisa.ru>
- 5i. Горные информационные технологии: <http://www.geocad-it.ru/>
- 6i. Geoblock – горно-геологическая ГИС: <http://geoblock.sf.net/>
- 7i. Диспетчеризация с помощью GPS и ГЛОНАСС: <http://www.gisa.ru/30691.html>
- 8i. Rockworks – программа для геологов компании Rockware:  
<http://www.rockware.com>.
- 9i. Карты и космические снимки поверхности Земли на русскоязычной странице сайта Google Map: <http://maps.google.ru/>
- 10i. Каталог минералов: [www.catalogmineralov.ru](http://www.catalogmineralov.ru)
- 11i. Компания АМИ GeoniCS Sapr: <http://sapr.ami.ua/po/geonics.html>
- 12i. Консорциум по стандартизации открытых геопространственных данных:  
<http://www.opengeospatial.org>
- 13i. Пермский сервер ГИС: [http://old.perm.ru/gis/link\\_gis.htm](http://old.perm.ru/gis/link_gis.htm)
- 14i. Растровая и векторная модели данных:  
<http://geomod.rsu.ru/GIS/representation/GIS.htm#222>
- 15i. Credo-Dialogue – сайт: [http://www.credo-dialogue.com/d\\_1.htm](http://www.credo-dialogue.com/d_1.htm)
- 16i. Сайт ООО Дата+ <http://www.dataplus.ru>
- 17i. Geomix – ГИС разработки ФГУП ВИОГЕМ: <http://geomix.ru>
- 18i. Сайт Роскартографии: <http://www.roskart.gov.ru>
- 19i. Datamine Studio – горно-геологическая интегрированная система:  
<http://www.datamine.co.uk/>
- 20i. Vulcan – горно-геологическая система: <http://www.maptek.com/>
- 21i. MineScape – горно-геологическая программа австралийской компании Mincom: <http://www.mincom.com/>
- 22i. Micromine – программа горно-геологического моделирования австралийской компании Micromine Pty Ltd: <http://www.micromine.ru/>
- 23i. *Gems u Surpac* – системы моделирования и планирования добычи компании Gemcom Inc: <http://www.gemcomsoftware.com/>
- 24i. MineFrame – система автоматического планирования, проектирования и сопровождения горных работ: <http://www.mineframe.ru/>
- 25i. *Gemcom Whittle* – программа оптимизации карьеров:  
<http://www.gemcomsoftware.com/products/Whittle/>

## Список литературы

1. **Букринский В.А.**, Геометрия недр: учеб. для вузов. 2-е изд.. - М. : Недра, 1985. - стр. 526.
2. **Ершов В.В.**, Геолого-маркшейдерское обеспечение управления качеством руд. - М. : Недра, 1986. - стр. 260.
3. **Ильин А.И. Мининг С.Э., Стрельцов В.И., Стрельников А.В., Васильев П.В.**, Маркшейдерия при решении проблем недропользования // Горный журнал. - 1999 г.. - №7. - стр. 23-25.
4. **Смирнов В.И. Прокофьев А.П., Борзунов В.М. и др.**, Подсчет запасов месторождений полезных ископаемых. - М. : Госгеолтехиздат, 1960. - стр. 672.
5. **Погребницкий Е.И. Терновой В.И.**, Геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. - Л. : Недра, 1974. - стр. 304.
6. **Коган И.Д.**, Подсчет запасов и геолого-промышленная оценка рудных месторождений. - М. : Недра, 1971. - стр. 290.
7. **Родионов А.А. Коган Р.И., Голубев В.А. и др.**, Справочник по математическим методам в геологии. - М. : Недра, 1987. - стр. 334 .
8. **Рыжов П.А.**, Геометрия недр. - М. : Углетехиздат, 1952. - стр. 390 .
9. **Ушаков И.Н.**, Горная геометрия (3-е изд.). - М. : Госгортехиздат, 1962. - стр. 460.
10. **Буткевич Т.В. Оглоблин Д.Н. и др.**, Справочник маркшейдера. Под ред. Т.В. Буткевича и Д.Н.Оглоблина. - М. : Metallurgizdat, 1955. - 2.
11. **Адигамов Я.М. Зарайский В.Н.**, Нормирование запасов руд по степени подготовленности к добыче. - М. : Недра, 1978. - стр. 264.
12. **Ломоносов Г.Г.**, Формирование качества руды при открытой добыче. - М. : Недра, 1975. - стр. 224.
13. **Капутин Ю.Е.**, Горные компьютерные технологии и геостатистика. - СПб. : Недра, 2002. - стр. 424.
14. **Матерон Ж.**, Основы прикладной геостатистики. - М. : Мир, 1968. - стр. 408.
15. **Давид М.**, Геостатистические методы при оценке запасов руд: пер. с англ.. - Л. : Недра, 1980. - стр. 360.
16. **Редькин Г.М.**, Нестационарное анизотропное математическое моделирование неоднородностей систем минерального сырья . - М. : Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2007. - стр. 500.
17. **Колганов В.Ф. Бондаренко И.Ф., Давыденко А.Ю., Васильев П.В.**, Компьютерное моделирование при разведке и оптимизации разработки месторождений алмазов. - Новосибирск : Наука, 2008. - стр. 262.
18. **Ампилов Ю.П. Герт А.А.**, Экономическая геология. - М. : Изд-во ГеоИнформ-Марк, 2006. - стр. 406.
19. **Иванов Н.И.**, Экономико-математическое моделирование развития горных работ на шахтах. - М. : Недра, 1971. - стр. 200.
20. **Капралов Е.Г. Кошкарёв А.В., Тикунов В.С. и др.**, Основы геоинформатики: в 2 кн: учеб. пособие. - М. : Академия, 2004. - стр. 832 .
21. **Скворцов А.В.**, Геоинформатика: учеб. пособие. - Томск : Изд-во Том. ун-та, 2006. - стр. 336.
22. **Авраменко П.М. Акулов П.Г., Атанов Ю.Г., Петин А.Н. и др.**, Природные ресурсы и окружающая среда Белгородской области / ред. С.В.Лукин, . - Белгород, 2007 г.. - стр. 556.
23. **Васильев П.В.**, О геоинформационном обеспечении рационального недропользования на горнодобывающих предприятиях // Труды II Международной

- научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах». - Белгород : Изд-во БелГУ, 2006. - стр. 183-188.
24. **Каждан А.Б. Гуськов О.И., Шиманский А.А.,** Математические методы в геологии: учеб. для вузов. - М. : Недра, 1990. - стр. 251.
25. **Васильев П.В.,** Прогнозирование раскрытия минералов при добыче и рудоподготовке по данным автоматического анализа изображений структур и текстур руд // Маркшейдерия и недропользование. - 2008 г.. - №3. - стр. 50-53.
26. **Исаченко В.Х.,** Инклинометрия скважин. - М. : Недра, 1987. - стр. 216.
27. **Ермолов В.А.,** Геология. Том 2. Разведка и геолого-промышленная оценка месторождений полезных ископаемых. - М. : Техинформ, 2009. - стр. 392.
28. **Ершов В.В. Дремуха А.С., Трость В.М., и др.,** Автоматизация геолого-маркшейдерских графических работ. - М. : Недра, 1991. - стр. 347.
29. **Капутин Ю.Е.,** Информационные технологии планирования открытых горных работ. - СПб. : Недра, 2004. - стр. 424.
30. **Ермолов В.А.,** Геолого-экологическое обеспечение управления качеством руд в процессах рудоподготовки: учеб. пособие. - М. : МГИ, 1997. - стр. 112.
31. **Бызов В.Ф.,** Управление качеством продукции карьеров: учеб.для вузов. - М. : Недра, 1991. - стр. 239.
32. **Васильев П.В. Майдаков М.А.,** Использование графического ускорения интерполяции Сибсона для моделирования геоструктур // I-я международная научно-техническая конференция «Компьютерные науки и технологии». - Белгород : Изд-во БелГУ, 2009. - Т. 2. - стр. 137-142.
33. **Щеглов В.И.,** Практические методы кригинга. - М. : ВИЭМС, 1989. - стр. 51.
34. **Рыков В.В. Штоян Д.,** Модели и методы стохастической геометрии в геологии. - М. : ВИЭМС, 1987. - стр. 74.
35. **Васильев П.В.,** Оценка сложности рудных месторождений методами стохастической геометрии // Материалы 9-го Международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород : ФГУП Виогем, 2007. - стр. 141-144.
36. **Henley S.,** Russian Reserve Reporting // Mining Journal. - 2004. - Vol. 21. - pp. 18-21.
37. **Смирнов В.И. и др.,** Рудные месторождения СССР. В трех томах. Под общей редакцией акад. В.И.Смирнова. - М. : Недра, 1974.
38. **Зарайский В.Н. Стрельцов В.И.,** Рациональное использование и охрана недр на горнодобывающих предприятиях. - М. : Недра, 1987. - стр. 293.
39. **Петин А.Н.,** Минерально-сырьевые ресурсы Курской Магнитной аномалии и экологические проблемы их промышленного освоения // Вестник РУДН Сер. Инженерные исследования. - 2006 г.. - 11 : Т. 12. - стр. 124- 135.
40. **Петин А.Н. Мининг С.С.,** Минерально-сырьевые ресурсы и геолого-экономическая оценка месторождений полезных ископаемых. - Белгород : Изд-во БелГУ, 2005. - стр. 205.
41. **Васильев П.В. Петин А.Н., Яницкий Е.Б.,** Геоинформатика в недропользовании: учеб. пособие. - Белгород : Изд-во БелГУ, 2008. - стр. 232.
42. **Петин А.Н. Яницкий Е.Б.,** Геоинформационные технологии как инструмент создания и анализа геоэкологических данных горнодобывающих комплексов Курской Магнитной аномалии (КМА) // Вестник РУДН, Сер. Инженерные исследования. - 2007 г.. - Т. 2. - стр. 113-118.
43. **Петин А.Н. Васильев П.В.,** Исследование технологических и наноструктурных свойств руд при решении задач рационального недропользования. - Вестник Российского университета дружбы народов. Серия инженерные исследования, 2008 г.. - №3. - стр. С.41-49.



44. **Васильев П.В. Буянов Е.В.,** О методике совместной работы программ MapInfo и Geoblock по оконтуриванию и подсчету запасов рудных месторождений // Бюллетень ГИС-ассоциации. - 2000 г.. - №2. - стр. 32-33.
45. **Розанов М.С. Васильев П.В.,** Применение AJAX-технологии для разработки информационной системы «гидротехнические сооружения» // Научные ведомости БелГУ. Серия: Информатика, прикладная математика и управление. - Белгород : Изд-во БелГУ, 2007 г.. - №7(38). - Вып.4. - стр. 78-82.
46. **Наговицин О.В. Билин А.Л., Смагин А.В.,** Оптимизация границ карьеров на основе алгоритма проф. С.Д. Коробова // Горн. информ.-аналит. бюллетень. - М. : МГГУ, 2002 г.. - №7. - стр. 244-246.
47. **Алферов А.Ю. Васильев П.В., Кинзерская Е.А.,** Состояние и тенденции компьютеризации геолого-маркшейдерского обеспечения горных работ // Маркшейдерский вестник. - 1996 г.. - №2. - стр. 22-31.
48. **Аленичев В.М. Суханов В.И., Иманкулов Р.А.,** Проблемы разработки горно-геологических информационных систем для карьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2008 г.. - №10. - стр. 306-311.
49. **Башлыкова Т.В. Пахомова Г.А., Лагов Б.С. , и др.,** Технологические аспекты рационального недропользования. Роль технологической оценки в развитии и управлении минерально-сырьевой базой страны. - М. : МИСИС, 2005. - стр. 576.
50. **Акишев А.Н. Васильев П.В.,** Обоснование нормативов запасов при обновлении оборудования на предприятиях АК АЛРОСА // Материалы 10-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". - Белгород : ФГУП Виогем, 2009. - Т. 2. - стр. 105-109.
51. **Арсентьев А.И.,** Определение производительности и границ карьеров. - М. : Госгортехиздат, 1961. - стр. 256.
52. **Бастан П.П. Костина Н.К.,** Смешивание и сортировка руд. - М. : Недра, 1990. - стр. 168.
53. **Васильев П.В.,** Применение линейного стереологического анализа для предсказания степени раскрытия минеральных фаз магнетитовой руды // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 1986 г.. - 5. - стр. 34-36.
54. **Васильев П.В. Кинзерская Е.А.,** Оперативное планирование горных работ с использованием компьютерной системы GEOLMARK // Материалы 4-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". - Белгород : ФГУП Виогем, 1997 г.. - стр. 48-52.
55. **Васильев П.В.,** Программа для ЭВМ: Моделирование месторождений и подсчет запасов полезных ископаемых (GEOBLOCK) // Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и топологий интегральных схем (РосАПО). - Свидетельство № 970356, от 22 июня 1997 г..
56. **Васильев П.В.,** Развитие горно-геологических информационных систем // Бюллетень ГИС-ассоциации. - 1999 г.. - №2. - стр. 27 – 31.
57. **Васильев П.В. Уиттл Д.,** Построение экономической блочной модели месторождения при решении задачи оптимизации контуров карьера // Материалы 4-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". - Белгород : ФГУП Виогем, 1997 г.. - стр. 286-296.
58. **Отгонбилэг Ш.,** Управление горной массой . - М. : Недра, 1996. - стр. 173.
59. **Тихонов О.Н.,** Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. - М. : Недра, 1984. - стр. 208.

60. **Васильев П.В., Лукьянов А.Ф., Поскачей А.Н., Семушев М.И., Адигамов Б.Я.**, Способ рентгеноспектрального флуоресцентного анализа вещества в легком наполнителе // А.С.754274. Бюллетень Изобретений. - Оpubл. 07.08, 1980 г..
61. **Васильев П.В., Гурьянова И.В.**, Компьютерная графика: учеб. пособие. - Белгород : Изд-во БелГУ, 2007. - стр. 168.
62. **Васильев П.В., Черноморец А.А.**, Оптимизация управления запасами при открытых горных работах на основе алгоритма бифуркации // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. - 2008 г.. - №10. - стр. 249-254.
63. **Гудков В.М., Васильев А.А., Николаев К.П.**, Прогноз и планирование качества полезного ископаемого. - М. : Недра, 1976. - стр. 191.
64. **Зарайский В.Н., Васильев П.В., Серый С.С., Быховец А.Н.**, Состояние и направления совершенствования компьютеризации геолого-маркшейдерских работ на примере Ковдорского ГОКа // Маркшейдерский вестник. - 1994 г.. - №1. - стр. 25-27.
65. **Киянец А.В., Стрельцов В.И., Стрельников А.В., Мининг С.Э., Васильев П.В.**, Промышленная безопасность и рациональное недропользование на горных предприятиях // Горный журнал. - 2004 г.. - №10. - стр. 14-17.
66. **Поротов Г.С.**, Математические методы моделирования в геологии. - СПб : Изд-во СПГГИ, 2006. - стр. 206.
67. **Ржевский В.В.**, Проектирование контуров карьеров. - М. : Metallurgizdat, 1956. - стр. 356.
68. **Стрельцов В.И., Могильный С.Г.**, Маркшейдерское обеспечение природопользования недр. - М. : Недра, 1989. - стр. 205.
69. **Васильев П.В.**, Оценка потерь полезного компонента при морфологическом анализе изображений геоструктур // Научные ведомости Белгородского Государственного Университета. Серия: История Политология Экономика Информатика. - Белгород : БелГУ, 2009 г.. - №7(62). - вып.10/1. - стр. 129-133.
70. **Васильев М.В., Бастан П.П., Ключкин Е.И., Федосов Ю.К.**, Усреднение руд в СССР и за рубежом. - Свердловск : Средне-уральское книжное издательство, 1973. - стр. 100.
71. **Кузьмин В.И., Мининг С.Э., Редькин Г.М.**, Геометризация и рациональное использование недр. - М. : Недра, 1991. - стр. 319.
72. **Хедли Дж., Уайтин Т.**, Анализ систем управления запасами. Перев. с англ.. - М. : Наука, 1969. - стр. 512.
73. **Лукьянов А.Ф., Поскачей А.Н., Адигамов Б.Я., Васильев П.В., Семушев М.И.**, Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ с двусторонним облучением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. - 1982 г.. - №9. - стр. 49 - 51.
74. **Трубецкой К.Н., Хронин В.В., Краснянский Д.В.**, Проектирование карьеров: учебник для вузов. - М. : Изд-во Акад. горн. наук, 2001. - стр. 536.
75. **Хохряков В.С.**, Проектирование карьеров (3-е изд.). - М. : Недра, 1992. - стр. 336.
76. **Васильев П.В.**, Стохастическая модель разрушения и раскрытия минералов при добыче и переработке руд // Материалы 10-го международного симпозиума «Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях». - Белгород : ФГУП ВИОГЕМ, 2009 г.. - стр. 99-105.
77. **Васильев П.В., Колганов В.Ф.**, Компьютерные технологии оптимизации контуров карьеров на основе геолого-математических моделей месторождений // Материалы 7-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". - Белгород : ФГУП Виогем, 2003 г.. - Т. 1. - стр. 424-429.
78. **Васильев П.В., Журин С.Н., Субботин В.М., Лябах А.И.**, Методика формирования базы данных и моделирования Яковлевского месторождения богатых железных руд // Материалы 5-го международного симпозиума "Освоение месторождений минеральных

- ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях". - Бегород : ФГУП Виогем, 1999 г.. - Т. 2. - стр. 362-368.
79. **Ершов В.В. Ермолов В.А.**, Геологическое обеспечение управления качеством руд и запасами минерального сырья: учеб. пособие. - М. : МГИ, 1989. - стр. 124.
80. **Орлов В.П. Шевырев И.А., Соколов Н.А. и др.**, Железные руды КМА. - М. : Геоинформмарк, 2001. - стр. 616.
81. **Васильев П.В. Петин А.Н.**, Интегрированная геоинформационная система с открытым программным обеспечением решения задач недропользования // IX международная конференция "Новые идеи в науках о Земле " S-XI. Секция геоинформатики. - М. : Изд-во РГГРУ, 2009. - стр. 108.
82. **Дунаев В.А.**, Предпосылки и проблемы утилизации техногенных минеральных отходов // Труды II Международной научной конференции «Проблемы природопользования и экологическая ситуация в Европейской России и сопредельных странах». - Белгород : Изд-во БелГУ, 2006. - стр. 326-327.
83. **Сученко В.Н.**, Анализ исходной информации и прогнозирование в геометрии недр. - М. : Техинформ, 2009. - стр. 270.
84. **Ляшенко В.И.**, Развитие методов управления запасами руд при подземной разработке месторождений сложной структуры // Горный журнал. - 2005 г.. - №6. - стр. 23-27.
85. **Порцевский А.К.**, Управление качеством рудной массы на открытых горных работах: учебное пособие. - М. : МГОУ, 1998. - стр. 44.
86. **Шаталов И.И. Щеглов В.И.**, Моделирование месторождений и рудных полей на ЭВМ: учебное пособие. - М. : Недра, 1989. - стр. 150.
87. **Коробов С.Д.**, Пространственная модель геологического блока // Горные науки и промышленность. - М. : Недра, 1989 г.. - стр. 274-279.
88. **Шестаков Ю.Г.**, Математические методы в геологии: Учебное пособие. - Красноярск : Изд-во Красноярского ун-та, 1988. - стр. 208.
89. **Порцевский А.К.**, Систематизация признаков сложноструктурных месторождений // Горный журнал. - 2006 г.. - №1. - стр. 30-33.
90. **Шек В.М. Конкин Е.А., Литвинов А.Г.**, Программный комплекс НЕДРА подсистемы геолого-маркшейдерского обеспечения АСУ горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. - М. : МГГУ, 2007 г.. - №9. - стр. 240– 246.
91. **Васильев П.В.**, Построение динамических горно-геологических моделей месторождений для оптимизации управления запасами минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ. - 2008 г.. - №3. - стр. 75-84.

**Петин Александр Николаевич**  
**Васильев Павел Владимирович**

## ГЕОИНФОРМАТИКА В РАЦИОНАЛЬНОМ НЕДРОПОЛЬЗОВАНИИ

Монография

Редактор З.М. Лычева  
Компьютерная верстка Е.Д. Соболева  
Корректор З.М. Лычева  
Оригинал-макет Н.А. Гапоненко

Подписано в печать 06.10.2011. Формат 60×84/16.  
Гарнитура Times. Усл. п.л. 15,34. Тираж 500. Заказ 210.  
Оригинал-макет подготовлен и тиражирован в ИПК НИУ «БелГУ»  
308015, г. Белгород, ул. Победы, 85