Высшее профессиональное образование

Учебник

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

БАКАЛАВРИАТ

ЕСТЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

ACADEMIA

Высшее профессиональное образование

БАКАЛАВРИАТ

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Под редакцией профессора **В. В. Авдонина**

Допущено
Учебно-методическим объединением
по классическому университетскому образованию
в качестве учебника для студентов, обучающихся
по направлению «Геология»

ACADEMIA

Москва
Издательский центр «Академия»
2011

УДК 550.8(075.8)
ББК 26.34я73
Г36

Авторы:
В. В. Авдонин, В. В. Мосейкин, Г. В. Ручкин, Н. Н. Шатагин, Т. И. Лыгина, М. Е. Мельников

Рецензенты:
д-р геолого-минералог. наук, проф. *В. С. Круподеров*;
канд. геолого-минералог. наук, доц. *В. В. Дьяконов* (зав. кафедрой месторождений полезных ископаемых и их разведки им. В. М. Крейтора Российского университета дружбы народов)

Г36 **Геология** и разведка месторождений полезных ископаемых : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / [В. В. Авдонин, В. В. Мосейкин, Г. В. Ручкин и др.] ; под ред. В. В. Авдонина. — М. : Издательский центр «Академия», 2011. — 416 с. — (Сер. Бакалавриат).

ISBN 978-5-7695-6667-7

Учебник создан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по направлению подготовки «Геология» (квалификация «бакалавр»).

В учебнике кратко изложены сведения об условиях формирования, закономерностях размещения месторождений полезных ископаемых, охарактеризованы главнейшие геолого-промышленные типы рудных месторождений и их связь с геологическими формациями. Рассмотрены современные поисковые методики. Впервые подробно описаны методы построения компьютерных моделей, указаны направления их использования. Приведены основные сведения о способах разработки месторождений.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования.

УДК 550.8(075.8)
ББК 26.34я73

© Коллектив авторов, 2011
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

ISBN 978-5-7695-6667-7

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебник предназначен для студентов геологических специальностей, изучающих месторождения твердых полезных ископаемых, поиски, разведку и оценку этих объектов. Его содержание соответствует программам курсов «Геология полезных ископаемых», «Поиски полезных ископаемых», «Разведка месторождений твердых полезных ископаемых», «Методика опробования, разведок и подсчета запасов».

В основу учебника положены курсы лекций, которые авторы в течение многих лет читают на геологическом факультете Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова и в Московском государственном горном университете.

В книге кратко освещены вопросы геологии металлических полезных ископаемых, проанализированы связи месторождений с геологическими формациями. Приведены общие сведения о геолого-промышленных типах рудных месторождений, теоретические основы, современные методические разработки и практические рекомендации по организации поисковых работ. Изложены основы разведки, опробования месторождений, общие сведения о классификации запасов, рассмотрены ведущие показатели кондиций. Даны основы классических методов подсчета запасов. Охарактеризованы принципы геолого-экономической оценки месторождений, основные способы разработки месторождений, современные геотехнологические методы добычи полезных ископаемых.

Значительное внимание в учебнике уделено методикам обработки разведочных данных с использованием компьютерных технологий — построению моделей рудных тел и месторождений и работе с ними, геостатистическим методам подсчета запасов.

Учитывая современные тенденции развития минерально-сырьевой базы и перспективы освоения полезных ископаемых Мирового океана, авторы сочли необходимым включить в учебник разделы, посвященные методикам поисков и разведки наиболее перспективных типов полезных ископаемых океанского дна — оксидных железомарганцевых руд.

Учебник состоит из 10 глав. Главы 1, 2, 4 написаны В. В. Авдониным, глава 3 — Г. В. Ручкиным, главы 5, 6 — Н. Н. Шатагиным, главы 7, 8 — В. В. Мосейкиным, глава 9 — Т. И. Лыгиной, глава 10 — М. Е. Мельниковым.

При изложении материала авторы стремились следовать традициям классической российской геолого-разведочной школы, созданной трудами В. М. Крейтера, В. И. Смирнова, А. Б. Каждана и др.

ВВЕДЕНИЕ

Современная мировая экономика характеризуется неуклонным ростом потребления минерального сырья, расширением круга используемых в промышленности элементов, вовлечением в производство новых типов месторождений полезных ископаемых. Укрепление и совершенствование минерально-сырьевой базы России — основная задача геологической службы.

Обеспечение ресурсами и запасами не только действующих отраслей горнодобывающей промышленности, но и ее перспективных направлений требует оперативного решения проблемы освоения новых видов полезных ископаемых. Успешное осуществление геолого-разведочных работ возможно лишь при условии постоянного совершенствования теории и методов поисков и разведок месторождений полезных ископаемых. Результативность геолого-разведочной отрасли определяется уровнем научных и методических разработок, степенью использования современных поисково-разведочных средств.

Научные основы поисков и разведок месторождений полезных ископаемых созданы трудами нескольких поколений отечественных геологов, среди которых в первую очередь необходимо назвать Г. Д. Ажгирея, Я. Н. Белевцева, А. Г. Бетехтина, Ю. А. Билибина, П. П. Бурова, А. Б. Каждана, В. М. Крейтера, В. А. Обручева, А. П. Прокофьева, В. И. Смирнова, С. С. Смирнова, А. А. Якжина и др.

Многими ведущими учеными были написаны замечательные учебники и методические руководства по поискам и разведкам месторождений, не утратившие своего значения до настоящего времени. Тем не менее в последние годы произошли существенные изменения в самой структуре минерально-сырьевой базы, оценке перспектив использования природных ресурсов и методов их вовлечения в промышленное использование.

В геолого-разведочной отрасли можно отметить несколько областей, в которых наблюдаются наиболее значимые изменения.

Во-первых, это касается совершенствования теории и методики поисковых работ. Во-вторых, широкое внедрение компьютерных технологий во все направления геолого-разведочного процесса качественно изменило методику подсчета запасов и оценки месторождений на всех стадиях их освоения.

Существенные изменения происходят и в методике добычных работ, в особенности в связи с требованиями экологической безопасности.

Наконец, необходимо учитывать еще одно важное обстоятельство. Наряду с неуклонно возрастающей потребностью в различных видах минерального сырья отчетливо проявляется тенденция истощения минерально-сырьевой базы, снижения открываемости новых месторождений, вовлечения в промышленное производство неблагоприятных по геологической позиции месторождений и руд более низкого качества. Эти причины стимулируют повышенный интерес к минерально-сырьевому потенциалу Мирового океана. Вследствие интенсификации научно-исследовательских и поисково-разведочных работ в океане в последние годы сложилась качественно новая ситуация — возникла необходимость решения проблем освоения минерально-сырьевых ресурсов океана в практической плоскости, что ознаменовалось интенсивными усилиями по разработке теоретических основ, методики и технических средств морских геолого-разведочных работ.

Авторский коллектив настоящего учебника постарался отразить в нем все важнейшие достижения, касающиеся поисков, разведки и эксплуатации месторождений и характеризующие современное состояние геолого-разведочной отрасли.

ЧАСТЬ I

ГЕОЛОГИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Глава 1
Геологические условия формирования месторождений полезных ископаемых

1.1. Генетическая классификация

Месторождения полезных ископаемых формируются в земной коре в результате разнообразных геологических процессов — магматических, осадочных, метаморфических. В соответствии с этим все месторождения разделяются на три крупные серии — магматогенную, седиментогенную, метаморфогенную. Согласно классификации В.И.Смирнова, серии подразделяются на группы, а группы — на классы (табл. 1.1). Каждый класс представлен, как правило, большим количеством геолого-промышленных типов.

Месторождения полезных ископаемых известны в пределах всех крупнейших структур Земли — на платформах, геосинклинальных складчатых поясах, в Мировом океане. Они формировались в течение длительного времени практически на всех ступенях развития структур. Образование наиболее древних месторождений относят к начальным стадиям формирования земной коры, возраст их оценивается цифрами порядка 3 800—2 800 млн лет. Наиболее молодые месторождения образуются в настоящее время, буквально на наших глазах. Время формирования конкретных месторождений различно, но соизмеримо с геологическим временем образования рудоносных комплексов горных пород и изменяется от нескольких десятков тысяч лет (накопление некоторых соляных залежей) до нескольких десятков (угленосные толщи) и даже нескольких сотен миллионов лет.

Месторождения образуются на различных глубинах в земной коре — от поверхности до границы Мохоровичича (10—15 км) и, возможно, несколько глубже. Вещество, из которого формируются залежи полезных ископаемых, имеет различное происхождение и поступает из разных источников. Оно может быть ювенильного проис-

хождения и поступать из глубинных частей коры и верхней мантии или выщелачиваться гидротермальными растворами из окружающих пород, может в виде взвесей и растворов сноситься с поверхности континентов при образовании осадочных месторождений и т. д.

Наиболее общие условия образования месторождений можно рассмотреть при анализе рудоносности геологических формаций.

Таблица 1.1. **Сводная генетическая классификация месторождений полезных ископаемых** (по В. И. Смирнову, 1989)

Серия	Группа	Класс
Магматогенная (эндогенная)	Магматическая	Ликвационный Раннемагматический Позднемагматический
	Карбонатитовая	Магматический Метасоматический Комбинированный
	Пегматитовая	Простые пегматиты Перекристаллизованные пегматиты Метасоматически замещенные пегматиты
	Альбитит-грейзеновая	Альбититовый Грейзеновый
	Скарновая	Известковые скарны Магнезиальные скарны Силикатные скарны
	Гидротермальная	Плутоногенный Вулканогенный Амагматогенный (телетермальный, стратиформный)
	Колчеданная	Гидротермально-метасоматический Гидротермально-осадочный Комбинированный
Седиментогенная (экзогенная)	Выветривания	Остаточный Инфильтрационный
	Россыпная	Элювиальный Делювиальный

Окончание табл. 1.1

Серия	Группа	Класс
		Пролювиальный Аллювиальный Литоральный Гляциальный
	Осадочная	Механический Химический Биохимический Вулканогенный
Метаморфогенная	Метаморфизованная	Регионально-метаморфизованный Контактово-метаморфизованный
	Метаморфическая	—

1.2. Рудоносность геологических формаций

Месторождения полезных ископаемых, все и всегда, являются членами геологических формаций. И нет ни одного месторождения, которое не входило бы в состав какой-либо формации. Это фундаментальное положение формационного анализа имеет первостепенное значение при прогнозах, поисках, разведке месторождений, решении генетических и других вопросов.

Принадлежность месторождения (а точнее, промышленного типа) к данной геологической формации определяет его генезис, структуру, морфологию рудных тел, минеральный состав руд и вмещающих пород.

Из определения геологических формаций как естественно выделяемых комплексов, в которых слагающие их породы тесно парагенетически связаны друг с другом в пространственном и возрастном отношениях, следует, что полезные ископаемые представляют собой по существу горные породы, входящие в состав формаций, но встречающиеся, может быть, реже, чем другие компоненты формации (Н. В. Шатский, 1965).

Если обратиться к известному сравнению, что «формации представляют собой парагенезисы пород, как и породы являются парагенезисами минералов», то уместна такая аналогия — месторождения в геологических формациях подобны в ряде случаев акцессорным минералам в породах. Хотя можно привести примеры формаций, являющихся почти в полном объеме полезными ископаемыми (например, формации железистых кварцитов).

Руды — это в большинстве обычные для формации породы. Рудами их делает экономика — относительная технологическая простота, а следовательно, и выгода извлечения из них тех или иных компонентов — металлов. Руды, как и любые другие породы формаций, являются продуктами процессов, свойственных данной формации.

Даже признавая определенную уникальность месторождений, не следует отделять их от всей связанной с ними совокупности пород. Л. Н. Овчинников считает, что «процессов, специально приводящих только к образованию рудных месторождений, в природе не существует. Рудообразование — явление частное, дополнительное, сопровождающее различные планетарные эндогенные и экзогенные геологические процессы», которые (можно добавить) являются составной частью процессов образования геологических формаций.

Оценивать характер связи месторождений с геологическими формациями можно с разных позиций, опираясь при этом на различные критерии: возрастные, фациальные, геохимические и др. Для решения формационных проблем целесообразно рассмотреть проявление связей в трех аспектах: 1) источники рудного вещества, 2) перенос (транспортировка), 3) локализация (условия, причины, механизм концентрации) руды. Очевидно, что эти вопросы должны быть раздельно рассмотрены для месторождений, входящих в осадочные, вулканогенно-осадочные и магматические формации.

Рудоносность осадочных формаций. С осадочными формациями связаны разнообразные рудные месторождения. Прежде всего это месторождения железа, марганца, алюминия, в которых сосредоточены основные запасы данных металлов. Известны крупные осадочные месторождения медных и полиметаллических руд, а также редкометалльных, урановых и некоторых других.

Осадочные месторождения обладают рядом специфических особенностей, важных для выделения промышленных типов. Рудные тела этих месторождений представляют собой пласты, линзы, пластообразные залежи, положение которых определяется слоистостью вмещающих пород. В пределах рудоносных горизонтов может располагаться одно или несколько параллельных согласных рудных тел, образующих залежи, продуктивные толщи и т. д. Рудные тела отличаются устойчивой формой, выдержанностью по падению и простиранию, четкими природными границами, простым внутренним строением. Рудам свойственны массивные, полосчатые, слоистые, ритмично-слоистые текстуры, которые также типичны для вмещающих осадочных пород. Прожилково-вкрапленные руды встречаются реже и, как правило, в месторождениях, претерпевших метаморфические преобразования. Положение рудных тел, особенности их внутреннего строения обнаруживают отчетливую связь с фациями окружающих пород. Рудные тела вместе с вмещающими породами подвергаются складчатым и разрывным нарушениям, процессам ме-

таморфизма. Нередко вследствие процессов преобразования руды приобретают признаки эпигенетических.

Рудоносность осадочных формаций определяется в первую очередь типом их литогенеза, приуроченностью к определенной геотектонической структуре. Выделенные Н. М. Страховым основные типы литогенеза определяют общий набор полезных ископаемых, который потенциально может быть связан с соответствующими формациями. Так, в формациях гумидного типа локализуются месторождения железных, марганцевых руд и бокситов. Аридный литогенез обусловливает формирование медных и свинцово-цинковых месторождений. В зависимости от климатических условий, в которых происходит накопление пород осадочных формаций, с ними бывают связаны и многочисленные месторождения нерудных полезных ископаемых.

Геотектоническая позиция определяет вещественный состав осадочных формаций, мощность, характер цикличности, морфологию формационных тел и тем самым обусловливает особенности локализации тел полезных ископаемых.

С платформенными сероцветными терригенными формациями гумидных областей связаны месторождения железа, такие, как Керченское, Аятское, Западно-Сибирского бассейна и др. Накопление железных руд подобных месторождений происходит в условиях лагунно-заливных побережий. Рудообразующие бассейны отделены от моря барьерами, ассоциации с дельтами отсутствуют, привнос материала осуществляется небольшими водотоками, дренирующими заболоченную соседнюю низменность, а также высачиванием грунтовых вод. Значительная часть железа с заболоченной суши мигрирует в форме органоминеральных комплексов или окисных пленок. Характерна пространственная близость железорудных бассейнов и железоносных кор выветривания, особенно латеритных.

Формирование железорудных месторождений платформенных терригенных формаций паралического и субпаралического типов обусловлено главным образом палеогеографическими условиями. Привнос железа в морские бассейны связан, вероятнее всего, с континентальными водами; выпадение железа в осадок в прибрежной зоне обусловлено, по-видимому, распреснением морских вод. Наиболее благоприятны для железонакопления участки морского бассейна, прилегающие к заболоченным прибрежным низменностям и отчлененные от открытого моря островными грядами и отмелями. Здесь формируются в основном шамозитовые и гётит-гидрогётитовые оолитовые руды. В более застойных зонах бассейнов, а также при обилии органического вещества могут отлагаться сидеритовые или лептохлоритовые осадки.

На примере железорудных месторождений данного типа отчетливо проявляются основные особенности формирования месторождений осадочных формаций: поступление рудного вещества, его мо-

билизация, перенос и концентрация определяются главным образом климатом и рельефом, т. е. теми же факторами, которые обусловливают фациальный облик пород формации. В этом и заключается причина закономерностей фациального контроля рудных тел осадочных месторождений.

Близкие условия формирования свойственны и марганцевым месторождениям. Источниками марганца служили прилегающие к бассейну седиментации участки суши, на которых гумидные массы кристаллических пород подвергались длительной гипергенной переработке. Наиболее подходящим для марганценакопления тектоническим режимом является замедленное трансгрессивное развитие районов рудонакопления, при котором создаются условия, препятствующие выносу в бассейн больших масс обломочного материала.

С красноцветными и пестроцветными терригенными и терригенно-карбонатными формациями аридных областей связаны месторождения медистых песчаников. Несмотря на различную геотектоническую позицию меденосных формаций, им свойственна общая закономерность: все они приурочены к сочленениям двух типов структур — областей сноса и питания обломочным и рудным веществом и участков накопления и захоронения этого вещества.

Медная минерализация сопровождается обычно концентрациями Pb, Zn, Co, Ag, Ni, Pt, V, Ce, Re, Cd и др. Для образования месторождений в медистых песчаниках необходим размыв в областях сноса пород, обогащенных медью и другими металлами, в том числе месторождений и рудопроявлений. Об этом свидетельствует и различный набор элементов-спутников, сопровождающих медь в разных районах. Таким образом, основным источником рудного вещества служат разрушающиеся породы в областях сноса. Наряду с этим многие исследователи допускают в некоторых случаях функционирование и других источников. К их числу относятся горячие минерализованные рассолы и растворы, морские и озерные воды, вулканогенные эксгаляции, эвапориты, нефтегазоносные залежи и т. д.

Окончательное формирование рудных скоплений в виде промышленных концентраций происходит в основном в диагенетическую стадию вследствие перераспределения рассеянного рудного вещества.

Таким образом, ведущая роль в формировании месторождений медистых песчаников принадлежит седиментационным и седиментационно-диагенетическим процессам. Следовательно, мобилизация рудного вещества, перенос и накопление его определяются в основном климатическими условиями и фациальной обстановкой.

Подводя итог краткому анализу связей осадочных рудных месторождений с геологическими формациями, необходимо отметить следующие положения. В качестве поставщиков рудного вещества выступают те же источники, которые поставляют материал для формирования всех пород формации. Перенос рудного вещества осу-

ществляется теми же агентами, которые переносят материал одновременно формирующихся вмещающих пород. Осаждение рудного вещества, как и осаждение материала окружающих пород, определяется фациальной обстановкой. Наконец, диагенетические и последующие метаморфогенные преобразования рудных скоплений свойственны им в той же степени, как и вмещающим породам. Эти факты, свидетельствующие о тесной связи осадочных месторождений с вмещающими их формациями, определяют необходимость выделения промышленных типов на формационной основе.

Все указанные особенности взаимосвязей рудных месторождений с осадочными формациями свойственны рудоносным формациям, в которых руды являются равноправными членами формаций и связаны с ними пространственно и во времени и которые могут быть названы продуктивными.

В ряде случаев осадочные формации содержат оруденение, не свойственное им, не связанное с ними в генетическом отношении, т. е. оруденение, наложенное, произведенное процессами, связанными со становлением других формаций, главным образом магматических. Это гидротермальные, жильные и штокверковые месторождения, метасоматические, контактовые. Физико-механические свойства, петрографический состав, химические особенности пород в значительной степени определяют свойства локализованных в них наложенных месторождений. Такие формации выделяются в группу ***рудовмещающих***.

Особую группу составляют ***рудоносные формации***, характеризующиеся первичным рассеянным убогим оруденением, которое под влиянием наложенных процессов (контактных, метаморфических и др.) преобразуется в более концентрированное и приобретает промышленную значимость. К подобным формациям относятся в первую очередь так называемые черносланцевые и разнообразные известково-терригенные формации, с которыми связаны полиметаллическое, редкометалльное, золотое, урановое оруденения. Эти формации предложено ***называть рудоносными материнскими***. Можно выделять материнские формации рудоносные и нерудоносные, среди которых, в свою очередь, могут быть ***пассивные***, рудное вещество которых мобилизуется наложенным на них процессом (например, коры выветривания), и ***активные***, поставляющие рудные компоненты в окружающие породы в результате процессов, происходящих в самой формации или сопутствующих становлению отдельных ее составляющих (например, некоторые магматические формации). Такая классификация осадочных формаций полностью согласуется с соответствующей классификацией магматических формаций.

Рудоносность магматических формаций. Эндогенные месторождения, связанные с магматическими формациями, образуются в результате эволюции магматического процесса и взаимодействия магматических тел и их эманаций с окружающими породами. Среди

них выделяется несколько генетических групп (см. табл. 1.1): магматических, карбонатитовых, пегматитовых, альбитит-грейзеновых, скарновых, гидротермальных (плутоногенных) месторождений. Группа месторождений, имеющих эндогенный (магматический) источник рудного вещества и характеризующихся экзогенными условиями отложения, т.е. колчеданные и некоторые другие вулканогенные месторождения, рассмотрены далее.

По характеру связей магматических формаций с рудными месторождениями среди первых может быть выделено несколько типов. Формации относятся к ***рудоносным продуктивным***, когда магматические массы являются источником оруденения, локализующегося в породах этой же формации. В отличие от рудоносных продуктивных формаций осадочных пород (где связь рудных обособлений с вмещающими породами почти всегда только парагенетическая) магматические являются одновременно и материнскими, что, однако, в названии этого типа не отражается. Собственно материнскими формациями называются такие, которые служат источником рудного вещества, но не вмещают оруденение, которое локализуется на большем или меньшем удалении от магматических образований формации во вмещающих породах. Различие между этими двумя типами формаций (рудоносными и нерудоносными материнскими) достаточно условно уже потому, что широко развиты месторождения, руды которых одновременно локализованы в породах материнской формации и вне их — в экзоконтактовой зоне.

Магматические формации так же, как и осадочные, нередко вмещают оруденение, совершенно не связанное с ними генетически, и тогда они могут быть отнесены к ***рудовмещающим*** формациям. Помимо общей характеристики условий локализации оруденения, определяемых физико-механическими, петрохимическими свойствами среды, которые оказывают определенное влияние на структуру месторождения, околорудные изменения, а иногда и на состав руд, квалификация формации как рудовмещающей, в общем, ни к чему не обязывает. И тем не менее, возможно, есть более глубокий смысл такого определения. Среди рудовмещающих могут оказаться не случайные, а закономерно связанные с оруденением формации, связь которых не очевидна и устанавливается лишь на своего рода статистической основе повторяемости. Установление таких связей дает дополнительный материал для расшифровки генезиса месторождений.

Наконец, целесообразно в некоторых случаях выделять ***рудообразующие*** формации, понимая под ними те, которые, не являясь источником рудных компонентов, определяют образование рудных месторождений воздействием формирующихся магматических масс и их эманаций на вмещающие породы. В этом случае возможность образования месторождений определяется сочетанием, взаимодействием двух формаций, одна из которых обеспечивает наличие по-

лезных компонентов в достаточных количествах, концентрациях и соответствующих формах, другая служит источником энергии и иногда флюидов, возбуждающим процессы рудообразования.

Понятие рудоносности магматических формаций базируется на связи оруденения с магматическими образованиями. Принято различать два типа такой связи: генетическую и парагенетическую. В случае генетической связи источником оруденения являются сами магматические массы, формирующие тела комплекса. При этом связь может быть сингенетической (оруденение образуется одновременно с вмещающими породами в результате магматического процесса) и эпигенетической (оруденение образуется позже пород материнской формации и накладывается на них и на вмещающие породы в результате деятельности пневматолитовых и гидротермальных растворов).

Надо заметить, что, когда рассматривается вопрос о генетической связи оруденения с магматическими образованиями, речь идет обычно не о формации в целом, а о каком-то одном члене этой формации — продукте конкретного этапа или фазы магматической деятельности (массиве, штоке, дайковой серии и т.д.), поскольку магматическая формация сама является совокупностью образований, парагенетически связанных между собой.

При парагенетической связи источником рудного вещества вероятнее всего являются глубинные магматические очаги, дающие материал и для образования магматических пород формации. Иными словами, породы формации и рудные тела имеют один общий очаг. Именно такие связи характерны для вулканогенных формаций с их вулканогенно-осадочными месторождениями. В этом случае в качестве дополнительного источника рудного вещества могут выступать и породы, сквозь которые циркулируют рудоносные растворы, если возникают условия для выщелачивания определенных компонентов.

Наиболее достоверной, а в ряде случаев практически несомненной представляется связь собственно магматических месторождений с формациями ультрабазит-базитового состава. Это месторождения хромитов в породах дунит-перидотитовой и пироксенит-перидотитовой формаций, месторождения титаномагнетитов, элементов платиновой группы в габбро-пироксенит-дунитовых комплексах, ликвационные сульфидные медно-никелевые руды в ультраосновных и габброидных массивах, месторождения редких земель, тантала и ниобия, апатитов и апатит-магнетитовых руд в щелочных породах и др.

Указанные месторождения располагаются внутри рудоносных интрузивов или в непосредственной близости от них. Образование руд происходит в магматических камерах в результате процессов дифференциации магматического расплава, предшествующих и сопровождающих кристаллизацию. Дифференциация происходит по механизму ликвации или кристаллизационной дифференциации

и приводит к формированию расслоенных массивов. Рудные обособления представляют собой одну из фаз расслоенного расплава. Рудные тела имеют пластообразную форму, образуя согласные залежи сплошных и вкрапленных руд в стратифицированных массивах. Образуются также жилы, линзы, гнезда, положение которых определяется элементами протомагматической тектоники. В некоторых случаях обособившиеся рудные фазы могут быть выжаты во вмещающие породы, где они локализуются в виде секущих жил.

Таким образом, источником рудного вещества магматических месторождений являются магматические массы самого рудоносного массива. Этот очевидный в большинстве случаев вывод подтверждается также наличием иногда закономерной зависимости состава руд месторождений от петрохимических особенностей рудоносной формации. Обособление рудного вещества, условия локализации рудных тел, их форма, состав руд, запасы месторождений — это основные параметры, характеризующие промышленную значимость месторождений такого типа и определяемые только процессами становления магматического массива.

Несколько менее очевидной представляется связь с магматическими формациями грейзеновых и скарновых месторождений. *Грейзеновые* месторождения локализуются в эндоконтактовых частях рудоносных интрузивов и надынтрузивной зоне во вмещающих породах. Это обстоятельство затрудняет получение доказательств генетической связи оруденения с массивами изверженных пород и дает основание для трактовки связей как парагенетических. Грейзеновые месторождения олова, вольфрама, молибдена, лития, бериллия (часто комплексных руд) приурочены к купольным локальным выступам рудоносных плутонов. Такая форма кровли, по мнению большинства исследователей, обеспечивает концентрацию рудоносного потока постмагматических растворов, отделяющихся при кристаллизации магматических масс гранитоидного плутона. В случае уплощенной кровли происходит рассеивание рудных компонентов (В. Т. Покалов, 1984). Для этих месторождений также проявлена зависимость вещественного состава руд от состава магмы, который в свою очередь определяется геолого-тектонической обстановкой. Это служит основанием для достаточно обоснованного выделения рудоносных формаций.

Таким образом, для большинства грейзеновых месторождений с большей или меньшей достоверностью устанавливается, что источником рудного вещества служат кристаллизующиеся массы рудоносных плутонов, состав которых определяет состав руд месторождений. Положение рудных тел, структура месторождений в значительной степени определяются процессами, сопровождающими становление рудоносных интрузивов.

Сложнее решаются проблемы связи с магматическими формациями *скарновых* месторождений. Сложность этого решения заключа-

ется в том, что, по-видимому, наряду с месторождениями собственно скарнового генезиса (для которых источником рудного вещества служат магматические массы рудоносных интрузивов, а условия локализации руд обусловлены развитием процессов скарнирования) существует большое число месторождений, которые могут быть отнесены к разряду скарнированных. Имеются в виду многочисленные месторождения железа, меди, полиметаллов и другие, особенности геологического строения которых позволяют сделать вывод, что рудные тела их были сформированы до внедрения гранитоидов в результате процессов вулканогенно-осадочного или осадочного рудогенеза, а современный облик они приобрели, когда попали в зону контактового воздействия гранитоидной интрузии. Иными словами, для подобных месторождений материнскими являются вмещающие осадочные или вулканогенно-осадочные формации, а прорывающие их массивы относятся к рудообразующим.

Еще менее определенной и труднее доказуемой представляется связь гидротермальной рудной минерализации с гранитоидными интрузиями.

Рудные тела гидротермальных месторождений в виде жил, жильных зон, штокверков, гнезд и сложных комбинированных образований размещаются среди гидротермально измененных вмещающих пород на различном, иногда большом удалении от рудогенерирующих массивов и значительно реже в пределах последних. Особенности размещения, минерального состава, взаимоотношений с вмещающими породами дают основание для интерпретаций генезиса гидротермальных месторождений, разработки различных концепций. Разнообразны и представления об источнике рудного вещества и гидротерм, причинах циркуляции растворов, механизмах переноса минеральных соединений и локализации руд. В качестве источников рудного вещества указываются как магматические, так и внемагматические фильтрационные. Источниками воды помимо остывающих и кристаллизующихся магматических масс считаются захороненные воды, в том числе минерализованные, а также метаморфогенные, атмосферные и морские воды. Во всех моделях формирования гидротермальных месторождений, предусматривающих участие немагматических источников воды, значительная, чаще решающая, роль в образовании минеральной массы рудных тел отводится продуктам инфильтрационного выщелачивания.

Основой для установления характера генетических связей гидротермальных месторождений с конкретными проявлениями изверженных пород следует считать их формационную принадлежность, выражающуюся, в частности, в том, что с определенными по составу магматическими формациями всегда связаны определенные месторождения. Эти связи больше, чем другие факты, дают основания утверждать, что главным поставщиком минеральной массы гидротермальных месторождений служат магматические очаги.

Рудоносность вулканогенных формаций. Как уже было отмечено, спецификой месторождений, связанных с вулканогенными формациями, являются эндогенный источник рудного вещества и экзогенные условия локализации руд. Это определяется в первую очередь особенностями самих вулканогенных формаций, которые по условиям генерации магм близки к интрузивным, а по условиям становления — к осадочным формациям.

Главнейшие критерии связи оруденения с вулканическими комплексами — их пространственная и временна́я сопряженность, повторяемость парагенезисов вулканических пород и руд, близость фаций глубинности, геохимическое родство пород и руд (в том числе по изотопному составу свинца и серы), иногда наблюдаемые переходы от вулканогенных пород к рудам.

Обширная группа месторождений, связанных с вулканизмом, характеризуется рядом общих особенностей, из которых наиболее важными являются следующие:

1) тесная пространственная и временна́я связь оруденения с вулканическими породами;

2) связи оруденения с вулканическими образованиями чаще парагенетические, прямые генетические связи более редки, чем для интрузивных формаций;

3) приуроченность оруденения к вулканическим и вулканотектоническим структурам;

4) широкое распространение месторождений стратиформного типа, образующихся в поверхностных и приповерхностных условиях при участии экзогенных процессов. Среди гидротермальных месторождений резкое преобладание низкотемпературных;

5) приуроченность руд к определенным фациям вмещающих пород, часто наблюдаемая фациальная изменчивость руд, соответствие фациальных признаков руд и окружающих пород;

6) существенная роль метеорной и морской воды в процессе рудоотложения;

7) существование различных минеральных ассоциаций, свидетельствующее о формировании месторождений в неравновесных условиях при резко меняющихся pT-условиях, кислотности-щелочности и т. п.

Среди большого количества типов месторождений, связанных с вулканогенными формациями, наиболее разнообразны и хорошо изучены колчеданные и колчеданно-полиметаллические месторождения.

Рудоносными формациями указанных месторождений являются базальтоидные формации, образующие своеобразные ряды или семейства. Это, в общем, достаточно близкие по составу ассоциации, которые в зависимости от структурного положения провинций, геотектонической обстановки формирования приобретают специфические черты состава, количественного соотношения различных пород,

петрохимических особенностей и в связи с этим характеризуются различной рудоносностью.

Если из обширного семейства базальтовых формаций выбрать ограниченный ряд колчеданоносных, то можно отчетливо увидеть зависимость основного типа оруденения от состава формаций, обусловленного в основном структурным положением провинции. Сопоставление данных по всем колчеданоносным провинциям однозначно свидетельствует о том, что с увеличением доли кислых пород в составе формаций, возрастанием доли калия в вулканитах увеличивается содержание цинка и свинца в составе руд месторождений. В свою очередь, количество кислых вулканитов в составе базальтоидных формаций зависит от характера эволюции базальтовых магм, который определяется строением и составом фундамента геосинклинальных прогибов, а также положением рудоносных формационных зон относительно платформ или срединных массивов.

Таким образом, доказано, что эволюция петрохимических особенностей формаций обусловливает эволюцию состава руд месторождений. Более того, даже в пределах одной формации нередко проявляется зависимость состава руд месторождений от петрохимических особенностей конкретных рудоносных комплексов, с которыми они связаны. Примером может служить базальт-риолитовая формация Рудного Алтая. Она представляет собой совокупность обособленных комплексов, которые с учетом палеовулканологического районирования, главнейших этапов развития вулканизма и петрохимических особенностей объединяются в три субформации: эмсско-эйфельскую, живетско-раннефранскую и позднефранско-раннефаменскую. Отчетливо выражена вертикальная изменчивость формации: наиболее ранние комплексы во всех зонах отличаются повышенными содержаниями калия и более высокой степенью ликвационного расслоения. Снизу вверх по разрезу в кислых породах формации увеличивается содержание натрия и соответственно уменьшается отношение K_2O/Na_2O. Для всех этапов формирования устанавливается антидромное развитие: базальтовый вулканизм следует за риолитовым и характеризуется относительной автономностью (структурной и пространственной).

Риолитовые и базальт-риолитовые комплексы с относительно повышенным содержанием калия и признаками высокой степени ликвационной дифференциации магматических расплавов, предшествующей извержениям, предопределяют, как правило, формирование месторождений полиметаллических и колчеданно-полиметаллических руд с высоким содержанием свинца и бария. С комплексами существенно натриевого состава ассоциируют преимущественно колчеданные и медно-колчеданные месторождения. Таким образом, намечаются эволюционные ряды месторождений от ранних баритполиметаллических к поздним колчеданно-полиметаллическим на северо-востоке Рудного Алтая, где развиты наиболее ранние ком-

плексы, и от полиметаллических до медно-колчеданных на юго-западе, где вулканогенные комплексы более молодого возраста. Этим рядам месторождений соответствуют последовательно образованные рудоносные комплексы, в которых постепенно снижаются относительные количества калия и магния.

В результате детального формационного анализа рудно-алтайской провинции было выявлено два принципиально важных факта. Во-первых, установлено, что вулканогенные среднедевонские комплексы характеризуются относительной автономностью формирования, определяемой приуроченностью к региональным вулканотектоническим депрессиям и выраженной в различной степени дифференцированности, интенсивности проявления, петрохимических особенностях. Во-вторых, показано, что состав руд месторождений обусловлен петрохимическими особенностями рудоносных комплексов, главным образом количеством и соотношениями калия и натрия. Рудно-алтайские месторождения являются наглядным примером, иллюстрирующим связь, зависимость и обусловленность размещения, локализации, особенностей состава руд и строения месторождений — составом, строением, эволюцией рудоносной вулканогенной базальт-риолитовой формации эмсско-раннефаменского возраста.

Следует подчеркнуть, что руды месторождений колчеданного класса по источнику материала, способам его транспортировки, условиям осаждения, характеру последующих преобразований аналогичны многим разновидностям пород, слагающим рудоносные вулканогенно-осадочные формации.

По роли в рудогенезе и отношению к рудным месторождениям геологические формации могут быть подразделены на пять основных типов.

1. ***Рудоносные*** (продуктивные) — формации, в которых руды являются равноправными членами, размещаются среди других пород формации и связаны с ними пространственно и во времени. К этому типу следует отнести осадочные формации, включающие осадочные месторождения, вулканогенно-осадочные формации, вмещающие вулканогенно-осадочные месторождения, наконец, магматические формации, вмещающие связанные с ними месторождения, в первую очередь магматические, иногда пегматитовые, грейзеновые, гидротермальные (некоторые типы жильных и штокверковых месторождений). Однако в последних случаях оруденение чаще всего выходит за пределы рудоносных формаций в породы, которые относятся к другим (вмещающим) формациям.

2. ***Рудовмещающие*** — формации, которые заключают в себе месторождения, не связанные с ними, а образованные в результате проявления процессов, сопровождающих становление других более молодых формаций. В роли рудовмещающих могут выступать породы осадочных, вулканогенно-осадочных и магматических формаций. В основном рудовмещающими формации могут быть по отношению к месторождениям гидротермальным, жильным, штокверковым, метасоматическим, контактовым.

3. ***Рудогенерирующие*** — формации (продуктивные), которые поставляют рудное вещество и обеспечивают транспортировку рудного материала. Это активные материнские формации, к которым в первую очередь относятся магматические формации, продуцирующие гидротермальные месторождения.

4. ***Материнские*** — формации пассивные, являющиеся источником рудного вещества, которое мобилизуется, переносится и откладывается в результате процессов, связанных с другими формациями (рудообразующими). С одной стороны, это формации магматических и других пород, служащие материалом для формирования месторождений кор выветривания. С другой стороны, это формации, заключающие в себе рассеянное рудное вещество, которое образует промышленные концентрации благодаря воздействию процессов, сопровождающих формирование другой формации. Пример — некоторые черносланцевые формации, в которых образуются промышленные месторождения при наложении гидротермальных или контактовых процессов, связанных с формированием более поздних магматических формаций. В этом случае материнские формации являются и рудовмещающими.

5. ***Рудообразующие*** — формации, которые служат источником энергии при рудообразовании, реализуемом за счет вещества, содержащегося в иных геологических формациях (пассивных материнских).

Таким образом, можно выделить две принципиально различные группы формаций. Первую составляют рудоносные формации, в которых все основные свойства связанных с ними месторождений

обусловлены особенностями самих формаций. Связи месторождений с этими формациями парагенетические и генетические. Источники рудного вещества различны, но всегда те же, из которых образуются и другие породы формации.

Вторую группу составляют геологические формации, которые в формировании месторождений участвуют совместно, т. е. выступают своеобразными парами. Это рудогенерирующие и рудовмещающие формации, а также материнские пассивные и рудообразующие формации.

1.3. Основные особенности выделения геолого-промышленных типов рудных месторождений на формационной основе

Связь рудных месторождений с геологическими формациями обусловливает необходимость выделения геолого-промышленных типов на формационной основе. Для многих групп месторождений это давно стало основным принципом типизации, прежде всего для магматических месторождений, связь которых с формациями очевидна, а указание на формационную принадлежность типа служит важной его характеристикой. Например, хромитовые месторождения дунит-перидотитовой формации или ильменитовые месторождения анортозитовой формации. Вошло в практику и обязательное указание на формационную принадлежность вулканогенных месторождений и в первую очередь колчеданных.

Соотношение промышленных типов и геологических формаций, различных для разных групп месторождений. В большинстве случаев геолого-промышленный тип соответствует определенной геологической формации. Например, ликвационные месторождения платины связаны с трапповой формацией, осадочные морские месторождения марганца — с кварц-глауконитовой песчаноглинистой формацией и т. д. Такой тип связи позволяет рассматривать три аспекта соотношений.

1. Главнейшие общие особенности месторождений данного промышленного типа определяются особенностями рудоносной формации. Прежде всего имеются в виду генетический тип месторождений, закономерности размещения и локализации, промышленные типы руд.

2. Геологические условия реализации формации в каждом конкретном случае и связанные с этим ее особенности обусловливают определенные индивидуальные черты месторождений: масштаб запасов, особенности морфологии рудных тел, соотношения рудообразующих компонентов, присутствие и уровень содержаний попутных компонентов и элементов-примесей и др.

3. Нередко отдельные месторождения или их группы бывают приуроченными к различным комплексам или массивам, выделяемым в составе формаций. В этом случае месторождения могут различаться между собой в соответствии с различиями рудоносных комплексов.

Особенности соотношений геолого-промышленных типов и геологических формаций, указанные в пунктах 2 и 3, в некоторых случаях могут служить основой для выделения геолого-промышленных подтипов (когда их различия приобретают принципиальный, существенный в промышленном отношении характер).

Соответствие геолого-промышленного типа определенной геологической формации не означает, что с данной формацией не могут быть связаны месторождения других промышленных типов. Наоборот, известно, что в большинстве случаев практически с каждой формацией связаны не один, а два или несколько промышленных типов, но различных видов полезных ископаемых. Например, карбонатитовая формация является основой для геолого-промышленных типов танталониобиевых, редкометалльных, железных, железотитановых, фосфорных, флюоритовых, наконец, медных и медно-свинцовых руд и т. д. Другим не менее наглядным примером может служить гарцбургит-ортопироксенит-норитовая формация расслоенных интрузий (бушвельдского типа), с которой связаны промышленные типы хромитовых, железных и платиновых месторождений. Точно так же с большинством осадочных и вулканогенно-осадочных формаций обычно связано несколько геолого-промышленных типов месторождений, особенно если учесть неметаллические полезные ископаемые и месторождения углеводородного сырья.

Имеются примеры и других соотношений, когда с одной формацией могут быть связаны различные геолого-промышленные типы одного и того же металла. Так, с формацией (точнее, с вулканоплутонической ассоциацией) гранитоидов повышенной калиевой щелочности в зависимости от конкретной геологической обстановки могут быть связаны молибден-вольфрамовые месторождения скарнового, грейзенового, кварцево-жильного, штокверкового геолого-промышленных типов.

Некоторые геолого-промышленные типы рудных месторождений связаны не с одной формацией, а с группой родственных формаций. Примером может служить тип сульфидных медно-никелевых месторождений, связанный с группой формаций базит-гипербазитового ряда. Состав рудоносных формаций этого ряда определяет состав руд связанных с ними месторождений, что является основой для выделения соответствующих подтипов. Аналогичная ситуация свойственна геолого-промышленному типу медистых песчаников, который разделяется на подтипы в зависимости от приуроченности месторождений к различным пестроцветным формациям песчано-глинистых пород, формирующихся в условиях орогенного режима или режима активизации платформ.

Иногда можно выделять своеобразные ряды геолого-промышленных типов, соответствующие рядам геологических формаций. Это в первую очередь может быть отнесено к семейству колчеданных месторождений, в котором выделяется несколько типов месторождений (от медно-колчеданных до барит-полиметаллических), связанных с вулканогенно-осадочными формациями различного состава.

Обоснование формационной принадлежности геолого-промышленных типов. Типизация месторождений на формационной основе может играть существенную роль в решении определенных задач.

1. Формационный анализ является основой прогнозно-металлогенических исследований. Прогнозные работы любой детальности должны опираться на выделение рудоносных формаций, что значительно повышает объективность и надежность перспективной оценки изучаемых районов.

2. Результативность поисковых работ может быть значительно повышена, когда изучается внутреннее строение рудоносных формаций и учитываются закономерности приуроченности рудных тел к тем или иным элементам формации.

3. Особенности рудоносной формации дают дополнительные сведения, касающиеся морфологии рудных тел, промышленного типа руд, изменчивости основных параметров, учет которых существенно повышает эффективность разведочных работ.

Наконец, особую роль формационная принадлежность месторождений и промышленных типов играет в решении генетических проблем. Можно уверенно утверждать, что она определяет в основном генетический тип месторождений. В связи с этим следует обратить внимание на некоторые методические аспекты решения данных вопросов. Уместно воспользоваться общими принципами системного подхода к изучению месторождения. Согласно Л. И. Четверикову и А. Б. Каждану, модель месторождения может быть представлена системой соподчиненных уровней: минерализованной зоны (толщи) — тела полезного ископаемого — морфологически обособленного участка — локального обособления — минерального агрегата. Генетическая информация может быть получена на любом уровне изучения объекта, однако значимость этой информации ограничивается пределами соседних уровней. Отсюда следует, что генезис месторождения нельзя выяснить на уровне изучения месторождения, иными словами, вопросы генезиса нельзя решать для каждого месторождения в отдельности, наоборот, эта проблема может быть решена только для целого класса (например, геолого-промышленного типа) месторождений. Наглядным примером тому могут служить колчеданные месторождения. До тех пор пока вопросы генезиса решались на уровне изучения отдельных месторождений, практически невозможно было избежать противоречий. Каждое месторождение давало обильную пищу для дискуссий. Рудные тела характеризуются

в одних случаях согласным, в других секущим положением. Ореолы измененных пород фиксируются не только в лежачем, но иногда и в висячем боку рудных залежей. Наряду с рудокластами отмечаются факты метасоматического замещения вмещающих пород. Перечень подобных противоречий может быть продолжен. Решение проблемы было найдено, когда получили систему доказательств принадлежности колчеданных месторождений к вулканогенным формациям базальтового ряда, т. е. решение находится на другом, более общем уровне. При этом все сразу встало на свои места. Вроде бы непримиримые противоречия обернулись системой наглядных и убедительных свидетельств вулканогенно-осадочной природы этих объектов. Оказалось, что рудные тела обнаруживают закономерную приуроченность к вулканическим структурам. Многие их особенности подобны особенностям самих вулканогенных тел. Активные нижние контакты и захоронения последующими осадочными или вулканогенно-осадочными породами свойственны и лавовым потокам, в особенности экструзивам. Последние, как и рудные тела, характеризуются рвущими соотношениями с подстилающими породами, согласным залеганием центральной, или купольной, части, перекрытием более поздними образованиями, содержащими их обломки. В известной степени обобщенная модель рудного тела характеризуется такими же элементами, как и модель экструзива.

Решение вопроса о генезисе месторождений может быть получено только путем изучения всего класса месторождений на основе их связи с геологическими формациями. Изучение конкретных объектов на других, более высоких уровнях позволяет выяснить детали процесса формирования месторождения и его индивидуальные черты. Так, в первом приближении можно считать, что уровень месторождений позволяет выявить закономерности размещения их, уровень рудоносной зоны и рудного тела — особенности локализации, уровень морфологически обособленного участка — фациальную обстановку рудоконцентрации, уровень локального обособления — характер диагенетических процессов, уровень минерального агрегата — особенности процессов преобразования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колчеданные месторождения мира. — М.: Недра, 1979.

2. Справочное пособие по стратиформным месторождениям / под ред. Л. Ф. Наркелюна, А. И. Трубачева. — М.: Недра, 1990.

Глава 2
Основные геолого-промышленные типы месторождений

2.1. Месторождения руд черных металлов

В группу черных металлов объединены железо, марганец, хром, титан, ванадий. Ведущую роль в этой группе играет железо, составляющее основу черной металлургии.

Железо — один из самых распространенных элементов в земной коре (его кларк 4,65 %) и важнейший металл мирового народного хозяйства. Ежегодное производство товарных железных руд составляет 1,2 млрд т. В недрах 97 стран подтвержденные запасы железных руд оцениваются в 194 млрд т. Наибольшими запасами обладают Россия, Австралия, Китай, Бразилия, Украина и США (от 50 до 15 млрд т). Добыча осуществляется в 48 странах. По уровню запасов выделяют месторождения (млн т): мелкие — до 50, средние — 50—300, крупные — 300—1 000, весьма крупные — 1 000—3 000 и реже — уникальные — более 3 000.

Главнейшие минералы железных руд — магнетит, мартит и гематит, гётит и гидрогётит, а также сидерит, шамозит, тюрингит. Содержание железа в рудах должно быть не менее 20 % (богатыми считаются руды с содержанием железа более 57 %), вредных примесей: серы — не более 0,3, фосфора — 0,2, цинка, свинца, мышьяка и меди — 0,1 %.

Железорудные месторождения весьма разнообразны; промышленные объекты известны практически среди всех серий (эндогенной, экзогенной, метаморфической) и групп генетической классификации. Они образовывались во все эпохи начиная от протерозоя до современной. Примерно 66 % мировых разведанных запасов относится к докембрию, 3,9 — к нижнему палеозою, 11,6 — к верхнему палеозою, 12,0 — к мезозою и 5,9 % — к кайнозою. Основными геолого-промышленными типами являются: а) железистые кварциты и связанные с ними богатые железные руды; б) осадочные пластовые месторождения; в) титаномагнетитовые месторождения в основных и ультраосновных породах; г) скарново-магнетитовые месторождения. В этих типах сосредоточено 99,7 % общих запасов, они обеспечивают 94 % мировой добычи. Кроме того, железные руды добываются из карбонатитовых, вулканогенно-осадочных месторождений и месторождений кор выветривания.

Месторождения железистых кварцитов содержат подавляющую часть (76 %) мировых ресурсов железных руд. Они связаны с докем-

брийскими метаморфическими железисто-кремнистыми формациями и распространены на всех щитах древних платформ. Согласные, многоярусные залежи пластовых тонкополосчатых руд простого минерального состава (магнетит, гематит) образуют крупные и уникальные месторождения в пределах гигантских железорудных бассейнов. К этому типу относятся российские месторождения Курской магнитной аномалии (КМА), Кольского полуострова и Карелии, Южной Якутии, Малого Хингана и др. Месторождения КМА Михайловское, Лебединское, Стойленское и другие относятся к числу уникальных. Железистые кварциты представляют собой полосчатые руды с ритмичным чередованием существенно рудных и кварцевых полосок мощностью от 2 до 10 мм при содержании железа от 25 до 45 % и отсутствии вредных примесей.

С железистыми кварцитами связаны месторождения богатых руд, из которых одни сформировались в связи с магнезиально-железистым метасоматозом в условиях амфиболитовой или зеленосланцевой фаций метаморфизма, другие образовались за счет выветривания железистых кварцитов. Содержание железа в рудах составляет от 52 до 69 % при ничтожном содержании вредных примесей. Запасы богатых руд в месторождениях КМА достигают 10,5 млрд т.

Осадочные пластовые месторождения приурочены к терригенным и карбонатным формациям — морским геосинклинальным и платформенным, а также континентальным озерно-болотным, речным и т. д. Рудные тела сложены хемогенно-осадочными оолитовыми преимущественно бурожелезняковыми рудами. Нередко они достигают громадных размеров: в Керченском бассейне (Украина) запасы составляют 2 млрд т, в Аятском (Казахстан) — свыше 8 млрд т, в Клинтонских месторождениях (США) — 14,3 млрд т. На долю осадочных месторождений приходится 14,8 % мировых запасов и около 15 % добычи железных руд.

Рудные тела залегают в виде устойчивых протяженных (иногда до 100 км) пластов мощностью от 0,5 до 30 м, одиночных или образующих пачки, в которых насчитывается иногда до десятка пластов. Содержание железа составляет от 20 до 50 %. Руды сложены оолитами гидрогётитового, гётитового, лептохлоритового или сидеритового состава с примесью обломочного песчано-глинистого материала.

Магматические титаномагнетитовые месторождения связаны с интрузивами основного и ультраосновного состава, относящимися: а) к дунит-пироксенит-габбровой формации (качканарский тип); б) формации автономных анортозитов (месторождения Канады); в) платформенной формации ультрабазит-базитовых расслоенных интрузивов (бушвельдский тип); г) габбровым формациям складчатых областей. По тектонической приуроченности выделяются рудоносные формации докембрийских платформ, позднепротерозойских и фанерозойских складчатых областей и зон активизации древних платформ.

В магматических месторождениях заключено 5,5 % мировых запасов железных руд, они обеспечивают 6 % добычи. В некоторых месторождениях запасы руды превышают 1 млрд т.

Формирование рудных тел связано с процессами расслоения магматических масс. В основном рудном минерале титаномагнетите выявлены структуры распада твердого раствора (магнетит + ильменит). Содержание железа составляет от 17 % во вкрапленных рудах до 48—58 % в массивных. Помимо железа в рудах в промышленных количествах содержатся титан (от 0,8—2 % до 12—14 % TiO_2), ванадий (0,1—0,5 % V_2O_5), платиноиды. Наиболее ярким представителем этой группы является Гусевогорское месторождение на Урале. Суммарные запасы руды превышают 6 млрд т, в них содержится едва ли не половина мировых запасов ванадия.

К числу крупнейших относятся месторождения Бушвельдского массива (ЮАР), Канады (Аллард-Лейк), США (Сэндфорд-Лейк), Финляндии (Отанмяки) и др.

Скарново-магнетитовые месторождения связаны с гранитоидами повышенной основности (плагиогранитами) и размещаются в складчатых областях различного возраста. Рудные тела располагаются среди скарнов, которые подразделяются на известковистые, магнезиальные и силикатные. Рудные тела имеют пластообразную, столбообразную, неправильную форму и сложены богатыми магнетитовыми и сульфидно-магнетитовыми рудами. Масштаб месторождений средний и крупный. В скарновых месторождениях заключено 3,4 % мировых запасов железа, и они дают около 3 % добычи. Для России эти месторождения более значительны — почти 15 % запасов и более 19 % добычи. Наибольшей известностью пользуются месторождения Магнитогорское, Гороблагодатское, Высокогорское (Урал, Россия), Сарбайское, Соколовское (Казахстан), Дашкесанское (Азербайджан), Айрон-Спрингс (США) и др.

Марганец — важнейший металл черной металлургии, чрезвычайно дефицитный для России. Общие мировые запасы марганцевых руд в 51 стране превышают 10 млрд т, в том числе в ЮАР — 4 млрд т, Украине — 2,4 млрд т. Добыча марганцевой руды в 26 странах достигла 25 млн т, более половины добывается в ЮАР, Китае, Австралии, Бразилии.

К уникальным относятся месторождения с запасами более 1 млрд т, к крупным — с запасами в сотни миллионов тонн, к средним и мелким — с запасами в десятки миллионов тонн. В промышленности используются два типа руд. Оксидные руды (пиролюзит, манганит, псиломелан, браунит и др.) имеют осадочное происхождение, оолитовое и конкреционное сложение, содержат 30—45 % Mn, 10—18 % SiO_2, не более 0,2 % P. Вторичные оксидные руды, образующиеся в процессах выветривания, по составу и свойствам близки первичным.

Уникальные и крупные концентрации связаны с осадочными формациями и в меньшей степени с вулканогенно-осадочными. Обра-

зование марганцевых месторождений в истории Земли было крайне неравномерно: крупнейшая докембрийская марганцеворудная эпоха ознаменовалась интенсивным накоплением осадочных руд, которые впоследствии были метаморфизованы; вторая крупная эпоха — олигоценовая, с ней связано образование уникальных осадочных месторождений Украины, Грузии; с конца мела формируются коры выветривания, а с эоцена — железомарганцевые конкреции океана.

Основными геолого-промышленными типами марганцевых месторождений являются: а) осадочные морские; б) вулканогенно-осадочные; в) месторождения выветривания. Кроме того, перспективным типом, освоение которого возможно в ближайшем будущем, являются железомарганцевые конкреции абиссальных котловин Мирового океана.

Морские осадочные месторождения содержат 75 % мировых ресурсов марганцевых руд. К этому типу относятся уникальные и крупные олигоценовые месторождения Никопольское, Большетокмакское (Украина), Чиатурское (Грузия), меловое Грут-Айленд (Австралия).

Пластовые и линзообразные рудные тела Никопольского бассейна средней мощностью 2—4 м прослеживаются в виде широкой (до 2,5 км) прерывистой полосы на 250 км. Они приурочены к рудоносной кварц-глауконитовой песчано-глинистой формации, сложенной глинами, глауконитовым песком, известняками и др. Марганцевые руды являются седиментационно-диагенетическими образованиями, часто имеют конкреционное строение. На всех месторождениях отчетливо выражена фациальная зональность: в прибрежных условиях накапливались оксидные руды, в более глубоководных — карбонаты.

Вулканогенно-осадочные месторождения связаны с вулканогенно-кремнистыми и доломитоизвестняковыми комплексами базальтоидных формаций. Это преимущественно палеозойские месторождения оксидных и карбонатных руд, незначительные по масштабу. Некоторые из них характеризуются комплексным составом руд: железо—марганец—свинец—цинк—барий (Атасуйские месторождения, Казахстан).

Месторождения выветривания образуются по марганецсодержащим метаморфизованным силикатным и карбонатным породам в условиях тропического климата. В этих месторождениях сосредоточено более трети мировых запасов марганца. Марганценосные коры выветривания сложены песчано-глинистыми породами со скоплениями оксидных руд (пиролюзит, псиломелан, манганит и др.). Содержание марганца — 44—48 %, железа — 4,4, кремнезема — 7—13, глинозема — 3,2, фосфора — 0,17 %. Крупнейшим месторождением этого типа является Постмасбург (ЮАР). Крупные месторождения известны в Бразилии (штат Минас-Жерайс), Западной Африке, Индии.

Хром — металл, основным потребителем которого является черная металлургия, около 10 % хромитовых руд используется для изготовления огнеупоров, 5 % — в химической промышленности. Подтвержденные запасы в 26 странах составляют 2,4 млрд т хромитов; 70,8 % запасов сосредоточено в ЮАР, 12,5 — в Казахстане, 5,8 % — в Зимбабве. Ежегодное производство товарной руды — около 16,5 млн т. Уникальные месторождения обладают запасами в сотни миллионов тонн; крупные и средние — в десятки миллионов тонн, мелкие — в единицы тонн. Руды сложены хромитами — хромшпинелидами переменного состава. К промышленным рудам относятся сплошные и густовкрапленные хромиты с высоким содержанием Cr_2O_3 и благоприятным отношением Cr_2O_3/FeO. Выделяются три типа руд. Наиболее высококачественные — металлургические руды, используемые для производства феррохрома, содержат 50—52 % Cr_2O_3, отношение $Cr_2O_3/FeO > 2,5$. Химический тип руд — среднехромистый с повышенной глиноземистостью, содержит более 36 % Cr_2O_3 и не более 14—16 % Fe_2O_3. Огнеупорные хромитовые руды должны содержать 32—33 % Cr_2O_3 и отношение $Cr_2O_3/FeO < 2,5$.

Материнской для промышленного хромитового оруденения является только дунит-гарцбургитовая группа формаций, при этом хромиты локализуются в максимально насыщенных оливином дунитах. Выделяют три геолого-промышленных типа месторождений: 1) раннемагматические; 2) позднемагматические; 3) россыпные (промышленное значение их несущественно).

Раннемагматические месторождения представлены пластообразными телами хромитовых руд в стратифицированных массивах ультраосновных пород, сформированных в областях активизации платформ. Это ведущий тип хромитовых месторождений, на его долю приходится почти 82 % мировых запасов. Классическим примером служит Бушвельдский массив (ЮАР) — грандиозный лополит размером 460×250 км. Хромитовые руды сосредоточены в пироксенитах и анортозитах критической зоны. Руды образуют параллельные пластообразные залежи мощностью от 0,2 до 1,8 м. Число таких пластов достигает 25. Они прослеживаются на десятки километров при очень устойчивой мощности. Хромиты нижних пластов характеризуются более высоким качеством.

Подобное строение имеют месторождения комплекса Великой Дайки в Зимбабве, руды которых относятся к металлургическому типу.

Позднемагматические месторождения локализованы в ультраосновных массивах складчатых поясов. Месторождения связаны с поясами дунит-гарцбургитовых массивов офиолитовых серий. В груборасслоенных хромитоносных массивах рудные тела имеют форму уплощенных линз, а также жилообразных, гнездообразных тел. Наиболее крупные месторождения этого типа известны в пределах Кемпирсайского массива (Южный Урал, Казахстан). Размеры рудных тел по простиранию достигают 1,5—2 км при мощности от

25 до 180 м. В некоторых месторождениях количество рудных тел исчисляется несколькими десятками. Этот тип характеризуется наиболее высокосортными хромитовыми рудами.

2.2. Месторождения руд цветных металлов

К цветным металлам отнесены те, которые определяют основной круг деятельности цветной металлургии: алюминий, магний, никель, кобальт, медь, свинец и цинк, олово, вольфрам, молибден, висмут, сурьма, ртуть.

Алюминий — один из важнейших конструкционных материалов. Благодаря своей легкости, механической прочности, высокой электропроводности, большой коррозионной устойчивости он нашел широкое применение в авиационной технике, транспортном машиностроении, строительной индустрии и др. По объему производства и потребления в мире алюминий занимает второе место среди металлов после железа. Основная алюминиевая руда — бокситы.

Подтвержденные запасы бокситов в 39 странах мира составляют 25 млрд т, из которых 29,6 % находится в Гвинее, 14,8 — в Австралии, 8 % — на Ямайке. Добывают бокситы в 24 странах в количестве 162,4 млн т в год, 95 % добычи приходится на 10 основных стран, среди которых — Австралия (36 %), Бразилия (12 %), Гвинея (более 10 %), Китай (более 9 %). Производство глинозема в странах, добывающих бокситы, превысило 62 млн т, а выплавка первичного алюминия в 45 странах достигла 30 млн т. В современных условиях налажено производство алюминия из нефелиновых, алунитовых и других высокоглиноземистых пород (каолиновых глин, кианитовых, силлиманитовых, андалузитовых сланцев).

Уникальными считаются месторождения бокситов с запасами более 500 млн т, крупными и средними — 500—50, мелкими — менее 50 млн т.

Содержание глинозема в промышленных рудах превышает 28 %. На качество руд влияет содержание кремнезема, железа, кальция, серы; по соотношению этих компонентов определяются сорта руд.

Бокситы представляют собой остаточную или осадочную породу, состоящую из гидроксидов алюминия, оксидов и гидроксидов железа, глинистых минералов и кварца. По минеральному составу различают бокситы гиббситовые, бемитовые, диаспоровые. При этом замечено, что в молодых, не претерпевших преобразования месторождениях преобладают гиббситовые руды, а в более древних и преобразованных они сменяются бемитовыми и диаспоровыми.

Все промышленные типы бокситовых месторождений являются экзогенными образованиями и подразделяются на месторождения выветривания и осадочные. Месторождения выветривания делятся

Таблица 2.1. **Главнейшие геолого-промышленные типы месторождений алюминия**

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Условия залегания	Состав руд	Примеры месторождений	Масштабы залежей	Способ разработки
1. Остаточный латеритный	а) Современная кора выветривания на древних сланцах, базальтах и др.	Горизонтальные залежи площадью 5—15 км^2, мощность до 10—15 м	Приповерхностные на плоских возвышенностях — бовалях; перекрыты железистой кирасой	Гиббсит, гематит	Боке, Фриа (Гвинея)	Уникальные, до 3 млрд т	Открытый
	б) Древняя кора выветривания на филлитовых сланцах и метабазитах	Крупный горизонт. Залегающие тела протяженностью до нескольких десятков километров, мощность — несколько метров	Залежи перекрыты осадочными породами палеозоя, мезозоя, кайнозоя, мощность 450—600 м	Бёмит, гиббсит, шамозит	Висловское (КМА, Россия)	Крупные, 80 млн т	Подземный (предпол.)
2. Остаточный переотложенный	Молодые мезозойско-кайнозойские песчано-глинистые, примыкающие к площадям развития латеритных кор выветривания	Линзообразные, пластообразные	1—3 горизонта среди песчаников, глин и др.	Гиббсит, бёмит, гематит, каолинит, сидерит	Гвианская береговая равнина, Уэйн, Гов (Австралия)	Крупные	Открытый

3. Осадочный платформенный	Терригенные, карбонатно-терригенные, вулканогенно-терригенные континентальные, красноцветные, иногда суглинистые	Линзообразные, пластообразные	На глубинах 40—150 м под осадочными формациями палеозоя, мезозоя	Гиббсит, бёмит, каолинит	Тихвинская группа, Северо-Онежский район (Россия)	Мелкие, средние, редко — крупные	Открытый
4. Осадочный геосинклинальный	Карбонатная (терригенная, континентальная, мелководная терригенно-карбонатная, рифогенная субформации)	Линзовидные, пластообразные	Среди дислоцированных осадочных толщ	Диаспор, бёмит, редко — гиббсит, гематит, пирит	Красная Шапочка и др., Северо-Уральский бокситоносный район (СУБР) (Россия)	Крупные, средние	Подземный

Таблица 2.2. **Главнейшие геолого-промышленные типы месторожде-**

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Минеральный состав руд
1. Сульфидный медноникелевый (магматический)	Габбро-троктолитовая, габбро-долеритовая и другие базит-гипербазитовые руды	Пластовые и линзовидные в расслоенных массивах, висячие и донные вкрапленных и массивных руд	Главный: пирротин, пентландит, халькопирит; второстепенный: кубанит, магнетит, ильменит, барит, ковеллин
2. Медно-порфировый (гидротермальный плутоногенный)	Габбро-диорит-плагиогранитного ряда	Изометричные штокверковые в апикальных частях рудоносных порфировых штоков	Главный: пирит, халькопирит, молибденит; второстепенный: барит, энаргит, блеклые руды, халькозин
3. Колчеданный (вулканогенный)	Дифференцированные вулканогенные базальтоидного ряда	Линзовидные, пластообразные, согласные с вмещающими породами	Главный: пирит, халькопирит, сфалерит; второстепенный: галенит, блеклые руды, барит
4. Стратиформные (медистые песчаники и сланцы)	Пестроцветные осадочные (вулканогенно-осадочные) моласового типа	Пластовые, пластообразные, лентовидные	Главный: пирит, халькопирит, барит, халькозин; второстепенный: галит, сфалерит, магнетит, ильменит

на остаточные латеритные и остаточные переотложенные, а осадочные — на залегающие в терригенных формациях платформенных областей и связанные с карбонатными формациями геосинклинальных областей. Характеристика геолого-промышленных типов приведена в табл. 2.1.

Основные промышленное значение имеют латеритные месторождения (90 % мировых запасов).

ний меди

Средние содержания элементов, мас.%	Попутные компоненты	Масштабы месторождений	Относительная доля в мировых запасах, %	Примеры месторождений	Способ отработки
Cu = 0,2—7,5; Ni = 0,2—4,0	Co, ЭПГ, Au, Ag, Se, Te	Средние, крупные	2—2,5	Норильский район, Печенга (Россия)	Подземный
Cu = 0,2—3,0; Mo = 0,001—0,02	Mo, Au, Ag, As, Se, Te, Re, Pb, Zn	Крупные, уникальные	65—70	Чукикамата, Эль-Тениенте (Чили), Коунрад (Казахстан), Песчанка (Россия)	Открытый
Cu = 1,0—6,0; Zn = 1,0—4,0	S, Au, Ag, Cd, Se, Te, In, Ta, Ge	Мелкие, средние, крупные	5—8	Гайское, Сибайское (Южный Урал, Россия), Рио-Тинто (Испания), Скуриотисса (Кипр)	Открытый, подземный
Cu = 1,0—6,0	Pb, Zn, Au, Ag, Cd, Mo, Re, Fe, Co, U, ЭПГ, Ni	Крупные, уникальные	15—20	Удокан, Джезказган (Казахстан), Чамбиши (Замбия), Олимпик Дам (Австралия)	Открытый, подземный

В России разрабатываются бокситовые месторождения Северо-Уральского (СУБР) и Южно-Уральского (ЮУБР) бокситоносных районов (84 % добычи), а также Тихвинского района (16 %). В связи с недостатком сырья Россия ежегодно ввозит более 2 млн т бокситов и около 4 млн т глинозема, главным образом из Гвинеи.

Медь обладает комплексом замечательных свойств — высокой электропроводностью, химической устойчивостью, пластичностью,

способностью образовывать сплавы с различными металлами. Наиболее широко применяются сплавы меди с оловом (бронза), цинком (латуни), никелем (мельхиор) и алюминием (алюминиевые бронзы). По объему производства и потребления медь занимает третье место после железа и алюминия.

Подтвержденные запасы меди в 70 зарубежных странах превышают 590 млн т. Наиболее крупными запасами владеют Чили, Австралия, Перу, США, Польша, Замбия и др. По разведанным запасам Россия занимает девятое место в мире. В России запасы меди учтены на 121 месторождении, 72 из которых являются собственно медными, остальные — комплексными. Ежегодное производство меди в мире превышает 15 млн т.

Месторождения меди с запасами более 5 млн т относятся к уникальным (всего известно 18 таких месторождений, 4 из них находятся в России). Крупные месторождения имеют запасы от 1 до 5 млн т, средние — от 0,2 до 1, мелкие — менее 0,2 млн т. Богатые руды содержат более 2 % меди, рядовые — 1—2, бедные — менее 1 %. Среднее содержание меди в добываемых рудах в настоящее время составляет 1—0,8 %.

Руды медных месторождений в большей части комплексные, при этом до 80 % меди извлекается из сульфидных руд. Остальное приходится на карбонаты, оксиды, силикаты и самородную медь. Всего из руд различных типов извлекается более 13 компонентов, доля попутной продукции в суммарной стоимости сырья составляет 40—50 %.

Среди промышленных месторождений меди выделяют магматические, карбонатитовые, скарновые, гидротермальные плутоногенные, колчеданные, стратиформные (табл. 2.2).

Свинец и цинк в природе встречаются совместно, образуя комплексные полиметаллические месторождения. Разведанные запасы свинца в 70 зарубежных странах оцениваются в 114 млн т, цинка — 250 млн т. Наиболее крупными запасами свинца и цинка обладают США, Австралия, Казахстан, Канада, Китай. Россия занимает четвертое место в мире по запасам свинца и пятое по запасам цинка. Суммарные запасы свинца и цинка в уникальных месторождениях превышают 5 млн т, в крупных месторождениях колеблются от 5 млн т до 600 тыс. т, в средних — от 600 до 200 тыс. т, в мелких — менее 200 тыс. т. По масштабам использования в промышленности свинец и цинк, каждый в отдельности, уступают меди, а в сумме превосходят ее. Ежегодное производство в концентратах составляет (млн т): свинца — 2,8—3,0, цинка — 9,1, рафинированного свинца — 7,3, металлического цинка — 10,1.

В России месторождения свинца и цинка сосредоточены на Урале, Северном Кавказе, Рудном Алтае, Енисейском кряже, в Забайкалье, Приморье.

В рудах свинцово-цинковых месторождений встречается до 30 рудных минералов, однако основное промышленное значение имеют

лишь галенит и сфалерит. Среднее значение стандартного отношения Zn:Pb для всех генетических типов месторождений по запасам и добыче составляет (1,4—1,85):1. Попутными компонентами свинцово-цинковых руд являются Cd, Ag, Au, Se, Te, Ge, Ta, Ga, In. В свинцово-цинковых рудах сосредоточено более 80 % мировых запасов кадмия, 40—50 % таллия, 25—30 % селена, теллура, индия, 15—20 % галлия и висмута. Свинцово-цинковые руды дают 50 % мировой продукции серебра. Свинцово-цинковые руды относятся к богатым при содержании свинца свыше 4 % или суммы свинца и цинка свыше 7 %; руды среднего качества содержат 2—4 % свинца или 4—7 % суммы свинца и цинка; бедные руды характеризуются содержанием свинца 1,2—2 % или суммы свинца и цинка не ниже 4 %.

Среди промышленных месторождений свинца и цинка выделяются скарновые, плутоногенные, гидротермальные, месторождения экзогенно-эндогенной серии. Последние могут быть подразделены на три типа: 1) колчеданно-полиметаллические месторождения в вулканогенных формациях; 2) колчеданно-полиметаллические месторождения в терригенных формациях; 3) стратиформные месторождения в карбонатных формациях (табл. 2.3).

Промышленная значимость этих типов весьма существенна: в первых двух сосредоточено более 60 % подтвержденных запасов, и они обеспечивают более 45 % добычи свинца и цинка; третий тип содержит почти 30 % запасов и дает почти треть добычи.

Никель и кобальт: запасы и добыча никеля и кобальта сосредоточены в основном в двух геолого-промышленных типах месторождений — сульфидных медно-никелевых и силикатных никелевых. Разведанные запасы никеля в 30 зарубежных странах составляют около 65 млн т. Наиболее крупными запасами обладают Австралия, Куба, Канада. В России никелевые месторождения расположены на Кольском полуострове, в Красноярском крае, на Южном Урале. Уникальные месторождения содержат более 500 тыс. т металла, крупные — 500—250 тыс. т, мелкие — менее 100 тыс. т. Основу минерально-сырьевой базы никеля составляет относительно небольшое число месторождений: в 34 наиболее крупных сосредоточены 91 % мировых подтвержденных запасов, они обеспечивают 93 % мировой добычи. Добыча никелевых и никельсодержащих руд ведется в 26 странах, ежегодное производство металлического никеля достигло 1,3 млн т. Основными мировыми производителями являются Россия (более 23 %), Канада (более 14 %) и Австралия (14 %).

Подтвержденные запасы кобальта в 30 зарубежных странах оцениваются в 7,4 млн т. Наиболее крупные запасы кобальта находятся в Конго (более 46 %), на Кубе (13,6 %). Годовое производство рафинированного кобальта достигло 46,3 тыс. т и обнаруживает тенденцию к росту. В уникальных месторождениях кобальта запасы превышают 50 тыс. т, в крупных составляют 50—25, в средних — 25—10, в мелких — менее 10 тыс. т. Значительное количество кобальта по-

Таблица 2.3. **Главнейшие геолого-промышленные типы свинцово-**

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Минеральный состав руд
1. Колчеданно-полиметаллический в вулканогенных формациях	Контрастно и последовательно дифференцированные базальтоидные — базальт-риолитовая, базальт-андезит-дацитриолитовая и др.	Линзовидные, пластообразные тела приурочены к палеовулканическим структурам. Протяженность — до 1—2 км, мощность — от нескольких метров до 15—20 м	Главный: сфалерит, галенит, халькопирит, пирит; второстепенный: тетраэдрит, теннантит, марказит, арсенопирит, золото и др.
2. Колчеданно-полиметаллический в терригенных формациях	Углеродистые терригенно-флишоидные формации с редуцированными вулканогенными комплексами базальтового или риолито-базальтового ряда	Протяженные пластовые тела, иногда многоярусные залежи. Длина тел — до нескольких километров, мощность — несколько десятков метров	Главный: сфалерит, галенит, барит, пирротин; второстепенный: сульфосоли Pb, пирит, магнетит, арсенопирит, буланжерит и др.
3. Стратиформный в карбонатных формациях	Карбонатные (известняково-доломитовые) формации подвижных зон платформ, реже — срединных массивов и миогеосинклинальных зон	Согласные пластовые и лентовидные залежи в одном или нескольких стратиграфических горизонтах. Протяженность — от сотен метров до первых километров, ширина до 1 км, мощность 0,5—200 м	Главный: галенит, барит, сфалерит; второстепенный: пирит, марказит, халькопирит
4. Скарновый	Гранитоидные комплексы вулканоплутонических ассоциаций	Пластоподобные, трубообразные тела среди известковых скарнов	Главный: галенит, сфалерит; второстепенный: арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, антимонит

цинковых месторождений

Средние содержания элементов, мас.%	Попутные компоненты	Масштабы месторождений	Относительная доля в мировых запасах	Примеры месторождений	Способ отработки
Pb = 4; Zn = 6; Cu = 0,3; Au = 3 г/т; Ag = 8 г/т	Cd, Sb, As, Ag, Au, Ba	Крупные, уникальные	60	Риддер-Сокольное, Тишинское (Алтай, Казахстан), Корбалихинское (Рудный Алтай, Россия), Куроко (Япония), Кидд-Крик, (Канада), Фалун (Швеция)	Подземный
Pb = 0,4—7; Zn = 0,1—6,5	Au, Ag, Cu, Cd, As, Ba	Крупные, уникальные		Филизчай (Азербайджан), Холоднинское, Горевское (Россия), Маунт-Айза (Австралия), Атасуйские (Казахстан)	Подземный
Pb = 0,4—5,8; Zn = 1,0—1,4; Ba = 3,3—6,4	Ba, Ag, Cd, Se, Te, In	Крупные, уникальные	30	Сардана (Россия), Миргалимсай (Казахстан), месторождения долины р. Миссури (США)	Подземный и открытый
Pb = 6—12; Zn = 6—14; Ag = 60 г/т	Cu, Ag, Sn, Bi	Средние и мелкие	6	Николаевское (Приморье, Россия), Кызыл-Эспе, Аскоран (Казахстан), Карамазар (Узбекистан)	Подземный и открытый

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Минеральный состав руд
5. Плутоногенный гидротермальный	Гранитоидные формации и риолитовые комплексы вулканогенных формаций	Жильные тела, жильные поля. Протяженность — несколько сотен метров или километров, мощность — от доли метра до 5 м	Главный: галенит, сфалерит; второстепенный: халькопирит, пирит, пирротин, блеклые руды

ступает также из руд стратиформных медно-кобальтовых месторождений.

Магматические месторождения сульфидных медно-никелевых руд — это около 29 % запасов никеля, месторождения кор выветривания латеритных руд — более 71 %. В России в сульфидных медно-никелевых месторождениях содержится 89 % разведанных запасов, в силикатных никелевых — 11 %.

Сульфидные медно-никелевые месторождения заключают в себе почти 9 % запасов и обеспечивают 32 % производства кобальта. Сульфидные медно-никелевые руды (см. табл. 2.2) состоят из пирротина, халькопирита, пентландита. Среднее содержание никеля в них колеблется от 0,25 до 4 %, меди — от 0,2 до 7,5 %, кобальта — от 0,06 до 0,11 % в зависимости как от типов месторождений, так и от типов руд — сплошных, брекчиевидных или вкрапленных. Стратиформные медно-кобальтовые месторождения (медистые песчаники) Замбии, Конго и Уганды — один из основных источников кобальта (более 44 % запасов, почти 43 % добычи).

Латеритные никелевые руды формируются при выветривании ультрабазитов. Мощность кор выветривания достигает 40—50 м. Среднее содержание никеля в латеритных рудах — от 0,9 до 2,9 %. В некоторых разновидностях руд оно повышается до 3—4 % и даже до 9 %. Среднее содержание кобальта — 0,1 %, в богатых рудах достигает 3—4 %.

Латеритные никелевые месторождения составляют более 46 % запасов кобальта и обеспечивают свыше 41 % его добычи.

В перспективе крупными источниками никеля и кобальта могут стать месторождения океанского дна — скопления железомарганцевых конкреций и кобальтоносных корок подводных гор. Ресурсы никеля и кобальта в этих образованиях грандиозны — измеряются миллиардами тонн.

Окончание табл. 2.3

Средние содержания элементов, мас.%	Попутные компоненты	Масштабы месторождений	Относительная доля в мировых запасах	Примеры месторождений	Способ отработки
Pb до 3	Ag, Cu	Мелкие, средние	Pb = 3; Zn = 9	Садон, Згид (Северный Кавказ, Россия), Гарц, Рудные горы (Германия)	Подземный

Олово, вольфрам, молибден — три металла, которые очень часто образуют совместные, комплексные месторождения в различных сочетаниях между собой, а также с другими элементами (табл. 2.4).

Олово извлекают из оловянных и комплексных олововольфрамовых, оловосеребряных и оловополиметаллических руд. Разведанные запасы составляют 8 млн т, 38 % из них заключено в россыпных месторождениях. Ежегодное производство олова в концентрате составляет около 280 тыс. т, рафинированного олова — более 345 тыс. т.

Уникальные коренные месторождения олова характеризуются запасами более 100 тыс. т, крупные — 100—25 тыс. т, средние — 25—5 тыс. т, мелкие — менее 5 тыс. т. Наиболее крупными запасами обладают Китай, Бразилия, Малайзия, Индонезия. В России основные месторождения сосредоточены в Верхоянско-Чукотской, Сихотэ-Алинской и Монголо-Охотской рудных провинциях.

Основной рудный минерал промышленных оловянных руд — касситерит. Содержание олова в рудах коренных месторождений колеблется от 1 % и более в богатых до 0,1 % в бедных рудах. Россыпные месторождения разрабатываются при содержании касситерита 100—200 г/м^3, в богатых россыпях его содержание достигает 10—15 кг/м^3.

Россыпи — ведущий геолого-промышленный тип оловянных месторождений, они обеспечивают 75 % производства металла.

Из коренных месторождений наибольшее значение имеют грейзеновые, вулканогенные гидротермальные и плутоногенные гидротермальные, последние содержат более 50 % балансовых запасов олова в России.

Вольфрам — металл твердых сплавов, специальных сортов стали для электротехнической и электронной промышленности. Разведанные запасы составляют 3 млн т. Наиболее крупные запасы находятся в Китае, Казахстане, Канаде, США, Вьетнаме. Россия занимает третье

Таблица 2.4. **Основные геолого-промышленные типы месторождений**

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Минеральный состав руд
Скарновый Олововольфрамовый Молибден-вольфрамовый Полиметаллически-вольфрамовый	Интрузивные и вулканоплутонические комплексы известково-щелочного характера, многофазные, пересыщенные глиноземом, отличающиеся повышением щелочности и активности калия к концу магматического процесса	Прерывистые тела сложной формы Плитообразные тела Минерализованные тектонические зоны	Касситерит, станнин, шеелит Магнетит, пирит, Молибденит и другие сульфиды Молибдошеелит
Грейзеновый Олововольфрамовый Молибден-вольфрамовый		Штокверки, жильные зоны, трубообразные тела, штоки, жилы	Касситерит, вольфрамит, арсенопирит, циннвальдит Олововольфрамовые, молибден-вольфрамовые, вольфрамит, касситерит, молибденит, магнетит, пирит, пирротин, шеелит, висмутин, касситерит, вольфрамит, флюорит
Гидротермальный плутоногенный Касситерит-кварцевые олововольфрамовые Касситерит-силикатный	Металлогеническая специализация рудоносных гранитоидов связана с их петрохимическими особенностями: молибденоносные плутоны характеризуются повышенной щелочностью,	Жилы, штокверки, минерализованные зоны жильной серии протяженностью до нескольких километров в надкупольных зонах	Касситерит, вольфрамит, флюорит Сульфиды Zn, Pb, Cu, шеелит, молибденит, висмутин

олова, вольфрама, молибдена

Средние содержания элементов, мас.%	Попутные компоненты	Масштабы месторождений	Относительная доля в мировых запасах, %	Примеры месторождений
Sn = 0,3—0,5 (до 20)		Мелкие, средние	Sn = 0,7	Кительское (Россия), Маунт-Гарнет (Австралия)
WO_3 = 0,06—0,6 Mo = 0,03—0,1	Bi, Au, Cu, Be	Крупные, средние	W = 25,6 Mo = 2,1	Тырныауз (Россия), Лянгар, Ингичке (Узбекистан)
WO_3 = 0,8—2,0	Pb, Zn	Средние, крупные		Восток II (Россия)
Sn = 0,1—2,5	Li, Ta, Nb, Zr, F, TR	Мелкие, средние	Sn = 15,6	Этыка, Бутугычаг, Экуг (Россия), Питинга (Бразилия), Альтенберг (Германия), Циновец (Чехия)
WO_3 = 1—2; Mo = 0,01—0,2; WO_3 = 0,3—1,0	Bi, Nb, Ta, Be, Au, Sc		W = 60 %	Акчатау (Казахстан), Югодзыр (Монголия)
Sn = 0,3—0,8; WO_3 = 0,5—1,5		Средние и мелкие	Sn = 3,9	Пыркакайское (Чукотка, Россия)
WO_3 = 0,8—1,2;	Zn, Pb, Cu, W	Средние и крупные	Sn = 6,3	Депутатское (Якутия, Россия)

Геолого-промышленный тип	Рудоносные формации	Рудные тела	Минеральный состав руд
Молибден-вольфрамовый Молибденовый медно-молибденовый (порфировый)	а оловорудные — более высокой калиевостью	Штокверки	Молибденит, халькопирит, магнетит
Вулканогенный гидротермальный (сульфосольно-сульфидный тип касситерит-сульфидной формации). Комплексные руды: Sn-W-Bi и Sn-Ag-W	Риолитовые, риодацитовые и дацитовые комплексы вулканоплутонических ассоциаций	Жилы, штокверки в жерловых зонах, некках	Главный: касситерит, станнин, висмутин, арсенопирит; второстепенный: вольфрамит, халькопирит, галенит, сфалерит

место по запасам вольфрама. Уникальные коренные месторождения содержат его запасы более 250 тыс. т (Санг-Донг в Южной Корее, Панаскуэйра в Португалии), крупные — 250—100 тыс. т, средние — 100—15, мелкие — менее 15 тыс. т. Богатыми считаются руды, содержащие более 1 % вольфрама; бедными — 0,3—0,1 %. В россыпях содержание вольфрама должно быть не ниже 300—200 г/м^3. Главными минералами вольфрамовых руд являются вольфрамит, гюбнерит (на них приходится 75 % мировой добычи), шеелит (25 %). Руды коренных месторождений подразделяют на кварц-вольфрамитовые и скарновые шеелитовые. Среди промышленных месторождений вольфрама выделяются скарновый, грейзеновый, гидротермальный плутоногенный типы (см. табл. 2.4). Меньшее значение имеют гидротермальный вулканогенный, стратиформный и россыпной типы.

Молибден — металл, свыше 80 % которого используют в металлургии для легирования сталей, чугунных отливок и др. Подтвержденные запасы молибдена в 25 странах оцениваются в 10 млн т. Уникальные месторождения (Кляймакс, Гендерсон, США) заключают в себе более 500 тыс. т металла, мелкие промышленные месторождения — менее 25 тыс. т. Половина запасов сосредоточена в небольшом числе крупных штокверковых месторождений. Наиболее крупные запасы находятся в Китае, США, Чили, Армении, Канаде. На

Окончание табл. 2.4

Средние содержания элементов, мас.%	Попутные компоненты	Масштабы месторождений	Относительная доля в мировых запасах, %	Примеры месторождений
Mo = 0,05—0,5 Mo = 0,005—0,025	Pb, Cu, Zn, Bi Au, Ag, Bi, Se, Te, Re, Ge	Уникальные, крупные Уникальные, крупные		Жирекен (Россия), Кляймакс, Гендерсон (США), Чукикамата, Эль-Тениенте (Чили), Сорское (Россия)
Sn = 0,3—0,4 (до 1—1,2 %)	Ag, Pb, Zn, Bi, W	Мелкие, средние, крупные	Sn = 12,8	Льяльягуа, Чоролька (Боливия)

их долю приходится 80 % подтвержденных запасов. Производство молибдена в концентратах составляет 150 тыс. т и осуществляется в 17 странах, пять из которых — США, Чили, Китай, Перу и Канада — обеспечивают почти 90 % мирового производства.

Главный минерал промышленных руд — молибденит, на него приходится 95 % всего добываемого молибдена. Второстепенную роль играет молибдошеелит, совсем незначительную — повеллит, ферримолибдит и вульфит, распространенные в зонах окисления.

В богатых рудах содержание молибдена превышает 0,5 %, в бедных составляет 0,2—0,1 %, убогие (комплексные) руды содержат 0,1—0,02 %. Среди промышленных месторождений важнейшее значение имеют скарновые, грейзеновые, плутоногенные гидротермальные (см. табл. 2.4). В них содержится 94 % суммарных подтвержденных запасов молибдена.

2.3. Геолого-промышленные типы месторождений благородных металлов

К благородным металлам относятся золото, серебро, платина и металлы ее группы — палладий, иридий, родий, осмий, рутений.

Они названы благородными, поскольку, обладая химической стойкостью и не подвергаясь коррозии на воздухе, в воде и активных средах, сохраняют привлекательный внешний вид в изделиях. Эти особенности благородных металлов обусловили и области их использования.

Золото — первый металл, освоенный человеком. Подсчитано, что за всю историю человечества суммарная добыча золота составила 110—120 тыс. т, при этом утрачено около 10 % этого количества. Области использования золота разнообразны. Почти половина добытого металла составляет правительственные резервы государств и запасы центральных банков. С древнейших времен золото используется для чеканки монет. Большое количество его идет на изготовление предметов культа и ювелирных изделий. Золото широко применяют в электронной, космической и других промышленных отраслях, в медицине и т. д.

Прогнозные ресурсы оцениваются в 110—180 тыс. т, из них до 60 тыс. т прогнозируются в ЮАР, ресурсами до 25 тыс. т обладают Китай, Бразилия, страны СНГ (включая Россию). Общие запасы в 115 странах составляют 94,1 тыс. т, подтвержденные — 54 тыс. т, из них на долю ЮАР приходится почти 29,6 %, Австралии — 10,3, США — 8,3 %.

В настоящее время добыча золота осуществляется более чем в 90 странах; ежегодный объем добычи составляет около 2 500 т. Более 65 % золота добывают в ЮАР, США, Австралии, Индонезии, Китае, Канаде, России. В ЮАР ежегодная добыча в последние годы составляет 350—400 т, в Австралии и США — более 250 т, в Канаде — 150 т. Россия добывает 140—150 т золота в год; 64 % золота добывается в Дальневосточном регионе, 24 % — в Восточно-Сибирском.

Промышленными считаются руды с содержанием золота 1—5 г/т и более и россыпи с минимальным содержанием 0,1 г/м^3. К весьма крупным и уникальным относятся коренные месторождения с запасами более 100 т, к мелким — менее 10 т. В весьма крупных месторождениях россыпного типа запасы должны превышать 50 т, в мелких — менее 1 т.

Главный минерал золоторудных месторождений — самородное золото. Промышленное извлечение золота производится из собственно золоторудных месторождений, из месторождений комплексных, а также из месторождений других металлов как попутного компонента.

Важнейшим геолого-промышленным типом являются золотоносные конгломераты, на долю которого приходится от 36 до 41 % мировых запасов. Львиная доля этих запасов сосредоточена в метаморфизованных золотоносных конгломератах Витватерсранда (ЮАР), в пределах обширного рудного поля (350×200 км), сложенного мощной толщей протерозойских дельтовых отложений. Мощность многочисленных рудоносных «рифов» — сближенных в разрезе горизон-

тов золотоносных конгломератов — от 30 до 400 м, протяженность по простиранию — до 70 км, протяженность всей рудоносной полосы — около 200 км.

Из руд промышленно извлекают золото, платиноиды, серебро, уран, алмазы. За период с 1884 по 1978 г. вышеназванное месторождение дало 34 600 т золота, 1 500 т серебра, 1 500 т платиноидов, 100 тыс. т урана (его добыча началась в 1952 г.). С 1979 по 1995 г. добыча золота составила 10 725 т. Рудные тела вскрыты горными выработками до глубины 3 600 м и скважинами до 4 600 м. Оставшиеся в недрах запасы золота составляют 31 тыс. т (общие) и 16 тыс. т (подтвержденные). Месторождения подобного типа известны в Канаде, Бразилии.

Второе место по значимости (более 12 % запасов) занимают комплексные ***месторождения золотосеребряных руд*** в вулканогенных формациях. Это прежде всего месторождения киммерийской и альпийской эпох, локализованные в вулканических постройках: Сильвертон-Теллурид (США), Карамкен (Россия) и др.

Все большее значение приобретают месторождения, локализованные в черносланцевых толщах, углеродистых известняках, известковых алевролитах широкого возрастного диапазона (месторождения «карлинского» типа). Месторождения характеризуются тонкодисперсным характером выделений золота и достаточно крупными размерами запасов. К ним можно отнести такие месторождения, как Хоумстейк (США), Калгурли (Австралия), Мурунтау (Узбекистан), Куранахское и Сухой лог (Россия).

Тип плутоногенных гидротермальных месторождений также представлен крупными собственно золоторудными месторождениями. Это жильные месторождения, сложенные рудами золотокварцевой и золото-кварц-сульфидной формаций, — Колар (Индия), Бендиго (Австралия), Березовское (Россия).

Россыпные месторождения в общем мировом балансе запасов занимают скромное место (немногим более 4 %). Однако для России они были и остаются одним из важнейших источников золота.

Довольно значительные запасы (11,5 %) сосредоточены в золоторудных объектах второстепенных типов. Золотосодержащие типы месторождений (медно-порфировые, колчеданные, колчеданно-полиметаллические и др.) содержат от 13 до 14 % запасов золота.

2.4. Геолого-промышленные типы месторождений радиоактивных элементов

В группу радиоактивных элементов, имеющих промышленное значение, входят уран, торий, радий.

Уран в промышленных целях стал использоваться с конца 40-х гг. XX в. Развитие ядерного оружия обусловило высокий спрос на уран

в самом начале развития атомной энергетики. Потребности в уране подвержены существенным колебаниям; они определяют колебания цен на него.

Производство урана за последние годы (начиная с 1988 г.) систематически снижается и в настоящее время уже не обеспечивает все возрастающие потребности атомной энергетики. Его мировое производство из природных объектов оценивается в 40,3 тыс. т. Потребление урана в атомной энергетике в 33 странах мира составляет 65—67 тыс. т.

Наиболее высокие потребности у США (20 570 т), России (9 170 т), Франции (8 879 т), Японии (7 500 т), Южной Кореи (3 400 т), Германии (3 350 т), Великобритании (2 250 т).

Существующий дефицит восполняется за счет складских запасов, оружейного урана и других вторичных источников.

По данным на 1.01.2002 г., разведанные запасы урана стоимостной категории до 80 долл/кг оцениваются в 2 500 тыс. т. Наиболее крупными запасами (более 100 тыс. т) владеют 8 стран (тыс. т): Австралия — 667; Казахстан — 433; Канада — 314,5; ЮАР — 231; Бразилия — 162; Намибия — 144; Россия — 138; США — 104.

Наиболее крупными производителями урана, по данным за 2000 г., являются Канада (29,7 %), Австралия (21,0 %), Нигер (8,1 %), Намибия (7,5 %), Россия (6,9 %), Узбекистан (5,6 %), Казахстан (5,2 %), США (4,02 %), Украина (2,8 %), ЮАР (2,4 %). На другие страны приходится 6,8 %.

В России в настоящее время действует только одно предприятие, добывающее уран, — Приаргунское производственное горно-химическое объединение, разрабатывающее Стрельцовскую группу месторождений в Читинской области.

К крупным относятся месторождения урана с запасами более 10 тыс. т, к мелким — менее 1 тыс. т. Из более чем 100 урановых минералов промышленное значение имеют уранинит (настуран, урановая смолка) и его аморфная разновидность — урановая чернь. В различных типах руд присутствуют также браннерит, давидит, ураноторит, уранофан, коффинит, отенит, торбернит, карнотит.

Урановые месторождения весьма разнообразны по условиям залегания, обстановкам локализации руд, генезису. Наибольшее значение в экономике имеют месторождения четырех геолого-промышленных типов: 1) «несогласия» — дает более 40 % добычи; 2) «песчаниковый» — 24,5 %; 3) медно-золотой и золотой с попутной добычей урана — 13,6 %; 4) жильно-штокверковый — 10,8 %.

Классические *месторождения типа «несогласия»* распространены в канадской провинции Атабаска. В районе месторождений на сильно дислоцированных раннепротерозойских гнейсах с резким несогласием залегают позднепротерозойские песчаники формации Атабаска. Рудные тела, приуроченные к этому контакту, располагаются вдоль него в песчаниках в виде линз. Корни тел в виде круто-

падающих жилообразных апофиз уходят в породы гнейсового фундамента. Состав первичных руд — настуран, коффинит, а также галенит, сфалерит, халькопирит, минералы кобальта и никеля. Среднее содержание урана — 1,47 % в канадских месторождениях, 0,24 % в австралийских. Запасы месторождений исчисляются от нескольких десятков до сотен тысяч тонн. Месторождения — Мидуэст-Лейк, Раббит-Лейк, Ки-Лейк и другие (Канада), Джабигука (Австралия).

Месторождения «песчаникового» типа широко распространены в урановорудной провинции Вайоминг (США). Многочисленные урановые месторождения пластово-инфильтрационного типа локализованы в меловых и палеоген-неогеновых песчано-глинистых отложениях, толщи которых залегают почти горизонтально. Эти месторождения — одни из наиболее крупных по запасам и добыче — отличаются причудливой формой рудных тел (ролловой, серповидной, в плане лентовидной), сформированных в результате фильтрации пластовых артезианских вод, отлагавших растворенный выщелоченный уран и сопутствующие ему компоненты на восстановительном «геохимическом барьере». В составе руд преобладают настуран и коффинит. Среднее содержание урана — 0,03—0,15 % (эти руды разрабатываются методами подземного выщелачивания). Более богатые руды с содержанием 0,2—0,3 % разрабатываются горным способом. Глубина залегания рудных тел — от нескольких метров до 300 м. Крупнейшие месторождения провинции — Шерли-Бейсин, Гэз-Хилс, Саут-Хилс, Норт-Хилс, месторождения бассейна Паудер-Ривер, Хайленд и др. К этому типу относятся среднеазиатские месторождения Кызылкумского района и др.

В третью группу (*тип медно-золотой и золотой с попутной добычей урана*) объединены месторождения, известные под названием «золотоносных конгломератов», и уникальное месторождение Олимпик Дам (Австралия), относящееся, по некоторым данным, к типу медистых песчаников, содержащее грандиозные запасы меди, урана, золота и серебра.

Месторождения жильно-штокверкового типа — довольно разнообразные объекты эндогенной серии. Они представлены гидротермальными вулканогенными, плутоногенными и метасоматическими образованиями. Сюда могут быть отнесены альбититовые месторождения Украинского кристаллического щита, жильно-штокверковые месторождения Кокчетавского рудного района и месторождения Стрельцовского рудного поля. Последнее приурочено к крупной кальдерообразной структуре — депрессии, возникшей на жестком гранитном основании. Вулканогенно-осадочные породы, выполняющие депрессию, мощностью около 1 000 м сложены лавопирокластическими образованиями андезитового состава, туфами, экструзивными риолитами, игнимбритами, туфопесчаниками и т. д. Преимущественно среди туфов развиты оруденелые штокверковые зоны и послойные залежи. Оруденение охватывает интервал 500—700 м.

Руды малосульфидные коффинит-настурановые и сульфидно-настурановые с галенитом и молибденитом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месторождения металлических полезных ископаемых / [В. В. Авдонин и др.]. — М.: Академический проект, Трикста, 2005.

2. *Еремин Н.И.* Неметаллические полезные ископаемые. — М.: Изд-во МГУ; ИКЦ «Академкнига», 2007.

3. *Козловский Е.А.* Россия: минерально-сырьевая политика и национальная безопасность. — М.: Изд-во МГГУ, 2002.

4. *Синяков В.И.* Геолого-промышленные типы рудных месторождений. — СПб.: Недра, 1994.

5. *Смирнов В.И.* Геология полезных ископаемых. — М.: Недра, 1989.

6. *Смирнов В.И.* Курс рудных месторождений / [В. И. Смирнов и др.]. — М.: Недра, 1986.

ЧАСТЬ II

ПОИСКИ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Глава 3
Поиски полезных ископаемых

3.1. Геологическое обоснование постановки поисков и стадии поисковых работ

Основная задача поисковых работ — обнаружение и предварительная оценка промышленных месторождений. Решение этой задачи достигается при выполнении определенного комплекса работ.

В геолого-разведочном процессе реализуется принцип последовательного приближения путем перехода от мелко-, среднемасштабных работ к более детальным. Это определяется необходимостью периодической оценки результатов работ и принятия обоснованных решений о целесообразности проведения более детальных исследований. Основанием для постановки последующих работ служит оценка перспективности изучаемых площадей и практического значения прогнозных ресурсов полезных ископаемых, обнаруженных при проведении предшествующих работ. Для оценки перспективности изучаемых площадей пользуются понятиями прогнозных ресурсов.

Прогнозные ресурсы, наличие которых предполагается на основе общих геологических представлений, научно-теоретических предпосылок, результатов геологического картирования, геофизических и геохимических исследований, оцениваются в границах бассейнов, крупных районов, рудных узлов, рудных полей и отдельных месторождений. По степени достоверности прогнозные ресурсы подразделяются на три категории: P_3; P_2; P_1. Подробная характеристика категорий приведена в подразд. 4.3.

Прогнозные ресурсы служат для долгосрочного и текущего планирования геолого-разведочных работ, а также могут использоваться при проектировании прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ. Совокупность таких работ должна обеспечивать получение

прироста запасов категории C_2, являющегося основным результатом суммы проведенных разномасштабных поисковых работ. Для определения рациональных путей решения этой задачи требуется оценить прогнозные ресурсы, необходимые для получения намеченных приростов, и выбрать эквивалентные площади для постановки геологоразведочных работ соответствующих масштабов.

Классификация прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых отражает последовательное повышение точности и надежности оценки с ростом объема информации о них. Соответственно работам каждого масштаба (детальности) отвечают собственные категории прогнозных ресурсов. При этом соблюдается эквивалентность между геологическими объектами, пространственными металлогеническими категориями и прогнозными ресурсами, обеспечивается последовательная локализация перспективных площадей, в наиболее общем виде отвечающих ряду: металлогеническая или минерагеническая зона — рудный район — рудное поле — месторождение (перспективный участок).

При *региональном геологическом изучении территории* в результате прогнозно-металлогенического картографирования и геолого-съемочных работ масштаба 1:200 000 (1:100 000) обеспечивается необходимый уровень изученности для постановки поисковых работ, выделяются *рудные районы* с оценкой их прогнозных ресурсов по категории P_3.

На основании этих результатов осуществляется постановка поисковых работ в масштабе 1:50 000 (1:25 000). Поисковые работы могут проводиться и на ранее опоискованных участках и площадях, если это обусловлено изменениями представлений об их геологическом строении и рудоносности, изменением конъюнктуры минерального сырья, увеличением глубинности исследований или внедрением инновационных технологий поисковых работ и обработки их результатов. При геолого-съемочных и поисковых работах масштаба 1:50 000 (1:25 000), опережающих и сопровождающих их детализационных, наземных исследованиях (геофизических, геохимических, геолого-минералогических и др.), а также исследованиях, связанных с проходкой поверхностных горных выработок и, при необходимости, поисковых скважин, достигается уровень изученности площадей, достаточной для постановки более детальных поисковых работ: выявления и оконтуривания *рудных полей* и *локальных площадей*, перспективных для обнаружения месторождений полезных ископаемых, определения их прогнозных ресурсов по категории P_2.

Детальные поиски в зависимости от сложности геологического строения территории, формационного типа прогнозируемого оруденения и глубинности исследований могут проводиться в масштабах 1:25 000 — 1:10 000. Они включают комплекс геолого-минерагенических, геофизических, геохимических и других видов и методов исследований с проходкой поисковых скважин и поверхностных горных

выработок. Для поисков скрытых и погребенных месторождений используется глубокое бурение в сочетании со скважинными геофизическими и геохимическими исследованиями. Рациональный комплекс методов формируется на основе особенностей геологического строения объекта, ландшафтно-геохимических условий производства работ и накопленного опыта применения поисковых методов для различных видов полезных ископаемых и промышленных типов месторождений.

По совокупности полученной геологической, геофизической и геохимической информации и ее комплексной интерпретации локализуются *перспективные участки, потенциальные месторождения и объекты*. Проверка природы геофизических и геохимических аномалий, вскрытие, опробование и изучение проявлений тел полезных ископаемых осуществляются поверхностными горными выработками и поисковыми скважинами. В отобранных пробах определяют содержание основных и попутных компонентов и в необходимых случаях предварительные технологические свойства руд.

Основным результатом поисковых работ является геологически обоснованная оценка перспектив исследованных площадей (участков, объектов). На изученных проявлениях полезных ископаемых определяются прогнозные ресурсы категорий P_2 и P_1, а также частично осуществляется подсчет запасов категории C_2.

Выявленные и положительно оцененные проявления включают в фонд объектов, подготовленных для постановки оценочных работ.

Оценочные работы проводят на выявленных и положительно оцененных проявлениях полезных ископаемых. Для оконтуривания площади и изучения геолого-структурных особенностей потенциально промышленного месторождения выполняется геологическая съемка и составляется геологическая карта масштабов 1:25 000 — 1:10 000 для крупных месторождений и масштабов 1:5 000 — 1:1 000 для небольших и сложных. Геологическая съемка сопровождается детальными минералого-петрографическими, геофизическими и геохимическими исследованиями. Изучение рудовмещающих структурно-вещественных комплексов, вскрытие и прослеживание тел полезных ископаемых осуществляют с поверхности канавами, шурфами, поисково-картировочными скважинами.

Изучение глубины залегания проводится преимущественно буровыми скважинами до горизонтов, обеспечивающих вскрытие рудоносных структурно-вещественных комплексов, а при глубоком их залегании — до горизонтов, экономически целесообразных для разработки с использованием современных технологий освоения месторождений. При высокой степени изменчивости полезной минерализации или при сильно расчлененном рельефе для изучения объекта на глубину возможно применение подземных горных выработок.

Все вскрытые в естественных и искусственных обнажениях выходы полезной минерализации подвергаются опробованию и анализу на основные и попутные компоненты. В необходимых объемах проводится контроль качества отбора и обработки проб и их анализов.

Технологические свойства полезного ископаемого изучаются по лабораторным, а в необходимых случаях по малым или большим технологическим пробам, отобранным по основным природным разновидностям руд; определяются принципиальная схема переработки руд, обеспечивающая комплексное использование полезного ископаемого, и возможные технологические показатели.

В скважинах и горных выработках проводится комплекс гидрогеологических, инженерно-геологических, геокриологических и других наблюдений и исследований в объемах, достаточных для обоснования способа вскрытия и разработки месторождения, определения источников водоснабжения, возможных водопритоков в горные выработки и очистное пространство. Определяются факторы, негативно влияющие на показатели горного предприятия. Дается характеристика экологических условий производства добычных работ и оценка влияния последних на природную среду. При оценке гидрогеологических, инженерно-геологических, экологических и других природных условий разработки месторождения используются соответствующие показатели известных и отрабатываемых в районе месторождений.

В результате оценочных работ степень геологической изученности месторождения, качества, вещественного состава и технологических свойств полезных ископаемых, а также горно-геологических условий эксплуатации должна обеспечить предварительную оценку промышленного значения месторождения с подсчетом всех или большей части вероятных запасов категории C_2. По менее детально изученной части месторождения количественно и качественно определяются прогнозные ресурсы категории P_1 с указанием границ их распространения.

Достоверность данных о геологическом строении, условиях залегания и морфологии тел полезных ископаемых подтверждается на участках детализации с подсчетом запасов категории C_1.

Геолого-экономическая оценка месторождений является обязательной частью комплекса оценочных работ и осуществляется систематически в процессе их проведения и по их завершении. Оперативная геолого-экономическая оценка осуществляется по укрупненным показателям, и по ее результатам принимаются обоснованные решения о целесообразности продолжения работ или их прекращения на конкретном участке, месторождении.

После завершения стадии оценки разрабатываются временные разведочные кондиции и составляется технико-экономический доклад (ТЭД), в котором дается экономически обоснованная предварительная оценка масштабов, экономической значимости месторожде-

ния, определяется целесообразность инвестирования в дальнейшие разведочные работы. Отчет с результатами подсчета запасов, включая обоснование временных кондиций, и технико-экономический доклад представляются на государственную геологическую, экономическую и экологическую экспертизу. Содержание отчета, в том числе технико-экономического обоснования кондиций, а также перечень обязательных текстовых и графических приложений определяются соответствующими инструктивно-нормативными документами относительно содержания, оформления и порядка представления на государственную экспертизу материалов технико-экономического обоснования кондиций на минеральное сырье и подсчета запасов. Заключение государственной экспертизы является основанием для постановки запасов на государственный учет.

По результатам оценочных работ производится подготовка пакета геологической информации, необходимой для проведения конкурса или аукциона на предоставление лицензии на разведку и добычу полезных ископаемых.

В соответствии с указанной последовательностью разномасштабных прогнозно-металлогенических исследований и поисковых геолого-разведочных работ для получения на той или иной слабо изученной территории необходимого прироста запасов категории C_2 требуется выполнение комплекса работ, обеспечивающих перевод ресурсов категории P_3 в P_2, категории P_2 в P_1 и, наконец, ресурсов категории P_1 в запасы категории C_2. Соответствующим образом от стадии к стадии изменяются ранги и размеры площадей требуемых работ.

Очевидно, что значения прогнозных ресурсов всех категорий не эквивалентны значениям запасов категории C_2, выявляемых на той же площади. Это зависит от ряда причин как объективного, так и субъективного характера. К числу главных из них принадлежат недостаточная достоверность оценок прогнозных ресурсов, определяемая несовершенством геологических основ прогнозирования и его вероятностным характером; рассредоточенность прогнозируемой массы металла по серии мелких объектов; превышение выявляемых масштабов объектов над предполагавшимися; несоответствие качества обнаруженных руд современным промышленным требованиям; недоступность глубин залегания месторождений для поискового и промышленного освоения; субъективные ошибки при выборе направлений работ и т. п.

3.2. Геологические предпосылки поисков

Месторождения полезных ископаемых и в особенности промышленные месторождения встречаются в земной коре достаточно редко. Однако они при всей их исключительности не являются случайными

образованиями. Формирование месторождений — это отдельные, в ряде случаев весьма незначительные по масштабам эпизоды в общем комплексе сложных процессов эволюции земной коры. Но они подчиняются строгим закономерностям. Выявление, изучение закономерностей образования и размещения месторождений — основа поисковых и разведочных работ.

Научно обоснованное проведение поисковых работ возможно при учете совокупности геологических данных, определяющих возможность обнаружения тех или иных месторождений. Поисковые критерии, на основе которых оцениваются перспективы изучаемых площадей и проводятся поисковые работы, делятся на две группы: геологические предпосылки поисков и поисковые признаки.

Геологические закономерности, контролирующие размещение месторождений, составляют основу геологических предпосылок.

Геологическое положение различных типов месторождений определяется комбинацией условий, благоприятных для их образования, которые имели место в период формирования месторождений. Таким образом, геологические предпосылки поисков — это такие элементы и особенности геологического строения данного участка земной коры, которые предопределяют существование условий и возможностей образования месторождений определенного типа в его пределах в геологическом прошлом. Геологические предпосылки обусловливают принципиальную теоретическую возможность протекания процессов рудообразования; их наличие характеризует перспективность данного участка на обнаружение месторождений.

Известно, что все месторождения одного промышленного типа образуются в сходных условиях, поэтому для каждого типа необходимо сочетание определенных условий, т. е. предпосылок. Иными словами, можно говорить о комплексе предпосылок, определяющих геологически благоприятные условия и обстановки формирования месторождений данного типа. При этом значения каждой предпосылки различны для разных групп месторождений.

Главнейшие группы геологических предпосылок поисков были выделены и охарактеризованы основоположниками этого направления в поисково-разведочной геологии В. М. Крейтером и В. И. Смирновым. В настоящее время при прогнозно-поисковых исследованиях принято выделять несколько групп геологических предпосылок: формационные, стратиграфические, структурные, литолого-фациальные, геохимические.

Формационные предпосылки. Формационные предпосылки основаны на одном из важнейших положений геологии полезных ископаемых — положении о закономерной связи полезных ископаемых с геологическими формациями (см. подразд. 1.2, 1.3).

Принадлежность к конкретным формациям определяет главнейшие геологические условия, в которых происходило образование полезных ископаемых.

Установление связи тех или иных полезных ископаемых с определенными формациями имеет важнейшее значение для поисков. Принцип использования формационных предпосылок заключается в том, что развитие в исследуемом районе пород какой-либо формации или нескольких формаций является указанием на возможность обнаружения месторождений, которые обычно связаны с этими формациями. Так, развитие гранодиоритовых комплексов предопределяет возможность формирования скарновых месторождений вольфрама, гидротермальных месторождений золота и ряда других. Наличие различных комплексов габбро-пироксенит-дунитовой формации может служить основанием для поисков магматических месторождений хромитов, медно-никелевых сульфидных месторождений, платиноидов, титаномагнетитов и т. д.

Эти самые общие принципы нуждаются в детализации. Для того чтобы на площади развития какой-либо рудоносной формации, охватывающей нередко сотни и тысячи квадратных километров, можно было выделить конкретные перспективные участки, необходимо располагать сведениями о закономерностях локализации руд. Изучение этих закономерностей позволяет выявить в пределах формации конкретные элементы, являющиеся рудолокализующими или определяющие возможность возникновения обстановок, благоприятных для рудоотложения, либо каким-либо другим образом влияющих на характер связанных с формацией полезных ископаемых. Например, рудные тела некоторых месторождений в конкретных районах локализуются вдоль тектонических нарушений, занимающих определенную структурную позицию. Месторождения осадочного генезиса характеризуются приуроченностью к определенным частям стратиграфического разреза, для других определяющей является литолого-фациальная обстановка. В ряде случаев эти рудоконтролирующие элементы приобретают самостоятельное значение и их целесообразно рассматривать в качестве отдельных групп геологических предпосылок.

В первую очередь заслуживают внимания стратиграфические, структурные, литолого-фациальные и геохимические предпосылки.

Стратиграфические предпосылки. Некоторые типы месторождений осадочных полезных ископаемых характеризуются отчетливой приуроченностью к определенным стратиграфическим горизонтам, которая объясняется тем, что образование их происходило в определенные эпохи осадконакопления. Так, Н. М. Страховым установлено в истории развития земной коры семь крупных и девять мелких эпох образования осадочных железорудных месторождений. С этими эпохами в основном совпадают периоды образования осадочных месторождений марганца и бокситов.

Закономерной стратиграфической приуроченностью характеризуются месторождения угля, горючих сланцев, фосфоритов, медистых песчаников и др.

Таким образом, изучение стратиграфического разреза имеет большое значение при поисковых работах, поскольку присутствие в изучаемом районе пород тех стратиграфических горизонтов, которые в глобальном или региональном масштабе относятся к продуктивным, может служить предпосылкой поисков соответствующих месторождений.

Однако при этом нужно иметь в виду, что, строго говоря, стратиграфическая приуроченность свойственна не просто телам полезных ископаемых или так называемым продуктивным горизонтам, а в первую очередь осадочным рудоносным формациям, которые в качестве присущих им компонентов включают эти тела и продуктивные горизонты.

Структурные предпосылки. Как было отмечено ранее, тела полезных ископаемых характеризуются закономерной структурной приуроченностью, которая может проявляться на различных уровнях. В глобальном масштабе подобными структурами могут являться металлогенические провинции, в региональном масштабе эти структуры могут быть проявлены металлогеническими поясами и бассейнами. Данные категории — важный элемент прогнозно-металлогенических оценок крупных территорий, перспективных районов.

Для поисков конкретных месторождений ведущее значение приобретают локальные рудолокализующие структуры. А они весьма разнообразны для месторождений различных групп, больше того, в месторождениях одного промышленного типа зачастую выделяется несколько структурных разновидностей. При проведении поисковых работ важно знать различные структурные типы месторождений, являющихся объектом поисков для того, чтобы обратить внимание на выявление соответствующих структур, которые могут служить поисковыми предпосылками.

Часто под структурными предпосылками подразумеваются прежде всего разрывные и складчатые структуры, контактовые зоны интрузивных тел, поскольку к этим элементам бывают приурочены рудные тела месторождений различных типов. Наличие разрывных нарушений традиционно рассматривается как благоприятная предпосылка для поисков. Точно так же укоренились представления о высокой перспективности некоторых ставших классическими комбинаций структурных элементов. Например, это сочетания складок, преимущественно антиклинальных, и секущих разрывов, особенно если складки образованы чередованием пород, различающихся по компетентности, пористости, проницаемости и другим физико-механическим свойствам.

Кроме того, имеются более сложные по структурной позиции месторождения; выявление структурных предпосылок в этом случае требует постановки специальных исследований. Имеются в виду вулканогенные месторождения, связанные с вулканогенно-осадочными формациями. Наиболее наглядным примером их могут служить

месторождения колчеданного семейства: медно-колчеданные, колчеданно-полиметаллические и др. Установлено, что они занимают закономерные позиции в палеовулканических структурах, располагаясь обычно: 1) на склонах экструзивных и экструзивно-лавовых куполов; 2) в жерловых зонах стратовулканов; 3) в вершинных депрессиях вулкано-купольных структур и стратовулканов; 4) в депрессионных структурах других типов. Для того чтобы выявить указанные структуры, а затем приступить к поисковым работам в наиболее благоприятных частях этих структур, необходимо достаточно детально расшифровать внутреннее строение вулканогенных толщ, т. е. провести специальное палеовулканологическое картирование.

Таким образом, структурные предпосылки можно условно подразделить на две группы: 1) тектонические — разломы разных типов, складки, их комбинации и т. д.; 2) палеовулканологические — древние захороненные вулканические постройки, стратовулканы, экструзивы, субвулканы, депрессии разного рода и др.

Литолого-фациальные предпосылки. Изучение условий формирования месторождений показывает, что процессы рудоотложения протекают, как правило, в строго определенных фациальных обстановках. Это прежде всего относится к месторождениям осадочного генезиса, подавляющее большинство которых обычно бывает локализовано в породах, относящихся к наиболее благоприятным для рудоотложения фациям. Фундаментальными исследованиями Н. М. Страхова установлены основные закономерности формирования осадочных руд железа, марганца, алюминия, приуроченность их к фациям прибрежной зоны озер и морей. Дифференциация этих элементов, обусловленная различной геохимической подвижностью, выражена в том, что осаждение алюминия происходит в прибрежной зоне, железа — в верхней части шельфа, а марганца — в нижней части. Для осадочных месторождений важную роль играет климатический фактор, который определяет типы литогенеза и соответствующие им обстановки формирования полезных ископаемых: гумидный, аридный и ледовый.

Фациальный контроль размещения и локализации руд отчетливо проявлен и в месторождениях, связанных с вулканогенными формациями. Связь процессов формирования и локализации руд с фациями вулканогенных пород проявляется по-разному и может рассматриваться в трех аспектах: 1) закономерная приуроченность месторождений к определенным группам фаций, обусловленная парагенетической связью оруденения с вулканизмом; 2) приуроченность руд к фациям, определенная условиями их одновременного образования; 3) приуроченность руд к определенным фациям, связанная с особенностями состава, строения и физико-механических свойств последних.

Геохимические предпосылки. Геохимические предпосылки основаны на геохимической специализации формаций и рудоносных

комплексов как магматических, так и осадочных. Изучение геохимической специализации разных типов пород позволяет выявить естественные связи различных элементов, в том числе индикаторов рудоносности данного комплекса.

Для магматических пород характер геохимической специализации в каждом конкретном случае зависит от сложного комплекса факторов, включающих геохимическую природу магмы, геологические особенности ее кристаллизации и дифференциации, геохимическую специфику вмещающих пород, а также характер послемагматического изменения материнских пород.

В осадочных образованиях геохимическая специализация определяется особенностями химического состава пород, являющихся источниками сноса, характером дифференциации кластического и растворенного вещества на путях миграции, тектоническим и климатическим режимами седиментационной области, характером физико-химических и биологических процессов в конечных водоемах стока и, наконец, условиями диагенетического преобразования осадков.

Геохимическая специализация геологических комплексов может иметь региональное или локальное значение. Так, примерами региональной специализации могут служить региональная оловоносность меловых гранитоидов Чукотки, редкометалльная специализация юрских гранитов Восточного Забайкалья, региональная меденосность осадочных прибрежно-морских комплексов Центрального Казахстана.

Локальная специализация отдельных массивов и частей стратиграфического разреза является результатом особых условий формирования и геологического развития данного комплекса.

Не только геохимическая специализация, но и другие поисковые предпосылки характеризуются различной масштабностью проявления: одни из них свойственны крупным металлогеническим провинциям, другие позволяют оценивать перспективность рудных районов, третьи являются локальными и служат указателями возможного размещения месторождений.

3.3. Поисковые признаки

Под поисковыми признаками понимаются непосредственные указатели месторождений: это следы процессов и явлений, сопутствовавших образованию, изменениям и разрушению месторождений; особые физические, минералогические и химические свойства полезного ископаемого и околорудных пород, по которым можно обнаружить месторождения; сведения о деятельности человека, имеющей отношение к полезному ископаемому. Иногда условно поисковые признаки делятся на прямые, непосредственно указывающие на

наличие оруденения (выходы полезных ископаемых, ореолы рассеяния, следы старых горных выработок и др.), и косвенные, свидетельствующие о происходивших процессах рудообразования или о возможном присутствии полезных ископаемых (измененные околорудные породы, геохимические и геофизические аномалии, геоморфологические признаки и др.).

Выходы полезных ископаемых. Коренное обнажение тела полезного ископаемого — наиболее достоверный поисковый признак. Во всех случаях выходы полезных ископаемых требуют тщательного изучения и оценки, которая нередко осложняется тем, что залежи в поверхностных условиях бывают существенно изменены гипергенными процессами. Следует иметь в виду также, что наличие коренных выходов полезного ископаемого еще не является гарантией того, что это выходы промышленных рудных тел: они могут оказаться незначительными по размеру или неудовлетворительными по качеству.

Геохимические аномалии. Геохимические аномалии имеют основное значение при поисках месторождений полезных ископаемых. Они выражены в формировании геохимических ореолов — зон, участков пород, окружающих месторождение или расположенных в непосредственной близости от него и характеризующихся повышенным содержанием рудообразующих или сопутствующих рудообразованию специфических элементов, минералов, других компонентов.

Ореолы подразделяются на первичные, связанные с процессами рудообразования, и вторичные, возникающие в результате воздействия на месторождение эндогенных процессов.

Первичные ореолы — это зоны рудовмещающих пород, окружающие месторождение, обогащенные в процессе рудообразования главными рудообразующими и рядом сопутствующих элементов (рис. 3.1). Различают первичные ореолы сингенетические и эпигенетические. Первые образуются в результате совместно протекающих процессов образования полезного ископаемого и вмещающих пород. Поэтому распределение химических элементов в этих ореолах характеризуется плавным повышением концентраций по

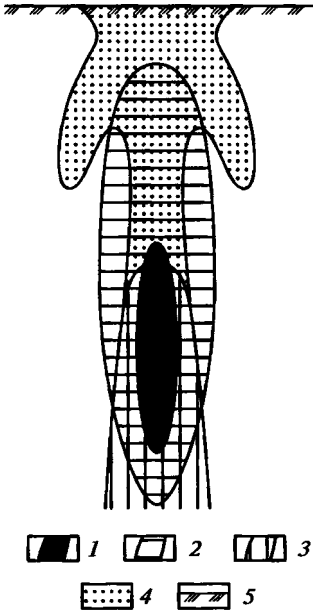


Рис. 3.1. Обобщенная схема первичного ореола гидротермального месторождения (по А. П. Соловову, с изменениями):

1 — рудное тело; *2* — околорудный ореол; *3* — подрудный ореол; *4* — надрудный ореол; *5* — современная денудационная поверхность

мере приближения к рудным телам. Сингенетические ореолы свойственны месторождениям магматического и осадочного генезиса.

Эпигенетические ореолы сопровождают эпигенетические месторождения, наложенные, образующиеся в результате процессов, протекающих в среде ранее сформированных вмещающих пород. Типичными представителями этих образований являются, например, жильные гидротермальные месторождения, пегматитовые и др.

Вокруг рудных тел и месторождений формируются ореолы как привнесенных элементов (положительные), так и выщелоченных из руды (отрицательные) и переотложенных в околорудном пространстве в ходе гидротермально-метасоматического процесса.

Ореолы, формирующиеся в процессе эпигенетического рудообразования, подразделяются на диффузионные, инфильтрационные и диффузно-инфильтрационные. Как и рудные залежи, эпигенетические ореолы приурочены к рудовмещающим структурам и часто отличаются несогласным, секущим положением по отношению к вмещающим породам. Поскольку миграция компонентов в сторону от формирующихся рудных тел зависит от ряда факторов (их подвижности, состава растворов, фильтрующих свойств среды, физико-химической обстановки и др.), строение этих ореолов, соотношение элементов в них бывают довольно сложными.

Главные ореолообразующие элементы (например, для благородных и цветных металлов — Au, Ag, Cu, Pb, Sb, As, Bi и некоторые другие) являются производными от вещественного состава руд и позволяют судить о минерально-геохимическом типе скрытого месторождения. Второстепенные элементы (Co, Ni, Cd, Ba, Mo, Hg, F, J, Br и др.) встречаются в виде примесей в жильных, рудных и породообразующих минералах, образуют как положительные, так и отрицательные ореолы и имеют большое значение при оценке уровня эрозионного среза рудных тел.

Первичные ореолы часто представляют собой непосредственное продолжение рудных тел и отличаются от них лишь меньшими содержаниями полезных компонентов. А поскольку с течением времени меняются требования промышленности к содержанию полезных компонентов в руде, меняется и условная граница между рудой и ореолом. Это в первую очередь относится к сингенетичным месторождениям.

Форма нахождения элементов в первичных ореолах различна. Часто они образуют собственные минералы, обычно те же, что присутствуют в рудах. Нередко они содержатся в виде изоморфных примесей в различных минералах вмещающих пород и новообразованных, «ореольных».

Первичные ореолы практически во всех случаях характеризуются определенной зональностью в распределении элементов и их концентраций. Зональность определяется геохимическими свойствами элементов, составом вмещающих пород, стадийностью рудообразую-

щих процессов и др. Важная роль зональности ореолов в поисках определяется тем, что по ее характеру иногда удается установить уровень эрозионного среза относительно рудного тела: надрудный, рудный, подрудный (см. рис. 3.1). Морфология первичных ореолов, как было отмечено ранее, определяется в основном рудоконтролирующими структурами.

Вторичные ореолы и потоки рассеяния — это зоны пород преимущественно поверхностных образований, обогащенных продуктами, возникающими при процессах разрушения месторождений. Такие ореолы и потоки образуются в рыхлом покрове и почвах, растительности, грунтовых и поверхностных водах, почвенном и приповерхностном воздухе и связаны между собой. Ореолы характеризуются изометричной формой в плане, у потоков вытянутая форма, обусловленная перемещением продуктов разрушения постоянными или временными водотоками, реже другими агентами (рис. 3.2).

Литохимическим потоком рассеяния месторождения называется зона повышенных содержаний химических элементов, характерных для данного месторождения, прилегающая к вторичному ореолу рассеяния и развивающаяся в аллювиальных, эоловых, ледниковых и других отложениях, речных, озерных и подземных водах на путях твердого и водного стоков. В направлении стока содержания хими-

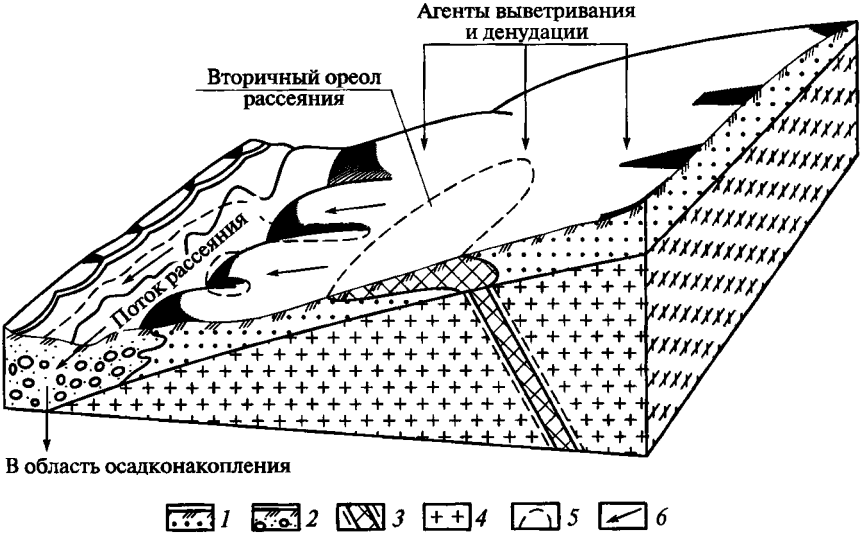


Рис. 3.2. Схема формирования вторичных ореолов и потоков рассеяния (по А. П. Соловову):

1 — элювиоделювий; *2* — аллювий; *3* — рудное тело и его первичный ореол; *4* — рудовмещающие породы; *5* — контур аномальных содержаний рудных элементов в продуктах выветривания, речной воде и растительности; *6* — направление стока

ческих элементов затухают, постепенно приближаясь к значениям, соответствующим местному геохимическому фону. Содержание элементов в потоке рассеяния в первую очередь зависит от положения рудных тел, их первичных и вторичных ореолов рассеяния в местном бассейне денудации. Месторождения, выведенные на уровень денудационного среза, в благоприятных условиях образуют литохимические потоки рассеяния протяженностью более 1 км. Различия в миграционной способности элементов, а также разные количественные соотношения между элементами в составе руд и первичных ореолов определяют выбор элементов-индикаторов, по которым ведут литохимические поиски по вторичным ореолам и потокам рассеяния. Из всего многообразия типов потоков рассеяния наиболее распространены и имеют наибольшее практическое значение речные потоки рассеяния.

В зависимости от характера разрушения месторождения и фазового состояния продуктов разрушения вторичные ореолы и потоки рассеяния разделяются на механические, солевые, водные (или гидрогеохимические), газовые (атмогеохимические) и биогеохимические.

Механические ореолы формируются во всех типах рыхлых отложений от элювиальных до ледниковых при разрушении химически устойчивых полезных ископаемых. Механические ореолы обусловлены повышенными концентрациями рудных минералов. По крупности и агрегатному состоянию продуктов разрушения ореолы и потоки подразделяются на крупнообломочные (рудные развалы, валуны, галька), шлиховые (песчано-гравийные), тонкодиспергированные (глинистые).

Солевые ореолы и потоки рассеяния образуются в результате разложения, растворения, переноса и переотложения рудного вещества в поверхностных породах в виде элементов и солей. Формирование солевых ореолов и их состав в значительной степени зависят от климатических условий района, в особенности от соотношения между количеством атмосферных осадков и величиной испарения. В большинстве случаев наблюдаются совместные механические и солевые ореолы.

Водные (*гидрогеохимические*) *ореолы* представляют собой области распространения подземных и поверхностных вод, которые в результате взаимодействия с полезными ископаемыми, а также первичными и вторичными ореолами отличаются повышенными содержаниями химических элементов, присутствующих в месторождении, и некоторых других компонентов, например сульфат-иона, хлориона и др. Среди гидрогеохимических ореолов выделяются постоянные (преимущественно в глубоких водоносных горизонтах) и временные (в поверхностных и грунтовых водах), концентрации элементов в которых меняются в зависимости от обилия атмосферных осадков.

Газовые (*атмогеохимические*) *ореолы* рассеяния представляют собой локальное обогащение почвенного воздуха и приповерхностного слоя атмосферы паро- и газообразными соединениями, связанными с полезными ископаемыми. Такие ореолы образуются в результате миграции элементов в газовой фазе во время формирования месторождений и в процессе их разрушения. Газовые ореолы образуются при химических преобразованиях сульфидных руд, месторождений ртути; ореолы радона, тория и гелия возникают над месторождениями радиоактивных элементов; горючие газы, гелий, углекислый газ и другие фиксируют месторождения углеводородов.

Биогеохимические ореолы представляют собой области распространения растений с повышенным содержанием типоморфных для месторождения элементов. Повышенные концентрации устанавливаются в золе растений и обусловлены избирательным поглощением различных элементов растениями. При этом в конкретных условиях элементы неравномерно распределяются по растению, накапливаясь либо в листьях, либо в стволе и т. д. Разные виды растений характеризуются избирательными свойствами концентрации элементов.

Следы старых горных выработок. Следы выработок, из которых в древности производилась добыча полезных ископаемых, отвалы таких древних разработок, археологические находки и данные, свидетельствующие о старинных горных промыслах и металлургических производствах, могут служить важным указанием на наличие полезных ископаемых. По таким признакам были обнаружены многие месторождения на Кавказе, Урале, Алтае, в Казахстане и некоторых районах Сибири.

Измененные околорудные породы. Процессы рудообразования обычно приводят к более или менее значительным изменениям вмещающих пород. Околорудные изменения достаточно широко распространены. Кроме того, они различаются по типу формирующихся измененных пород, наличие которых свидетельствует о процессах минералообразования, хотя и не всегда сопровождающихся оруденением. Наиболее важными для поисков являются такие типы изменений, как скарнирование, грейзенизация, окварцевание, березитизация и др.

Скарны и скарнированные породы формируются при взаимодействии интрузий умеренно кислых, реже щелочных и основных изверженных пород с вмещающими карбонатными осадочными породами или вулканогенно-осадочными, содержащими примесь известкового материала. Они состоят из гранатов, пироксенов, других известково-железистых силикатов — волластонита, скаполита, эпидота, амфиболов; обычно располагаются вдоль контактов интрузива с вмещающими породами. В скарнах и скарнированных породах располагаются некоторые типы месторождений железа, кобальта, меди, полиметаллов, вольфрама, молибдена, золота и др.

Грейзены связаны с гранитными интрузиями резко выраженного кислого состава, пересыщенными глиноземом; располагаются в апикальных частях массивов и состоят из кварца, слюд (мусковит, биотит, циннвальдит), топаза, турмалина, флюорита и др. В основном грейзены развиваются по интрузивным породам и в небольшой степени охватывают породы кровли — кварциты, кварцевые песчаники, кислые эффузивы и др. С грейзенами связан более узкий круг месторождений: касситеритовые, вольфрамитовые, молибденитовые, бериллиевые, танталита-колумбита и висмутовые.

Окварцевание пород при гидротермальных процессах развито широко и сопровождает многочисленные типы месторождений. Гидротермальное изменение интрузивных и эффузивных пород кислого и среднего составов приводит к образованию так называемых вторичных кварцитов, в которых наряду с резко преобладающим кварцем присутствуют серицит, каолинит, андалузит, алунит, пирофиллит, а также рутил, турмалин и рудные минералы (пирит, халькопирит, молибденит, гематит и др.). С формацией вторичных кварцитов связаны некоторые промышленные типы медных, медно-молибденовых и молибденовых месторождений, известных под названием медно-порфировых.

Особый тип пород представляют собой окварцованные известняки — джаспероиды, состоящие из мелкозернистого кварца, халцедона и реликтов кальцита и доломита. Этот тип изменений околорудных пород наблюдается на некоторых месторождениях свинца и цинка, а также сурьмы и ртути.

Березиты представляют собой гидротермально измененные породы, образованные главным образом за счет гранитоидных пород (гранит-порфиров, кварцевых порфиров и др.) и состоящие из кварца и серицита с примесью пирита и рутила. Березитизация сопровождает образование золоторудных жильных месторождений и некоторых молибденовых, вольфрамовых, медных и др.

Помимо перечисленных типов гидротермального изменения боковых пород широко развиты и другие, которые сопровождают процессы формирования месторождений. Так, гидротермальные месторождения, локализованные в породах основного состава, нередко сопровождаются лиственитизацией — образованием метасоматического карбонат-кварцевого парагенезиса с примесью пирита, хлорита, талька, серицита, серпентинита, актинолита и др.

В ультраосновных породах наблюдаются серпентинизация и оталькование. Приповерхностные вулканогенные месторождения золото-серебряных, сурьмяных и полиметаллических руд, приуроченные к вулканогенным породам преимущественно андезитодацитового состава, часто сопровождаются пропилитизацией — замещением боковых пород ассоциацией хлорита, карбонатов, эпидота, пирита и др.

Некоторые типы изменений, в том числе широко распространенные, называются по ведущим новообразованным минералам: каоли-

низация, алунитизация, цеолитизация, турмалинизация, графитизация, флюоритизация, гематитизация, баритизация и др.

К группе околорудных измененных пород относят породы, претерпевшие вторичные изменения, т.е. преобразования вмещающих рудные залежи пород в зоне окисления. Они выражаются обычно в осветлении пород, широком развитии охр, возникающих при окислении сульфидных руд, образовании иногда «железных шляп», состоящих из гётита, гидрогётита, гематита, халцедона, опала, пирита, малахита и др. Железные шляпы, являясь хорошим поисковым признаком, нередко сами представляют собой объекты промышленной разработки (железо, золото, малахит и др.).

Геофизические аномалии. Тела полезных ископаемых по своим физическим свойствам нередко существенно отличаются от вмещающих пород. Это обусловливает возникновение аномалий в геофизических полях и возможность выявления их соответствующими методами. Геофизические аномалии являются поисковыми признаками месторождений, хотя далеко не все они бывают вызваны присутствием залежей полезных ископаемых.

Гравитационные аномалии, т.е. зафиксированные в гравитационном поле участки с отклонениями значения ускорения силы тяжести от нормальных, обусловлены неоднородностью строения земной коры. Положительные аномалии бывают вызваны наличием относительно крупных масс пород с высокими плотностными характеристиками. Такие аномалии часто фиксируются под залежами железных руд, хромитов, сульфидов и др.

Магнитные аномалии — изменения напряженности магнитного поля, вызванные присутствием неодинаковых по магнитным свойствам пород. Обычно тела полезных ископаемых характеризуются повышенными по сравнению с вмещающими породами содержаниями магнитных минералов, вызывают положительные магнитные аномалии, интенсивность которых зависит от типа руд и их объема. Хрестоматийными примерами месторождений, интенсивно возмущающих магнитное поле, являются Курская магнитная аномалия и гора Магнитная на Урале.

Присутствие среди относительно однородных вмещающих пород объектов, отличающихся от них своими электрическими свойствами, обусловливает возникновение ***электрических аномалий***, т.е. отклонений электромагнитного поля от его нормального значения. В зависимости от того параметра, который принят в каждом конкретном случае для характеристики поля, существуют аномалии кажущегося удельного электрического сопротивления, естественного электрического поля, вызванной поляризации и др. Руды многих месторождений по сравнению с вмещающими породами характеризуются повышенной электропроводностью, более низкими показателями электрического сопротивления и т.д. Разнообразные методы электроразведки, позволяющие измерять различные параметры

естественного и искусственных электрических полей, используют для выявления объектов с отличными от общего фона электрическими свойствами.

Радиоактивные аномалии, вызванные присутствием повышенных концентраций радиоактивных элементов в рудах, служат надежным поисковым признаком для обнаружения месторождений радиоактивного сырья. Благодаря высокой миграционной способности радиоактивные элементы проникают в вмещающие породы, почвы; газообразные продукты радиоактивного распада фиксируются в почвенном воздухе.

В качестве поисковых признаков используются и другие аномалии — сейсмические, сейсмоэлектрические и др.

Геофизические аномалии отражают неоднородность строения изучаемых участков земной коры. Поэтому при использовании геофизических поисковых методов едва ли не самая трудная и ответственная задача — выяснение природы установленных аномалий, выделение тех из них, которые обусловлены залежами полезных ископаемых.

Геофизические аномалии, выявленные над месторождениями, не только фиксируют скопления тех или иных полезных ископаемых, но по своим показателям — интенсивности, площади, конфигурации — позволяют в некоторых случаях оценить масштабы объекта, глубину, характер залегания и другие параметры.

Геофизические аномалии используются не только как признаки залегающих в недрах тел полезных ископаемых. Интерпретация геофизических материалов оказывает существенную помощь в расшифровке особенностей геологического строения, в частности в выявлении ряда геологических предпосылок, например участков развития измененных пород, положения и ориентировки разрывных рудоконтролирующих структур и т.д.

Геоморфологические поисковые признаки. При поисках полезных ископаемых в некоторых случаях могут быть использованы особенности микрорельефа исследуемой территории. Дело в том, что залежи полезных ископаемых могут существенно отличаться от вмещающих пород по степени устойчивости к агентам выветривания. Поэтому тела полезных ископаемых, выходящие на поверхность, могут фиксироваться отрицательными формами рельефа — депрессиями, впадинами, карстовыми воронками, если они легко выветриваются, разрушаются, выщелачиваются и т.д. И наоборот, устойчивые тела нередко выступают в рельефе в виде гряд, цепочек коренных выходов, образуют уступы и другие положительные элементы рельефа.

Геоморфологические поисковые признаки лежат в основе поисков всех типов россыпей: золота, платины, алмазов, касситерита и других устойчивых минералов; формирование россыпей тесно связано с преобразованиями форм рельефа.

Типы и виды поисковых признаков не ограничиваются перечисленными группами. Поисковыми признаками могут служить самые разнообразные факты и явления: характер растительности, окраска пород, их текстурно-структурные особенности, наличие типоморфных минералов в породах или шлихах, типоморфных элементов или их групп в минералах и т. д. При этом информативность признаков для разных групп месторождений различна. На самом деле для каждого промышленного типа месторождений, являющегося объектом поисков, должен быть установлен свой сугубо индивидуальный комплекс поисковых признаков. От того, насколько правильно установлен такой комплекс, во многом зависит успех поисковых работ.

3.4. Прогнозно-поисковые модели месторождений

В практике поисков месторождений полезных ископаемых широко используется принцип геологической аналогии (В. И. Смирнов, 1954; А. Б. Каждан, 1984), который основан на том, что месторождения, сформированные в близких геологических условиях, обладают чертами сходства условий залегания. Это дает возможность создавать эталонные модели месторождения, обладающие всеми основными свойствами реальных объектов. Как показывает практика поисковых работ, использование эталонов-аналогов помогает в решении ряда конкретных поисковых задач.

Научно-методической основой применения принципа аналогии являются типовые прогнозно-поисковые модели, состоящие из сопряженных и соподчиненных элементов рудоносного пространства. Эти элементы определяют геологические обстановки локализации объекта поисков, они включают геологические предпосылки, поисковые критерии и другие показатели, характеризующие наличие и степень проявления рудообразующих процессов (А. И. Кривцов, 1989). На основе этих элементов выделяются свойственные данному геолого-промышленному типу характеристики месторождений, которые помогают определить систему поисковых критериев и признаков и наметить совокупность поисковых методов. Иными словами, прогнозно-поисковые модели дают ответ на вопросы: как выглядит скопление рудного вещества, в какой геологической обстановке и по каким признакам оно может быть обнаружено и оценено.

Моделирование объектов поисков является важной частью геолого-разведочного процесса — от ранних до конечных его стадий. На каждой стадии выявляется определенный комплекс признаков в соответствии с масштабом (детальностью) проводимых работ; при этом проводятся сопоставление получаемых результатов с эталоном, оценка надежности построений, корректировка самой модели.

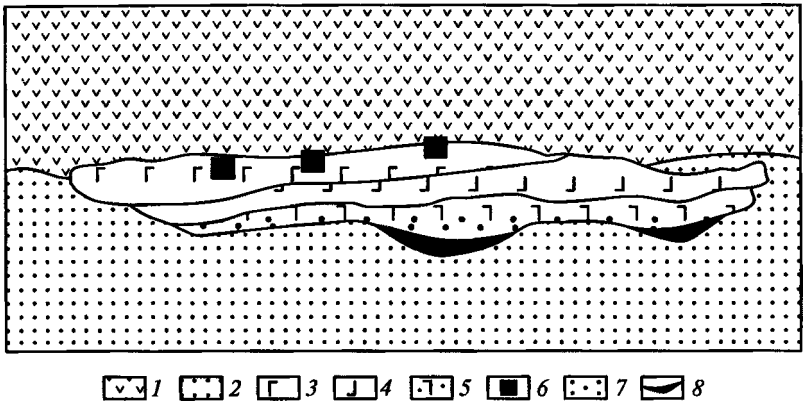


Рис. 3.3. Прогнозно-поисковая модель месторождения медно-никелевых платиноносных руд (по В. И. Кочневу-Первухову и др.):

1 — вулканогенные образования; *2* — осадочные и вулканогенно-осадочные породы; *3—5* — рудоносный интрузив: *3* — лейкократовые, *4* — мезократовые, *5* — меланократовые породы; *6* — позиция малосульфидных платиноидных руд; *7* — зоны внутриинтрузивных вкрапленных руд; *8* — придонные тела массивных и экзоконтактовых прожилково-вкрапленных руд

Основные элементы прогнозно-поисковых моделей:

– ассоциации горных пород, рудоносные формации, их части (фации, фазы и т. п.) в закономерных сочетаниях, определяемых структурой или (и) палеотектонической обстановкой месторождения, совокупность перечисленных факторов определяет условия нахождения объекта;

– наличие и уровни концентраций косвенных (минеральных, химических, физических) индикаторов данного типа оруденения, выявляемых на основе применения минералогических, геохимических и геофизических поисковых методов;

– совокупность прямых признаков (минеральных, физических, химических), указывающих на наличие данного вида полезного ископаемого;

– изменение характеристик элементов модели в зависимости от геологической обстановки (признаки скрытого оруденения, влияние перекрывающих толщ, уровень эрозионного среза, пострудные дислокации и регенерация рудных тел и т. д.).

Содержательные характеристики моделей иллюстрируются на примере медно-никелевых месторождений (рис. 3.3).

Основные элементы прогнозно-поисковых моделей отражаются в графической форме системой планов и разрезов, демонстрирующих взаимосвязь элементов для данного типа месторождений, и могут быть представлены в виде частных моделей, которые объединяют соответствующие группы критериев и признаков: геолого-структур-

ная, метасоматическая, рудно-минералогическая, геохимическая и геофизическая. В качестве примера на рис. 3.4 представлены частные модели для месторождений оловосиликатного геолого-промышленного типа.

Геолого-структурная модель **(*I*)** отображает литологические, магматические, структурные и морфологические критерии локализации месторождений оловосиликатного типа.

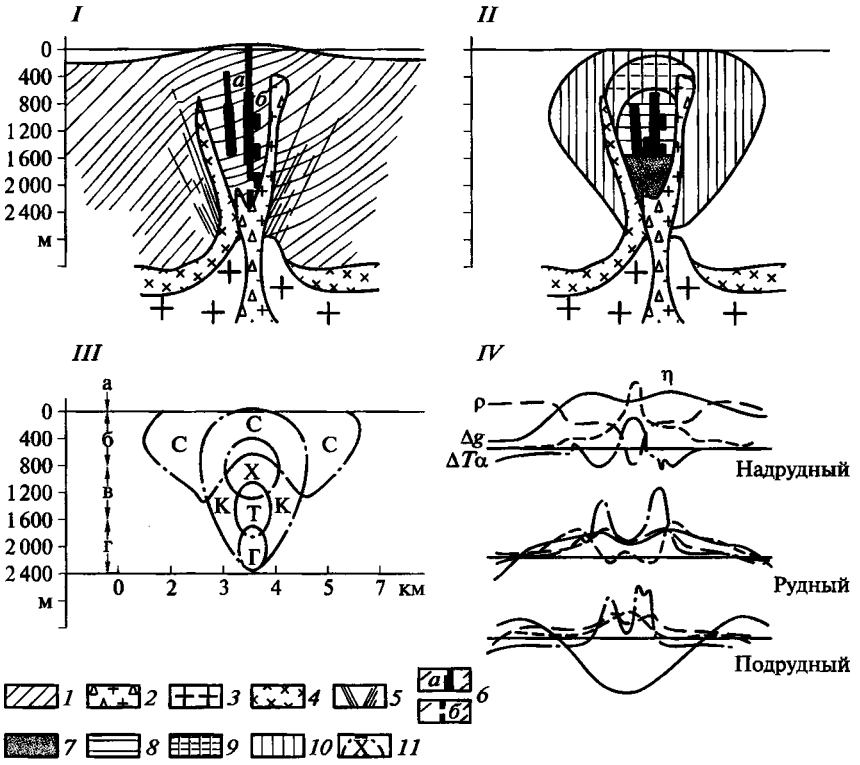


Рис. 3.4. Прогнозно-поисковая модель месторождений оловосиликатного промышленного типа (по А. Б. Павловскому и др., с изменениями):

I, *II*, *III* — модели соответственно геолого-структурная, метасоматическая, рудно-геохимическая, *IV* — геофизические графики на срезах; *1* — терригенные породы; *2* — трубки взрыва кислого состава; *3* — граниты; *4* — гранодиорит-порфиры, кварцевые диоритовые порфириты; *5* — разрывные нарушения; *6* — рудные тела: *а* — жильные; *б* — прожилково-вкрапленные зоны и штокверки; *7—10* — фации локальных метасоматитов: *7* — подрудных, *8* — рудовмещающих, *9* — надрудных, *10* — фланговых; *11* — границы распространения минеральных типов оруденения: С — сульфидно-сульфосольного, К — колчеданного, Х — хлоритового, Т — турмалинового, Г — грейзенового; положение определяющих эрозионный срез геохимических ассоциаций: а — Au-Ag, б — Pb-Zn-Ag, в — Sn-Cu-As, г — W-Mo; на графиках *IV*: Δg — поле силы тяжести, $\Delta T\alpha$ — магнитное поле, ρ — удельное сопротивление, η — поляризуемость

Литологические и магматические критерии: оловорудные объекты располагаются среди терригенных пород, характеризующихся, как правило, флишоидным строением, полимиктовым составом с преобладанием аркозов. Оруденение парагенетически связывается с пестрыми по составу интрузивными телами диорит-монцогранодиорит-гранитной формации.

Структурные и морфологические критерии: месторождения формируются в рудно-магматической системе, наложенной на вмещающие образования. Система возникла на разломе, по которому внедрялись гранитоиды, их внедрение вызвало формирование конусообразной структуры, обращенной вершиной вниз. Разрывные нарушения, составляющие остов структуры, имеют в разрезе пучковое расположение и контролируют положение рудных тел. В нижней части структуры преобладают штокверковые рудные тела, в верхней — жилы.

Метасоматическая модель (II): рудовмещающее пространство отчетливо ограничено границей распространения фаций локальных метасоматитов. Внизу слабо развита подрудная грейзеновая фация, сменяющаяся выше зоной рудовмещающих окварцованных и серицитизированных пород, которая вмещает основные рудные тела. Далее по восстанию зона постепенно переходит в пропилитоподобную с затухающей оловянной минерализацией. Эта фланговая фация локальных метасоматитов окружает центральную часть во всем объеме рудно-магматической структуры.

Рудно-геохимическая модель (III) объединяет минералогические и геохимические критерии и демонстрирует хорошую дифференцированность оруденения во всем объеме рудно-магматической системы.

Минералогические критерии: концентрации минералов олова тяготеют к центральной части структуры, где образуют эндогенную рудную колонну. В нижней ее части расположена убогая грейзеновая минерализация с касситеритом, сменяющаяся выше продуктивными касситерит-турмалиновым и касситерит-хлоритовым минеральными типами руд. На верхних горизонтах и на флангах оловосиликатные руды сменяются сульфидными с пониженными содержаниями олова. В осевой части развито преимущественно колчеданно-полиметаллическое оруденение, которое в верхнерудной части и на флангах сменяется сульфосольно-полиметаллическим.

Геохимические критерии: на месторождениях оловосиликатного типа отмечается четкая геохимическая зональность: для подрудной части характерно присутствие вольфрама и молибдена; для рудной части — олова, меди и мышьяка; надрудную часть отличают сереброполиметаллические геохимические аномалии. На периферии рудного поля геохимическую зональность продолжают ореолы золота и серебра, а на еще большем удалении — ореолы ртути и сурьмы.

Геофизическая модель (IV): на геофизических графиках видны изменения величин плотности ($\Delta g\hat{}$), магнитной восприимчивости

($\Delta T\alpha$), удельного сопротивления (ρ) и поляризуемости (η) пород рудно-магматической системы, различающиеся над месторождением, его флангами и периферией. Для надрудного и верхнерудного срезов характерна положительная гравитационная аномалия, совмещенная с переменным магнитным полем. На рудном срезе в поле силы тяжести на фоне положительных значений отмечаются две локальные положительные аномалии на флангах месторождения и отрицательная аномалия над его продуктивной частью. Подрудный срез характеризуется глубоким минимумом силы тяжести, осложненным на периферии локальными положительными аномалиями. Общее, близкое к нулевым значениям магнитное поле над месторождением образует положительную аномалию с минимумом над продуктивной частью. Слабо повышенное удельное электрическое сопротивление совмещено с положительной аномалией поляризуемости с минимумом в центральной части и максимальными значениями на флангах.

Выявление характерных черт различных по рудоносности частей месторождений — надрудных, рудных и подрудных — способствует их эффективному прогнозу, поискам и оценке.

Так, *надрудные части* месторождений оловосиликатного типа обычно не содержат прямых признаков присутствия рудных тел на глубине, поэтому при их поисках следует обращать внимание на наличие пропилитизированных пород, сульфидизации и окварцевания, колчеданной и полиметаллической минерализации, надрудных литогеохимических ореолов сереброполиметаллических аномалий с появлением на периферии рудного поля ореолов ртути и сурьмы, а также на положительные гравитационные и переменные магнитные аномалии.

Рудные части месторождений рассматриваемого типа отличаются наличием жил в верхних и центральных частях и штокверков в нижних, зон турмалинитов и хлоритовых метасоматитов, сопряженных с рудными телами, рудных литогеохимических ореолов олова, меди и мышьяка, отрицательной аномалии поля силы тяжести над центральной частью на фоне положительных значений, продуктов гипергенеза сульфидной минерализации при интенсивных процессах окисления с образованием вторичных минералов железа, меди и мышьяка.

Подрудные части отвечают рудным полям и месторождениям с глубоким уровнем эрозионного среза, близким к выклиниванию рудных тел. Для подрудных частей оруденения оловосиликатного типа характерно появление признаков практически безрудной грейзенизации с молибденитом и вольфрамитом. Вольфрам и молибден присутствуют в геохимических полях. Подрудный срез характеризуется глубоким минимумом силы тяжести, отражающим наличие гранитов, в отдельных случаях вскрываемых на глубоких горизонтах.

Итак, на базе комплексного описания формируются графические прогнозно-поисковые модели месторождений, отражающие позиции рудных тел относительно различных частей (надрудных, рудных, подрудных, фланговых) околорудного пространства и возможности их обнаружения при различных вариантах расположения эрозионного среза.

Таким образом, прогнозно-поисковые модели используют при обосновании благоприятных обстановок выявления месторождений, они способствуют повышению эффективности поисков и оценки промышленных перспектив выявленных месторождений.

3.5. Методы поисков

При поисках месторождений используют разнообразные методы, направленные на обнаружение самих залежей, а также всех видов аномалий, вызванных ими. В соответствии с этим методы поисков могут быть подразделены на геологические, минералогические, геохимические и геофизические. Отдельную группу составляют горно-буровые методы, которые применяют для проверки результатов, полученных каждым из перечисленных методов или их комплексом, и для непосредственного вскрытия залежей полезных ископаемых, положение которых предварительно оценено по характеру размещения выявленных аномалий.

По условиям, в которых ведутся поисковые работы, методы поисков подразделяются на дистанционные (космические и аэрометоды), наземные и подводные.

Таким образом, классификация поисковых методов может быть представлена в следующем виде.

I. *Космические методы поисков.* Геологическое и поисковое дешифрирование материалов различных космосъемок — цветных, спектрозональных и других специализированных съемок и измерений.

II. *Аэрометоды.*

1. Аэрогеологические методы: а) аэровизуальные геологические и поисковые наблюдения; б) геологическое и поисковое дешифрирование аэрофотоматериалов.

2. Аэрогеофизические методы: а) аэромагнитометрическая съемка; б) аэрорадиометрическая съемка; в) аэроэлектрометрическая съемка.

3. Аэротранспортные и аэродесантные методы: а) проведение наземных геологических, минералогических и геохимических исследований; б) проверка наземных геофизических исследований.

III. *Наземные методы.*

1. Геологические методы: а) метод геологической съемки — универсальный поисковый метод; б) методы специализированных геологических съемок.

2. Геолого-минералогические методы. А. Метод изучения и оценки выходов полезных ископаемых на современную поверхность. Б. Минералогические методы изучения и оценки ореолов рассеяния минералов: а) в рыхлых отложениях — метод обломочно-речной (русловый), валунно-ледниковый, шлиховой; б) в коренных породах — метод минералогического картирования, протолочно-шлиховой, шлихо-взрывной.

3. Геохимические методы. А. Литогеохимические методы изучения и оценки ореолов рассеяния химических элементов: а) в рыхлых отложениях — спектрометрические (металлометрические) и микрохимические методы по почвам и элювиально-делювиальным отложениям, донным осадкам, торфяным и другим образованиям; б) в коренных породах — спектрометрические и микрохимические методы. Б. Гидрогеохимические методы изучения и оценки ореолов рассеяния химических элементов: а) в поверхностных водотоках; б) в подземных водах. В. Биогеохимические методы изучения и оценки: а) ореолов рассеяния химических элементов в растениях — биогеохимические методы; б) ореолов развития определенных видов растений, связанных с геохимическими особенностями почв, — геоботанический метод. Г. Атмогеохимические методы изучения и оценки ореолов рассеяния: а) радиоактивных эманаций — эманационный метод; б) газов — метод газовой съемки.

4. Геофизические методы. Изучение и оценка геофизических аномалий, обусловленных телами полезных ископаемых, структурами, их вмещающими, сопровождающими их породами или сочетанием этих факторов, — методы магнитометрические, гравиметрические, сейсмометрические, электрометрические, радиометрические, ядерно-геофизические.

5. Горно-буровые методы, основанные на использовании для поисков: а) горных выработок; б) буровых скважин.

IV. *Подводные методы поисков.* Поиски полезных ископаемых, скрытых под водами рек, озер, морей, океанов: а) с надводных кораблей; б) с подводных кораблей; в) аквалангистами.

Подробному описанию различных методов, условий их применения, возможностей, точности, достоверности, способов интерпретации посвящены специальные учебные курсы, многочисленные методические руководства и другая специальная литература. Общая характеристика основных групп поисковых методов приведена далее.

Методы геологического картирования. Группа методов геологического картирования включает геологические методы, используемые при геологической съемке и поисках полезных ископаемых различных масштабов. Сама по себе геологическая съемка имеет самостоятельное значение как один из главных методов поисков. Только путем анализа геологических карт выявляются геологические закономерности, контролирующие размещение полезных ископаемых в данном районе. Геологическая карта служит также основой для

постановки других методов поисков, так как знание геологического строения изучаемой территории наряду с другими факторами позволяет правильно выбрать методы поисков, определить их масштаб, направление поисковых линий, густоту точек наблюдения и, главное, правильно интерпретировать фактические материалы, полученные в результате работ. Наконец, сведения о геологическом строении исследуемой площади в комплексе с другими материалами, собранными при поисках, позволяют произвести обоснованную геологическую оценку перспектив выявленного объекта и дать прогноз его возможного промышленного значения.

Масштаб геологических съемок, проводимых в целях поисков, зависит от сложности геологического строения изучаемой площади и от поставленных задач. Геологические карты масштаба 1:200 000 (1:100 000) составляют при проведении прогнозно-металлогенического картографирования. По содержанию эти карты комплексные. На них должны быть отражены все необходимые данные, имеющие отношение к геологическим предпосылкам поисков и поисковым признакам. Карты масштабов 1:50 000 — 1:25 000 также должны быть комплексными, но специализированными на определенный вид полезного ископаемого. Для изучаемого района они служат основным документом, обосновывающим постановку поисковых работ.

На основе геологической карты масштабов 1:50 000 — 1:25 000 объектами оценки являются потенциальные рудные поля. При поисках этого масштаба могут быть выявлены лишь весьма крупные месторождения относительно простого геологического строения: месторождения углей, минеральных солей, осадочные месторождения железа и марганца и некоторых других полезных ископаемых. При более детальных поисковых и поисково-оценочных работах, которые проводятся в контурах обнаруженных рудных полей, производятся специализированные крупномасштабные геологические съемки — 1:10 000 — 1:5 000 и крупнее.

Специализация геологических съемок при поисковых работах заключается в том, что главное внимание уделяется выявлению ведущих поисковых предпосылок прогнозируемого полезного ископаемого, а их изучение проводится с предельно возможной детальностью. Специализированное геологическое картирование как важнейший элемент входит во все рациональные системы поисковых работ.

Для выявления ведущих поисковых предпосылок изучаемых рудных полей и месторождений составляется несколько специализированных карт, позволяющих выявить или детализировать рудоконтролирующие элементы структур и сконцентрировать на них поисковые работы — геолого-структурные, литолого-фациальные, палеовулканические и др.

Кондиционность геологической карты заключается в соответствии ее содержания масштабу. Чем крупнее масштаб карты, тем подробнее

должна быть легенда, более дробными расчленение комплексов пород, выделение структурных элементов и т. д. Кроме того, все контуры, границы, элементы залегания пород должны быть установлены более точно и обоснованно. Следовательно, чем крупнее масштаб геологической карты и сложнее геологическое строение района, тем большее количество наблюдений требуется на единицу исследуемой площади.

Немаловажное значение при проведении геологической съемки (в том числе крупномасштабной) и поисков имеет использование материалов космо- и аэросъемков (материалов дистанционного зондирования), получаемых при использовании съемочных систем, работающих в оптическом и микроволновом диапазоне, радиодиапазоне электромагнитного излучения. В настоящее время при геологических исследованиях в основном используются данные аэросъемок и съемок с автоматических спутников околоземных орбит. Аэросъемки проводятся в масштабах 1:2 000 — 1:5 000 (разрешение на местности — десятки сантиметров), 1:16 000 — 1:50 000 (разрешение на местности — первые метры), 1:50 000 и мельче (разрешение на местности — многие метры). Космические съемки подразделяются на снимки высокого разрешения на местности (лучше 10 м), среднего (10 — 100 м) и низкого (хуже 100 м).

Материалы дистанционного зондирования позволяют выявлять практически весь комплекс геолого-тектонических элементов, являющихся объектами изучения при геологической съемке: площадных, стратифицированных и нестратифицированных объектов, прослеживать их границы, отдельные пласты и маркирующие горизонты, дайки, разрывные нарушения, выделять тектонические блоки складчатых и кольцевых структур, определять размещение и особенности магматических пород, а также решать ряд поисковых задач: выделение рудоконтролирующих структур, установление ареалов гидротермально-метасоматических измененных пород, размещение зон окисления и др.

В целом использование материалов дистанционного зондирования дает более полную и объективную картину пространственных особенностей изучаемых территорий и закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых.

Геолого-минералогические методы. Геолого-минералогические поиски месторождений твердых полезных ископаемых основаны на визуальном выявлении и прослеживании ореолов и потоков механического рассеяния, в зависимости от характера которых выделяются валунно-ледниковый, валунно-обломочный и шлиховой методы. К геолого-минералогическим методам относятся также минералого-петрологические и минералогические исследования, направленные на изучение околорудных метасоматитов, вкраплено-прожилковой минерализации и картирование кристалломорфических свойств минералов. Все они не имеют самостоятельного поискового значения

и используются в комплексе со специализированным геологическим картированием или другими видами геолого-разведочных работ.

Валунно-ледниковый метод используется геологами Канады, Скандинавских стран и России при поисках месторождений, перекрытых плащом ледниковых отложений. С помощью валунно-ледникового метода обнаружены многие месторождения рудных и нерудных полезных ископаемых. Он заключается в поисках рудных валунов и валунов-спутников в нижних горизонтах донных морен. Как правило, от коренного месторождения валуны расходятся в виде веера, расширяющегося в сторону движения ледника. Совместный анализ расположения валунного веера и геологической карты позволяет выделить перспективные площади обнаружения коренных месторождений.

Обломочный метод основан на изучении аллювиальных, делювиальных и элювиальных ореолов механического рассеяния. Сущность его заключается в обнаружении в отложениях обломков руды или сопутствующих минералов-индикаторов и прослеживании их вплоть до коренного выхода руды.

Обломочный метод применяется в горно-таежных районах в комплексе со специализированным геологическим картированием. С его помощью обнаруживаются коренные выходы многих рудных и нерудных полезных ископаемых, устойчивых в зоне гипергенеза, зон окварцованных и метасоматических измененных пород.

Шлиховой метод заключается в систематическом шлиховом опробовании рыхлых отложений, изучении состава шлихов, прослеживании и оконтуривании шлиховых ореолов рассеяния и выявлении по ним коренных и россыпных месторождений полезных ископаемых.

Шлихами называются концентраты, получаемые путем промывки рыхлых отложений, а также измельченных горных пород и минеральных скоплений. Шлиховой метод применяется для поисков полезных минералов, обладающих большой плотностью, механической прочностью и устойчивостью в поверхностных условиях. К этим минералам относятся золото, минералы платиновой группы, касситерит, алмаз, вольфрам, колумбит, шеелит, киноварь и ряд других минералов. Вблизи коренных выходов рудных залежей в шлихах отмечаются и нестойкие минералы, например сульфиды.

Шлиховые ореолы могут формироваться в рыхлых отложениях всех генетических типов — аллювиальных, делювиальных, элювиальных и других. Наибольшее поисковое значение имеют аллювиальные и элювиально-делювиальные ореолы. В зависимости от механической устойчивости минералов они могут образовывать шлиховые ореолы и россыпи протяженностью от нескольких километров до многих десятков километров. О протяженности расстояния до коренных источников рудных минералов в аллювиальных ореолах можно судить по степени окатанности их зерен и по наличию сростков с другими

минералами, которые указывают на близость коренных рудных выходов.

Отобранные шлиховые пробы массой от нескольких десятков до более ста килограммов (в зависимости от гранулометрического состава опробуемых отложений, вида и состава полезных минералов) подвергают обогащению посредством промывки в лотках, промывальных устройствах и приборах. Пробы промывают до получения шлихового концентрата шлиха. Полученные шлихи взвешивают, разделяют на фракции по крупности зерен, минералы мелкой фракции подвергают магнитной, электромагнитной и гравитационной сепарации.

Участки проявления аномальных концентраций рудных минералов выделяют по результатам оптического (под бинокуляром и микроскопом) определения минералов в полученных фракциях шлихов и их диагностики с применением микрохимического, люминесцентного анализов и других методов. При этом описывают кристаллографические характеристики минералов, наличие сростков с другими минералами, степень окатанности зерен, изучают ассоциации и химический состав минералов.

Исходную массу или объем промываемой пробы, массу полученного шлиха и результаты количественного определения составляющих их минералов пересчитывают на содержание ценных компонентов на 1 $м^3$ или 1 т рыхлых отложений.

В последние годы на стадии общих и детальных поисков используется шлиховой *минералого-геохимический метод*, являющийся разновидностью шлиховых методов поисков. Сущность метода заключается в изучении состава и особенностей распределения рудных элементов и элементов-примесей в околорудном пространстве по результатам анализа шлиха, его отдельных фракций или отдельных минералов.

Выявление аномальных участков основывается на изучении минералов-концентраторов рудных элементов и гидроксидов. Минералы-концентраторы (гранаты, пироксены, амфиболы, турмалин, пирит и др.) характеризуются повышенными (в 50—100 и более раз) содержаниями искомых элементов. Они дают возможность проводить шлихогеохимические поиски по шлихам, в которых отсутствуют промышленно ценные рудные минералы.

Энергетичным сорбентом рудных элементов являются гидроксиды железа (лимонит), образующиеся при окислении руд и содержащие в 100—1 000 раз больше рудных элементов, чем лимониты, отобранные из безрудных участков.

Минералогическому и геохимическому анализу подвергаются все шлихи, отмываемые при проведении поисковых работ. После промывки пробы легкая фракция отделяется в бромоформе, тяжелый остаток разделяется на магнитную, электромагнитную и неэлектромагнитную фракцию. Контрастность аномалий резко увеличивается,

если анализируется не весь шлих, а отдельные его фракции — концентраторы рудных элементов.

Поисковая информативность анализа фракций зависит от типа искомых месторождений и их типового минерального состава. В частности, для поисков золоторудных месторождений, на которых одним из главных минералов-концентраторов золота является пирит, геохимическому анализу подвергается неэлектромагнитная фракция. Если пирит окислен и замещен гидроксидами железа, то в первую очередь анализируется электромагнитная фракция. Эту фракцию необходимо анализировать и при поисках полиметаллических руд скарнового типа.

Сочетание в одном методе минералогической и геохимической информации существенно увеличивает достоверность и результативность поисков. Метод может применяться при поисках коренных месторождений благородных, цветных и редких металлов, сопровождающихся ореолами пиритизации. Особенно широкое применение метод находит при поисках месторождений, не выходящих на поверхность, а также месторождений, не сопровождающихся шлиховыми ореолами рудных минералов, устойчивых в зоне окисления (например, сульфидных).

Рудные объекты сопровождаются комплексными шлихогеохимическими ореолами Au, Ag, As, Sb, Bi, Pb, Zn, Cu, Ba и других элементов, которые в зависимости от масштабов оруденения прослеживаются на расстояния от нескольких сотен метров до 1—2 км от месторождения. Содержания ореолообразующих элементов возрастают по направлению к месторождению и вблизи месторождения в 100 и более раз превышают фоновые. Глубинность метода соответствует глубине расчленения рельефа.

Геохимические методы. Геохимические методы поисков полезных ископаемых основаны на выявлении, оконтуривании и оценке локальных ореолов элементов-индикаторов рудной минерализации и элементов-спутников в коренных породах, рыхлых отложениях, природных водах, растениях и газах. В зависимости от этого различают литохимические, гидрохимические, биохимические и атмохимические методы поисков. Литохимические методы основаны на исследовании состава и особенностей распределения химических элементов в горных породах, продуктах их выветривания и почвах, гидрохимические — на исследовании состава природных поверхностных и подземных вод, атмохимические — на изучении газового состава подземной атмосферы и ее приземных слоев, биохимические — на исследовании химического состава растений и их остатков.

Наибольшим распространением пользуются литохимические методы. Они проводятся по первичным, вторичным ореолам и по потокам рассеяния рудообразующих элементов-индикаторов.

Литохимический метод ***поисков по первичным ореолам*** применяется на всех стадиях поисковых работ. Сущность метода заключа-

ется в определении состава и особенностей распределения химических элементов, образующих аномальные концентрации в руде и околорудном пространстве. Поиски по первичным ореолам основаны на опробовании коренных пород или обломочной фракции элювиально-делювиальных отложений. Отбор геохимических проб осуществляется из естественных обнажений коренных пород, поверхностных и подземных горных выработок и керна скважин раздельно для неизмененных пород, зон тектонических нарушений, прожилково-вкрапленной, жильной, рудной и нерудной минерализации. Опробование производится методом пунктирной борозды путем отбора из интервала опробования около 10 мелких сколков. Интервал опробования определяется масштабом работ и сложностью геологического строения (табл. 3.1).

Выявление и оконтуривание первичных ореолов осуществляются по результатам анализов геохимических проб по общепринятой методике (Инструкция по геохимическим методам, 1983), основанной на сравнении геохимических параметров с параметрами фонового распределения элементов. За величину последнего принимается среднее арифметическое содержание элементов из всей выборки проб, отобранных из вмещающих пород, не затронутых каким-либо рудообразующим процессом.

Характерной особенностью первичных ореолов является горизонтальная и вертикальная зональность их строения, выражающаяся в закономерном изменении концентрации некоторых химических элементов в надрудных, околорудных и подрудных частях ореолов. Зональность ореолов обусловлена неравномерным, дифференцированным распределением или перераспределением в ореолах различных химических элементов при их миграции в процессе рудогенеза. Геохимическая зональность первичных ореолов особенно четко проявляется в изменении отношения содержаний легкоподвижных и малоподвижных элементов-индикаторов оруденения друг к другу и к содержанию основного рудного компонента в различных частях орео-

Таблица 3.1. **Интервалы отбора геохимических проб при поисках по первичным ореолам**

Масштаб работ	Расстояние между профилями, м	Интервал опробования в профиле, м
1:50 000	500	100—50
1:25 000	250	50—20
1:10 000	100	20—10
1:5 000	50	10—5
1:2 000	20	5

ла. Рассматриваемая зональность позволяет отличать обнажающиеся на поверхности надрудные срезы месторождения от подрудных.

Геохимическая зональность первичных ореолов проиллюстрирована С. В. Григоряном на примере слепого полиметаллического месторождения Канимансур (рис. 3.5). Вертикальная геохимическая зональность выражается в отчетливом сдвиге по вертикали ореолов отдельных элементов относительно друг друга: ореолы Ba и As наиболее широки и контрастны в верхних частях разреза (надрудные ореолы). В противоположность этому ореолы Mo, Co, Cu и Bi характерны только для нижних частей разреза (подрудные ореолы). Ореолы Pb и Zn наиболее интенсивны и широки на уровне рудных тел (околорудные ореолы).

На некоторых месторождениях первичные ореолы часто незначительны как по размерам, так и по интенсивности. Для выявления подобных ореолов достаточно эффективным является способ перемножения содержаний элементов-индикаторов и выделения на этой основе так называемых мультипликативных ореолов, которые по сравнению с моноэлементными более значительны по размерам и контрастности вследствие направленного усиления коррелирующихся полезных сигналов. Мультипликативные ореолы, как правило,

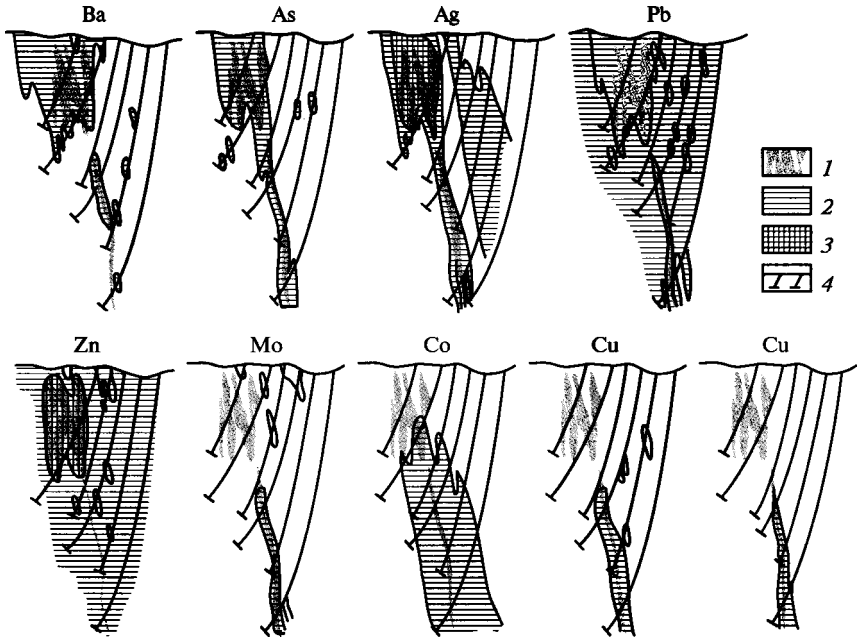


Рис. 3.5. Первичные геохимические ореолы месторождения Канимансур:

1 — рудные тела; *2* — первичные ореолы; *3* — поля повышенных концентраций; *4* — скважины

обнаруживают более тесную связь с геолого-структурными особенностями месторождений полезных ископаемых, облегчая и повышая надежность интерпретации аномалий.

Мультипликативные количественные показатели широко используют для расчетов коэффициентов зональности ореолов (отношение содержаний элементов-индикаторов в надрудных и подрудных частях ореолов, например, для золотосульфидных месторождений — $Ag \times Pb \times Ba/Cu \times Ni \times Co$), позволяющих различать фронтальные, центральные и тыловые по отношению к рудным залежам зоны. Применение коэффициентов зональности позволяет определить положение прогнозируемых рудных зон относительно выявленного среза ореола (уровень эрозионного среза месторождения) и установить пространственное положение и элементы залегания рудных зон (положение внутренних зон, падение, склонение рудных зон и т.д.).

Поиски по вторичным ореолам: различают остаточные (или механические) ореолы, обязанные рассеянию в элювиальных продуктах выветривания коренной минерализации, и наложенные — солевые ореолы, образующиеся в дальнепривностных рыхлых отложениях (эоловых, моренно-ледниковых, аллювиальных и т.д.), перекрывающих выходы месторождений. Наиболее эффективны поиски месторождений по остаточным механическим ореолам в рыхлых отложениях, перекрывающих выходы месторождений.

Литохимические поиски по механическим ореолам используют в широком диапазоне ландшафтно-поисковых условий как в аридных, так и в гумидных районах. Применение этого метода ограничивается главным образом отсутствием материала для отбора проб в условиях развития каменных осыпей, болот, мерзлотных склонов с малой мощностью сезонного оттаивания, эоловых образований и др.

Поиски рудных полей и месторождений по вторичным ореолам рассеяния элементов-индикаторов и их спутников в продуктах выветривания, эллювиально-делювиальных отложениях или почвах проводят в масштабах 1:50 000 — 1:10 000. Металлометрическое опробование выполняется обычно по системе профилей, ориентированных вкрест простирания рудоносных структур. Рекомендуемые интервалы опробования приведены в табл. 3.2.

Наложенные солевые ореолы рассеяния относятся к разряду слабых геохимических аномалий с максимальными содержаниями рудных элементов, соизмеримых с колебаниями местного фона. Наиболее благоприятные условия для образования солевых наложенных ореолов рассеяния возникают при гипергенных изменениях сульфидных месторождений (медно-колчеданных, колчеданно-полиметаллических, медно-порфировых, золотосульфидных и др.), имеющих многокомпонентный состав и относительно высокие кларки концентраций химических элементов в рудах.

Обнаружение этих слабых ореолов производится с применением методик анализа и обработки геохимических данных, которые

Таблица 3.2. **Интервалы отбора геохимических проб при поисках по вторичным ореолам**

Масштаб работ	Расстояние между профилями, м	Интервалы опробования в профилях, м
1:50 000	500	50
1:25 000	250	50—25
1:10 000	100	25—20
1:5 000	50	20—10
1:2 000	25	10

позволяют усиливать контрастность аномалий. Усиление слабых литохимических аномалий достигается применением избирательного анализа измененных подвижных форм элементов из ореолообразующей среды; привлечением специальных методов опробования; математической обработкой поисковых данных, понижающей флуктуации геохимического поля; повышением прецизионности анализов проб.

К числу методов, позволяющих усиливать контрастность наложенных солевых аномалий, относится ионно-потенциометрический метод, основанный на измерениях pH, Eh и определении концентрации ионов NH_4^+, K^+, Na^+, Cl^-, Br^- и некоторых других. Эти компоненты, обладающие высокой подвижностью в зоне гипергенеза, способны формировать аномалии над погребенными месторождениями при мощности перекрывающих рыхлых отложений в несколько десятков метров. Изучение вторичных ореолов рассеяния ионов проводится по профилям вкрест простирания рудоносных структур верхних почвенных горизонтов глубиной 0,2 м.

Принципиальная возможность определения концентраций ионов при поисках рудных месторождений по вторичным ореолам рассеяния была доказана А. П. Солововым и Н. И. Сафроновым в 30-х гг. XX в. Новые аналитические возможности исследования состава водно-растворимых соединений в почвенных пробах определили внедрение ионно-потенциометрического метода в практику поисковых работ. За последние десятилетия ионно-потенциометрические исследования были проведены в ЦНИГРИ при поисках месторождений на золоторудных полях Магаданской области, Чукотки, Закарпатья и других и показали высокую эффективность применения метода в сложных для поиска обстановках. Например, проведенные В. Б. Чекваидзе исследования на Береговском месторождении (Закарпатье), перекрытом рыхлыми отложениями мощностью от 1,5 до 30—50 м, показали, что известные рудные тела четко определяются аномалиями pH/Eh, K^+, NH_4^+, Cl^- (рис. 3.6). Ионно-потен-

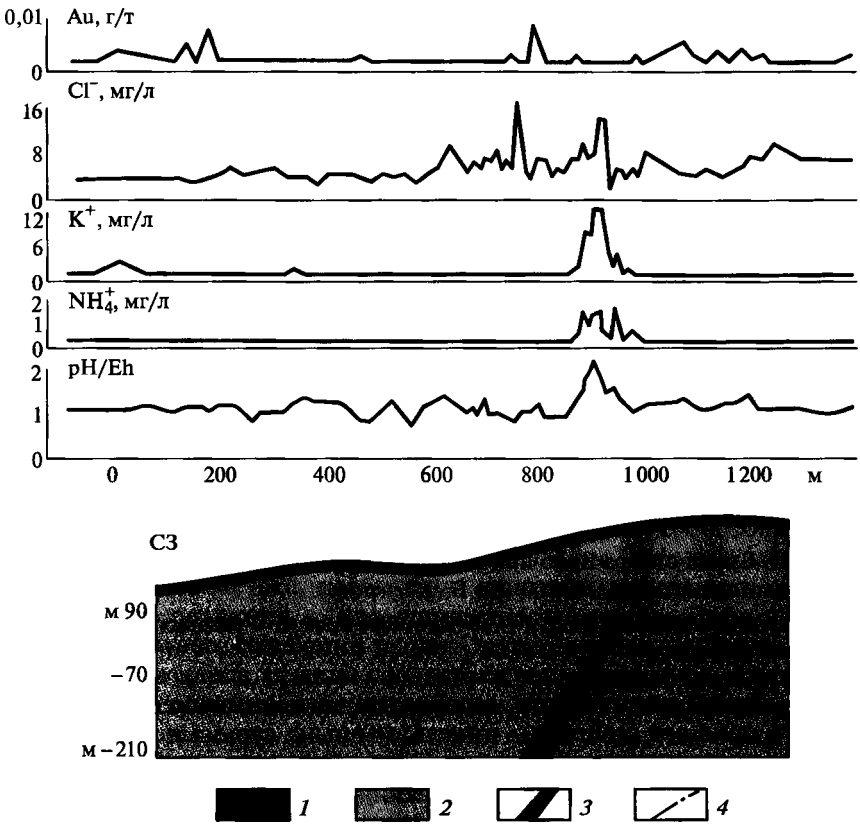


Рис. 3.6. Графики ионно-потенциометрических аномалий над слепым рудным телом Береговского месторождения:

1 — рыхлые отложения; *2* — коренные породы; *3* — рудное тело; *4* — тектонические нарушения

циометрические ореолы в ряде районов Карелии фиксируют золотоносные зоны, перекрытые мощными моренно-ледниковыми отложениями.

Поиски по потокам рассеяния — один из основных геохимических методов поисков месторождений твердых полезных ископаемых в активно денудируемых горно-складчатых районах. Поиски наиболее полно отвечают задаче ускоренного изучения обширных геологически слабо изученных рудных районов, так как позволяют в короткие сроки и с малыми затратами исследовать территории в несколько десятков и сотен квадратных километров для постановки более детальных исследований. Они наиболее эффективны для элементов — индикаторов и спутников рудной минерализации, которые обладают хорошей миграционной способностью в поверхно-

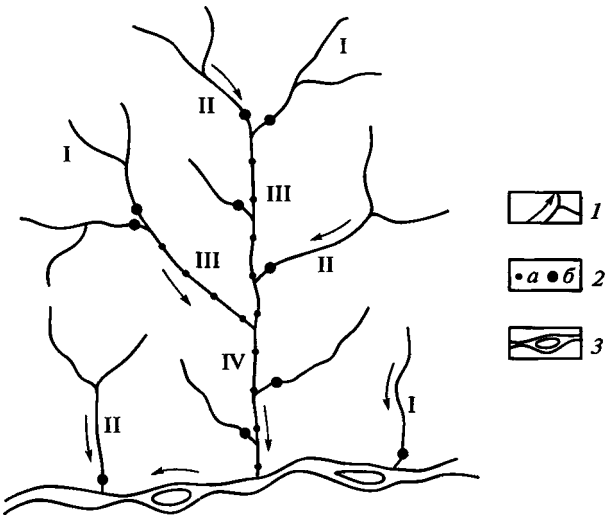


Рис. 3.7. Схема отбора проб при литохимических съемках по потокам рассеяния масштаба 1:200 000 (по В.Л. Бугрову):

1 — реки и их порядки (I—IV); *2* — точки отбора проб (*а* — рядовых, *б* — двойных); *3* — магистральная река

стной водной среде (золото, серебро, цинк, медь, свинец, молибден, уран, в меньшей степени — никель, мышьяк, сурьма и ртуть).

Литохимические съемки проводят путем систематического отбора проб из аллювиальных отложений гидросети в пределах сухой пойменной части водотоков, реже из-под воды. Плотность отбора зависит от степени эрозионного расчленения местности, разветвленности гидросети и выбранного масштаба поисковых работ. Отбор проб начинается в 50—100 м выше устьев опробуемых водотоков старших порядков и заканчивается в устьях рек II—I порядков (рис. 3.7).

Геологический осмотр потоков рассеяния начинается с осмотра русел с максимальным содержанием элементов, а затем распространяется на прилегающие склоны и водоразделы. Цель осмотра — обнаружение коренных выходов рудных тел или рудных свалов.

Гидрохимический метод поисков основан на выявлении в природных водах гидрохимических аномалий — участков распространения подземных или поверхностных вод, несущих повышенные концентрации элементов-индикаторов месторождений, хорошо мигрирующих в водной среде. К их числу относятся медь, свинец, цинк, никель, кобальт, молибден, мышьяк, йод, бром и ряд других элементов. Концентрации отдельных рудных компонентов в гидрохимических аномалиях по сравнению с фоновыми значениями в водах поверхностного и подземного стоков могут возрастать на несколько порядков. Аномальные содержания рудных элементов в поверхност-

ных и подземных водах сохраняются на расстояниях до 1 000 м (иногда несколько километров) от месторождения. Отбор гидрохимических проб осуществляется из рек, ручьев, колодцев, родников, горных выработок и скважин, вскрывающих водоносные горизонты, с последующим анализом микроэлементного состава воды.

Наиболее благоприятными объектами для гидрохимического метода поисков являются месторождения природных солей, в частности поисковым признаком месторождений калийных солей служат повышенная величина в пробах отношения Br/Cl (более 15) и K/Br (более 10) при содержании хлора более 150 г/кг. Среди рудных месторождений — это в первую очередь сульфидные месторождения, медно-колчеданные, колчеданно-полиметаллические и медно-никелевые. Вблизи сульфидных месторождений в водах резко возрастает содержание не только рудных элементов, но и сульфид-иона без существенных концентраций гидрокарбонатного иона и хлора.

Гидрохимический метод относится к числу глубинных методов поисков месторождений в коренных породах. Глубинность метода определяется врезом долины и составляет в среднем 200—500 м; для восходящих напорных вод может достигать 1 км. Характеризуя возможности этого метода, необходимо отметить зависимость его результатов от различий в гидродинамическом режиме вод разных глубин, сезонных колебаний уровня грунтовых вод, выпадения атмосферных осадков, режима гидростока рек и других факторов, что существенно осложняет интерпретацию и оценку гидрохимических аномалий.

Биохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых основаны на способности организмов отражать в химическом составе, видовых ассоциациях и морфологии организмов особенности среды обитания.

Резко проявленные изменения химического состава почв и почвообразующих пород (в частности, появление высоких концентраций рудных элементов) могут вызвать местные изменения биологических особенностей растений, выражающиеся в смене видового состава растительных ассоциаций и появлении специфических растений, являющихся индикаторами на определенные химические элементы, а также в появлении необычных форм растений, изменении темпов их развития, угнетении растений или, наоборот, их повышенном росте и т.д.

Сущность метода состоит в выявлении вторичных ореолов рассеяния путем анализа особенностей распределения химических элементов — индикаторов оруденения в растениях и их остатках. Над всеми типами месторождений в различных ландшафтно-геохимических условиях наблюдается накопление рудных элементов в растениях. При высоких концентрациях химических элементов в питающей среде большинство (95 %) видов и частей растений, а также их остатков (биообъектов) накапливают элементы.

В поисковых целях используется небольшое число видов растений и их частей, которые накапливают рудные элементы линейно пропорционально их содержанию в питающей среде. Содержание рудных элементов в пробах растительности определяется после их озоления. В одну пробу отбирается масса растений с площади в несколько квадратных метров. У древесных растений (сосны, лиственницы, осины и др.) опробуется верхний пробковый слой коры, в котором накапливаются уран, свинец, цинк, бериллий, фтор, литий, цирконий и ряд других элементов. Биогеохимические поиски золоторудных месторождений эффективны при использовании для опробования коры и листьев березы, хвои и сухих ветвей лиственницы, сосны, а также полыни, саксаула, верблюжей колючки и живого мохо-лишайникового покрова (бриогеохимический метод поисков) (рис. 3.8).

Предпочтительнее опробовать не живые (зеленые) части многолетних травянистых растений, а их сухие прошлогодние остатки и при этом нижние части стеблей, а не всю наземную биомассу. Наиболее благоприятным временем отбора надземных частей травянистых растений являются осенний и осенне-зимний периоды после окончания вегетации и созревания семян.

Глубинность биохимического метода поисков выше, чем глубинность других поверхностных геохимических методов. Максимальная мощность рыхлых отложений, ограничивающая возможность метода в степных и пустынных районах, составляет 20—50 м, в лесных рай-

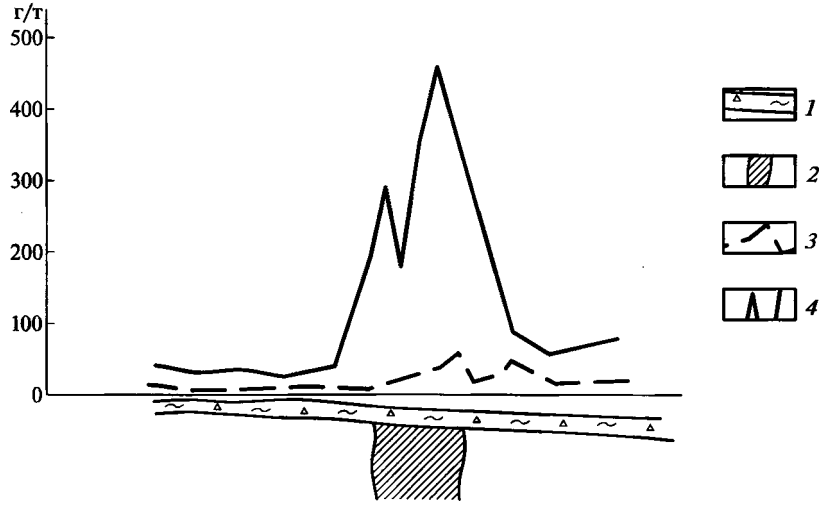


Рис. 3.8. Распределение золота в пробах мха и почв на Олимпиадинском месторождении (по В.А. Загоскину):

1 — элювиально-делювиальные отложения; *2* — рудное тело; *3* — распределение золота в пробах почв; *4* — распределение золота в пробах мха

онах гумидной зоны — 10—20 м, в районах с многолетней мерзлотой не превышает 3—10 м. Его применение оправдано лишь в тех геологических и ландшафтных условиях, когда выявление вторичных литохимических ореолов и потоков рассеяния затруднено. Следует также отметить, что сложность интерпретации биогеохимических аномалий, связанная с необходимостью учета влияния биологических, техногенных и антропогенных (выбросы и отходы горных и промышленных предприятий, загрязнение растений при перевозке руд, внесение в почву различных микроэлементных удобрений и др.) факторов на концентрацию металлов в золе растений, заметно снижает достоверность результатов биохимических методов поисков.

Атмохимические (газовые) методы поисков месторождений основаны на исследовании подземной атмосферы и ее приземного слоя — химического состава газов, насыщающих горные породы (углекислый газ, метан, сероводород, сернистый газ, пары ртути и некоторые другие газы). Важное практическое значение для поисков погребенных месторождений имеет большая проникающая способность газовых компонентов, мигрирующих на значительные расстояния от рудных тел через перекрывающие толщи рыхлых отложений. Атмохимические поиски в целом являются косвенными, однако тщательный анализ физико-химических условий образования газовых ореолов часто дает достаточные основания для уверенной геологической интерпретации выявленных аномалий и установления связи с месторождениями.

Геофизические методы. Геофизические методы поисков и разведки месторождений полезных ископаемых основаны на изучении естественных или искусственно создаваемых физических полей, в которых отражаются различия горных пород и руд по физическим свойствам.

По видам изучаемых полей геофизические методы подразделяются на магнитометрические, гравиметрические, электроразведочные, сейсморазведочные и ядерно-физические. По месту проведения измерений выделяются воздушные, морские (в том числе подводные), наземные, подземные съемки, скважинные исследования и лабораторные определения.

Магнитометрические методы (магниторазведка) объединяют геофизические методы, которые в целях решения тех или иных геолого-разведочных задач прибегают к изучению магнитного поля Земли. Характер последнего зависит от состава и строения геологических образований, слагающих тот или иной участок земной коры.

В качестве прямого поискового метода магнитометрическая съемка используется для выявления и оценки магнетитовых и титаномагнетитовых месторождений, руды которых обладают высокой магнитной восприимчивостью. На основе этих съемок выявляются и оконтуриваются аномальные магнитные поля, соответствующие рудным

залежам, детализируются и оцениваются их аномальные участки, зоны и локальные аномалии.

При поисках других полезных ископаемых магниторазведка позволяет выявлять те или иные факторы, контролирующие оруденение, либо обнаруживать рудные тела по наличию в них сопутствующих ферромагнитных минералов на некоторых медно-никелевых, хромитовых и слабомагнитных железорудных месторождениях. Применение магнитных съемок эффективно, если объекты поисков расположены в разрезах слабомагнитных пород. При поисках полиметаллических месторождений, месторождений бокситов, россыпных месторождений и ряда других полезных ископаемых магниторазведка поставляет косвенные данные.

Для решения разнообразных поисково-картировочных задач в зависимости от геологического строения изучаемой площади широко применяют аэромагнитные съемки. Аэромагнитные съемки являются основным геофизическим методом поисков кимберлитовых трубок в России и за рубежом. В частности, с их помощью выявлены практически все известные на сегодняшний день объекты в Архангельской области. Средне-, высокомагнитные кимберлитовые трубки в магнитном поле выделяются положительными локальными аномалиями, имеющими в плане преимущественно изометричную или овальную форму. Вместе с тем при использовании этого поискового метода будут пропущены слабомагнитные кимберлитовые тела.

Для месторождений, связанных с малыми магнетитсодержащими интрузиями, актуальны задачи их выявления и оконтуривания. Поисковый интерес представляют зоны экзо- и эндоконтактов интрузивов. В вулканогенных областях в магнитном поле картируются кольцевые структуры и линейные тектонические нарушения, имеющие рудоконтролирующее значение, а также вулканические сооружения. Пониженными магнитными полями выделяются участки, подвергшиеся гидротермальной проработке. Некоторые типы колчеданно-полиметаллических и золоторудных месторождений пространственно совпадают с зонами пирротиновой минерализации и отличаются повышенными значениями магнитного поля. Дайки основных пород создают узкие линейные аномалии магнитного поля значительной интенсивности. При детальных поисках магниторазведка позволяет выделять и прослеживать рудоконтролирующие зоны и кварцевые жилы, обогащенные магнититом и пирротином.

***Гравиметрические методы* (*гравиразведка*)** основаны на изучении гравитационного поля территории и являются неотъемлемой частью геофизического комплекса на разных стадиях геолого-разведочных работ. Диапазон ее применения — от задач изучения глубинного строения земной коры, отдельных рудоконтролирующих структур и выявления рудоконтролирующих факторов до задач поисково-оценочных и разведочных. Объектами поисков являются залежи железных, хромитовых, медно-никелевых и других руд, значительно

отличающихся по плотности от вмещающих пород. В гравитационном поле баритоносные горизонты, баритовые, барит-свинцово-цинковые тела также фиксируются положительными аномалиями силы тяжести.

Редкометалльные, медно-порфировые, золотокварцевые рудные районы фиксируются минимумами гравитационного поля сложных очертаний, а размещение крупных объектов в рудных районах контролируется блоками пород повышенной плотности, искажающими эти минимумы.

Измерения гравитационного поля выполняют на поверхности суши, на море, в скважинах и подземных горных выработках. В значительных объемах проводятся аэрогравиметрические работы.

Электроразведочные методы (электроразведка) объединяют многочисленные геофизические методы, основанные на изучении постоянных и переменных электромагнитных полей естественных и искусственно создаваемых источников. Выделяются следующие группы методов.

1. Методы сопротивлений, основанные на изучении искусственно созданного поля постоянного тока (различные виды электропрофилирования, электрозондирования и метод заряда).

2. Методы изучения полей физико-химического происхождения (естественного поля, вызванной поляризации, частичного извлечения металлов и контактный способ поляризационных кривых).

3. Методы низкочастотного электромагнитного поля (индуктивные методы — дипольного индуктивного профилирования, длинного кабеля, переходных процессов; электромагнитные зондирования — частотные, становления поля; магнитотеллурические методы — зондирования, профилирования и теллурических токов).

4. Радиоволновые методы (радиокомпарации и пеленгации, радиоволнового просвечивания).

Большинство перечисленных методов используют при наземных электроразведочных исследованиях, а также в скважинах и подземных горных выработках большого сечения, но некоторые низкочастотные и радиоволновые методы применяют и в аэроварианте.

Электропрофилирование состоит в измерении кажущегося сопротивления установкой при ее перемещении вдоль заданных направлений (профилей). В практике работ наиболее широко применяют установки: четырехэлектродные симметричные (симметричное профилирование), срединных градиентов, совокупности двух трехэлектродных установок (комбинированное профилирование), дипольные (дипольное профилирование).

Электрозондирование применяют для установления глубины залегания горизонтальных или пологопадающих границ раздела пород с разными электрическими сопротивлениями. Основные геологические задачи — расчленение разреза осадочных толщ, картирование по латерали на глубину тектонических нарушений, зон трещинова-

тости, интрузивных образований, изучение поведения кровли фундамента, прослеживание зон рудной минерализации и оценка мощности рыхлых отложений, перекрывающих коренные породы.

Метод заряженного тела, называемый также методом заряда, используют в различных модификациях: заряженного тела, заряда с измерением магнитного поля, электрической корреляции, погруженного электрода. Метод основан на изучении характеристик электрического или магнитного тока, создаваемого зарядом, помещенным в горные породы. Метод применяется на стадиях поисковых, поисково-оценочных и разведочных работ в целях обнаружения, прослеживания и определения элементов залегания и размеров преимущественно сульфидных рудных тел, главным образом на медно-колчеданных, колчеданно-полиметаллических, медно-никелевых и сульфидных золоторудных месторождениях. Реализуется он при наличии на объекте исследований достаточного объема буровых работ, что ограничивает его широкое применение. Другие ограничения метода заключаются в развитии на объекте вкрапленной минерализации, высокой электропроводности перекрывающих объект пород.

Метод естественного электрического поля основан на изучении естественных электрических полей, обусловленных различными электрохимическими процессами, самопроизвольно протекающими в земной коре. Естественные поля имеют разную природу и связаны с разными геологическими объектами. Метод позволяет картировать разломы, зоны минерализации, сульфидизации, графитизации, проводить поиски сульфидных руд, магнетита, графита, антрацита, кимберлитовых трубок, картировать поверхности коренных пород под наносами повышенной электропроводности. Основные преимущества метода — высокая глубинность (до 1 км) и мобильность.

Метод вызванной поляризации основан на использовании электрохимических явлений, происходящих на границе обладающих ионной проводимостью пород или электронных проводников (руд) с окружающей их жидкостью — электролитом, под действием пропускаемого в земле электрического тока. Метод вызванной поляризации эффективно используется для поисков вкрапленного сульфидного оруденения.

При проведении поисковых работ методом вызванной поляризации сочетание измерений на земной поверхности и в скважинах позволяет получить представление о пространственной структуре поля вызванной поляризации, уточнить положение руд в разрезе. С этой целью используют установки погруженного электрода и вертикального градиента, что существенно увеличивает разрешающую способность метода. Для установления возможной связи между рудными пересечениями соседних скважин применяют установки электрической корреляции.

Дипольное индуктивное профилирование используется для поисков руд с высокой электропроводимостью и основано на изучении

вихревых токов, искусственно наведенных в электропроводящих объектах, находящихся в окрестностях обследования. Характерная особенность метода — его высокая разрешающая способность при разделении объектов по электропроводности.

Метод переходных процессов применяется для поисков месторождений сульфидных руд, имеющих очень высокую электропроводность. Метод обладает меньшей, чем другие методы электроразведки, чувствительностью к изменениям рельефа местности и мощности рыхлых отложений и обеспечивает большую, чем другие индуктивные методы, глубинность исследования.

Радиоволновые методы электроразведки основаны на изучении электромагнитных полей высокой частоты, создаваемых специальными портативными передатчиками либо вещательными радиостанциями. Основными из них являются: а) метод радиокомпарации и пеленгации («радиокип»), который базируется на изучении полей дальних длинноволновых и сверхдлинноволновых радиостанций, уверенный прием волн которых наблюдается на расстояниях соответственно 1 000 и 12 000 км; б) метод радиоволнового просвечивания, основанный на изучении изменений электромагнитного поля, вызванных различной способностью поглощения электромагнитной энергии горными породами и рудами.

Метод «радиокип» применяется для геокартирования и поисковых работ масштабов 1:50 000 — 25 000 в районах с малой (первые метры) мощностью поверхностных отложений при выявлении прямых признаков хорошо проводящих медно-колчеданных и медно-никелевых руд на малых глубинах, а также косвенных признаков медно-порфировых, золоторудных в терригенных толщах, золотосеребряных руд в вулканических поясах месторождений.

Радиоволновое просвечивание применяется при поисках и разведке сульфидных, золотосульфидных, золотосеребряных, олово- и вольфрамо-полиметаллических рудных тел, железорудных месторождений, кимберлитовых трубок, пьезокварцевых полостей, угольных пластов в межскважинном, околоскважинном, межвыработочном пространствах.

Геоэлектрохимические методы основаны на реализации электронных преобразований электрического поля в форме электрохимических реакций, вызванных либо искусственным электрическим возбуждением, либо вещественными изменениями, происходящими в естественных геологических процессах.

Наиболее широко распространен геоэлектрохимический метод, основанный на частичном (избирательном) извлечении металлов (ЧИМ), сущность которого состоит в электрохимическом растворении рудных элементов при пропускании постоянного электрического тока между заземлениями, перемещении растворенных веществ в поле электрического тока, накоплении их в элементоприемниках и регистрации накопленных компонентов химическими или другими

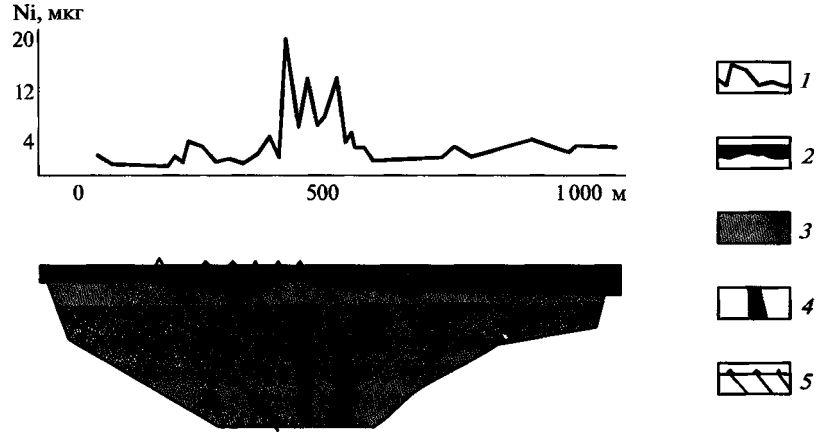


Рис. 3.9. Результаты наблюдений методом частичного извлечения металлов (ЧИМ) на медно-никелевом месторождении:

1 — график ЧИМ; *2* — моренные отложения; *3* — коренные породы; *4* — рудные тела; *5* — буровые скважины

методами анализа. Метод частичного извлечения металлов предназначен для выявления и прослеживания глубокозалегающих месторождений меди, свинца, цинка, никеля, олова, молибдена и других элементов, в том числе и на закрытых территориях под покровом рыхлых отложений мощностью до 200 м, а также для разбраковки геофизических аномалий и выделения рудных интервалов при каротаже скважин (рис. 3.9).

Сейсморазведка основана на изучении распространения в земной коре упругих волн, возбуждаемых искусственным путем — взрывом, ударом или вибрацией. Сейсмические исследования, проводимые при поисках месторождений, называют рудной сейсморазведкой. Ее задачами являются изучение геологического строения как района, так и отдельных структур, с которыми могут быть связаны рудные месторождения, прослеживание зон разрывных нарушений, контактов (в том числе на глубину), определение рельефа коренных пород.

Сейсморазведка успешно применяется при крупномасштабных картировочных и поисковых работах для локализации в разрезе геологических неоднородностей (рудных тел, кимберлитовых трубок, зон трещиноватости и др.), расчленения разрезов при поисках глубокозалегающих месторождений полиметаллов, никеля, железа, апатитов, серы и других полезных ископаемых.

Ядерно-геофизическая разведка включает группу методов, основанных на изучении естественной и искусственной радиоактивности.

Среди методов, использующих естественную радиоактивность, основное значение имеют радиометрические методы для поиска

месторождений радиоактивных руд, фосфоритовых, танталовых, ниобиевых, редкоземельных и других месторождений, руды которых содержат примеси радиоактивных металлов, а также для установления закономерностей распределения радиоактивных элементов — урана, тория и калия в составе площадных метасоматитов, сопровождающих некоторые типы месторождений благородных и других металлов.

Методы, основанные на изучении искусственной радиоактивности, используются для поисков месторождений тяжелых металлов — свинца, цинка, молибдена, ртути, сурьмы и др. Однако основная область применения ядерно-геофизических методов с использованием искусственных источников излучения — определение вещественного состава и физических свойств пород и руд в условиях естественного залегания. Ядерно-геофизические методы занимают существенное место в комплексе скважинных исследований.

Геофизические исследования скважин (ГИС) являются неотъемлемой частью геолого-разведочного процесса и позволяют при работах по поиску рудного и нерудного сырья решать следующие поисковые и оценочные задачи: литологическое расчленение разреза; выделение рудных интервалов, их глубины и мощности; определение элементного состава руд; поиски и прослеживание магнитных руд и зон в околоскважинном пространстве; изучение физико-механических свойств руд и пород. Для этого используют различные модификации электрических, электромагнитных и магнитных методов, ядерно-геофизические методы, акустический каротаж.

Горно-буровые методы. Горно-буровые методы заключаются в использовании поискового бурения и поисковых горных выработок. Они служат единственным способом подтверждения данных, полученных другими поисковыми методами. С их помощью создаются искусственные обнажения (пересечения) горных пород и рудных тел. Характерной особенностью горно-буровых работ на поисковой стадии являются значительные расстояния между выработками и небольшая глубина пересечений (за исключением специальных единичных поисковых глубоких скважин). При поисках месторождений используют в основном поверхностные горные выработки: копуши и расчистки на склонах, врезы, канавы, единичные траншеи по простиранию выявленных рудных тел, единичные шурфы. В исключительных случаях (главным образом в условиях альпинотипного горного рельефа) проходят поисковые штольни, из которых проходят скважины подземного бурения (рис. 3.10). Строго лимитированное расстояние между горными выработками не устанавливается.

Протяженные и мощные зоны прожилково-вкрапленной рудной минерализации и штокверки вскрывают канавами на полную мощность (ширину) с расстоянием 100—200 м между пересечениями.

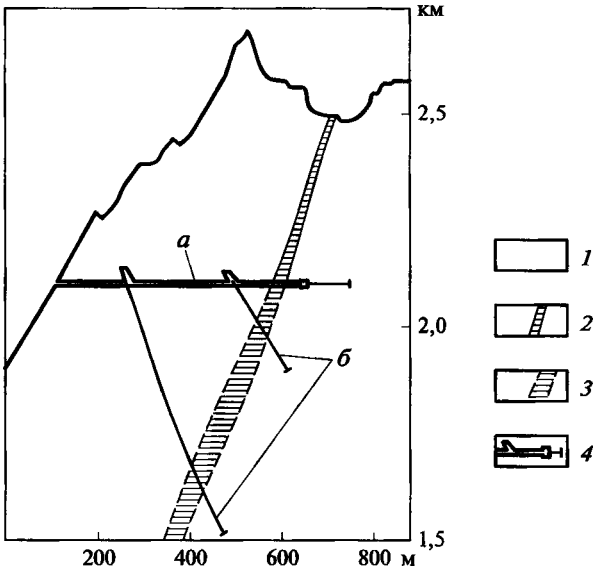


Рис. 3.10. Поиски месторождений путем использования горных выработок и скважин подземного бурения:

1 — коренные породы; *2* — рудная зона, выявленная; *3* — рудная зона, прогнозируемая по геолого-геофизическим данным; *4* — поисковые выработки: *а* — штольня, *б* — подземная скважина

Маломощные рудные тела и жилы прослеживают с помощью траншей и короткометражных канав, расположенных через 50—100 м. При значительной мощности рыхлых отложений проходят единичные шурфы с рассечками глубиной до 15—20 м. Выходы зон минерализации, кварцевых жил, гидротермально-метасоматических и других образований на склонах вскрывают расчистками. Делювиальные склоновые образования опробуют системой копушей глубиной до 0,5 м.

Вскрытие выявленных поверхностными выработками продуктивных структур и горизонтов производится единичными скважинами или единичными профилями скважин по две-три выработки в профиле до глубины 150—200 м. Для повышения достоверности и информативности бурения используют методы геофизических исследований в скважинах, рациональный комплекс которых определяется исходя из геолого-геофизических условий производства поисковых работ.

В целом сеть наземных (канавы, траншеи, отдельные шурфы и др.) выработок в совокупности с единичными скважинами колонкового бурения должна обеспечить оценку прогнозных ресурсов категории P_2 и P_1.

3.6. Комплексирование методов. Прогнозно-поисковые комплексы

Каждый объект поисков (месторождение) обладает комплексом признаков, для обнаружения которых применяется широкий спектр геологических, геолого-минералогических, геохимических методов и их различных модификаций в сочетаниях, обеспечивающих надежное установление как признаков объектов, так и самих объектов. Комплексное использование нескольких различных методов поисковых работ позволяет получить максимальный объем информации для наиболее полного решения поисковой задачи при минимальных затратах средств и времени (В. М. Крейтер, 1969; Красников, 1965; Каждан, 1985 и др.). При этом исключаются лишние методы, не дающие дополнительной информации.

Выбор методов, включаемых в рациональный набор, зависит от их характера и степени проявленности тех признаков, которые должны быть выявлены. А это в первую очередь определяется геолого-промышленным типом месторождения, являющегося объектом поисков, поскольку каждый геолого-промышленный тип характеризуется определенными особенностями, которые могут служить поисковыми признаками.

Как показывает практика поисковых работ, наиболее употребляемыми и универсальными методами, включаемыми в рациональный комплекс, являются *геологические* и *геохимические*. Эти методы в определенных условиях эрозионного вскрытия и обнаженности изучаемых площадей могут применяться при поисках любых месторождений. Область использования шлиховых методов ограничена теми типами месторождений, в состав руд которых входят тяжелые и химически устойчивые минералы. Геофизические методы отличаются узкой направленностью на определенные типы месторождений, в частности магнитные съемки являются ведущими при поисках магнитных железных руд, электроразведка широко применяется при поисках сульфидных месторождений меди, свинца и цинка, радиометрические методы — при поисках месторождений урана, тория и редких земель. К числу основных методов при поисках алмазных месторождений кимберлитового типа относятся гравиметрические и магнитометрические съемки. В остальных случаях геофизические методы являются вспомогательными и широко используются в комбинации с другими поисковыми методами.

Содержание рационального комплекса поисковых методов определяется целями, задачами и масштабами геолого-разведочных работ на данной стадии поискового процесса. Для каждой стадии характерен свой комплекс методов и видов работ, направленных на решение задач этой стадии.

Задача поисковых работ ранних стадий — установление комплекса поисковых критериев и признаков в целях обнаружения перспективных участков. Основу комплекса составляет геологическое картирование, обеспечивающее создание геологической основы качественной интерпретации результатов геофизических и геохимических методов поисков, также включаемых в рациональный комплекс на ранних стадиях поисков. Важное значение имеют дистанционные аэрокосмические методы, позволяющие установить простирание пород, тектонические нарушения, системы трещин, дайки изверженных пород, контуры измененных пород, в благоприятных случаях рудные тела и т.д. Из числа геолого-минералогических методов преобладают валунно-обломочные и шлиховые, а из геохимических — литохимические методы поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния в донных осадках.

Конечной целью поисково-оценочных работ является обнаружение промышленных месторождений и рудных тел. Применяемый комплекс методов существенно усложняется. Его основу составляют геологические и геолого-минералогические методы, включающие специализированные геолого-структурные, литолого-фациальные съемки, минералого-петрографические и петрохимические методы с применением поверхностных (иногда и подземных) горных выработок, картировочных, поисковых и поисково-оценочных скважин колонкового бурения. Используется также широкий арсенал детальных геофизических методов, в том числе и методов скважинной геофизики. На этой стадии геохимические поиски по вторичным ореолам рассеяния уступают свое место литохимическим методам по первичным геохимическим ореолам, включая геохимическое опробование керна буровых скважин.

На разрешающие возможности поисковых методов и состав их рационального комплекса существенное влияние оказывает обстановка ведения работ в районе поисков. Реальные условия поисков месторождений зависят от мощности перекрывающих отложений, расчлененности рельефа и степени эрозионного среза залежей полезных ископаемых. Перечисленные факторы определяют характер и степень проявленности и достоверности поисковых признаков различных частей рудных систем — надрудных, фланговых, внутренних (рудовмещающих) и подрудных. Различия в условиях нахождения рудоносных систем влияют на выбор методики работ по обнаружению рудных тел, в частности на расположение скважин, их глубину, а также набор применяемых геофизических методов, последовательность, масштабы и объемы геологических, геохимических, горно-буровых, скважинных геофизических и иных видов поисковых и оценочных работ.

В закрытых районах с региональным развитием рыхлых или слоистых перекрывающих отложений выходы рудовмещающих пород и структур, а также признаки полезных ископаемых практически

отсутствуют, в связи с чем поиски в этих условиях возможны лишь на основе глубинного геологического картирования с помощью картировочного и поискового бурения в комплексе с глубинными структурно-геофизическими исследованиями и скважинными модификациями поисковых методов. На эффективность поисковых методов в значительной степени влияют особенности состава и строения перекрывающих отложений. Например, сложные ситуации при поисках месторождений алмазов возникают в Якутии на площадях преимущественного развития в разной степени намагниченных траповых образований, в том числе непосредственно залегающих на кимберлитах. В этих случаях эффективность магнитных геофизических методов поисков коренных месторождений алмазов резко снижается, что требует внесения существенных корректив в применяемый комплекс поисковых методов.

Таким образом, выбор рационального комплекса поисковых методов в целях оптимизации проведения поисковых работ — весьма сложная задача, решение которой зависит от целей работ на каждой стадии геологоразведочного процесса, комплекса признаков объекта, подлежащих выявлению, конкретных природных условий поисков и обстановок нахождения объектов. При этом рациональный комплекс поисковых работ должен обеспечивать получение максимальной информации для выявления и оценки объектов.

Эффективное решение поисковых задач обеспечивается созданием и использованием в практике прогнозно-поисковых (геологоразведочных) комплексов, представляющих собой технологические схемы реализации геолого-разведочного процесса, позволяющие выбирать наиболее рациональные варианты проведения работ с учетом обстановки нахождения объектов поисков и уровня геологической и поисковой изученности рудоносных площадей (А. И. Кривцов, 1989 и др.).

Прогнозно-поисковые комплексы учитывают принятую стадийность геолого-разведочного процесса, основанную на принципе соответствия между стадиями работ и их целями, поисковыми объектами разного ранга. Для каждой из стадий геолого-разведочного процесса формируются и используются оптимальные комплексы методов, необходимых и достаточных для опознания объекта поисков, поэтому каждой стадии отвечают однотипные по составу блоки прогнозно-поисковых комплексов, а всему процессу — сумма подобных блоков, сопряженных по последовательности выполнения. Каждый блок комплекса представляет собой систему взаимосвязанных элементов «методы—признаки—объекты», которые должны надежно обеспечивать достижение целей геолого-разведочных работ различной детальности. При формировании блоков решаются следующие задачи: создание прогнозно-геологической модели объекта с набором соответствующих признаков — характеристик модели; разделение признаков на необходимые и дополнительные; оценка опознаваемо-

сти объекта прогноза и поисков по отдельным признакам и их сочетаниям; оценка выявляемости признаков объекта различными методами (сочетаниями методов), применяемыми в регионе или известными в геолого-разведочной практике, с учетом их разрешающих возможностей. В итоге реализации комплекса на каждой стадии геолого-разведочного процесса могут быть получены положительные, отрицательные или неопределенные результаты, в зависимости от которых принимается решение — соответственно о проведении работ последующей стадии, их прекращении или возврате к предшествующей стадии (рис. 3.11).

Подобная схема построения прогнозно-поисковых комплексов отражает не только стадийность проведения работ, но и последовательную локализацию поисковых объектов с повышением детальности. Полнота реализации схемы определяется уровнем изученности той или иной территории. В каждом конкретном случае работы должны начинаться с того отрезка геолого-разведочного процесса, началу которого отвечает выявление объекта поисков предшествующей стадии. Таким образом, каждой стадии геолого-разведочных работ соответствуют однотипные по структуре (но не по содержанию) блоки,

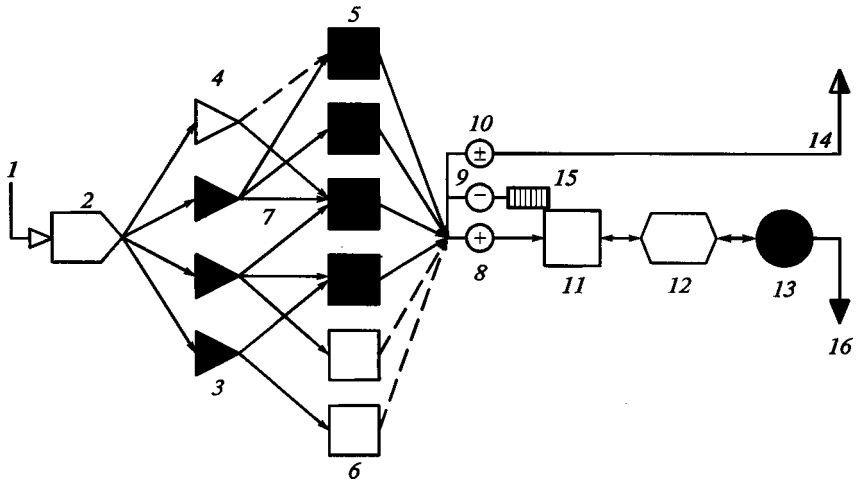


Рис. 3.11. Блок-схема стадий прогнозно-поискового комплекса (по А. М. Кривцову):

1 — переход от предшествующей стадии; *2* — стадия работ; *3—4* — методы работ: *3* — обязательные, *4* — дублирующие либо избыточные; *5—6* — признаки объектов: *5* — необходимые, *6* — дополнительные; *7* — связи «методы — признаки» и «признаки — объекты» (основные и второстепенные); *8—10* — результаты работ: *8* — положительные, *9* — отрицательные, *10* — неопределенные; *11—13* — объекты прогноза и поисков: *11* — геологические, *12* — металлогенические, *13* — ресурсы и запасы; *14* — возврат к предшествующей стадии; *15* — прекращение работ; *16* — переход к последующей стадии

а всему процессу — сумма сопряженных блоков прогнозно-поискового комплекса.

Основой прогнозно-поискового комплекса является прогнозно-поисковая модель месторождения искомого геолого-промышленного типа. Доступность элементов модели для обнаружения и применение того или иного варианта комплекса определяются условиями ведения поисков. При оценке опознаваемости объектов необходимо учитывать, что ряд признаков обладает высокой информативностью не в любых обстановках, а лишь в наиболее благоприятных. Объекты могут быть опознаны одним, несколькими или комплексом признаков. Для уверенного выявления объекта при поисках иногда бывает недостаточно установленных признаков. В этом случае проводится доработка геологической модели объекта. Оптимизация в звене «признаки — объекты» в конечном счете обеспечивает выбор комплекса характеристик, необходимых для уверенного выявления объекта при поисках.

Оценка степени выявляемости поисковых признаков теми или иными методами имеет своей целью разделить методы на обязательные, дублирующие и избыточные с исключением из комплекса двух последних категорий. Оптимизация в звене «методы — признаки» обеспечивает формирование арсенала методов, необходимых для решения задач прогнозно-поискового комплекса соответствующей стадии с наименьшими затратами. Такая оптимизация в звеньях «признаки — объекты» и «методы — признаки», проведенная в каждом блоке комплекса, позволяет создать полные (основные) варианты комплексов для месторождений ведущих геолого-промышленных типов твердых полезных ископаемых.

Различная степень благоприятности геолого-разведочных обстановок для выполнения работ по поискам, а также высокая эффективность отдельных методов в некоторых условиях определяют возможность получения сокращенных вариантов реализации комплексов. Эти варианты применимы в тех случаях, когда методы, поставленные на ранних стадиях, могут обеспечить решение задач последующих стадий, даже далеко отстоящих. Кроме того, сокращенные варианты возможны в таких ситуациях, когда на изучаемой площади те или иные признаки выявлены предшествующими работами. Соответственно сокращение определяется исключением части методов конкретных стадий либо отдельных стадий полностью. При этом, однако, следует иметь в виду, что сокращенные варианты приложимы к определенным частям площади, отвечающим указанным условиям, а применение сокращенных вариантов на конкретных участках не исключает необходимости всех работ комплекса на остальной площади.

На каждом этапе полного цикла и сокращенных вариантов прогнозно-поисковых комплексов возможно получение различных результатов решения задач: позитивного (обнаружение объекта поис-

ков), негативного (отсутствие объекта поисков на исследуемой части площади) и неопределенного (недостаток информации для решения задач стадии). Отрицательные результаты требуют прекращения работ на данной части площади. Неопределенные результаты вызывают необходимость возврата к началу предшествующей стадии, критической оценки качества выполненных работ или дополнения этой стадии новыми методами, постановка которых обеспечивает получение однозначных (либо позитивных, либо негативных) результатов. Переориентировка работ в случае получения неопределенных результатов может быть причиной неоправданных многократных возвратов к работам на одних и тех же площадях, что отрицательно влияет на эффективность поисков. Поэтому для осуществления конкретного проекта поисков требуется выбор таких методов, которые либо надежно обеспечивают выявление объектов поиска на соответствующих стадиях, либо уверенно обосновывают их отсутствие на исследуемой площади.

Таким образом, с одной стороны, критический анализ используемых комплексов методов, оценка их информативности в отношении выявленных признаков и установление опознаваемости объектов поиска признаками позволяют исключить те методы, которые либо дублируют другие, либо устанавливают второстепенные признаки. С другой стороны, подобный анализ позволяет определить методы, информативность которых столь высока, что они уже на ранних стадиях обеспечивают опознание объектов поисков, принадлежащих к целям работ заключительных стадий. Синтез информации, полученной при названных направлениях оценок методов и признаков, обеспечивает выбор и обоснование оптимальных схем комплексирования.

3.7. Условия и обстановки ведения поисков

Методика поисков рудных месторождений определяется не только геологическим строением месторождений, но и обстановками и природными условиями ведения поисковых работ, влияющими на характер и степень проявленности поисковых признаков и на возможности и особенности применения поисковых методов.

Природные условия ведения поисков определяются ландшафтными особенностями территории поисков, т. е. рельефом, климатом, характером поверхностных и подземных вод, сочетанием почв и растительных сообществ.

Рельеф района поисков оказывает решающее влияние на выбор рациональных методов поисков, так как он определяет степень обнаженности района, условия эрозионного вскрытия геологических формаций и связанных с ними месторождений, характер четвертичного покрова, почв и растительности. С этой точки зрения выделя-

ются следующие основные типы рельефа, определяющие условия ведения поисков: высокогорный, среднегорный и равнинный.

В *высокогорном рельефе* с максимальными абсолютными высотами от 2 500 до 7 000 м и глубиной расчленения 2 000—4 000 м обнаженность коренных пород высокая, наносами в виде осыпей и речных отложений покрыты незначительные площади. В этих условиях преобладают процессы физического разрушения горных пород, в связи с чем зона окисления отсутствует либо проявлена слабо. Механический разнос рудного материала в виде обломков и шлихов происходит весьма интенсивно с образованием хорошо проявленных ореолов и потоков рассеяния. Высокая расчлененность рельефа позволяет изучать геологические разрезы на глубину до 2 000—3 000 м и предоставляет возможность выявления месторождений на всем этом интервале.

В *среднегорном рельефе* с наиболее характерными высотными отметками от 500—1 000 м (иногда до 3 000 м) степень расчлененности рельефа различна и соответственно различна обнаженность коренных пород — от значительной до малой, но в общем она хуже, чем в высокогорных районах. Значительные площади могут быть перекрыты элювиальными, делювиальными, пролювиальными и речными отложениями. Среднегорные районы могут быть безлесными и залесенными, что сильно осложняет поисковые работы. Зона окисления обычно хорошо проработана на значительную глубину. Разнос рудного материала происходит весьма интенсивно с образованием хорошо выраженных ореолов и потоков рассеяния всех типов. Условия для применения геохимических методов поисков весьма благоприятны.

В *низкогорных районах* с абсолютными отметками 1 000—200 м и глубиной расчленения, обычно не превышающей 100—300 м, выделяются участки с резкими и мягкими формами рельефа. В этих ландшафтных обстановках решающая роль в определении условий проведения поисков принадлежит климату.

В условиях сухого климата низкогорье хорошо открыто; в условиях средней полосы склоны и пологие вершины гор густо заросли лесами, делювий и элювий закрыты почвенным покровом, скрывающим коренные породы, обнажения приурочены к вершинам увалов и долинам рек; на севере поисковые условия несколько улучшаются за счет уменьшения густоты растительного покрова. Особенно неблагоприятны для поисков широкие речные долины, межгорные впадины, депрессии, заболоченные низины. В этих условиях наиболее эффективны поиски валунно-речным, шлиховым методами, а также по вторичным ореолам рассеяния.

В *районах со слабо расчлененным рельефом* и в *равнинных* обнаженность коренных пород очень низкая, приуроченная к бортам редких рек и оврагов; коренные породы вскрыты на малую глубину. Бóльшая часть территории поисков перекрыта чехлом молодых рых-

лых отложений, на которых часто развиваются лесные массивы. Зона окисления месторождений в связи с высоким уровнем грунтовых вод не очень глубокая, а разнос рудного материала в большинстве случаев незначителен или отсутствует. В данных поисковых условиях возможность выявления месторождений ограничена верхними, случайно вскрытыми эрозией горизонтами. Это же относится к применению геолого-минералогических и геохимических методов. Здесь возможно вести поиски, сочетая геофизические методы с буровыми.

По степени развития рыхлых отложений, перекрывающих коренные породы, различаются площади следующих категорий (по В. И. Красникову).

Площади первой категории, обнаженные или покрытые маломощными (до 1—2 м) элювиально-делювиальными отложениями, характеризуются развитием геохимических ореолов нормальной интенсивности и широким проявлением других, в том числе и визуальных, поисковых признаков. На площадях первой категории большинство используемых в практике поисковых методов могут дать положительный эффект.

Площади второй категории, перекрытые делювиально-покровными отложениями средней мощности (до 5 м), характеризуются развитием резко ослабленных у дневной поверхности ореолов рассеяния рудного вещества и редким проявлением других поисковых признаков. На этих площадях могут применяться гидрохимические и биохимические методы, обладающие повышенной глубинностью.

Площади третьей категории, перекрытые покровными суглинками и другими привностными отложениями значительной (до 20—30 м и более) мощности, характеризуются развитием неглубоких погребенных ореолов рассеяния и полным отсутствием других поисковых признаков, за исключением глубинных геофизических аномалий. На этих площадях в благоприятных условиях могут быть использованы гидрохимические и биохимические методы поисков.

Площади четвертой категории перекрыты мощным (многие десятки — первые сотни метров) чехлом отложений аллювиального, ледникового, озерного, морского и илового происхождения с глубоко погребенными ореолами рассеяния и полным отсутствием других поисковых признаков, за исключением глубинных геофизических аномалий. Перспективные площади этой категории с весьма неблагоприятными условиями ведения поисковых работ должны исследоваться глубинными геофизическими методами и подвергаться разбуриванию скважинами с их комплексным изучением.

Резко различными природными условиями проведения поисковых работ характеризуются ландшафтные обстановки аридных и гумидных биоклиматических зон.

В *аридных зонах* (полупустыни, степь, лесостепь) с щелочными и нейтральными почвами и почвенно-грунтовыми водами преобла-

дают процессы физического выветривания и переноса, связанные с резкими изменениями температурного режима. Эти ландшафты благоприятны для повышенных концентраций большинства элементов-индикаторов и спутников рудной минерализации в приповерхностных природных образованиях. Рудные выходы выщелачиваются слабо, широко развиты механические ореолы рассеяния, обычно проявленные вблизи дневной поверхности, в рыхлых отложениях при их незначительной мощности, что способствует эффективному применению литохимических методов их выявления. При более значительном покрове рыхлых отложений образуются биохимические и литохимические солевые ореолы.

В *гумидных зонах* с тропическим и субтропическим климатом преобладают биохимические процессы выветривания, приводящие к образованию мощных кор выветривания, выносу растворенного вещества и механическому перемещению продуктов выветривания. В умеренно теплых гумидных зонах высокая миграционная способность рудных элементов сохраняется, что приводит к формированию ореолов большой протяженности, часто оторванных от коренных рудных концентраций. В холодных гумидных зонах резко преобладают процессы физической дезинтеграции, морозного выветривания и выноса рудных минералов с их накоплением в аллювиальных потоках рассеяния. Химическая миграция рудных элементов и спутников минерализации проявляется слабо; рудные выходы слабо изменены.

Учитывая многообразие природных обстановок, нередко меняющихся в пределах сравнительно небольших площадей, для обоснования постановки тех или иных поисковых методов составляют карты ландшафтно-поискового районирования.

Таким образом, наиболее эффективные и информативные методы поисков месторождений данного геолого-промышленного типа выбирают с учетом природных условий в районах проведения поисковых работ, состава и мощности перекрывающего рыхлого чехла.

Конкретные обстановки выявления месторождений зависят от степени эродированности, мощности перекрывающих отложений и расчлененности рельефа. Они определяют возможность выявления различных по рудоносности частей месторождений: надрудного, рудоносного, подрудного пространств, что отвечает основным обстановкам ведения поисков месторождений.

Обстановки могут быть проиллюстрированы на примере медно-порфировых месторождений (рис. 3.12).

Первый вариант соответствует эрозионному срезу, расположенному на расстоянии сотен метров (более 200—300 м) над верхними выклиниваниями рудоносных штоков. Прямые признаки присутствия на глубине рудных тел не имеют выражения на дневной поверхности. К косвенным могут быть отнесены следующие: наличие жильной полиметаллической, иногда серной с марказитом минерализации

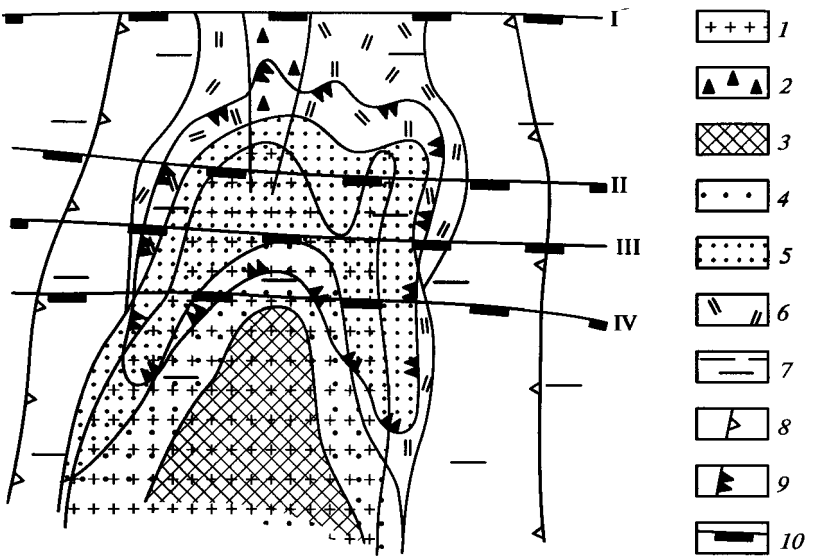


Рис. 3.12. Модель медно-порфирового месторождения (по А. И. Кривцову):

1 — рудоносный порфировый интрузив; *2* — брекчиевая трубка; *3* — кварцевое ядро; *4* — зона калишпатизации и биотитизации; *5* — зона окварцевания и серицитизации; *6* — зона аргиллизации; *7* — пропилитизированные породы; *8* — границы ореола интенсивной пиритизации; *9* — контуры промышленных руд; *10* — варианты положения эрозионного среза (I—IV)

в пропилитизированных и аргиллизированных породах; тела брекчий, нередко минерализованных; слабо проявленные комплексные геохимические аномалии меди, мышьяка, свинца, цинка и серебра; гравиметрические аномалии, подтверждающие присутствие на глубине интрузивных масс.

Второй вариант отвечает эрозионным сечениям, вскрывающим верхнее выклинивание рудоносных порфировых интрузивов. Эти зоны маркируются пропилитизацией, мощными ореолами пиритовой вкрапленности с халькопиритовой минерализацией, проявлениями свинцово-цинковой минерализации, турмалиновыми и медно-турмалиновыми жилами, выходами рудоносных порфировых интрузивов, комплексными геохимическими аномалиями меди, молибдена, свинца, цинка, золота и серебра, брекчиевыми телами.

Третий вариант соответствует эрозионному срезу, вскрывающему рудоносное пространство. При таком положении эрозионного среза на поверхности обнажаются рудоносные порфировые интрузивы, минерализованные зоны в окварцованных, серицитизированных, калишпатизированных породах, пиритовые ореолы в пропилитах, часто присутствуют брекчиевые тела. Оруденение находит отражение во вторичных геохимических аномалиях меди, молибдена,

свинца и цинка, а также в геофизических аномалиях вызванной поляризации, совпадающих с геохимическими аномалиями и отражающих наличие зон сульфидизации. В гумидных ландшафтах в этих обстановках проявляются зоны окисления и выщелачивания, которые благодаря развитию вторичных минералов железа, меди, цветных охр хорошо выделяются на фоне окружающих пород и обнаруживаются при дешифрировании аэрофотоснимков.

Четвертый вариант отвечает положению глубокого эрозионного среза, близкого к нижним выклиниваниям рудных тел. Для этого варианта характерно развитие окварцованных пород и кварц-полевошпатовых тел, сопровождающихся медно-молибденовой, а также нередко вольфрамовой и оловянной минерализацией с соответствующими комплексными геохимическими аномалиями меди, молибдена, висмута, вольфрама, олова.

Различия в проанализированных обстановках ведения поисков влияют на выбор методики работ по выявлению рудных тел, расположение скважин, их глубину, а также набор применяемых геофизических методов.

3.8. Оценка результатов поисковых работ

В результате поисковых работ оконтуриваются потенциальные рудные поля, перспективные участки, обнаруживаются проявления полезных ископаемых и оцениваются выявленные месторождения, которые по своим геологическим, экологическим условиям и технико-экономическим показателям пригодны для промышленного освоения. Поиски осуществляются дискретно, поэтапно в соответствии со стадиями поисковых работ (общие поиски, поиски, оценочные работы), каждая из которых имеет свои задачи и конечные результаты. Переход к последующей стадии основывается на достижении результатов предшествующей стадии, которые находят отражение в изученности площадей, намечаемых для постановки поисковых работ.

Основной задачей *стадии общих поисков*, проводимых в масштабах 1:50 000 — 1:25 000, является геологическое изучение недр в целях выделения рудных полей и локальных площадей, перспективных для обнаружения месторождений полезных ископаемых. При поисковых работах этого масштаба проводится геологическое изучение участков распространения полезных ископаемых, устанавливается природа выявленных геофизических и геохимических аномалий и в результате этого выделяются новые или уточняются параметры известных рудных полей и перспективных участков с оценкой прогнозных ресурсов по категории P_2.

Показателями результативности работ стадии общих поисков являются выделение и оконтуривание потенциальных рудных полей

и геолого-экономическая оценка их прогнозных ресурсов по категории P_2.

Показатель качества работ этой стадии геолого-разведочного процесса — достоверное выявление необходимых и возможных факторов (прямых и косвенных поисковых признаков), позволяющих оконтурить потенциальные рудные поля и разбраковывать их по степени перспективности. При достижении необходимых показателей результативности и качества работ на стадии общих поисков в потенциальном рудном районе на основе построенной прогнозно-поисковой модели выделяются потенциальные рудные поля с различной степенью перспективности. Определяется очередность их дальнейшего поискового освоения с учетом условий проведения поисков, устанавливаются последовательность, масштабы и объемы геологических, горно-буровых, геофизических и геохимических работ стадии поисков.

Предполагаемые геологические и поисковые обстановки нахождения выделенных рудных полей (с разбраковкой их по степени перспективности), вероятные глубины обнаружения промышленных руд, места заложения планируемых горных выработок и буровых скважин отражаются на комплекте специализированных геологических прогнозных карт масштаба 1:50 000, служащих основой для планирования дальнейших работ.

Работы *стадии поисков* осуществляются в пределах рудных полей или их частей, выявленных в процессе предшествующих геолого-разведочных работ, по которым имеется оценка прогнозных ресурсов категории P_2. В зависимости от сложности геологического строения территории, геолого-промышленного типа прогнозируемого оруденения и глубинности исследований поиски могут проводиться в масштабах 1:25 000 — 1:10 000. По результатам полученной геологической, геохимической и геофизической информации и ее комплексной интерпретации локализуются перспективные площади, рудные поля, участки и объекты. Проверка природы геохимических и геофизических аномалий, вскрытие и изучение проявлений тел полезных ископаемых осуществляются поверхностными горными выработками и поисковыми скважинами. В отобранных пробах определяется содержание основных и попутных компонентов, в необходимых случаях — предварительные технологические свойства руд. Основной результат поисковых работ — геологически обоснованная оценка перспектив исследованных участков и объектов. На изученных проявлениях полезных ископаемых определяются прогнозные ресурсы категории P_1, а также частично подсчитываются запасы категории C_2.

Показателями результативности стадии поисковых работ являются оконтуривание поисковых участков (потенциальных месторождений) и оценка их ресурсов категории P_1, подлежащих реализации в запасы при дальнейших геолого-разведочных работах (ГРР). По-

казатель качества работ этой стадии — достоверное выявление необходимых и возможных факторов (прямых и косвенных поисковых признаков), свидетельствующих о возможности обнаружения потенциального месторождения.

При достижении требуемых показателей результативности и качества ГРР на стадии поисковых работ в пределах ранее оконтуренных рудных полей на основе построенной прогнозно-геологической модели должны быть выделены площади поисковых участков с различной степенью перспективности в отношении вероятности обнаружения промышленного месторождения. Для этих участков определяются последовательность, масштабы и объемы последующих ГРР стадии оценочных работ. В случае выявления рудных подсечений при проверке геофизических и геохимических аномалий или площадей с комбинацией обоих типов аномалий дальнейшая их оценка проводится на стадии оценочных работ.

Работы *оценочной стадии* выполняются на выявленных и положительно оцененных проявлениях полезных ископаемых. Для оконтуривания площади и изучения геолого-структурных особенностей потенциально промышленного месторождения проводится геологическая съемка и составляется геологическая карта масштабов 1:25 000 — 1:10 000 для крупных месторождений и масштабов 1:5 000 — 1:1 000 для небольших и сложных. Геологическая съемка сопровождается детальными минералого-петрографическими, геофизическими и геохимическими исследованиями. Изучение рудовмещающих структурно-вещественных комплексов, вскрытие и прослеживание тел полезных ископаемых осуществляются с поверхности канавами, шурфами, поисково-картировочными скважинами.

Изучение глубины залегания выполняется преимущественно буровыми скважинами до горизонтов, обеспечивающих вскрытие рудоносных структурно-вещественных комплексов, а при глубоком их залегании — до горизонтов, экономически целесообразных для разработки с использованием современных технологий освоения месторождений. При высокой степени изменчивости полезной минерализации или при сильно расчлененном рельефе для изучения объекта на глубину возможно применение подземных горных выработок.

Все вскрытые в естественных и искусственных обнажениях выходы полезной минерализации подвергаются опробованию и анализу на основные и попутные компоненты. В необходимых объемах проводится контроль качества отбора и обработки проб и их анализов.

Технологические свойства полезного ископаемого изучают по лабораторным технологическим пробам, в скважинах и горных выработках проводится комплекс гидрогеологических и инженерно-геологических наблюдений для обоснования способа вскрытия и разработки месторождения.

В результате оценочных работ степень геологической изученности месторождения, качества, вещественного состава и технологических

свойств полезных ископаемых, а также горно-геологических условий эксплуатации должна обеспечить предварительную оценку промышленного значения месторождения с подсчетом всех или большей части запасов категории C_2.

Обязательной частью комплекса работ является геолого-экономическая оценка месторождений.

Показатель результативности оценочных работ — предварительная оценка промышленного значения месторождения с подсчетом всех или большей части запасов по категории C_2. По менее детально изученной части месторождения оцениваются ресурсы категории P_1 с указанием границ их распространения. Достоверность данных о геологическом строении, условиях залегания и морфологии рудных тел подтверждается на участках детализации с подсчетом запасов категории C_1. При этом оцениваются построенная принципиальная прогнозно-геологическая модель месторождения, обоснованность выбранных плотности сети и технических средств бурения, методика оконтуривания и подсчета резервов и запасов, планируемые технология обогащения руд, способы и системы отработки месторождения.

В результате оценочных работ должны быть достигнуты следующие цели:

– увязаны рудные подсечения и оконтурены тела полезных ископаемых по бортовому содержанию основных полезных компонентов, принятому с учетом геолого-экономических условий района проведения работ;

– определены морфология, размеры и условия залегания тел полезных ископаемых;

– изучены минералого-геохимические и текстурно-структурные особенности руд;

– расшифрованы (в первом приближении) внутреннее строение рудных тел — границы природных типов руд, включая окисленные, распределение содержаний основных полезных компонентов;

– детализирована комплексная прогнозно-геологическая модель месторождения для использования при разбраковке перспективных участков, а также геофизических и геохимических аномалий рудной природы;

– определены принципиальная схема переработки руд и основные технологические показатели;

– обоснована плотность сети, выбраны технические средства разведки и методика оконтуривания и подсчета запасов;

– обоснованы планируемые способы и системы разработки месторождения.

Таким образом, оценка результатов поисковых работ проводится на каждой стадии геолого-разведочных работ после их завершения. Основными оценочными показателями поисков являются получение достоверных результатов, определенных задачами работ каждой ста-

дии и суммированных в итоговых картографических и текстовых материалах, а также категорий прогнозных ресурсов и запасов полезных ископаемых, соответствующих детальности проведенных работ, обоснованность подготовки выделенных перспективных площадей и объектов для постановки последующих стадий работ.

При этом основные требования к эффективности и качеству работ должны базироваться на следующих положениях:

– реализация работ каждой стадии обеспечивает выявление объектов — потенциальных рудных полей, месторождений или рудных тел и эквивалентных им ресурсов и запасов;

– объект работ стадии устанавливается на основе выявления ряда обязательных геологических, геохимических и геофизических факторов, которые находят отражение в конечных результатах работ (картах, разрезах и т. п.);

– набор видов и методов работ и их объемы определяются необходимостью установления основных факторов (критериев и признаков) и разработки конечных итоговых документов;

– переход к последующей стадии допустим лишь при полном достижении результатов предшествующей стадии, которые находят отражение в изученности (подготовленности) площадей, намечаемых для постановки работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кривцов А. И.* Прикладная металлогения. — М.: Недра, 1989.

2. Методика поисков золоторудных месторождений / под ред. М. М. Константинова и В. А. Нарсеева. — М.: ЦНИГРИ, 1990.

3. Методические основы прогноза и поисков свинцово-цинковых месторождений / [Д. И. Горжевский и др.]. — М.: Недра, 1987.

4. Положение о порядке проведения геологоразведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые): утв. М-вом природных ресурсов РФ 05.07.99. — М., 1999.

5. *Смирнов В. И.* Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. — М.: Изд-во МГУ, 1957.

Глава 4
Разведка месторождений полезных ископаемых

4.1. Задачи и методы разведки

Месторождения полезных ископаемых

Объектом геолого-разведочных работ являются промышленные месторождения. К числу *промышленных месторождений* относятся такие скопления полезных ископаемых, которые по качеству и количеству содержащегося в них минерального сырья, условиям залегания технически возможно и экономически целесообразно разрабатывать на данном уровне развития производительных сил.

Главнейшая задача разведки как раз и заключается в выявлении промышленных месторождений, их оценке и определении возможностей наиболее целесообразного их использования.

Для целей разведки (особенно на ранних этапах) из множества особенностей, характеризующих месторождения, из широкого круга присущих им свойств и качеств наибольшее значение имеют форма тел, структура месторождения, изменчивость залежей и объекта в целом.

Формы тел полезных ископаемых. Телом, или залежью, полезного ископаемого называется локальное скопление природного минерального сырья, морфология которого определяется приуроченностью к конкретным геологическим структурам или их сочетаниям.

Тела полезных ископаемых разнообразны по форме: они бывают плоскими, изометричными, вытянутыми по одной оси. В организации разведочного процесса форма тел играет существенную роль. В общем случае все разнообразие форм тел полезных ископаемых может быть сведено к следующим основным типам.

Плоские тела полезных ископаемых — пласты, пластоподобные, жильные и некоторые линзовидные залежи.

Пласты представляют собой тела, ограниченные двумя параллельными поверхностями напластования (подошва и кровля), имеющие мощность, на несколько порядков меньшую размеров по простиранию и падению. Пластовые залежи отличаются устойчивой морфологией, выдержанностью, как правило, относительно однородным составом (рис. 4.1). Они наиболее типичны для рудных и нерудных месторождений осадочного генезиса. Положение пластовых залежей определяется элементами слоистости пород, они обладают обычно четкими природными границами, относительно простым, непрерывным или слабо прерывистым внутренним строением. Нередко пласты полезного ископаемого разделяются вмещающими

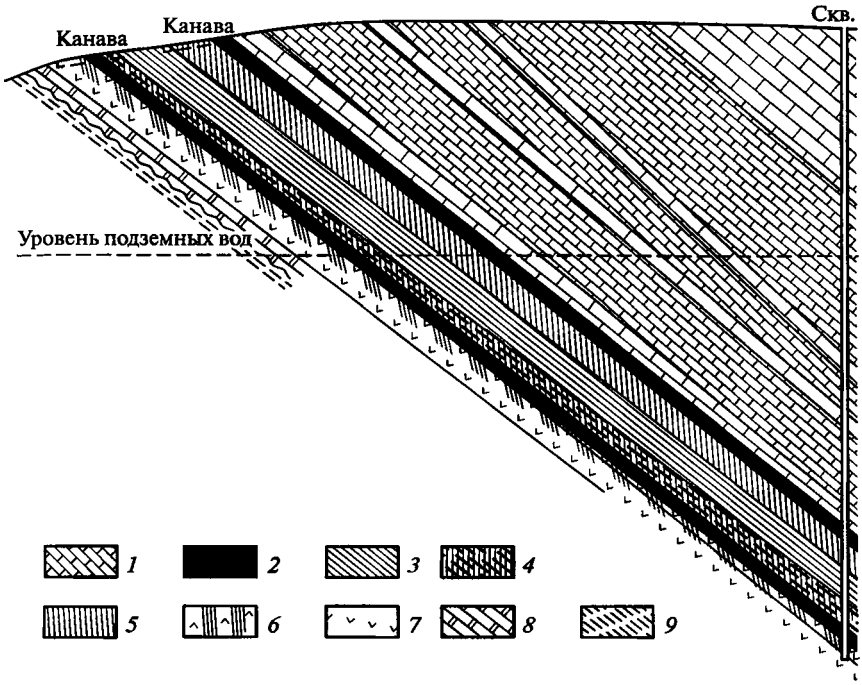


Рис. 4.1. Геологический разрез месторождения фосфоритов:

1 — известняки; *2* — фосфорит; *3* — фосфорит среднего качества; *4* — фосфорит, переслаивающийся со сланцами; *5* — фосфато-кремнистые сланцы; *6* — фосфорит окремненный; *7* — кремни; *8* — доломиты; *9* — окремненные породы

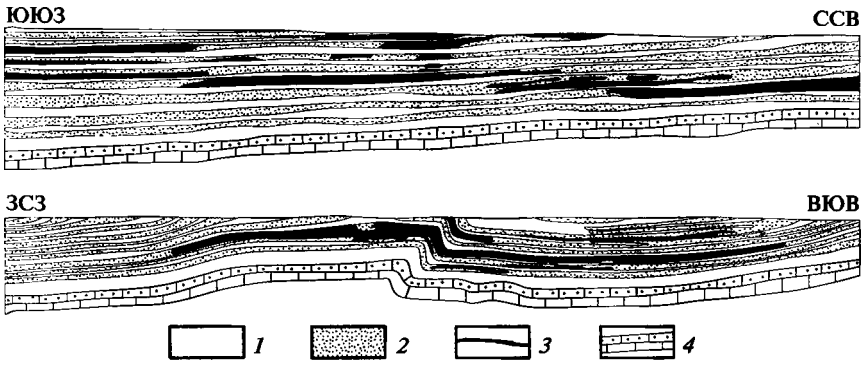


Рис. 4.2. Схематические геологические разрезы Джезказганского месторождения (по материалам Джезказганской ГРЭ):

1 — красноцветные песчаники и алевролиты; *2* — рудоносные слои; *3* — рудные залежи; *4* — известняки, песчаники, мергели

безрудными породами на пачки и отдельные слои. Таким образом, можно различать простые пласты (без прослоев породы) и сложные (с прослоями). В ряде случаев выделяются продуктивные толщи, состоящие из серии пластов полезных ископаемых (рис. 4.2). Пласты полезных ископаемых залегают согласно с вмещающими породами, вместе с ними они могут быть смяты в складки, разбиты разрывными нарушениями. Пластовые тела некоторых месторождений характеризуются изменчивой мощностью, что может быть связано, например, с явлениями карстообразования при их формировании.

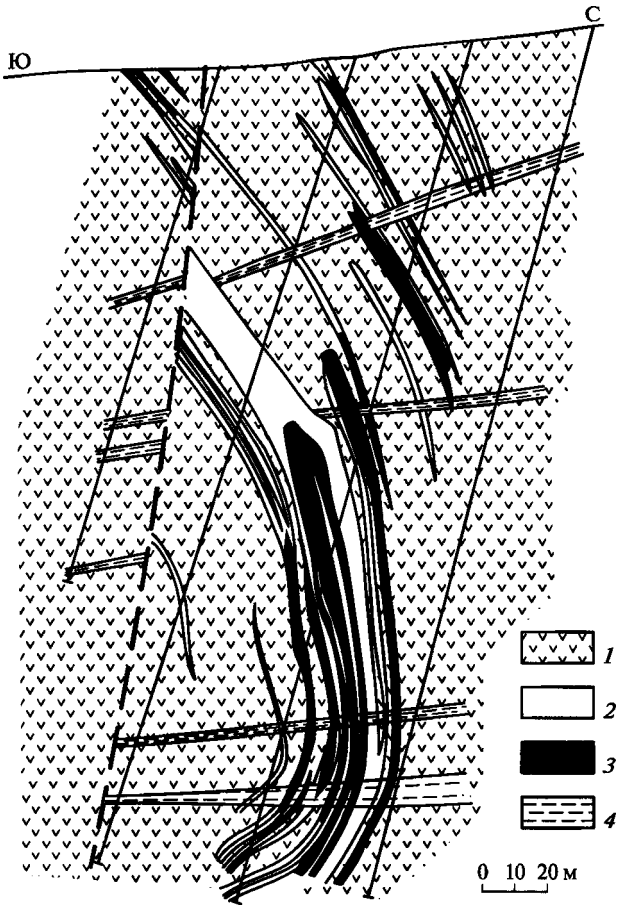


Рис. 4.3. Геологический разрез участка Ревдинского месторождения (по А. Н. Шарыпову):

1 — дуниты и аподунитовые серпентиниты; *2* — дуниты с повышенной вкрапленностью хромшпинелидов; *3* — хромитовая руда; *4* — тальк-карбонатные породы

К числу пластовых месторождений относятся осадочные месторождения железа, марганца, алюминия, углей, горючих сланцев, фосфоритов, солей и других, а также стратиформные месторождения меди, полиметаллов и др.

Пластоподобные залежи характерны для некоторых магматических, контактово-метасоматических и других месторождений, рудные тела которых располагаются в расслоенных стратифицированных массивах (рис. 4.3) или приурочены к контактам силикатных и карбонатных пород. К ним могут быть отнесены также скарнированные пластовые залежи. От пластовых залежей они отличаются меньшими протяженностью, выдержанностью, относительно более сложным строением.

К телам плоской формы относятся плащеподобные залежи месторождений, связанных с площадными и линейными корами выветривания. Месторождения залегают в приповерхностных условиях практически горизонтально. Рудные залежи характеризуются сильной изменчивостью контуров, прерывистостью, резкими колебаниями мощностей, отчетливо выраженной вертикальной зональностью (рис. 4.4). Типичными представителями этой группы могут служить месторождения силикатного никеля, а также бокситов, каолинов и др.

Определенным своеобразием отличаются залежи россыпных месторождений. Современные россыпи представлены горизонтально залегающими поверхностными образованиями, продуктивная часть которых — «пески» — подстилается «плотиком» (преимущественно коренными породами) и имеет с ним резкие природные границы. Рыхлые образования, перекрывающие продуктивную часть россыпи, русскими старателями названы «торфами» (рис. 4.5). Ширина и мощность россыпи устанавливаются по заданной величине содержания полезного компонента в процессе опробования. Погребенные россыпи обычно перекрыты мощным чехлом отложений и часто имеют наклонное залегание. Им свойственны вытянутая в плане форма и иногда сложное строение, обусловленное разделением пласта песков ложными плотиками на отдельные прослои, наличием струй, гнезд и др. Основные особенности морфологии и внутреннего строения россыпей определяются генетическим типом и условиями образования. Известны прибрежно-морские россыпи ильменита, рутила, монацита, пляжевые — золота, рутила, монацита, аллювиальные — золота, алмазов, касситерита, платины и др.

К типу плоских тел относятся также *жильные тела*, представляющие собой трещины в горных породах, выполненные минеральным веществом полезного ископаемого. По структурно-морфологическим особенностями выделяются простые, сложные жилы (рис. 4.6). Простые жилы характеризуются большой протяженностью, крупными размерами, выдержанной мощностью. Сложные жилы отличаются меньшими размерами, невыдержанной мощностью, на-

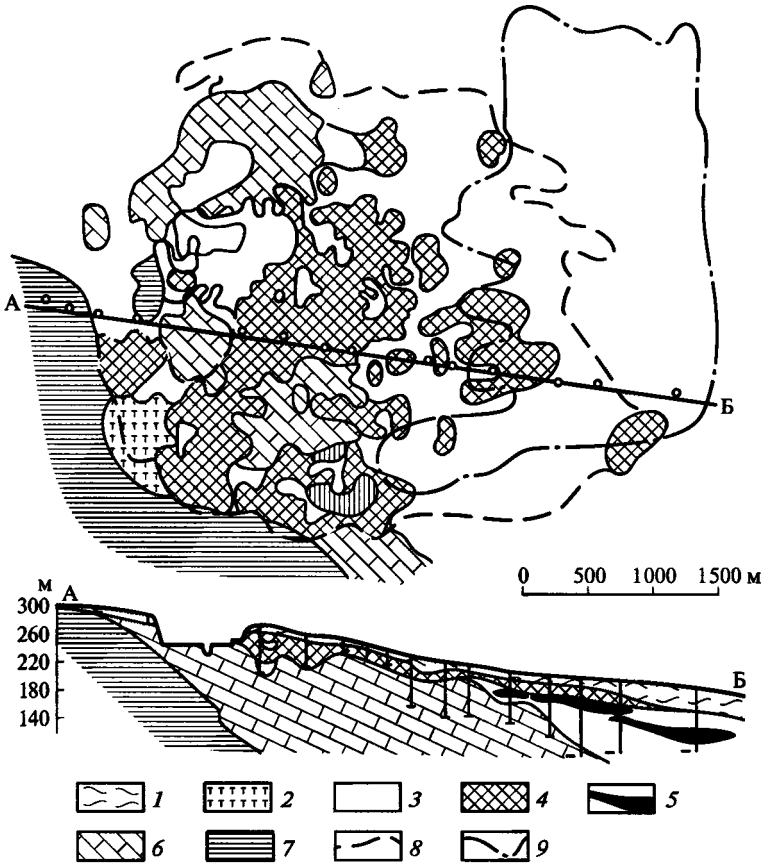


Рис. 4.4. Схематическая геологическая карта и разрез Аккермановского месторождения железных руд коры выветривания (по Г. Н. Киселеву):

1 — суглинки; *2* — глины песчаные, нередко с гипсом; *3* — глины, ожелезненные пески, галечники; *4* — бурожелезняковые руды (верхний горизонт); *5* — сидеритоглинистые руды (нижний горизонт); *6* — известняки; *7* — кремнистые сланцы; *8* — контур бурожелезняковых руд (верхний горизонт); *9* — контур сидеритовых руд (нижний горизонт)

личием раздувов, пережимов, многочисленных апофиз. Относительно крупные жилы часто образуют так называемые жильные зоны, жильные свиты и поля (рис. 4.7). Мелкие жилы иногда образуют сложные сочетания искривленных тел, пучков и других форм, приближающихся по характеру строения к штокверкам, которые благодаря высокой концентрации мелких жил могут разведываться единой системой горных выработок или скважин.

Жилам обычно свойственны резкие контакты с вмещающими породами; в то же время нередко наблюдаются изменения и мине-

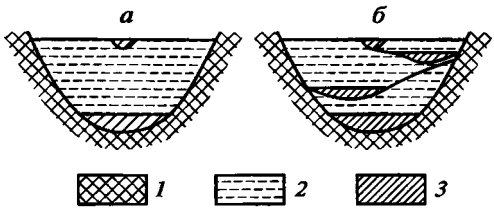


Рис. 4.5. Схематический поперечный разрез простой (*а*) и сложной (*б*) россыпи (по Ю. А. Билибину):

1 — коренной «плотик»; *2* — «торфы»; *3* — «пески»

рализация прилегающих к жиле боковых пород, которые благодаря этому могут представлять промышленный интерес. В ряде случаев наблюдаются сложное внутреннее строение жил, чередование обогащенных и бедных участков. Обогащенные участки — рудные столбы — выражены либо зонами повышенных концентраций полезных компонентов, либо раздувами жил.

Размеры и условия залегания жил определяются направлением простирания и протяженностью, углом падения и длиной по падению, склонением и мощностью.

Примерами промышленных жильных месторождений могут служить месторождения золота, олова, вольфрама, барита, флюорита и др.

Линзовидные залежи по морфологическим особенностям принадлежат к переходным образованиям между изометричными и пло-

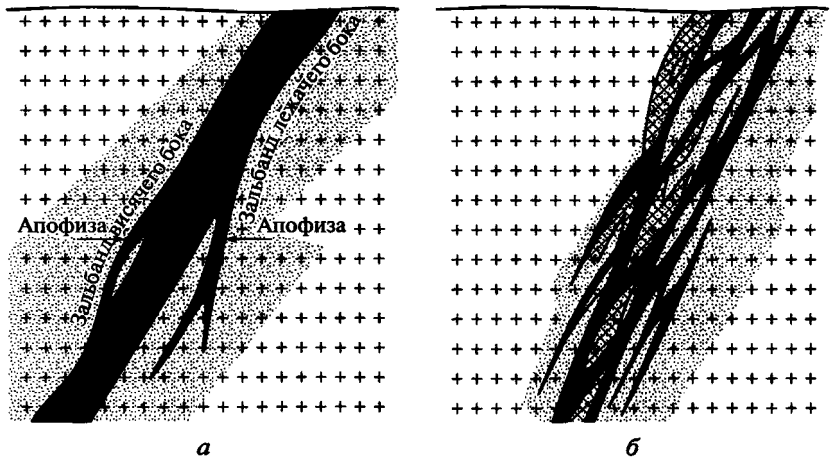


Рис. 4.6. Жилы (по В. И. Смирнову):

а — простая; *б* — сложная (точками покрыта площадь каменных околожильных вмещающих пород)

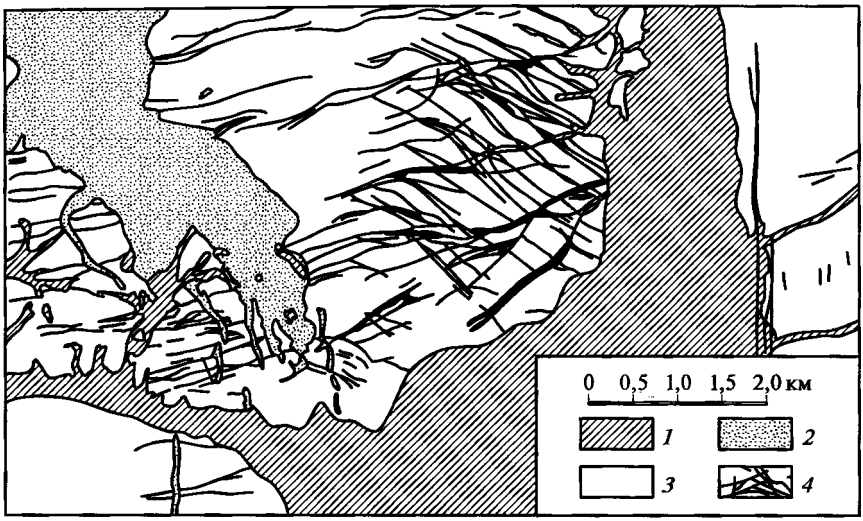


Рис. 4.7. Жильное поле медного месторождения Бьютт в США (по Э. Перри):

1 — речные отложения; *2* — риолит; *3* — кварцевый монцонит; *4* — рудные жилы

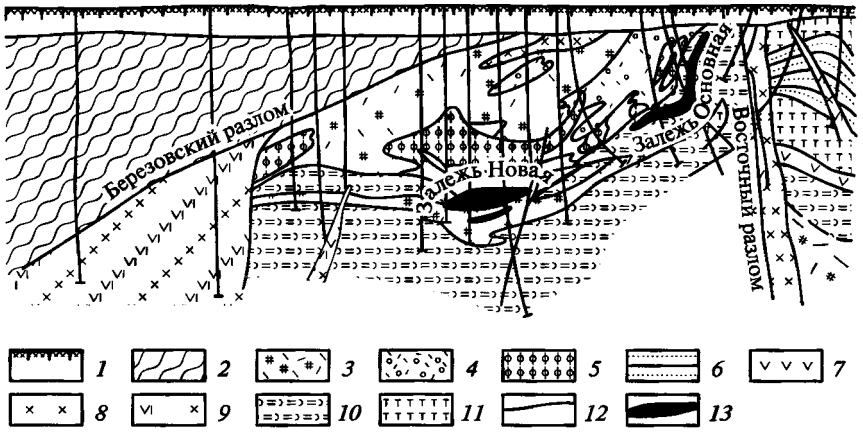


Рис. 4.8. Поперечный геологический разрез Орловского месторождения (по А. М. Гинатулину):

1 — рыхлые отложения; *2* — метаморфические сланцы ордовика; *3* — эффузивно-экструзивные кварцевые риолиты; *4* — лавобрекчии кварцевых риолитов; *5* — субвулканические риолиты; *6* — песчаники; *7* — порфириты андезитовые; *8* — плагиогранит-порфиры; *9* — гранодиориты; *10* — кремнистые и глинистые алевролиты; *11* — туфы кислого состава; *12* — тектонические нарушения; *13* — сульфидные руды

скими телами. Уплощенные, вытянутые линзы некоторых гидротермально-осадочных месторождений приближаются по форме к пластообразным залежам (рис. 4.8). В то же время рудные тела подобных месторождений, формировавшиеся в условиях локальных глубоких депрессий, характеризуются большой мощностью, соизмеримой с размерами по простиранию, и в общем изометричной формой.

Изометричные тела полезных ископаемых — штоки, штокверки, гнезда.

Штоки представляют собой обычно относительно крупные (несколько десятков метров в поперечнике) изометричные или почти изометричные залежи сплошных руд (рис. 4.9). Как правило, это руды гидротермально-метасоматической природы, формирующиеся в участках сложного пересечения мощных трещинных зон. Подобную форму имеют тела железных, медных руд некоторых скарновых месторождений. Форма штоков свойственна и телам каменной соли, слагающим ядра соляных куполов.

Штокверки — рудные тела, представляющие собой участки, в пределах которых горные породы пронизаны густой сетью разно-

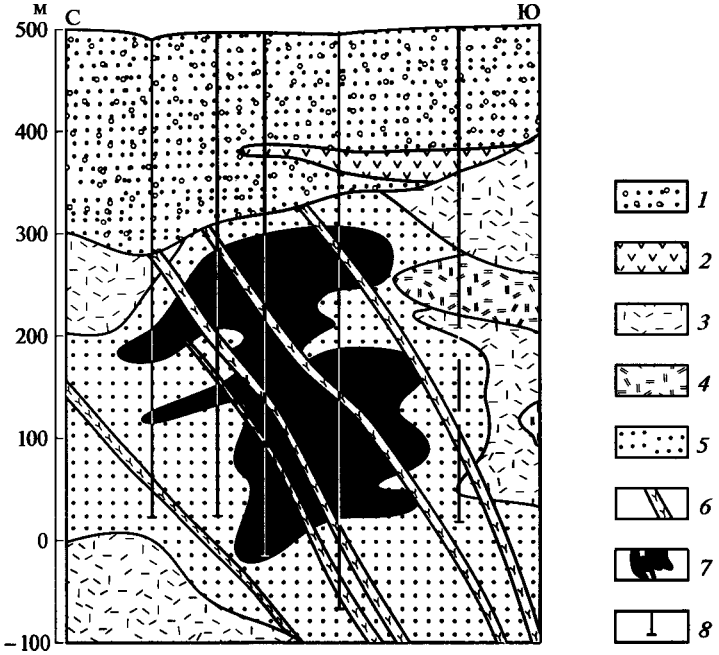


Рис. 4.9. Шток медной руды месторождения Цителсонсли (по В. И. Смирнову):

1 — четвертичные рыхлые отложения; *2* — четвертичная лава; *3* — верхнемеловые туфы; *4* — огипсованные туфы; *5* — вторичные кварциты; *6* — дайки кварцевых альбитофиров; *7* — рудное тело; *8* — буровые скважины

ориентированных рудных прожилков и насыщены вкрапленностью рудных и жильных минералов (рис. 4.10). Такие участки часто (но не всегда) имеют изометричную форму.

Штокверковые рудные тела обычно характеризуются крупными размерами (несколько сотен метров в поперечнике), нечеткими гра-

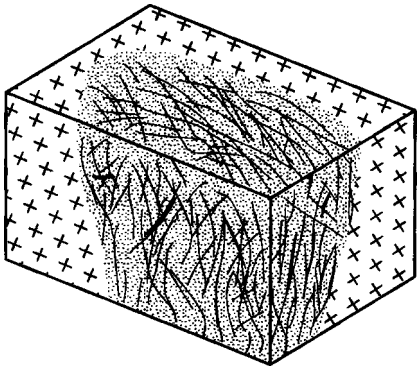


Рис. 4.10. Штокверк (по В. И. Смирнову)

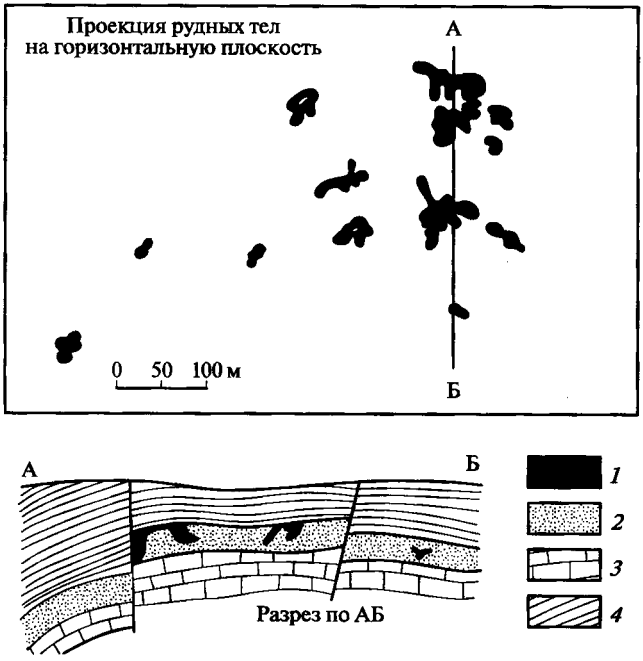


Рис. 4.11. Распределение гнезд киновари в пласте окварцованного известняка:
1 — руда; *2* — рудоносный пласт; *3* — известняк; *4* — сланец

ницами, в силу чего промышленные контуры проводятся только по результатам опробования. Штокверки имеют сложное внутреннее строение; содержание полезных компонентов в этих телах относительно невысокое. Примером штокверков являются тела многих порфировых месторождений меди, молибдена, грейзеновых месторождений олова, вольфрама и др.

Гнездо представляет собой относительно небольшое скопление полезного ископаемого изометричной формы. Размеры гнезд в поперечнике до 1 м, редко более. Месторождения, характеризующиеся гнездовой формой локализации полезного ископаемого, обычно содержат многочисленные гнезда, размещение которых контролируется структурными, литологическими факторами или их сочетанием (рис. 4.11).

Гнездовый характер имеют некоторые месторождения золота, ртути, хромитовых, свинцово-цинковых руд и др.

Вытянутые по одной оси тела называются трубами, столбами, трубообразными залежами. Рудные тела этого типа залегают в коренных породах разнообразного состава (обычно несогласно), контролируются трещинными или эксплозивными структурами. Известны примеры трубообразных тел, приуроченных к карстовым полостям. Крупные трубообразные тела (до нескольких сотен метров в поперечнике) характеризуются устойчивой морфологией, выдержанным залеганием, относительно простым внутренним строением (рис. 4.12). Мелким трубообразным телам свойственны неустойчивая форма, извилистое, иногда древовидное ветвящееся строение (рис. 4.13). Контакты трубообразных тел обычно резкие. Условия залегания определяются азимутом и углами ныряния (скатывания).

Трубообразную форму имеют рудные тела карбонатитовых, алмазных, некоторых полиметаллических и редкометалльных месторождений.

Форму рудных столбов имеют тела, локализованные в замковых частях складок или приуроченные к пересечениям разрывных нарушений (рис. 4.14).

Кроме перечисленных типов нередко встречаются ***тела сложной формы***, морфология которых определяется сочетанием простых, секущих и согласных форм (рис. 4.15). Локализация и морфология таких тел обусловлены сложной комбинацией рудовмещающих структур.

Структуры месторождений. Особенности локализации месторождений и тел полезных ископаемых, оказывающие существенное влияние на методику разведки, определяются геологическими структурами.

Структура месторождения — это пространственное расположение рудных тел и вмещающих пород, морфология рудных тел, их внутреннее строение и взаимоотношение с вмещающими породами, являющиеся результатом сложных взаимодействий процессов обра-

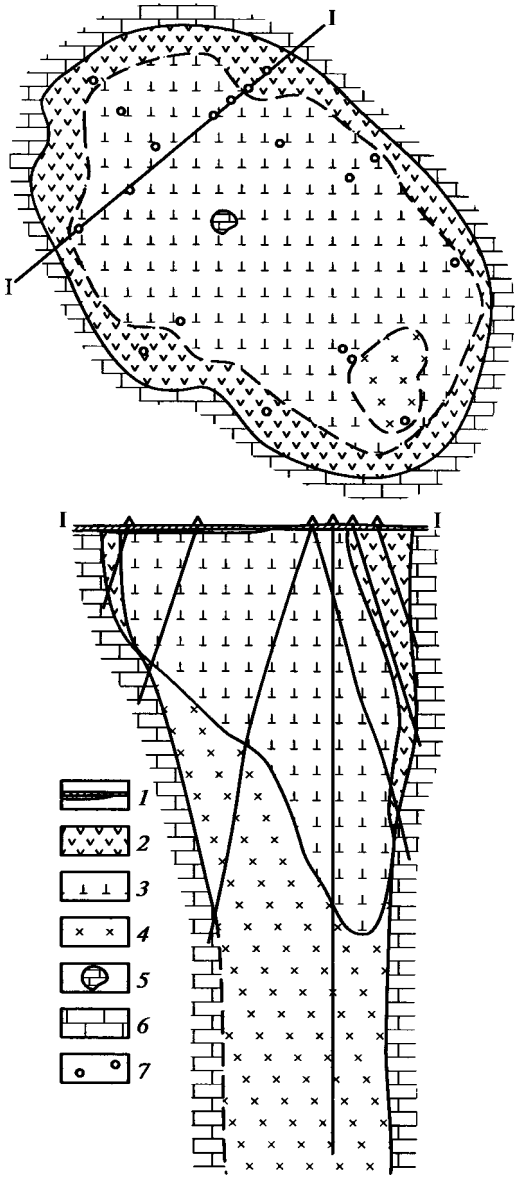


Рис. 4.12. Схематический план и разрез алмазоносной трубки «Мир»:

1 — элювиально-делювиальные отложения; *2* — измененный кимберлит желтого цвета; *3* — измененный кимберлит зеленого цвета; *4* — кимберлит зеленовато-черного цвета; *5* — ксенолит карбонатных пород; *6* — карбонатные породы ордовика; *7* — буровые скважины

зования пород, руд, проявления тектонических движений. Тела горных пород и руд, называемые структурными формами, подразделяются на первичные (пласт, лавовый поток, интрузивный массив, дайка и др.) и вторичные (складки, трещины, надвиги, сбросы и др.).

Геологические структуры, определяющие все основные особенности внутреннего строения месторождения и его облик, формируются в течение длительного времени. Они закладываются до образования залежей, развиваются параллельно с процессами рудообразования, проявляются после формирования рудных тел. Вследствие этого можно выделить три этапа развития структур месторождений: дорудный, внутрирудный и послерудный и соответствующие этим этапам элементы структуры.

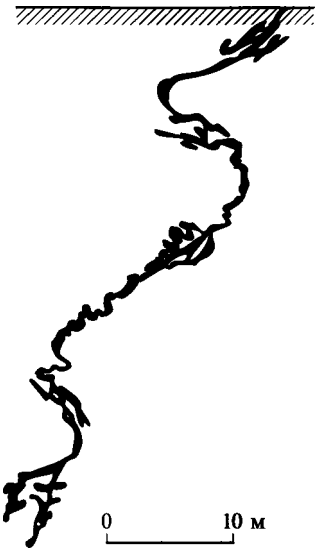


Рис. 4.13. Разрез тонкой трубы богатой полиметаллической руды (по В. И. Смирнову)

В процессе формирования эндогенных месторождений решающая роль принадлежит дорудным структурам, среди которых выделяются рудоподводящие, рудораспределяющие и рудовмещающие элементы (рис. 4.16).

К рудоподводящим относятся структуры, которые могли служить каналами поступления рудоносных расплавов или растворов в пределы рудного поля. Обычно в этом качестве выступают крупные разломы или зоны повышенной проницаемости. Сами рудоподводящие каналы обычно не вмещают рудных тел, но контролируют размещение месторождений и рудных полей; в этом состоит их важное поисковое значение.

Рудораспределяющими называются элементы структуры, по которым рудоносные растворы от подводящих каналов отводились на участки рудоотложения. Рудораспределяющими, как правило, служат разрывы, сопрягающиеся с главным рудоподводящим каналом, пересекаемые им проницаемые пласты и т. д. Следует отметить, что выделение рудоподводящих и рудораспределяющих структур очень часто невозможно из-за недостаточной изученности и почти всегда гипотетично, поскольку зависит от господствующих в данное время концепций рудообразования.

Рудовмещающими являются структуры, непосредственно вмещающие рудные тела, определяющие их положение, морфологию, размеры, внутреннее строение. Они играют важную роль в поисках и разведке месторождений. Среди них (по В. И. Смирнову, 1989) выделяются шесть групп, каждая из которых включает несколько типов:

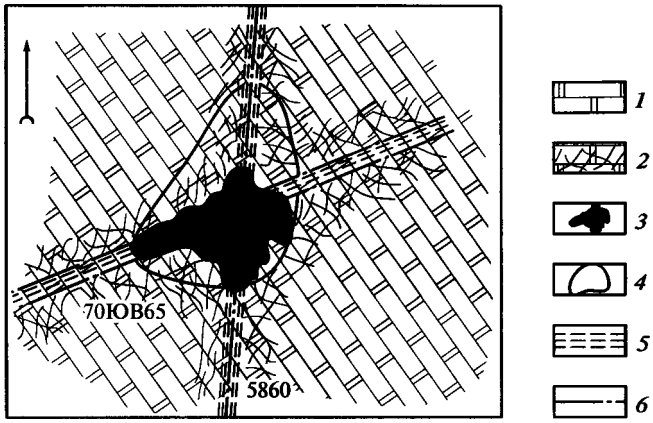


Рис. 4.14. Рудный столб на пересечении трещин. Свинцово-цинковое Екатерино-Благодатское месторождение в Забайкалье (по В. А. Кузнецову):

1 — белые мраморовидные известняки; *2* — трещиноватые известняки; *3* — раздув руд, образовавшийся в участке пересечения серии рудоносных трещин с пластами известняков; *4* — предполагаемые контуры рудного тела (контуры обрушения); *5* — тектоническая глинка; *6* — трещины скола

1) согласные структуры слоистых толщ (шарниры складок, флексуры, зоны межпластовых срывов и дробления и др.); 2) секущие структуры крупных разломов (надвиги, сбросы и сдвиги); 3) секущие структуры тектонических трещин (трещины отрыва, скола, оперения, зоны трещиноватости, рассланцевания и т. д.); 4) плутоногенные структуры (магматическое расслоение, последовательные инъекции, контракционные трещины, контакты согласных или секущих интрузий);

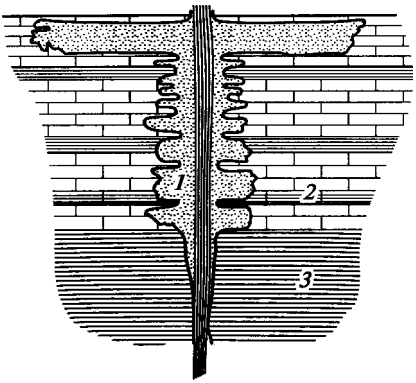


Рис. 4.15. Поперечный разрез рудного тела сложной формы (*1*), образовавшегося вдоль системы тонких трещин в перемежающихся слоях доломита (*2*) и сланца (*3*). Портленд. Южная Дакота (по Дж. Ирвингу)

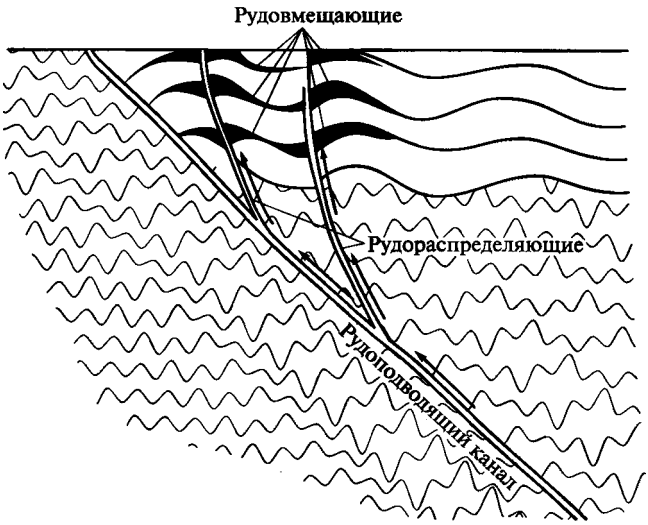


Рис. 4.16. Схема циркуляции рудоносных растворов по системе рудоподводящих, рудораспределяющих и рудовмещающих структур (по В.И.Смирнову)

5) вулканогенные структуры (вулканические жерла, кальдеры, трубки взрыва, кольцевые трещины и т.д.); 6) комбинированные структуры (пересечения трещин и пластов).

Правильное понимание характера связей рудных тел с важнейшими элементами структуры позволяет использовать их при прослеживании и оконтуривании залежей, при увязке разрезов по соседним пересечениям. Характеризуя структурные особенности месторождений, А.Каждан (1974) отмечал, что среди дорудных рудоконтролирующих структур наиболее выдержанными являются слоистость и контактовые поверхности вмещающих оруденение пород. Наличие этих элементов рудоконтроля существенно облегчает и упрощает проведение разведки. По характеру связи оруденения с элементами геологического строения ученый предложил выделять четыре типа тел: 1) залегающие согласно или почти согласно с элементами слоистости вмещающих пород; 2) залегающие параллельно контактовым поверхностям между различными породами; 3) залегающие несогласно с напластованием вмещающих пород или в неслоистых толщах, но контролируемые выдержанными и легкокартируемыми элементами геологического строения; 4) залегающие в неслоистых породах, контролируемые невыдержанными и сложными элементами структуры, с трудом поддающимися расшифровке.

Изменчивость тел полезных ископаемых. Одним из характернейших свойств залежей полезных ископаемых является их изменчивость. Форма и размеры, характер залегания, минеральный и хи-

мический составы, текстурно-структурные особенности, объемная масса и многие другие параметры изменяются в разных частях одной и той же залежи. Выяснение природной неоднородности тел полезных ископаемых — одна из важнейших задач разведки.

Неоднородность рудных тел и вмещающих пород возникает в процессе их формирования и впоследствии может существенно изменяться в результате преобразований, происходящих под влиянием процессов диагенеза, эпигенеза, метаморфизма, тектонических деформаций и др.

При ***характеристике изменчивости*** различают две ее стороны: характер изменчивости и ее интенсивность. Под характером изменчивости понимается ее направленность, закономерность или случайность. Степень изменчивости определяется размахом колебаний анализируемых величин (содержаний различных компонентов, мощности тел и т. д.).

На основе количественных характеристик изменчивости важнейших свойств полезных ископаемых (в первую очередь содержания полезных компонентов, мощности рудного тела, объемной массы и др.) решаются все методические вопросы разведки, опробования, оконтуривания и геолого-экономической оценки разведанных запасов.

Геологическая неоднородность, выявляемая по дискретной сети наблюдений, проявляется как совокупность случайной и неслучайной пространственной изменчивости данного свойства.

Известны многочисленные примеры *закономерных изменений* различных геологических параметров залежей. В основном это пространственные закономерности, например постепенное уменьшение мощности линзообразных рудных тел, вертикальная и горизонтальная зональности в изменении их вещественного состава, зональный состав рудных тел по мощности, фациальная зональность месторождений осадочного происхождения и др. Многочисленны случаи взаимной закономерной связи изменчивости двух или нескольких признаков.

При *случайной изменчивости* изучаемого признака его значения в смежных точках не зависят друг от друга и от расстояний между точками. Случайная изменчивость может быть количественно охарактеризована различными методами. Она оказывает непосредственное влияние на статистическую оценку средних характеристик изучаемого свойства, определяя число наблюдений, необходимое для достижения желаемой достоверности средних оценок.

При разведке наиболее важна закономерная изменчивость, которая позволяет оценить характер анизотропии рудного тела и выдержанность его свойств по различным направлениям. Ее характеристика служит основой для ориентировки сети наблюдений и выбора расстояний между смежными точками по каждому из наблюдаемых направлений.

По Л. Четверикову (1980), анизотропия тел полезных ископаемых проявляется в том, что неслучайная изменчивость изучаемого свойства оказывается различной в разных направлениях; обычно максимальная изменчивость наблюдается по направлению мощности залежей, а минимальная — по их вытянутости.

Одним из показателей степени анизотропии может служить величина

$$A_0 = \frac{J_{max}}{J_{min}},$$

представляющая собой отношение «длин» большой (J_{max}) и малой (J_{min}) осей анизотропии, выраженных в условных единицах. Каждая из осей определяется как отношение среднего числа элементов неоднородности $\bar{N}$, пересекаемых линиями, проведенными в заданном направлении, к средним длинам этих линий l в пределах изучаемого объема полезного ископаемого: $J = \frac{\bar{N}}{l}$.

В общем случае выделяются три главных направления анизотропии, которые часто совпадают с направлениями мощности, падения и простирания. По этим направлениям наблюдаются наиболее значительные различия количественных характеристик неслучайной изменчивости изучаемых свойств.

В соответствии с основными морфологическими типами тел полезных ископаемых можно выделить три типа анизотропии, описанные ниже.

К *первому типу* относятся тела, имеющие три взаимно ортогональные оси анизотропии. Это пласты, жилы, лентообразные, линзообразные тела, у которых ось максимальной изменчивости совпадает с направлением мощности, а ось минимальной изменчивости — с направлением простирания.

К *второму типу* относятся тела, имеющие две оси анизотропии. В этом типе выделяются два подтипа: а) тела трубообразной формы; б) сплюснутые, линзообразные тела, изометричные в плане. В обоих подтипах всегда можно видеть круговое сечение, перпендикулярное либо длинной (у труб), либо самой короткой (линзы) оси залежи. Плоскость кругового сечения образуется одним из направлений анизотропии. Другое направление совпадает с осью трубы или линзы. В сплюснутых телах — это направление максимальной изменчивости (мощность), в вытянутых трубообразных телах — ось минимальной изменчивости.

К *третьему типу* относятся тела, имеющие одну ось анизотропии, точнее тела практически изотропные, в которых изменчивость в разных направлениях почти одинакова. Это изометричные штокверки, тела штокообразной формы с концентрически-зональным строением.

Анизотропия свойств природных объектов (месторождений, рудных залежей) может быть неодинаковой на разных уровнях. Так, например, анизотропия строения рудной зоны может не совпадать с анизотропией входящих в ее состав и различно ориентированных рудных тел. А поскольку характеристики анизотропии являются основой для выбора рациональной геометрии разведочной сети, нередко возникают ситуации, когда переход на более детальный уровень разведки требует изменения ориентировки разведочной сети (см. подразд. 3.5).

Статистические методы изучения изменчивости месторождений: в качестве количественной характеристики признака (мощности, содержаний компонентов и т.д.) при разведке и подсчетах запасов принято использовать среднеарифметическую величину этого признака (например, содержания полезного компонента)

$$\overline{C} = \frac{\sum C_i}{n},$$

где C_i — содержание полезного компонента в i-й пробе; n — количество проб.

Мерой степени изменчивости этого признака в статистике принято среднеквадратичное отклонение $S = \sqrt{\frac{\sum (C_i - \overline{C})^2}{n-1}}$.

Для сравнения степени изменчивости залежи по различным признакам в разведочной практике широко используется *коэффициент вариации V*, который показывает отношение степени изменчивости исследуемого признака S к среднеарифметическому его значению $\overline{c}$, выраженное в процентах:

$$V = \frac{S}{\overline{C}} 100\%.$$

Важной статистической характеристикой является абсолютная величина ошибки вывода среднеарифметического значения признака по данным n наблюдений:

$$\delta = \frac{S}{\sqrt{n}}.$$

Коэффициент вариации широко применяется в разведочном деле: 1) как показатель степени изменчивости содержаний полезных компонентов при отнесении месторождений к той или иной группе; 2) в качестве основы для определения необходимого числа проб (наблюдений) при оценке средней величины исследуемого признака (содержания, мощности). Зная V, можно определить относительную

величину погрешности среднего $P = \frac{Vt}{\sqrt{n}}$, где t — коэффициент вероятности; 3) для грубого определения расстояний между пробами (см. подразд. 4.2).

Основные свойства коэффициента вариации сводятся к следующему: 1) он не учитывает расположения проб в пространстве, эта абстрактная характеристика отражает степень изменчивости, но не ее характер (представления о характере изменчивости дают соответствующие графики); 2) величина коэффициента вариации зависит от размера проб и способа их отбора: чем больше объем и масса проб, тем ниже коэффициент вариации; 3) он зависит от ориентировки линии отбора проб (относительно осей анизотропии), кроме того, его значения различны для разных участков месторождения. Таким образом, отношения величин коэффициентов вариации по линиям отбора проб, совпадающим с направлениями максимальной и минимальной изменчивости, соответствуют в известной степени показателям анизотропии. Эти отношения могут учитываться при определении геометрии разведочной сети.

Изучение закономерностей изменчивости содержаний полезных компонентов по данным опробования разведочных пересечений, разрезов осложняется тем, что на эту закономерную изменчивость накладывается случайная изменчивость. Поэтому для выявления локальной изменчивости в чистом виде из эмпирического ряда наблюдений исключается случайная изменчивость. Это достигается построением кривых регрессии методом сглаживания. Кривые регрессии строятся методом «скользящего окна», т. е. локальным усреднением единичных характеристик признака.

Составление кривых регрессий методом «скользящего окна» по определенным сечениям тела полезного ископаемого оказывает помощь в выявлении скрытых локальных закономерных кондиций в изменчивости признаков. Обобщение на основе геологического анализа данных, обработанных таким образом по ряду сечений, позволяет геометризовать исследуемые свойства в пространстве в виде топографических поверхностей и выявить не только степень, но и характер изменчивости.

Величина среднеквадратического отклонения S и величина коэффициента вариации V, вычисленные по исходным данным и с использованием величины отклонения от кривой регрессии, различны. Сглаживание приводит к их уменьшению.

Вмещающие породы. Вмещающие породы являются необходимым объектом исследований в процессе разведки. Их роль и значение в разведке и оценке месторождений определяются несколькими обстоятельствами.

Породы, среди которых размещаются залежи полезных ископаемых, могут находиться с ними в разных генетических и возрастных

отношениях. В месторождениях осадочного происхождения залежи минерального сырья — это пласты пород, являющихся равноправными членами слоистого разреза; их возраст определяется позицией в разрезе (они моложе подстилающих слоев и древнее перекрывающих). В генетическом отношении они представляют собой единое целое с вмещающими породами, от которых отличаются лишь некоторыми особенностями (повышенным содержанием какого-либо компонента или группы компонентов, физическими свойствами и т.д.), возникающими обычно вследствие изменения фациальных условий образования пород.

В некоторых типах месторождений вмещающие породы с телами полезных ископаемых связаны более тесными отношениями, характеризуются общностью происхождения. Так, рудные тела расслоенных интрузивных массивов образуются вместе с вмещающими их породами в результате одних и тех же процессов магматической дифференциации. В ряде случаев вмещающие породы выступают в качестве материнских образований при формировании рудных тел (например, в месторождениях кор выветривания).

Локализация эпигенетических месторождений нередко определяется тем, что вмещающие породы характеризуются определенными свойствами, делающими их благоприятными для размещения в них рудных тел. В одних случаях это особенности химического состава, предопределяющие возможность метасоматического замещения пород рудным веществом, в других — специфические физико-механические свойства, способствующие развитию рудолокализующих трещинных структур.

Изучение вмещающих пород связано с выяснением структуры месторождения, которая определяется, в частности, взаимоотношением всех разностей пород, слагающих участок месторождения. Согласное напластование, рвущие контакты, складчатые и разрывные нарушения — все эти элементы, проявленные во вмещающих породах, служат элементами структуры месторождения.

Окружающие рудные тела породы на контакте с эпигенетичными рудными телами нередко характеризуются изменениями, возникшими при процессах образования тел полезных ископаемых. Эти измененные породы часто являются хорошим поисковым признаком, а иногда благодаря развитию в них рудной вкрапленности сами могут быть полезным ископаемым.

Кроме того, вмещающие породы в некоторых случаях могут представлять интерес как объекты попутной добычи. Например, при открытой разработке месторождений породы вскрыши могут быть использованы в качестве строительных материалов и др.

Наконец, особенности состава и строения вмещающих пород оказывают существенное влияние на процесс разведки и разработки месторождений. Прочностные характеристики пород, трещиноватость, устойчивость, обводненность и другие факторы часто являют-

ся определяющими при выборе технических средств разведки и систем разработки месторождений и поэтому подлежат всестороннему изучению наряду с изучением самих залежей полезных ископаемых.

Стадии разведочных работ

Разведка месторождений полезных ископаемых — это комплекс исследований и работ по выяснению промышленного значения месторождения. Разведочные работы на месторождении проводятся прежде всего для определения количества и качества заключенного в нем полезного ископаемого, а также для выяснения природных условий залегания минерального сырья и экономических условий, в которых находится месторождение. Таким образом, разведочные работы преследуют цель промышленной оценки месторождений и получения геологических материалов, необходимых для составления проекта их эксплуатации и самой эксплуатации.

Главнейшие задачи, решаемые в процессе разведки, сводятся к следующему.

1. *Определение формы и размера промышленной части месторождения для оценки количества полезного ископаемого.* Геометризация тел полезных ископаемых в недрах выполняется на основе изучения геологического строения участка месторождения, его структурных особенностей, условий локализации тел, их взаимоотношений с вмещающими породами. Изучение формы месторождений в ряде случаев осложняется отсутствием естественных геологических границ, отделяющих полезное ископаемое от вмещающих пород, необходимостью установления этих границ по данным опробования. Надежное определение размеров тел может быть произведено только с учетом закономерностей изменчивости их морфологии. Поэтому разведка предусматривает изучение месторождений во всем их объеме.

2. *Установление качественно-технологической характеристики полезного ископаемого.* Качество полезного ископаемого неотделимо от количества, поскольку в контуры промышленных участков включаются лишь те части месторождения, которые отвечают промышленным требованиям; иными словами, форма залежей в известной степени определяется их качеством. Многие типы месторождений характеризуются присутствием нескольких различных типов полезных ископаемых (например, окисленные, сульфидные, смешанные руды) и сортов руд (различающихся по уровню содержания полезных компонентов, присутствию ценных или вредных примесей).

3. *Характеристика всех природных разновидностей руд* на основе технических требований к сырью (кондиций) и изучение их пространственного размещения.

4. *Выявление природных факторов, определяющих условия эксплуатации.* К таким факторам относятся характер залегания и мощ-

ность тел, глубина залегания и мощность вскрыши (если предусматривается открытая разработка), твердость и трещиноватость руд, состав и физико-механические свойства вмещающих пород, обводненность месторождения и др.

5. *Определение соответствия всех параметров месторождения современным геолого-экономическим требованиям промышленности.* С этой целью проводится анализ выявленных в процессе разведки геологических, горно-технических, технологических и экополитических факторов, на основе которого определяются способ разработки месторождения, параметры будущего горно-рудного предприятия, экономический эффект от разработки месторождения.

Разведочные работы обычно проводятся последовательно, в три стадии: предварительная, детальная, эксплуатационная.

Предварительная разведка следует за поисково-оценочной стадией и имеет целью получить достоверную информацию для надежной оценки промышленной значимости месторождения. На этой стадии определяется общая схема геологического строения месторождения, выполняется детальное геологическое картирование. В зависимости от сложности геологического строения геологические карты и разрезы составляют в масштабах от 1:10 000 до 1:500. Рудные тела с помощью канав, шурфов, картировочных скважин оконтуриваются с поверхности и отдельными горными выработками или профилями скважин пересекаются на глубине. Предварительное изучение месторождения производится до горизонтов, доступных для разработки. Изучением охватывается вся площадь месторождения для полной предварительной оценки его промышленной ценности и выбора наиболее важного участка для детальной разведки.

Проходка горных выработок и скважин, их опробование, проведение геофизических исследований имеют целью выяснить общие особенности морфологии рудных тел, условий их залегания, внутреннее строение и общую характеристику состава руд. Определяются минеральные формы нахождения полезных и вредных компонентов. По основным природным разновидностям руд отбирают технологические пробы для выделения промышленных типов и сортов руд. Устанавливаются общие закономерности их пространственного размещения и количественные соотношения. Производится также изучение горно-геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий. Одна из задач предварительной разведки — разработка временных кондиций, на основе которых оцениваются запасы по категории C_2. Данные предварительной разведки используют для составления проекта детальной разведки. По результатам предварительной разведки составляется технико-экономический доклад (ТЭД), обосновывающий целесообразность детальной разведки месторождения или отказ от следующего этапа.

Детальная разведка проводится на объектах, получивших положительную оценку по результатам предварительной разведки и на-

меченных к промышленному освоению в ближайшие 5—10 лет. На этой стадии сгущается сеть разведочных выработок, уточняются контуры рудных тел с выделением в них безрудных и некондиционных участков, разрабатываются технологические схемы переработки минерального сырья. Оценивается возможность использования попутных полезных ископаемых, в том числе пород вскрыши. Детальной разведке, особенно на крупных месторождениях, обычно подвергается только часть месторождения, достаточная для выявления запасов, необходимых для организации эксплуатационных работ. При этом исходят из производственной мощности будущего горного предприятия и нормального срока обеспечения его этими запасами. Данные детальной разведки должны обеспечивать геологическую часть проекта разработки месторождения. По результатам детальной разведки составляется горный доклад или технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных кондиций. На основе этих кондиций выполняется подсчет запасов (категорий А, В, C_2), который представляется для утверждения в Государственную комиссию по запасам России (ГКЗ) или в территориальную комиссию по запасам (ТКЗ).

Таким образом, детальная разведка по существу является обоснованием проекта промышленной разработки месторождения.

Отдельные мелкие месторождения очень сложного строения нередко экономически нецелесообразно подвергать детальной разведке, требующей больших капиталовложений. В этих случаях после предварительной разведки и оценки месторождения детальную разведку совмещают с эксплуатационно-подготовительными работами, что значительно сокращает сроки освоения таких месторождений и затраты на их разведку.

Эксплуатационная разведка сопровождает разработку месторождения, уточняет детали геологического строения отдельных участков, необходимые для правильной эксплуатации. Кроме того, ее задачей является расширение сырьевой базы действующего предприятия путем развития фронта разведочных работ как на флангах, так и в глубинных частях месторождения.

Из определений предварительной и детальной разведок вытекает, что различие между ними заключается в детальности определения тех или иных показателей.

Технические средства разведки

Основной объем разведочной информации геологи получают, используя два вида технических средств — горные выработки и буровые скважины. Эти виды характеризуются различной информативностью и различными экономическими показателями.

Проходка буровых скважин в 2—3 раза быстрее и более чем в 3—4 раза дешевле, чем горных выработок, хотя общее сокращение

времени и расходов на разведку бурением по сравнению с разведкой горными выработками не столь велико, так как объем буровых работ для разведки любого объекта, как правило, должен быть намного выше объема горных работ. Разведка бурением требует меньшей рабочей силы, энергии и оборудования. Однако бурение по геологическим результатам и степени информативности уступает горным выработкам. Каждая буровая скважина представляет собой лишь тонкий прокол рудного тела, недоступный для осмотра. Горные же выработки дают более крупное пересечение, доступное для осмотра, геологической документации и опробования на месте. Они позволяют проводить повторные наблюдения, контрольное опробование.

Кроме того, горные выработки обладают гибкостью, дающей возможность изменять их направление в зависимости от поведения рудного тела, что бывает необходимо при прослеживании тел сложной морфологии и прерывистых залежей. К этому надо добавить, что часть горно-разведочных выработок может быть использована при последующей эксплуатации, что частично окупает расходы на их проходку. Поэтому горные выработки применяются при разведке не менее часто, чем более дешевые буровые работы, особенно при изучении верхних частей рудных тел. В некоторых случаях при разведке сложных по форме, строению и распределению металлов месторождений, когда требуется тщательное и непрерывное прослеживание рудных тел, буровые скважины даже при существенном увеличении их количества не могут заменить горные выработки. Наконец, некоторые объекты, например месторождения пьезооптического сырья, вообще невозможно разведывать без применения горных выработок.

К числу технических средств разведки относят также и геофизические методы. В ряде случаев они служат необходимыми вспомогательными методами, сопровождающими проходку горных выработок и в особенности скважин. Результаты геофизических работ широко используются при проектировании буровых скважин и горных выработок, интерпретации полученных данных, в первую очередь данных буровых работ. Геофизические методы служат основой прогнозных оценок глубоких горизонтов и флангов месторождений, не вскрытых горными выработками и скважинами. Точно так же на предварительных этапах разведки месторождений основные выводы о масштабах объекта, протяженности рудных тел на глубину, условиях их залегания базируются на результатах геофизических исследований.

Выбор технических средств для разведки каждого конкретного месторождения производится с учетом общеэкономических, горнотехнических и геологических факторов.

Общеэкономические условия включают пути сообщения, энергетическую базу, климат, обеспеченность водой, крепежным лесом и др. Влияние каждого из этих факторов достаточно очевидно, хотя и не является решающим.

Горно-технические факторы определяются рельефом местности, глубиной залегания рудных тел, условиями их залегания, характером пород и водоносностью участка. Эти факторы в ряде случаев оказывают решающее влияние на выбор технических средств разведки. Расчлененный рельеф стимулирует использование штольневой системы; глубокое залегание тел делает более целесообразной разведку скважинами; характер вмещающих пород и гидрогеологическая обстановка определяют конкретную методику проведения горных и буровых работ.

Из числа ***геологических условий***, определяющих выбор горных и буровых работ, важнейшую роль играют устойчивость формы рудных тел, устойчивость в распределении полезного компонента, размеры тел. Бóльшая часть этих особенностей определяется принадлежностью изучаемого объекта к соответствующему геолого-промышленному типу.

Устойчивость формы рудных тел определяется выдержанностью их мощности или поперечного сечения на большом протяжении. Выделяются устойчивые по форме рудные тела, например пласты осадочных рудных месторождений, мощность которых очень слабо и закономерно изменяется на расстояниях сотен метров и даже нескольких километров. С другой стороны, бывают неустойчивые по форме тела, например некоторые жилы гидротермального происхождения, иногда состоящие из тонкой слабо минерализованной рудоносной трещины со спорадическими раздувами (рудными столбами) на коротких интервалах. Разведка устойчивых по морфологии тел более проста и нередко может быть осуществлена одними скважинами, тогда как получение разведочных данных необходимой достоверности по телам сложной морфологии требует проходки горных выработок.

Устойчивость распределения полезного компонента в рудах определяется двумя показателями: степенью прерывистости кондиционных участков рудного тела и изменчивостью содержаний полезного компонента.

Степень прерывистости определяется коэффициентом рудоносности, под которым понимается отношение количества руды, сосредоточенной в рудных обособлениях, ко всему объему рудоносной зоны, в которой заключена эта руда.

Чем выше коэффициент рудоносности, тем меньше прерывистость оруденения. При коэффициенте, равном единице, достигается непрерывное оруденение.

Интенсивность изменчивости содержаний полезного компонента оценивается коэффициентом вариации — чем выше коэффициент вариации, тем значительнее изменчивость, тем сложнее разведка и тем большее количество пересечения тела необходимо для надежной оценки качества минерального сырья.

С учетом двух названных показателей можно выделить рудные тела: 1) с непрерывным оруденением и равномерным распределе-

нием металла; 2) с непрерывным оруденением и неравномерным распределением металла; 3) с прерывистым оруденением и равномерным распределением металла; 4) с прерывистым оруденением и неравномерным распределением металла. От первой к четвертой группе возрастают сложность строения рудных тел и число необходимых пересечений, а также важность горных выработок для получения достоверных сведений о строении тел и качестве минерального сырья.

Размеры рудных тел также оказывают влияние на выбор технических средств разведки. Крупные тела вскрываются большим количеством пересечений, что практически исключает возможность существенных ошибок в определении размеров месторождения и качества руды. В этих случаях предпочтительнее разведка скважинами. Мелкие тела, в особенности характеризующиеся сложной формой, обычно разведуются горными выработками.

Исходя из анализа геологических условий, В. И. Смирнов сформулировал следующее правило для выбора горных или буровых работ при разведке: чем сложнее и изменчивее форма рудного тела, чем меньше его размеры, ниже коэффициент рудоносности и выше степень неравномерности распределения металла в руде, тем большее значение приобретают горные и меньшее буровые работы при разведке месторождений.

Принципы разведки

Несмотря на большое разнообразие месторождений полезных ископаемых, в основу разведки могут быть положены одни и те же принципы, поскольку геолого-разведочный процесс осуществляется на определенном уровне развития производительных сил и имеет в конечном счете одну и ту же задачу: выявление в недрах промышленных запасов различных полезных ископаемых. Исходя из этого, В. М. Крейтер сформулировал четыре основных принципа разведки: 1) последовательных приближений; 2) полноты исследований; 3) равной достоверности (равномерности); 4) наименьших затрат средств и времени.

Принцип последовательных приближений утверждает необходимость постепенного наращивания знаний об изучаемом месторождении по этапам и стадиям. Практически каждая новая разведочная выработка дает тот или иной «прирост» наших знаний, который должен быть учтен при проектировании и проходке следующей выработки. Этот принцип неизбежен во всем геолого-разведочном процессе.

Хотя работа всегда строится с максимальным ускорением, необходимо соблюдение последовательности этапов и стадий, что подтверждается всем огромным опытом разведок во все времена и осо-

бенно в настоящее время. Вслед за поисковой стадией следуют, сменяя друг друга, предварительная, детальная и эксплуатационная стадии разведочного этапа. Необоснованное форсирование событий, например производство детальных исследований до полного завершения предварительной разведки, чаще всего с неизбежностью приводит к крупным просчетам и дополнительным затратам.

Число стадий не пропорционально числу рабочих сезонов: иногда все стадии разведки (кроме эксплуатационной) проходят в один сезон, а иногда даже одна предварительная разведка требует нескольких лет.

С принципом последовательных приближений тесно связан другой, практически самостоятельный, принцип геологического прогноза и его проверки. Проектирование каждой разведочной выработки основывается на геологическом прогнозе, и ее проходка или подтверждает (уточняет) прогноз, или заставляет вносить в него коррективы, или, наконец, требует перестройки выдвинутых представлений. Геологический прогноз и его проверка подтверждают необходимость соблюдения принципа последовательных приближений.

Принцип полноты исследований требует не только решения основных задач разведки (определение качества и количества минерального сырья), но и получения всех данных, всей полноты информации, необходимой для проектирования и строительства горнорудного предприятия и наиболее рационального использования сырья. Конкретные требования принципа полноты исследований выражаются в следующем.

1. Необходимо полное пересечение разведочными выработками рудного тела, рудоносной зоны на всю мощность. Это особенно важно в тех случаях, когда рудная зона включает несколько рудных тел и несоблюдение данного требования может привести к тому, что на текущем этапе будет пропущено какое-то количество рудных тел.

2. Полное оконтуривание месторождения еще на ранних стадиях разведки дает возможность выбрать для детальной разведки наиболее подходящий участок.

3. Комплексное изучение полезного ископаемого, всех содержащихся в нем попутных компонентов позволяет правильно оценить месторождение и с наибольшей полнотой использовать заключенное в нем сырье.

4. Необходимо полное изучение вмещающих пород: во-первых, для проектирования систем отработки месторождения, во-вторых, для выяснения возможностей использовать их как попутное сырье.

История разведки многих месторождений наглядно свидетельствует о том, что нарушения требований принципа полноты исследований приводили к тому, что приходилось затрачивать большие средства на доразведку, доизучение месторождений.

Принцип равной достоверности (равномерности) основан на положении о том, что природные тела характеризуются изменчиво-

стью форм и качества, выявить которую можно наиболее уверенно и достоверно при равномерном расположении разведочных выработок или пунктов опробования. Это, однако, не означает, что разведочные выработки всегда следует располагать на равных расстояниях. Наоборот, в одном рудном теле в направлении меньшей изменчивости (например, по простиранию) расстояния между выработками и пунктами опробования должны быть бóльшими, чем по направлению большей изменчивости (например, по падению). Расположение выработок, согласно этому принципу, соответствует характеру изменчивости месторождения. Для достижения равной достоверности необходимо предусматривать увеличение количества наблюдений (сгущение разведочной сети) на участках месторождения, отличающихся более сложным геологическим строением.

Детальность и достоверность исследований, отвечающих данной стадии разведки, а также равноточность результатов достигаются не только равномерным расположением выработок, но и применением технических средств, равноценных по своим возможностям, использованием единого способа отбора проб, производством анализов по единой методике, в одной лаборатории и т.д.

Принцип наименьших затрат средств и времени является основным положением разведки, а также всех видов хозяйственной деятельности; смысл его очевиден.

С одной стороны, некоторые принципы разведки противоречат друг другу. Так, требования принципа полноты исследований потенциально поддерживают стремление заложить максимальное число разведочных выработок, чаще и в большем объеме отбирать пробы и производить другие разнообразные виды работ. С другой стороны, принцип наименьших затрат требует минимизации объемов геологоразведочных работ.

Принцип последовательных приближений, предусматривая стадийность геолого-разведочного процесса, как бы сдерживает темп разведки вопреки принципу наименьших затрат времени. На самом деле именно с учетом всех этих требований создаются важные для практики понятия о необходимой и достаточной полноте исследований, оптимальных плотностях разведочных сетей, оптимальных интервалах опробования, а также нормы на различного рода измерения и исследования.

Методы разведки

По А. Б. Каждану, методика разведки включает совокупность трех основных приемов исследования недр: 1) создание упорядоченных систем искусственных обнажений с помощью разведочных горных выработок и скважин; 2) осуществление геологических, геофизических, геодезических и других видов наблюдений и опробование гор-

ных выработок и скважин; 3) проведение геологической, горнопромышленной и экономической оценок разведанных объемов недр на основе анализа и обработки полученной информации.

Любая разведочная выработка или скважина, пересекающая тело полезного ископаемого, представляет собой искусственное обнажение и может рассматриваться как единичное разведочное пересечение. Разведочное пересечение должно, во-первых, быть ориентированным в направлении, близком к максимальной изменчивости важнейших свойств тела (как правило, это направление совпадает с направлением мощностей тел) и, во-вторых, вскрывать залежи полезных ископаемых на их полную мощность, захватывая прилегающие к ним участки неминерализованных пород.

Совокупность разведочных пересечений, расположенных в одной плоскости, образует разведочный разрез, а совокупность разведочных разрезов в пространстве — разведочную систему. Основные группы разведочных систем рассмотрены далее.

Разведочное опробование является теоретически обоснованным способом выяснения качества полезного ископаемого, другого способа в процессе разведки не существует. Основные вопросы, связанные с опробованием, изложены в подразд. 4.2.

Оценочное сопоставление непрерывно сопутствует всему процессу разведки месторождения. Сравнение параметров месторождения с требованиями промышленности, параметрами других подобных объектов, сравнение элементов процесса его промышленного освоения (добычи, переработки и др.) с подобными элементами других горнопромышленных предприятий — основа промышленной оценки месторождения на разных стадиях разведки и освоения.

Системы детальной разведки. По В. И. Смирнову и А. П. Прокофьеву, существуют три группы систем детальной разведки: горная, буровая и комбинированная горно-буровая, среди которых выделяется около тридцати основных систем.

Группа систем разведки горными выработками: полная разведка рудных тел исключительно горными выработками применяется в основном на неустойчивых по форме и распределению полезного компонента месторождениях. В этой группе выделено четыре системы.

Разведка канавами предназначена для исследования и прослеживания слюдоносных пегматитовых жил на их выходах. Пегматиты и мусковит устойчивы к выветриванию, поэтому канавы позволяют провести отбор надежных и представительных проб. Данные поверхностной разведки можно экстраполировать на значительную глубину.

Разведка шурфами применяется для близповерхностных горизонтальных или пологозалегающих тел полезных ископаемых (рис. 4.17). В ряде случаев при разведке сложных тел дополнительно используют рассечки: из вертикального шурфа на некоторой глубине

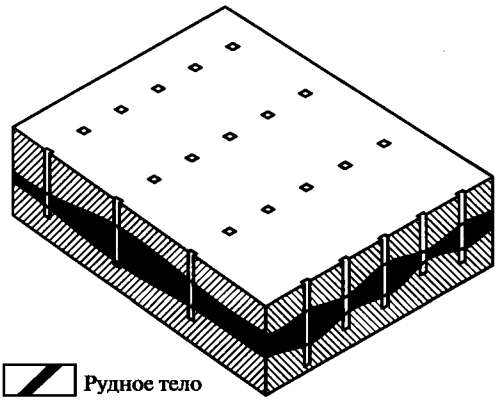


Рис. 4.17. Разведка шурфами

проходится квершлаг для вскрытия залежи. Иногда возникает необходимость проходки второго квершлага на большей глубине. Так создается достаточно сложная система вертикальных и горизонтальных выработок, позволяющая строить детальные разведочные разрезы (рис. 4.18). Достоинства системы сводятся к возможности получения достоверного геологического материала, крупных проб, а также к сравнительной дешевизне этого способа и возможности обеспечить широкий фронт разведочных работ. Недостатками системы являются ограниченность ее применения глубиной 30 м, иногда до 50 м от поверхности, а также крупные затруднения, возникающие при осуществлении разведки в сильно водоносных породах.

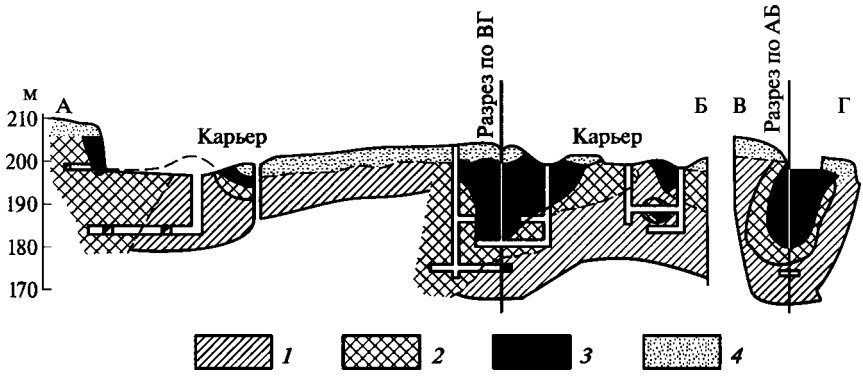


Рис. 4.18. Система шурфов с рассечками, примененная при разведке месторождения Семиз-Бугу (по П. М. Татаринову):

1 — вторичный кварцит; *2* — андалузитовая порода; *3* — залежи корунда; *4* — делювий

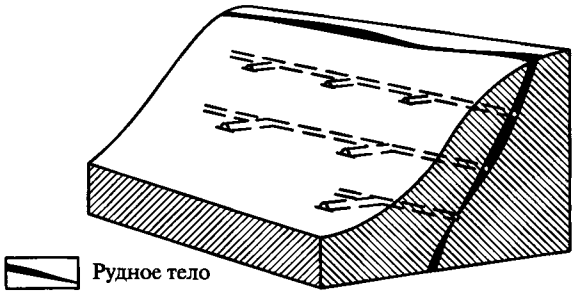


Рис. 4.19. Разведка штольнями

Разведка штольнями применяется на местности с расчлененным рельефом и обычно сводится к проходке нескольких штолен, закладываемых как по простиранию, так и по падению рудного тела (рис. 4.19). При необходимости из штолен развиваются штреки, орты, квершлаги и гезенки (рис. 4.20). Штольни закладываются на разных строго установленных уровнях с таким расчетом, чтобы по завершении проходки все рудное тело было нарезано увязанными между собой горизонтами с точной сбойкой выработок, идущих на одном уровне от разных устьев. Достоинства системы определяются возможностью получения детального геологического материала и сравнительной простотой горно-технического осуществления. Недостаток системы связан с ограниченными условиями ее применения.

Разведка шахтами производится в условиях ровного рельефа. Стволы шахт не являются разведочными выработками, а обеспечивают возможность проходки из них системы подземных выработок (квершлагов, штреков, ортов и др.) для разведки рудного тела (рис. 4.21). Разведка шахтами дает точный геологический материал, но является дорогой, технически сложной и применяется не часто.

Группа систем разведки буровыми скважинами: полная разведка рудных тел исключительно буровыми скважинами возможна только для месторождений, обладающих устойчивой морфологией, непрерывным оруденением и относительно равномерным распределением металла в крупных рудных залежах. Выделено четыре системы.

Разведка мелкими скважинами применяется в тех же случаях, что и разведка шурфами. Особенно часто к ней приходится прибегать при разведке сильно обводненных участков (например, долинных россыпей), на которых проходка шурфов затруднена. Эта система дешевле шурфовой, но дает менее подробный геологический материал.

Разведка скважинами колонкового бурения наиболее широко распространена, особенно при изучении глубоко залегающих место-

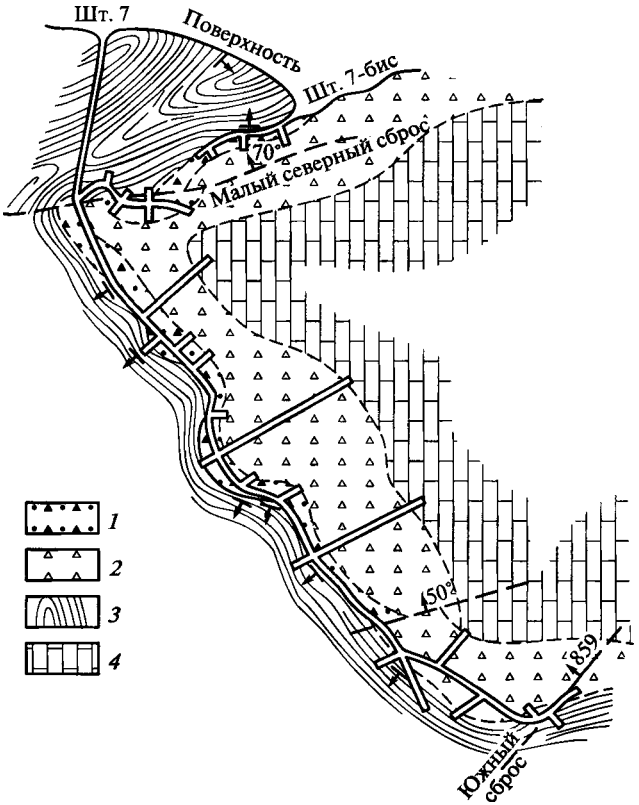


Рис. 4.20. Система разведки штольнями с рассечками (по А. К. Полякову):
1 — рудная брекчия; *2* — оруденелая брекчия непромышленная; *3* — сланцы; *4* — известняки

рождений (рис. 4.22). Она применима практически в любых условиях. Недостатками ее являются значительный расход воды, низкий выход керна в ряде разновидностей пород, малый объем проб.

Разведка глубокими скважинами ударно-канатного бурения осуществляется для рудных тел, обладающих большой площадью в плане, залегающих среди любых пород (рис. 4.23). Основное достоинство этой системы определяется возможностью получения крупных проб благодаря большим диаметрам скважин. Недостатки ее связаны с ограниченными возможностями документации скважин, отсутствием нераздробленных образцов, а также с тем, что скважины бурятся только вертикальные.

Разведка глубокими скважинами осуществляется бурением ударно-канатных скважин для получения крупных проб и некоторого количества колонковых скважин, позволяющих более детально изу-

чить разрез месторождения и получить образцы горных пород и руд.

Разведка роторным бурением широко распространена на нефтяных и газовых месторождениях и почти не находит применения на месторождениях рудных и нерудных полезных ископаемых, за исключением редких случаев проходки неглубоких скважин.

Группа горно-буровых систем разведки: очень часто разведка рудных месторождений осуществляется комбинацией горных и буровых работ. При этом горные выработки обеспечивают получение детальных геологических данных по части месторождения, а буровые скважины позволяют оконтурить остальную часть месторождения. Горно-буровые системы чаще всего применяют при разведке рудных тел средней сложности как в отношении морфологии, так и в отношении распределения металлов. Выделяют четыре горно-буровые системы.

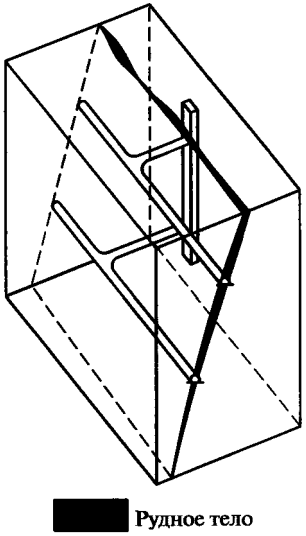


Рис. 4.21. Разведка шахтой

Разведка бурением с контрольными шурфами: для подтверждения данных, полученных при разведке пологих и неглубоко залегающих рудных тел с помощью бурения мелких скважин, часто осуществляется проходка определенного количества шурфов (обычно 5—10 % от общего числа скважин). Задаются контрольные шурфы или вместо скважин, или на месте скважин после проходки последних. Шурфы используют также для отбора валовых проб, материала для лабораторного изучения пород и руд, для осмотра рудного тела.

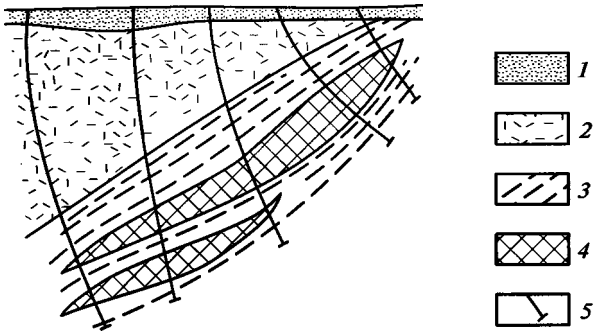


Рис. 4.22. Разведка глубокими скважинами колонкового бурения (разрез):
1 — рыхлые отложения; *2* — туфы риолитов; *3* — туфопесчаники; *4* — сульфидная руда; *5* — проекции стволов скважин

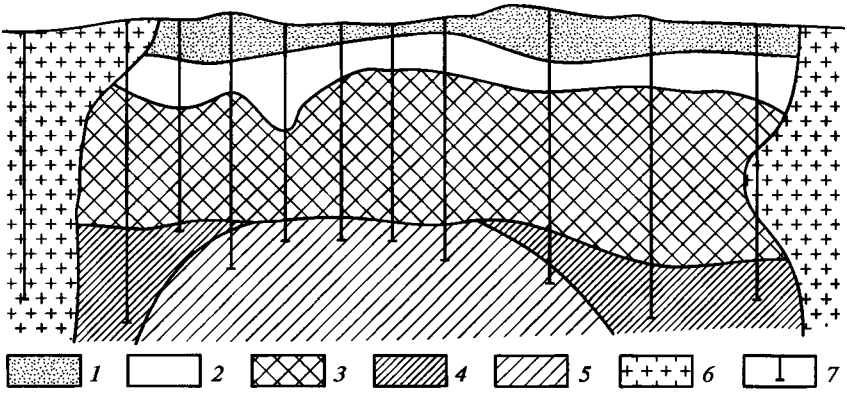


Рис. 4.23. Схематический разрез месторождения прожилково-вкрапленных медных руд во вторичных кварцитах:

1 — окисленная руда; *2* — зона выщелачивания; *3* — вторичная сульфидная руда; *4* — первичная промышленная руда; *5* — первичная непромышленная руда; *6* — гидротермально измененные гранодиорит-порфиры (вторичные кварциты); *7* — скважины

Система разведки бурением с контрольными штольнями подобна предыдущей, но применяется в горных районах.

Разведка штольнями и скважинами глубокого колонкового бурения применяется в тех случаях, когда по условиям рельефа верхняя часть рудных тел доступна для разведки штольнями, а остальная часть разведуется колонковым бурением (рис. 4.24).

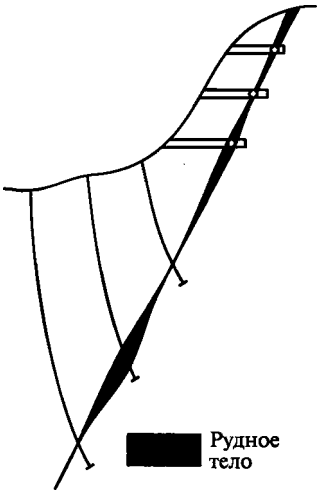


Рис. 4.24. Разведка штольнями и скважинами глубокого колонкового бурения (разрез)

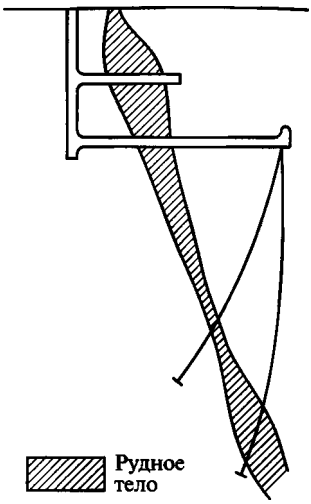


Рис. 4.25. Разведка шахтой и скважинами глубокого колонкового бурения (разрез)

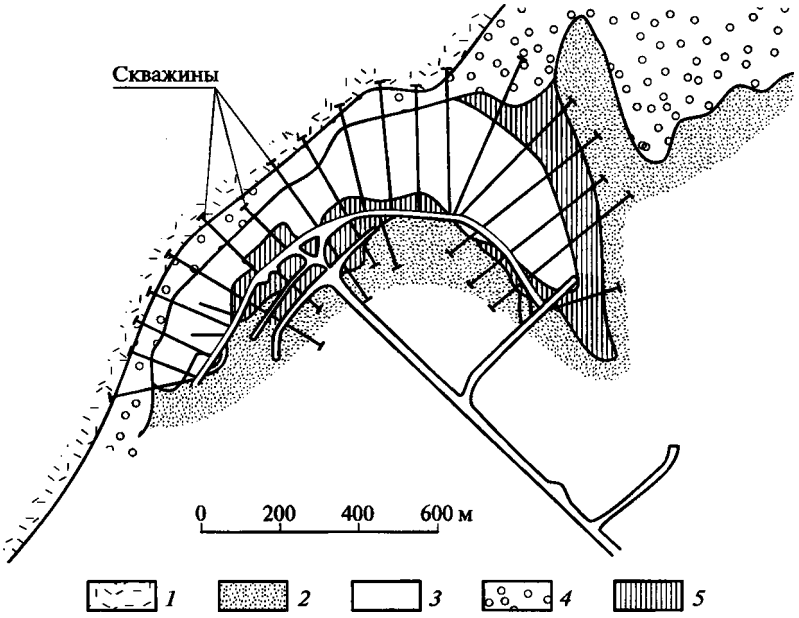


Рис. 4.26. Система разведки подземными горными выработками с горизонтальными скважинами (по В. И. Бирюкову и др.):

1 — диориты; *2* — порфириты; *3* — сульфидная руда; *4* — зеленокаменные породы; *5* — сланцы

Разведка шахтами и скважинами глубокого колонкового бурения: при разведке шахтами обычно вскрываются один-два (редко более) горных горизонта. Дальнейшая разведка на глубину горными выработками, проходимыми из шахты, резко усложняет технические условия их проведения и сильно удорожает разведку. Поэтому если горная разведка верхней части рудного тела дает достаточный геологический материал для выяснения строения и состава месторождения, то оконтуривание рудного тела на глубине может быть произведено колонковым бурением. При этом буровые скважины могут проходиться как с поверхности, так и из подземных горных выработок (рис. 4.25).

Помимо перечисленных основных систем разведки применяют и другие частные системы. Например, часто используется сочетание разведочных штреков, пройденных на нескольких горизонтах, с подземными горизонтальными скважинами, которые проводятся взамен ортов или чередуясь с ними (рис. 4.26).

Расположение разведочных выработок. Существует два основных способа закономерного размещения разведочных выработок и скважин: по сетке и по линиям.

Разведочные сети определяют расположение выработок по взаимно пересекающимся линиям; при этом различают сети квадратные, прямоугольные и ромбические (рис. 4.27).

При *разведке линиями* выработки и скважины располагают по прямым направлениям, обычно ориентированным поперек рудного тела. Чаще всего такой порядок расположения принимается для плоских крутопадающих рудных тел (линзы, жилы, пласты). При этом разведочные выработки и скважины располагают или по линиям, дающим возможность построить ряд горизонтальных разрезов, или по линиям, обеспечивающим создание серии вертикальных поперечных разрезов. Разведка линиями применяется также для неглубоких, горизонтально залегающих рудных тел, вытянутых в одном направлении, например россыпей, кор выветривания и др.

Строго говоря, *расположение выработок по линиям* также образует разведочную сеть, но с резко выраженной анизотропией. Как подчеркивал А. Б. Каждан, применение геометрически правильных разведочных сетей обеспечивает объективность выборочных данных, способствует выявлению неслучайных составляющих изменчивости геолого-разведочных параметров и благоприятствует применению математических методов их обработки.

Главный конструктивный элемент разведочной сети — ячейка сети, которая представляет собой область, непосредственно примыкающую к точке наблюдения (скважине или горной выработке), ограниченную по методу ближайшего района (рис. 4.28).

Одним из важнейших понятий является плотность разведочной сети. Плотность определяется расстояниями между точками наблюдений или размером разведочной ячейки. Оптимальной считается

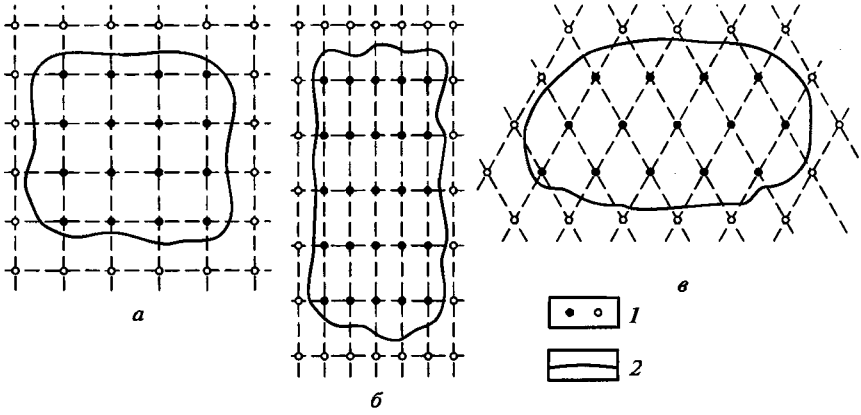


Рис. 4.27. Правильные разведочные сети: квадратная (*а*); прямоугольная (*б*); ромбическая (*в*):

1 — скважины (соответственно рудные и нерудные); *2* — контуры тел полезных ископаемых

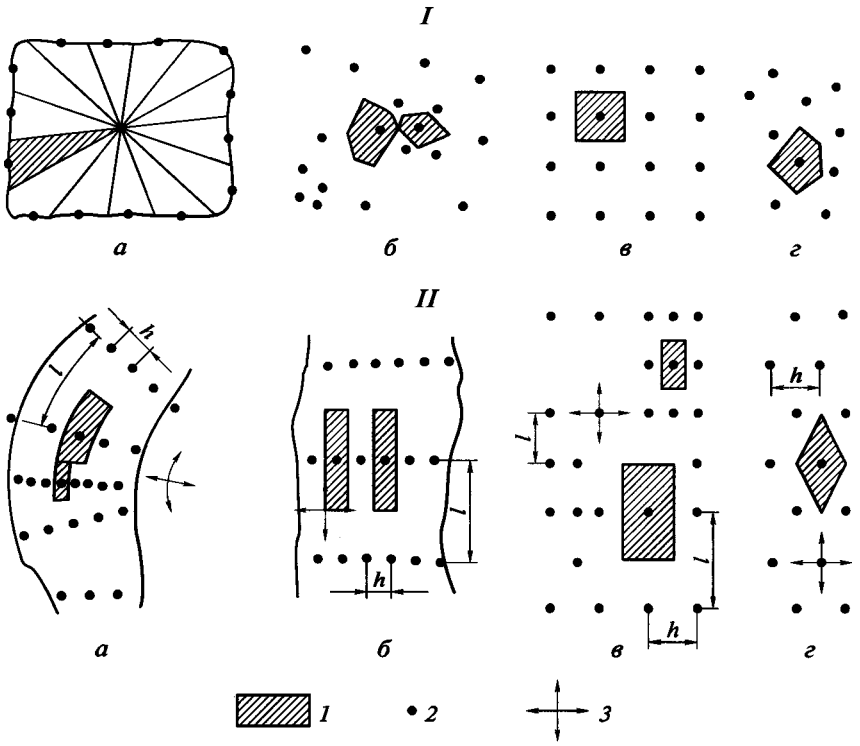


Рис. 4.28. Виды сетей разной геометрии (по Л. И. Четверикову):

I — изотропные сети: *а*, *б* — неравномерные, *в*, *г* — равномерные; *II* — анизотропные сети: *а*, *в* — неравномерные, *б*, *г* — равномерные; *1* — ячейки сети; *2* — местоположение точек наблюдений; *3* — оси анизотропии сети проб

такая плотность, которая обеспечивает получение необходимой для подсчета запасов разведочной информации с требуемой точностью и детальностью для данного этапа разведки.

Детализация разведочных работ предусматривает сгущение разведочной сети; при этом иногда возникает необходимость изменения вида сети: квадратная сеть может быть преобразована в прямоугольную или ромбическую и т. д. (рис. 4.29).

Важнейшими характеристиками разведочной сети являются ориентировка, форма и размеры ее ячейки. Ячейка — главный конструктивный элемент разведочной сети. В анизотропных сетях у ячеек вытянутая форма, и ориентированы они в одном направлении. В плане выделяют два ортогональных направления — две оси анизотропии с наибольшим I_{max} и наименьшим I_{min} средними расстояниями между выработками. Показателем анизотропии разведочной сети является величина $A_c = I_{max}/I_{min}$.

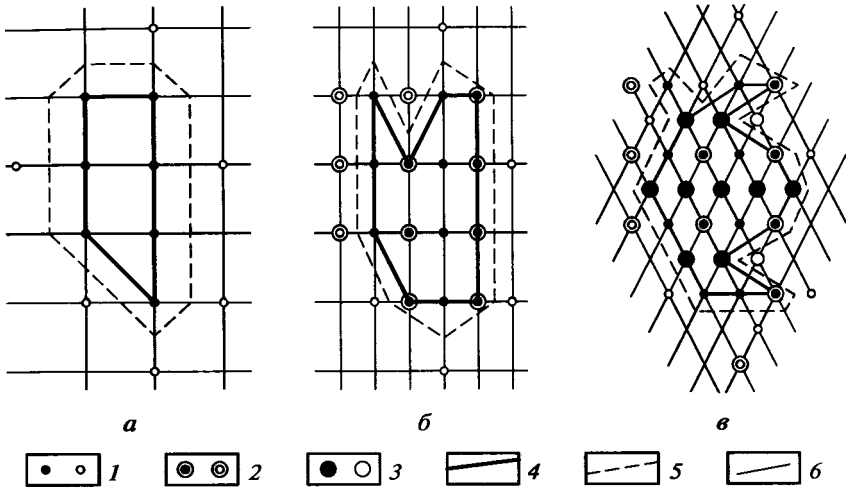


Рис. 4.29. Последовательное сгущение разведочной сети (по А. Г. Милютину):

а — изначальная квадратная сеть; *б* — прямоугольная сеть, полученная путем сокращения вдвое расстояния между скважинами по линии вкрест простирания; *в* — ромбическая сеть, образовавшаяся в результате проходки скважин в центре ячеек прямоугольной сети; *1—3* — буровые скважины: *1* — предварительной разведки (соответственно рудные и безрудные); *2* — детальной разведки (соответственно рудные и безрудные); *3* — доразведки (соответственно рудные и безрудные); *4*, *5* — линии контуров рудного тела: *4* — внутреннего контура, *5* — внешнего; *6* — линии сети, определяющие ее форму

Ориентировка и соотношение сторон ячеек разведочной сети зависят от характера анизотропии ведущего геолого-разведочного параметра в продольных плоскостях продуктивных залежей или рудных тел.

При разведке изотропных объектов используют квадратную сеть. Анизотропные залежи требуют применения прямоугольной или ромбической сети. При этом длинная сторона ячейки ориентируется вдоль направления минимальной изменчивости, а соотношение размеров ячейки устанавливается пропорционально отношению показателей анизотропии данного параметра по двум взаимно ортогональным направлениям, лежащим в продольной плоскости. Выбор геометрии ячейки разведочной сети зависит от того, какое свойство полезного ископаемого подлежит более надежной оценке.

Для надежной оценки объема и условий залегания полезных ископаемых используют характеристики изменчивости формы залежи, а для надежной оценки качества минерального сырья — характеристики изменчивости линейных запасов или содержаний.

Как показал Л. И. Четвериков, размер и геометрия разведочной сети влияют на выявляемую изменчивость признака, в частности на анизотропию закономерной изменчивости.

1. Наложение изотропной сети на анизотропный объект приводит к уменьшению анизотропии наблюдаемой изменчивости содержания по сравнению с природной анизотропией. Чем анизотропнее объект, тем значительнее подобное искажение.

2. Реализация равномерной анизотропной сети в изотропном объекте обусловливает появление ложной анизотропии наблюдаемой изменчивости содержания. По своему типу и ориентировке фиксируемая ложная анизотропия $A_л$ соответствует анизотропии сети $A_с$, но оказывается несколько меньшей по своему значению: $A_л < A_с$.

3. Осуществление анизотропной неоптимальной геометрии сети в анизотропном объекте может привести к следующему. Если анизотропия сети $A_с$ отличается от анизотропии объекта $A_о$ только значением показателя анизотропии, то при $A_с << A_о$ будет отношение $A_с < A_л < A_о$, а при $A_с >> A_о$ будет $A_с > A_л > A_о$.

Наиболее существенные искажения возникают при несовпадении ориентировок анизотропной сети и объекта. Неравномерность разведочной сети обусловливает дополнительные искажения наблюдаемой изменчивости, имеющие свои специфические особенности в каждом конкретном случае.

Эти положения наглядно подтверждаются экспериментальными данными. Так, на рис. 4.30 приведен один из примеров влияния ориентировки разведочной сети на наблюдаемую изменчивость содержания полезного компонента. Компьютерная модель месторождения опробована ЭВМ прямоугольной сетью с постоянным размером ячейки, но различно ориентированной. Хорошо видно, как близкая к реальной картина распределения содержаний, полученная сетью оптимальной геометрии (рис. 4.30, *а*), резко искажается при изменении ориентировки сети; ложная анизотропия в данном случае существенно превышает анизотропию объекта (рис. 4.30, *б*, *в*, *г*).

Вероятные погрешности оценок запасов и средних значений геолого-разведочных параметров в пределах подсчетных блоков определяются количеством разведочных пересечений. Оно зависит от предельно допустимых погрешностей определения каждого параметра и заданных доверительных вероятностей этих оценок в подсчетных блоках установленных размеров.

Как было отмечено ранее, в ряде случаев разведуемые объекты характеризуются различными степенью и характером изменчивости на разных структурных уровнях строения: рудоносная зона — тело полезного ископаемого — морфологически обособленные участки (рудные столбы и т.д.). При разведке таких объектов возникает необходимость изменять геометрию разведанной сети (не только плотность, но и ориентировку, соотношение сторон разведочной ячейки) при переходе к более детальным исследованиям.

Правильно выбранная разведочная сеть должна быть одновременно оптимальной с позиций как геометрии, так и количества разведочных пересечений на подсчетный блок.

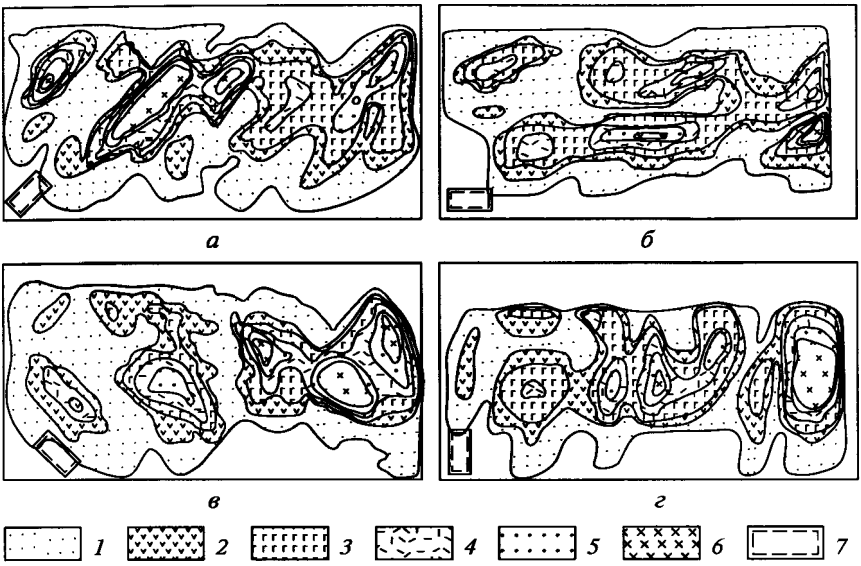


Рис. 4.30. Влияние анизотропии разведочной сети на наблюдаемую изменчивость содержания меди в модели рудного тела:

а—г — компьютерные модели, построенные по результатам опробования (сеть 50×100 м различной ориентировки); *1—6* — содержание меди (%): *1* — 0,1—0,5; *2* — 0,5—1,0; *3* — 1,0—1,5; *4* — 1,5—2,0; *5* — 2,0—2,5; *6* — 2,5—3,0; *7* — ячейка сети и ее ориентировка

При проектировании геолого-разведочных работ определение параметров разведочной сети проводится по аналогии с успешно разведанными и освоенными месторождениями данного промышленного типа. На ранних стадиях разведки месторождений ведущим фактором при формировании разведочной сети является морфогенетический тип этого месторождения.

Систематический анализ получаемой в процессе разведки геологической информации служит основой для корректировки разведочной сети. Оценку оптимальности сети и ее корректировку проводят: 1) по степени увязки смежных разведочных пересечений и разрезов; 2) путем выборочного сгущения разведочных пересечений или разрезов; 3) путем создания эталонных разрезов по типичным направлениям изменчивости свойств полезных ископаемых.

После завершения разведочных работ в ряде случаев возникает возможность оценить оптимальность использованной разведочной сети. Такая оценка выполняется: 1) сопоставлением результатов разведочных работ с результатами эксплуатационной разведки; 2) сравнением подсчета запасов с результатами эксплуатационных работ; 3) методом экспериментального разрежения разведочной сети.

Сравнение результатов разведочных работ с данными, полученными при эксплуатации месторождения, имеет очень важное значение для оценки точности и достоверности разведки и совершенствования разведочных методов. Оценка оптимальности заключается в том, что геологические разрезы и планы (в первую очередь контуры рудных тел), геолого-разведочные параметры (средние содержания и др.) и цифры запасов, выявленные в результате разведочных работ, сопоставляются с более детальными данными эксплуатационной разведки. Примеры сопоставления геологических разрезов, контуров рудных тел, особенностей внутреннего строения рудных залежей приведены на рис. 4.31, 4.32. По резуль-

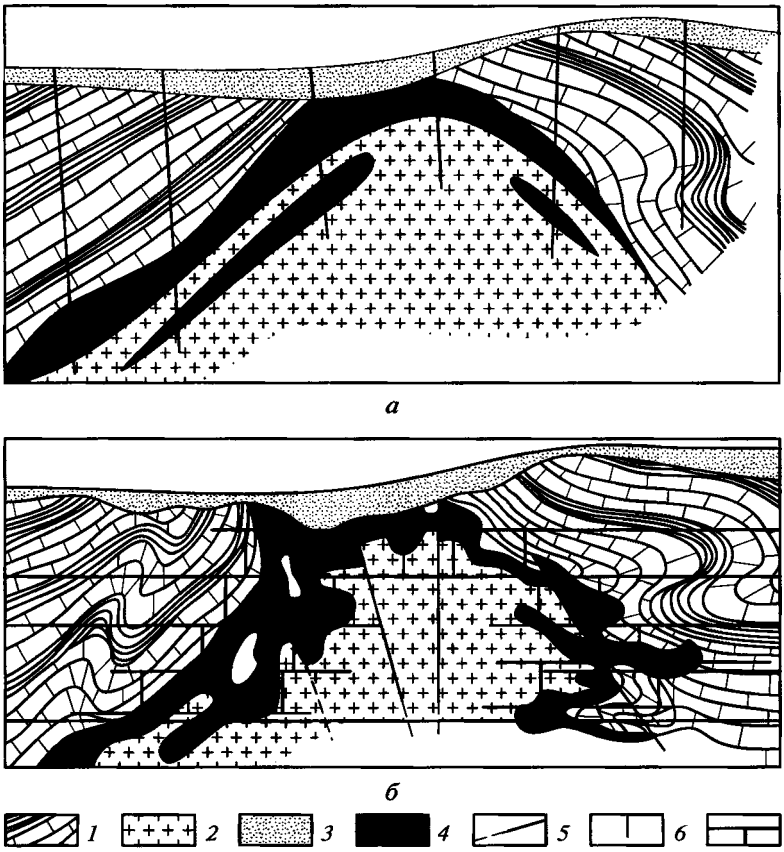


Рис. 4.31. Сравнение геологических разрезов, составленных по данным детальной (*а*) и эксплуатационной (*б*) разведок (по А. Б. Каждану):

1 — толща карбонатных пород; *2* — гранитоиды; *3* — рыхлые отложения; *4* — рудоносные скарны; *5* — тектонические нарушения; *6* — разведочные скважины; *7* — горные выработки

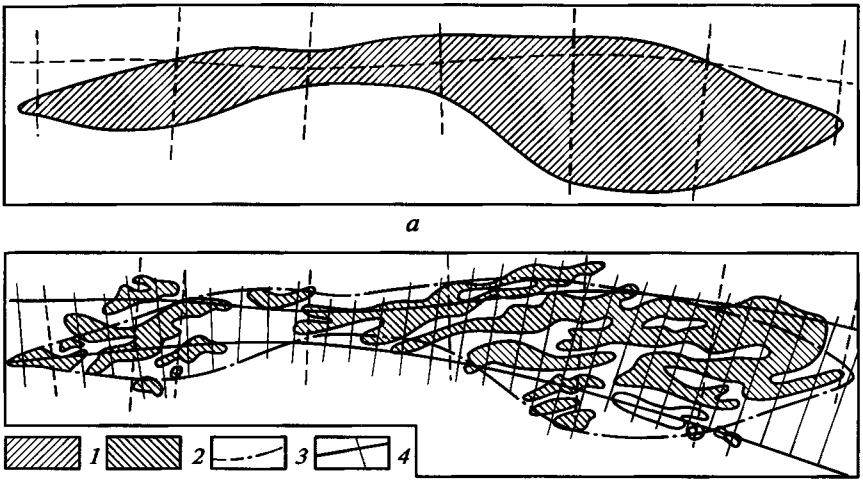


Рис. 4.32. Представления о морфологии и внутреннем строении залежей по данным детальной (*а*) и эксплуатационной (*б*) разведок (по А. Б. Каждану):

1 — контур залежи по данным детальной разведки; *2* — контуры залежи по данным эксплуатационной разведки; *3* — разведочные пересечения детальной разведки с рудными интервалами; *4* — разведочные пересечения эксплуатационной разведки

татам сопоставления оценивается степень подтверждения результатов разведочных работ и проводится корректировка разведочных сетей. Сущность метода экспериментального разрежения разведочной сети заключается в сопоставлении геологических разрезов, контуров промышленной минерализации, средних значений подсчетных параметров, запасов полезного ископаемого и других характеристик, полученных по многочисленным вариантам наложения разведочных сетей различной геометрии и эталонных значений тех же характеристик, за которые принимаются данные, полученные по исходной предельно густой разведочной сети.

По вариантам разрежения сети вычисляются фактические погрешности определения средней мощности, среднего содержания полезного компонента, рудной площади и запасов.

Анализ изменения погрешностей определения величины запасов полезного ископаемого в зависимости от плотности сети при различных вероятностях значений показателей изменчивости (коэффициентов вариации) позволяет определить оптимальную плотность сети для данного месторождения или участка.

Поскольку принципиально эти задачи имеют аналогичные решения как на природных объектах при реальной разведке, так и на моделях месторождений, построенных с помощью ЭВМ, в качестве

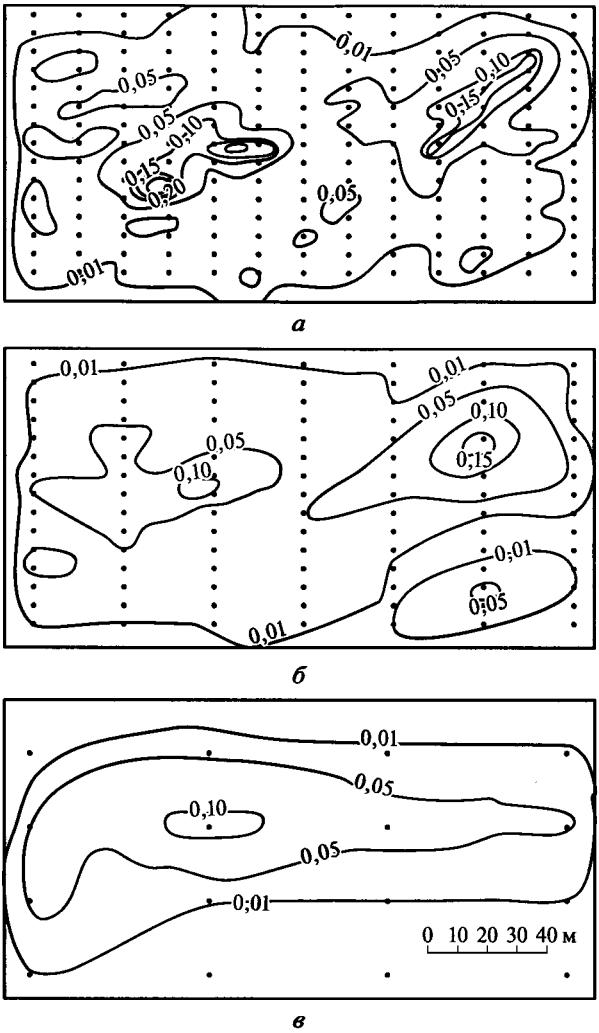


Рис. 4.33. Варианты разрежения (*а—в*) разведочной сети. Изоконцентрации серебра в плоскости рудного тела

примера можно привести варианты разрежения сети на одной из моделей (рис. 4.33).

4.2. Опробование

Опробование — один из важнейших способов получения информации в геологии. Пробы отбираются при поисках и разведке место-

рождений, проведении инженерно-геологических и гидрогеологических исследований, геологическом картировании, изучении осадочных, магматических и метаморфических пород, практически при всех видах геохимических, минералогических исследований и др. По существу, опробование — единственный, не имеющий альтернативы способ выявления достоверных, научно обоснованных сведений о качестве минерального сырья, его технологических свойствах, составе и строении тел полезных ископаемых, свойствах вмещающих пород и т. д.

Опробование осуществляется путем отбора проб, их обработки, выполнения соответствующих испытаний и оценки полученных результатов. Проба — это порция материала, отобранная от изучаемого объекта для проведения тех или иных испытаний. Такие пробы называют материальными; этот вид опробования наиболее распространен. Материал пробы может быть получен двумя способами: путем сплошного отбора в одном месте (сплошные пробы) или путем составления пробы из отдельных порций, взятых по определенной системе.

В настоящее время широко используют разнообразные методы (иногда их называют геофизическими) определения свойств пород (в том числе полезных ископаемых) непосредственно в естественном обнажении путем выполнения тех или иных измерений с помощью специальной аппаратуры или визуально. Каждое такое измерение тоже следует рассматривать как пробу. Такие пробы называются нематериальными и подразделяются на приборные и визуальные.

Таким образом, по определению Л. И. Четверикова, проба рассматривается как локальное специфическое единичное (точнее, одиночное) измерение, предназначенное для определения содержания какого-либо признака в объеме руды или породы.

Сплошные материальные пробы обладают свойством неповторимости. Каждая повторно отобранная проба, как бы близко она не находилась к предыдущей, представляет собой самостоятельный и тоже неповторимый замер, относящийся к другому объему исследуемого материала. Это свойство материальных проб заметно осложняет эмпирическую оценку их достоверности.

В отличие от материальных проб нематериальные могут быть повторены многократно в адекватных условиях. Это их существенное преимущество перед материальными пробами.

В связи с огромным разнообразием объектов опробования (геолого-промышленные типы месторождений, промышленные типы и сорта минерального сырья), целей и задач (минеральный и химический состав, физические, механические и другие свойства) требования к опробованию существенно различаются. Поэтому сложилась практика разработки инструктивных и методических руководств ресурсодобывающими ведомствами. В них регламентируются способы, параметры и технические средства опробования. Эти ведомства осу-

ществляют также метрологическое обеспечение управления качеством отбора, обработки и испытаний проб с регламентированной ими точностью.

Важнейшие методические вопросы, связанные как с отбором проб, так и с оценкой полученных результатов, наиболее детально и всесторонне разработаны для опробования рудных месторождений. В данной области накоплен обширный эмпирический материал, разработаны теоретические основы, которые пока еще не в полной мере используются при опробовании в других видах геологических исследований. Поэтому целесообразно основные особенности опробования рассмотреть на примерах опробования рудных месторождений.

Опробование рудных месторождений

В процессе разведки месторождений опробование играет важнейшую роль. К числу его главнейших задач относятся выявление качества минерального сырья, химического и минерального состава руд, технических и технологических свойств, а также закономерностей пространственного размещения руд, основных особенностей внутреннего строения рудных тел, их зональности и др. Как отмечает В. И. Смирнов, «Опробование является очень важной операцией геолого-разведочных работ, так как оно дает возможность оценить качество руды по ее сортам и отдельным участкам месторождения, а также выяснить закономерности распределения оруденения в пространстве, в частности определить особенности размещения обогащенных и разубоженных участков».

Осуществление целей опробования обычно связано с решением одной из двух основных задач. Первая заключается в определении среднего содержания, характерного или для опробованного объекта в целом, или для отдельной его части, вторая — в оценке наблюдаемой изменчивости и определении закономерностей этой изменчивости.

В процессе разведки и эксплуатации месторождений опробование позволяет получить данные, необходимые для решения важнейших вопросов: 1) определение запасов руды и металла; 2) оконтуривание рудных тел, а также в их пределах участков, различных по качеству минерального сырья; 3) направление геолого-разведочных и подготовительно-эксплуатационных работ, что в первую очередь относится к месторождениям, на которых тела полезных ископаемых не имеют четких геологических границ и постепенно переходят во вмещающие породы; границы промышленно ценного минерального сырья в этих случаях устанавливают только по результатам опробования; 4) выбор способа переработки руд при их обогащении и металлургическом переделе; 5) составление планов и программ добычи

руды и металла; 6) контроль за полнотой отработки рудных тел при эксплуатации; 7) получение исходных данных для определения потерь, разубоживания и разработки мер борьбы с ними.

Выделяют четыре главных вида опробования: химическое, минералого-петрографическое, техническое и технологическое.

Химическое опробование проводится для определения содержания полезных и вредных компонентов, выявляющего промышленную ценность отдельных участков и всего месторождения в целом. Надо заметить, что на самом деле содержание различных компонентов определяется не только химическими анализами, но и разнообразными другими способами (спектральным, полярографическим, нейтронно-активационным и др.).

Минералого-петрографическое опробование применяется для изучения минерального состава пород и руд, их текстурно-структурных особенностей которые, в частности, оказывают влияние на выбор способа переработки руд.

Техническое опробование проводится для определения физико-механических свойств минерального сырья, которое обычно применяется в промышленности без переработки и ценится именно за эти свойства. Например, строительные материалы исследуются на сопротивление сжатию, изгибу, на морозостойкость; в глинах определяются их керамические свойства (огнеупорность, пластичность, спекаемость, огневая усадка); листовая слюда подвергается испытаниям для определения электротехнических свойств и т. д.

К техническому опробованию относятся определения объемной массы руды и ее влажности, что необходимо для подсчета запасов большинства месторождений.

Технологическое опробование проводится для изучения технологических свойств минерального сырья и выбора схемы его переработки. Испытания таких проб осуществляются в лабораторных, полузаводских и заводских условиях.

В зависимости от характера предполагаемых испытаний размер, масса проб и характер материала бывают различны. Пробы для химических анализов должны быть представлены тонкораздробленным материалом, их масса составляет около 100—200 г (материал, отправляемый в лабораторию), хотя при отборе проб обычно получают значительно большее количество материала.

Для минералого-петрографических определений отбирают сравнительно небольшие штуфы, а также мелкие сколки для изготовления шлифов и аншлифов.

При техническом опробовании отбирают штуфы или монолиты, размер которых зависит от характера испытаний: объемную массу и пористость определяют на небольших штуфах, для определения сопротивления сжатию или морозостойкости отбирают монолиты размером $20 \times 20 \times 20$ см; оценка декоративных свойств камня проводится с отбором крупных блоков 0,05—0,1 $м^3$ и более.

Для изучения технологических свойств минерального сырья в полузаводских и заводских условиях размеры проб обычно согласовывают с организацией, проводящей испытания. Масса таких проб может колебаться в широких пределах — от нескольких сотен килограммов до нескольких сотен и тысяч тонн.

Способы отбора проб в горных выработках. Для отбора проб различного назначения, главным образом для химических анализов, используется несколько способов: штуфной, бороздовый, задирковый, валовый, шпуровой, точечный и вычерпывания.

Штуфной способ заключается в том, что в забое, стенке выработки или от уже отбитой массы отбирается 1—3 образца (штуфа) руды или породы. Масса каждого образца 0,2—0,5 кг. Штуфное опробование производится быстро, просто и дешево, однако непригодно для изучения химического состава руд по причине низкой точности и представительности. Как правило, штуфные пробы отбирают в основном для минералого-петрографических исследований, определения физико-механических свойств, технических испытаний (в этом случае отбирают монолиты соответствующей формы и размера) и почти никогда — для химического анализа, за исключением тех случаев, когда необходима предварительная, ориентировочная оценка качества минерального сырья.

Бороздовый способ пользуется наиболее широким распространением при опробовании рудных месторождений. Каждая индивидуальная проба отбирается выкалыванием или вырезанием из вскрытого в горных выработках или естественных обнажениях рудного тела узкой ленты — борозды, ориентированной по линии наибольшей изменчивости. Как было отмечено ранее, наиболее изменчивым является направление по мощности рудного тела.

Расположение бороздовых проб в горных выработках зависит от условий залегания тел полезных ископаемых и ориентировки выработок (рис. 4.34). Бороздовые пробы отбирают в забоях, по стенкам горных выработок и в их кровле. Принцип ориентировки борозд по линии наибольшей изменчивости соблюдается и при опробовании изометричных и трубообразных тел: бороздовые пробы располагают в плоскости поперечного сечения обычно по радиальным направлениям. В изометричных рудных телах, представленных штоками, гнездами, борозды располагают по преобладающим направлениям чередования рудных прожилков или зон.

Иногда при опробовании маломощных рудных тел с крайне неравномерным распределением полезного компонента отбирают две или три параллельные борозды, объединяя материал в одну пробу; этим повышаются представительность и надежность опробования.

В случае опробования зональных рудных тел, слоистых или полосчатых залежей, когда каждая зона или полоса характеризуется различным строением, минеральным составом и концентрациями металлов, борозды разделяют на секущие, соответствующие отдель-

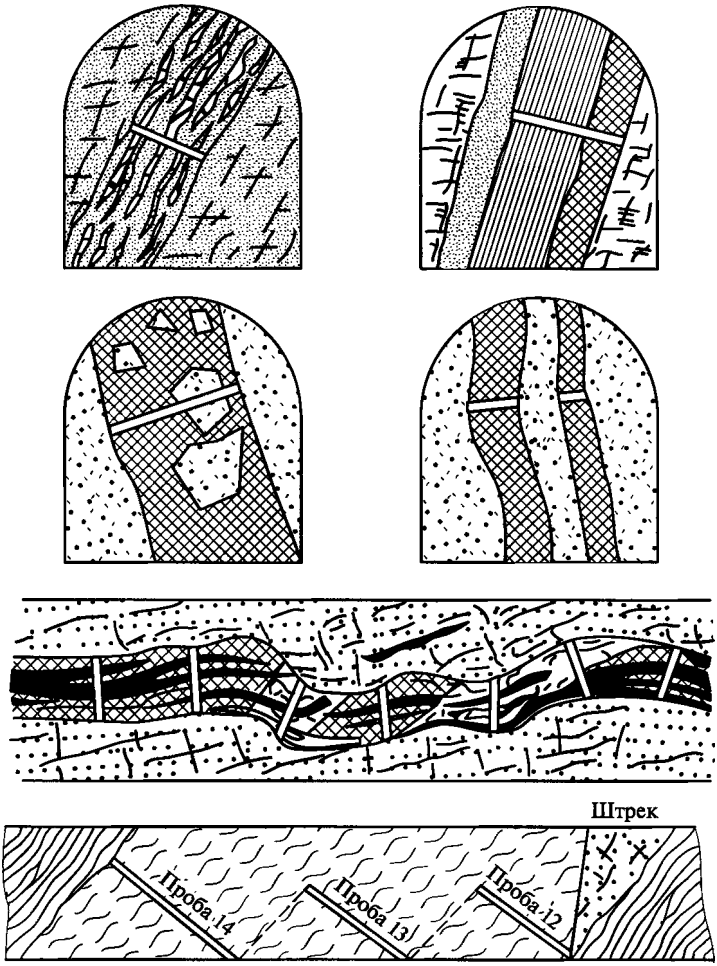


Рис. 4.34. Схемы расположения бороздовых проб в забоях и на стенках горных выработок

ным зонам. Каждая секция при этом представляет собой самостоятельную пробу. Например, при опробовании сульфидных тел самостоятельными секциями опробуются сплошные сульфидные руды, прилегающие к ним вкрапленные руды и минерализованные призальбандовые зоны (см. рис. 4.34). Секционное опробование позволяет более детально изучить распределение полезных компонентов в разных частях рудного тела, выделить сорта и типы руды, подлежащие селективной отработке. Секционное опробование используется и для определения границ рудных тел, которым свойственны постепенные переходы в безрудные боковые породы.

Длина бороздовых проб, отбираемых в рудных телах малой и средней мощности, определяется размером последней и может составлять 2—3 м. Если руды характеризуются крайне неравномерным распределением металла, они опробуются секционной бороздой с длиной секций до 1 м. При опробовании более мощных рудных тел, вскрываемых ортами или квершлагами, борозда делится на секции по 1, 2 или 3 м в зависимости от характера распределения полезного компонента.

Форма сечения борозды может быть квадратной, прямоугольной и треугольной. Наиболее часто отбирают борозды прямоугольного сечения, при этом глубина борозды (2—3 см) и ее ширина (5—15 см) зависят от мощности тела и равномерности распределения полезного компонента: чем меньше мощность тела и неравномернее распределение металла, тем шире и глубже борозда. Принятое сечение строго выдерживается по всей длине борозды, чтобы количество материала, получаемого с единицы длины, было бы везде одинаковым. Нарушение этого правила снижает точность опробования и приводит к искажению результатов.

Главными достоинствами бороздового способа являются объективность и высокая точность, что делает его универсальным способом пробоотбора, используемым при разведке самых разнообразных месторождений. Он не может применяться лишь в очень редких случаях, к которым относятся: 1) опробование исключительно тонких одиночных рудных прожилков руд благородных и редких металлов, по которым поперечная борозда не обеспечивает надежной массы пробы; 2) опробование руд с очень редкими зернами ценных минералов (конгломераты с золотыми самородками, гнезда хромшпинелидов с крупными включениями платины и др.); 3) опробование руд с исключительно хрупкими вкрапленниками и скоплениями рудных минералов, интенсивно выкрашивающимися из трещиноватых пород при вырубании борозды.

Существенным недостатком бороздового опробования является его низкая производительность. Поэтому в некоторых случаях используют разновидности бороздового способа: пунктирную борозду и пленочные пробы. Отбор пунктирной борозды заключается в отбойке материала вдоль линии борозды в виде мелких отдельных кусочков диаметром 2—4 см. Расстояние между такими порциями 3—5 см. В данном случае отбирается не сплошная, а составная проба, как и при точечном опробовании. Этот способ, позволяющий резко увеличить скорость отбора проб, применим при опробовании главным образом руд с весьма равномерным распределением полезного компонента.

Пленочные пробы представляют собой модификацию бороздовых проб, глубина которых составляет 2—3 мм. Отбойка материала пробы в виде тонкой ленты дает хорошие результаты при опробовании однородных массивных руд.

Отбор бороздовых проб значительно упрощается при использовании механических пробоотборников режущего типа (их конструкция основана на применении двух параллельных алмазных режущих дисков). В некоторых случаях пунктирная борозда может отбираться с помощью перфораторов.

Задирковый способ отбора проб осуществляется путем среза сплошного слоя руды со всей площади тела полезного ископаемого, вскрытого забоем горной выработки или в стенке квершлага или орта (см. рис. 4.37, *а*). Глубина среза составляет 3—5, реже 10 см. Объем задирковых проб зависит в основном от размера опробуемой площади рудного тела и изменяется в широких пределах — от 0,05 до 1 $м^3$ и более, а их масса колеблется от нескольких килограммов до нескольких сотен килограммов и даже нескольких тонн.

При отборе задирковых проб необходимо соблюдать постоянство глубины отбойки, чтобы обеспечить равномерное получение материала с различных частей опробуемой поверхности рудного тела.

Задирковое опробование — трудоемкий и дорогой способ, поэтому его используют обычно в трех случаях: 1) при опробовании тонких рудных жил золотых и редкометалльных месторождений, мощность которых не превышает 10 см, в связи с нецелесообразностью опробования их поперечной бороздой, не обеспечивающей надежной массы пробы; 2) при контроле более простых способов пробоотбора, таких, как бороздовое, шпуровое, точечное; 3) иногда для отбора технологических проб вместо валовых; в этих случаях глубина задирки увеличивается до 20 см и проба берется со всей площади забоя или стенки выработки.

Валовое опробование заключается в отборе всей рудной массы, получаемой в процессе проходки выработки, пересекающей рудное тело (в квершлагах и ортах, в шурфах, пересекающих горизонтально залегающие тела, или в специально проходимых для отбора валовых проб выработках). В ряде случаев при пересечении крупных рудных тел количество полученного материала превышает разумные пределы, и его сокращают. Такое сокращение осуществляется двумя способами: 1) в пробу отбирают рудную массу по отдельным интервалам выработки; 2) в пробу отбирают часть материала, сокращая его при погрузке или выгрузке отбитой рудной массы (например, в пробу направляют каждую вторую, третью или *n*-ю лопату, бадью, вагонетку). Второй способ обеспечивает получение более представительного материала. Во всех случаях сокращение валовых проб при их отборе должно быть обосновано расчетами и соответствующим контролем.

Объем и масса валовых проб зависят от мощности рудного тела и сечения выработки и достигают в некоторых случаях нескольких десятков кубических метров и нескольких сотен тонн.

Положительной стороной валового опробования является его высокая точность, отрицательной — необходимость отбора, транс-

портировки и переработки большого количества материала, что усложняет и удорожает его. Поэтому валовое опробование применяется: 1) для контроля всех других способов отбора проб; 2) для опробования тел полезных ископаемых с крайне неравномерным распределением полезного компонента (золотоносные россыпи, коренные месторождения платины и др.); 3) для отбора проб на технологические и технические испытания, особенно нерудных полезных ископаемых — слюды, асбеста и др.

Шпуровой способ опробования осуществляется путем сбора шлама, выбуриваемого в процессе проходки шпуров. Используются как специально задаваемые для отбора проб шпуры, так и шпуры, предназначенные для буровзрывных работ. При этом опробовать следует шпуры, направленные по линии мощности рудных тел. Привлекательной особенностью шпурового опробования является возможность отбора проб за пределами забоев и стен горных выработок. Эту возможность используют для опробования не вскрытых горными выработками частей крупных рудных тел (рис. 4.35).

Достоинства шпурового опробования следующие: 1) высокая представительность проб из шпуров, ориентированных вкрест простирания залежей; 2) механизация пробоотбора; 3) выдержанность сечения пробы; 4) тонкое измельчение материала; 5) возможность отбора проб за пределами выработок.

Недостатками этого способа являются: 1) практическая невозможность опробования выработок, идущих по простиранию рудного тела — пробы в данном случае непредставительны, поскольку буровзрывные шпуры ориентированы вдоль рудного тела; 2) невозможность секционного отбора проб; 3) неточность геологической документации опробования; 4) большие потери выбуриваемого материала — шлама.

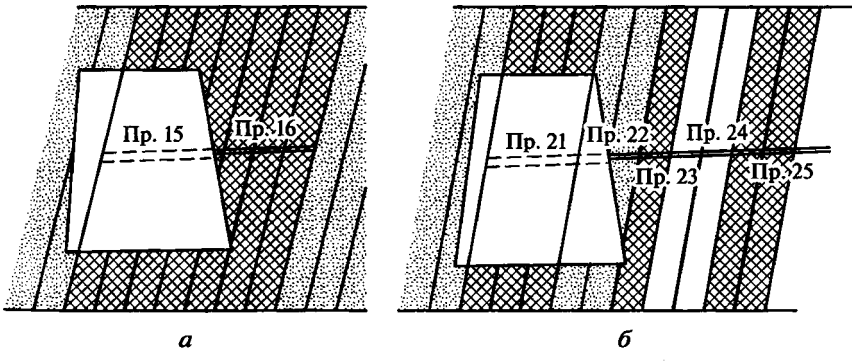


Рис. 4.35. Схема отбора проб из шпуров:

а — при опробовании залежи большой мощности; *б* — при опробовании параллельных тел полезных ископаемых

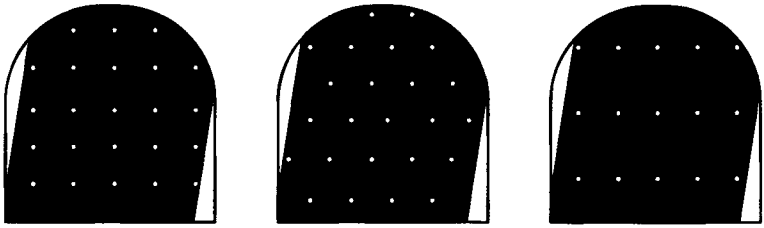


Рис. 4.36. Расположение точечных проб в забое по квадратной (*а*), ромбической (*б*) и прямоугольной (*в*) сетке

Тем не менее шпуровой способ широко применяют при благоприятных условиях.

Точечный способ заключается в отборе нескольких небольших порций материала, которые в совокупности составляют пробу, т. е. в этом случае берется не сплошная, а составная проба. Порции, составляющие пробу, берутся по строго определенной системе, по сетке с размером ячеек 10×10, 20×20 см. Часто используют ромбические или прямоугольные сетки (рис. 4.36). Число порций, составляющих одну пробу, колеблется от 10 до 20, масса одной порции — от 50 до 100 г. Очевидно, что составные пробы должны отбираться по сетке, анизотропия ячеек которой соответствует анизотропии опробуемого участка рудного тела. Только в этом случае проба может быть достоверной и представительной. Отбираемые указанным образом точечные пробы соответствуют задирковым и при благоприятных условиях могут заменять их (рис. 4.37). Составные пробы, отбираемые по линиям, как было отмечено ранее, соответствуют бороздовым.

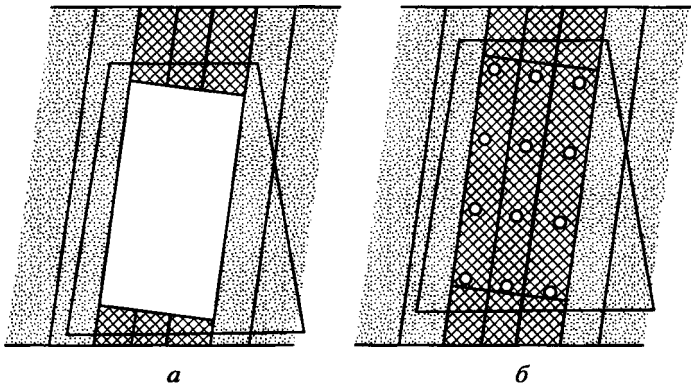


Рис. 4.37. Схемы отбора в забое горной выработки сплошной задирковой (*а*) и составной точечной (*б*) проб

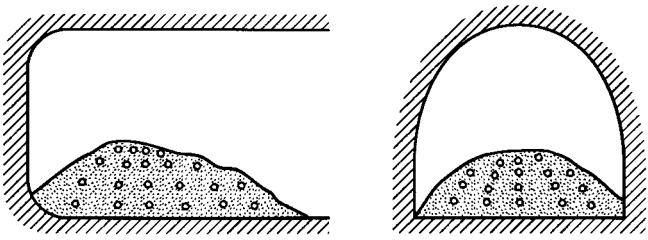


Рис. 4.38. Расположение точечных проб в навале отбитой руды у забоя: *а*, *б* — продольный и поперечный разрезы горной выработки

Следует подчеркнуть, что замена сплошных бороздовых и задирковых проб составными допускается лишь в тех случаях, когда экспериментально удается доказать, что составные пробы по достоверности и представительности сопоставимы со сплошными. Это наиболее вероятно для однородных рудных тел с относительно равномерным распределением полезного компонента. Впрочем, в ряде случаев показано, что правильный выбор сетки опробования и плотности отбора порций обеспечивает вполне удовлетворительную представительность и надежность точечных проб для руд с весьма неравномерным распределением металла.

Точечный способ применяют и для опробования навалов отбитой руды в забоях выработок или руды, погруженной в вагонетки, вагоны и т. д. Этот способ называют также горстьевым (рис. 4.38). Его применение целесообразно в выработках, пройденных по сплошной руде.

Одной из разновидностей точечного способа является ***способ вычерпывания***, который применяется для опробования навалов отбитой руды. Так же, как при горстьевом способе, на навал, предварительно выровненный для уменьшения его высоты, набрасывают веревочную сетку и из центров ячеек или узлов отбирают порции, которые в отличие от горстьевого способа отбираются не по одному кусочку, а до дна навала (рис. 4.39). Такой прием обеспечивает равномерность опробования как легкой фракции, так и глыб, что повышает представительность проб. Обычно при равномерном распределении полезного компонента отбирают 12—16 порций по 50 г каждая, при неравномерном распределении — 20—25 порций по 100 г, а в случае весьма неравномерного распределения полезного компонента число

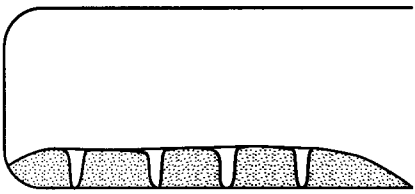


Рис. 4.39. Расположение лунок при опробовании навала руды по способу вычерпывания

порций увеличивается до 35—50, а их масса — до 200 г. Способ не очень удобен, отбор материала в виде лунок часто невозможен из-за наличия крупных глыб, поэтому он редко применяется.

Выбор способа отбора проб имеет немаловажное значение в разведочном процессе. Как правило, выбранный в начале разведочных работ способ опробования сохраняется до их завершения, что необходимо для получения сопоставимых материалов по разным участкам рудного тела, сортам и типам руд, опробованным в разное время (в полном соответствии с принципом равной достоверности). Способ пробоотбора должен быть наиболее простым, удобным, дешевым и в то же время обеспечивать достоверность и надежность проб.

Ведущую роль в выборе способа отбора проб играют некоторые геологические особенности изучаемого месторождения и в первую очередь текстурные особенности руд, мощность рудных тел, характер распределения полезного компонента, крепость руд.

Опробование по минеральному составу. Качество руды и приближенное количественное содержание полезных компонентов в ней можно определить по минеральному составу. Известно несколько приемов минералогического опробования: 1) по типам руд; 2) шлиховым минералам; 3) люминесцентное; 4) по оценке площади рудных минералов.

Опробование по типам руд служит для ориентировочной оценки содержаний полезных компонентов. Оно заключается в том, что по данным тщательной документации забоя или стенки выработки, вскрывающей рудное тело, выделяют типы руд, измеряют площади, сложенные каждым типом. А затем подсчитывают содержания компонентов на основе тех данных, которые ранее по химическим анализам установлены для всех типов руд этого месторождения. Как правило, при разведке месторождений создаются эталонные коллекции типов руд, для которых определяют средние содержания полезных компонентов.

Опробование по шлиховым минералам сводится к тому, что из материала пробы при его дроблении и промывке получают шлих, проводят его количественный минералогический анализ и пересчитывают содержание рудных минералов на содержание металлов. Этот способ используют для быстрой оценки качества минерального сырья еще до выполнения химических анализов на некоторых типах месторождений преимущественно вкрапленных руд.

Люминесцентное опробование применяется для ориентировочной оценки качества руды, ценные минералы которой светятся в ультрафиолетовых, катодных или рентгеновских лучах, и осуществляется путем облучения руды (переносной лампой в забое выработки) и подсчета светящихся минералов.

Опробование по оценке площади рудных минералов основано на количественном минералогическом анализе руд в шлифах или аншлифах и пересчете количества рудных минералов на содержание металлов.

Все перечисленные способы опробования руд по минеральному составу позволяют получить лишь приблизительную оценку качества минерального сырья.

Определение расстояний между пробами. Тела полезных ископаемых по направлению мощности (т. е. направлению максимальной изменчивости) опробуются непрерывно. Например, при бороздовом опробовании даже очень мощных рудных тел проба берется в виде непрерывной борозды, которая может быть разделена на отдельные секции.

По направлениям простирания и падения тел пробы обычно располагают на некотором расстоянии одна от другой. Выбор расстояний между пробами в первую очередь зависит от степени равномерности распределения полезного компонента. Поэтому на месторождениях с выдержанным оруденением и равномерным распределением металла расстояния между пробами больше, а на месторождениях с неравномерным и весьма неравномерным распределением металла сеть опробования сгущается, расстояния между пробами уменьшаются. При выборе расстояний между пробами можно ориентироваться на данные, приведенные в табл. 4.1, в основу которой положен большой фактический материал.

Таблица 4.1. **Расстояния между пробами** (по В. И. Смирнову)

Группа месторождений	Характер распределения металла, подлежащего определению	Коэффициент вариации содержания этого металла	Тип месторождения	Расстояние между пробами, м
I	Весьма равномерный	До 20	Морские осадочные месторождения железа и марганца	50—15
II	Равномерный	20—40	Осадочные месторождения железа, марганца, бокситов, некоторые метаморфические месторождения железа	15—4
III	Неравномерный	40—100	Большинство месторождений цветных металлов, некоторые месторождения редких металлов	4—2,5

Окончание табл. 4.1

Группа месторождений	Характер распределения металла, подлежащего определению	Коэффициент вариации содержания этого металла	Тип месторождения	Расстояние между пробами, м
IV	Весьма неравномерный	100—150	Преимущественно месторождения редких металлов, а также золота	2,5—1,5
V	Крайне неравномерный	Более 150	Некоторые месторождения золота и редких металлов	1,5—1

Зависимость расстояний между пробами от величины основного показателя изменчивости — коэффициента вариации — можно представить в виде графика (рис. 4.40) и выразить в виде эмпирической формулы $l = 200/V$, где l — расстояние между пробами; V — коэффициент вариации содержания полезного компонента.

Указанный способ оценки расстояний между пробами может дать лишь ориентировочные результаты, которые корректируются с учетом других данных. В наиболее ответственных случаях рекомендуется определять расстояния между пробами экспериментально методом разрежений.

Для ориентировочной оценки расстояний между пробами иногда используют статистические характеристики. Известно, что относительная величина погрешности определения среднего содержания P определяется по формуле $P = Vt/\sqrt{n}$, где V — коэффициент вариации содержания полезного компонента; t — коэффициент вероятно-

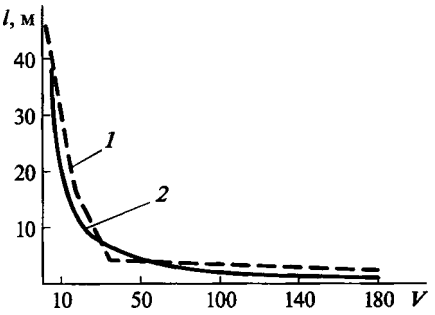


Рис. 4.40. Зависимость расстояний (l) между пробами от коэффициента (V) вариации содержаний полезного компонента (по А. П. Прокофьеву):
1 — по табл. 4.1; *2* — по формуле (см. текст)

сти, принимаемый для данных расчетов часто за 1, что соответствует вероятности 0,68; n — число проб.

Задаваясь определенной допустимой величиной погрешности, можно рассчитать число проб, обеспечивающее вычисление среднего содержания с ошибкой, не превышающей заданную: $n = V^2t^2/P^2$.

Число проб может быть выражено и как отношение длины опробуемого интервала L к расстоянию между пробами: $n = L/l$. Из этих двух выражений следует, что расстояние между пробами определяется как $l = P^2L/V^2t^2$. В этом выражении некоторой неопределенностью отличается величина L. При разведочных работах за L рекомендуется принимать суммарную длину горных выработок, в пределах которых по данным опробования должно быть установлено среднее содержание с допустимой погрешностью.

Отбор проб при бурении разведочных скважин. При бурении разведочных скважин отбор проб сопряжен с определенными особенностями и трудностями: 1) стенки скважин недоступны для осмотра; 2) повторный отбор проб затруднен, а в большинстве случаев невозможен; 3) количество материала, поступающего в пробу, ограничено.

В зависимости от вида бурения (колонкового, ударно-канатного, роторного, разных способов бурения неглубоких скважин) различают способы отбора проб.

При ***колонковом бурении*** могут применяться различные способы. В тех случаях, когда получают керн хорошего качества при достаточно высоком выходе (удовлетворительным считается выход керна не ниже 70—75 %), пробы отбирают из керна, представляющего собой в данном случае наиболее ценный для опробования материал. Эти пробы пригодны для химических, минералого-петрографических и технических испытаний, они в большинстве случаев весьма представительны для изучения структурных и текстурных свойств руд.

Перед опробованием керн измеряют, взвешивают и тщательно документируют. Керн разделяют на интервалы, отвечающие отдельным пробам. Интервалы выделяют в соответствии с изменчивостью тела полезного ископаемого и возможностью выделения зон, сложенных разными типами руды или минеральными, текстурно-структурными разновидностями и т. д. Поскольку разведочные скважины всегда ориентированы по направлению наибольшей изменчивости (или близко к этому направлению), схема их опробования по существу подобна секционному бороздовому опробованию в выработках. В пробу поступает часть керна: отбор проб производят, раскалывая керн вручную или керноколом или распиливая его (что предпочтительнее) вдоль оси на две части. Половина идет в пробу, вторая распиливается в свою очередь на две части: одна хранится в качестве дубликата, другая поступает в объединенную из нескольких скважин технологическую пробу или используется для изготовления шлифов, аншлифов, образцов и т. д. Иногда в пробу берут не половину, а не-

сколько меньшую часть керна, в ряде случаев керн опробуют, вырезая продольную узкую борозду.

В современных условиях колонковые скважины все чаще используют для отбора технологических проб. В этом случае в пробу объединяется весь рудный керн из нескольких специально пробуренных скважин.

Если при разбуривании тел полезных ископаемых не удается добиться удовлетворительного выхода керна, для получения надежных данных по содержанию полезных компонентов попутно с керном опробуют и шлам. Шлам в обязательном порядке опробуют и в тех случаях, когда выход керна достаточно высок, но устанавливается факт его избирательного истирания. Пробу шлама составляют из материала, осадившегося в течение данного рейса в шламовой трубе, и материала, собираемого из отстойников (в данном случае приходится применять специальные меры для улавливания, сохранения и опробования буровой мути с каждого интервала проходки скважины). Пробы шлама представляют собой менее ценный материал, чем керна, из-за засорения примесями, неполного улавливания, а также практической невозможности разделения на секции, соответствующие секциям керна. Тем не менее в случае избирательного истирания в керне мягких или хрупких частей, сложенных богатыми или бедными рудными скоплениями, приводящего к заметному обогащению или обеднению проб керна, сбор шлама обязателен при любом выходе керна, не достигающем 100 %.

При опробовании керна и шлама среднее содержание полезного компонента вычисляют по данным обеих проб пропорционально их объемам:

$$C = C_к \frac{l_к d^2}{l_и D^2} + C_ш \left(1 - \frac{l_к d^2}{l_и D^2}\right),$$

где C — среднее содержание компонента в этом интервале; $C_к$ — содержание компонента в керновой пробе; $C_ш$ — содержание компонента в пробе шлама; D — диаметр скважины, мм; d — диаметр керна, мм; $l_и$ — длина опробуемого интервала; $l_к$ — длина керна.

Ударно-канатное бурение широко используется при разведке разнообразных месторождений, преимущественно крупных штокверковых залежей меди, молибдена, олова, вольфрама и др. Материалом опробования естественно служит шлам. Механическое ударно-канатное бурение характеризуется относительно высокой производительностью и обычно большими диаметрами, поэтому с каждого пробуренного метра получают от 45 до 220 кг и более довольно тонкого и хорошо перемешанного материала, который идет в пробу полностью или может быть сокращен.

Шлам, отбираемый при канатном бурении, может загрязняться материалом из верхних частей скважины. Во избежание связанных

с этим погрешностей опробования скважина изолируется обсадными трубами. Обязательна обсадка труб перед началом бурения по рудному телу, а также по его отдельным мощным зонам, обладающим различной концентрацией металла. При опробовании скважины после каждого периода работы долота необходима тщательная очистка забоя; наиболее полное удаление шлама с забоя обеспечивается использованием поршневой желонки.

При механическом ударном бурении наиболее трудной задачей является отбор секционных проб, которые должны соответствовать разнородным зонам залежей. Для этих целей используется комплексный каротаж скважин, а также косвенные признаки — изменение скорости бурения в зависимости от различной крепости пород и руд, окраска шлама или буровой мути.

При ***роторном бурении*** сплошным забоем шлам собирают в специальных отстойниках, где его по отдельным интервалам смешивают и сокращают, и отбор проб можно осуществлять различными пробоотборниками — грунтоносами.

Существенный недостаток такого опробования, особенно при бурении глубоких скважин, — отставание тяжелых частиц от легких при их выносе на поверхность, что искажает состав проб, создает большие трудности в привязке полученного шлама к тому или иному интервалу проходки. Это является одной из причин ограниченного применения роторного бурения сплошным забоем для разведочных целей.

Бурение неглубоких скважин осуществляется разнообразными способами: колонковым, ударным, шнековым, вибрационным и др. Технические средства отбора проб зависят от способа бурения и также весьма разнообразны. Однако определяющими факторами в отборе проб из неглубоких скважин являются геологические и горнотехнические особенности опробуемого объекта. В основном неглубокими скважинами разведуются месторождения коры выветривания, россыпные, некоторые типы нерудных месторождений, в частности стройматериалов.

Буровая разведка и опробование сильно обводненных россыпных месторождений возможны только при опережающей обсадке скважин обсадными трубами. При опробовании россыпей отбирают секционные пробы, которые дают возможность установить мощность «пласта» и перекрывающих «торфов», положение плотика, наличие ложных плотиков и т. д.

Опробование россыпей, разведуемых буровыми скважинами, обычно сопровождается заметными погрешностями — систематическим занижением содержаний полезного компонента. Это связано с тем, что обсадка скважин и долочение крупных валунов вызывают сотрясение рыхлого материала и перемещение вниз тяжелых частиц, вследствие чего определяемая по данным опробования мощность пласта уменьшается.

Кроме того, часть рыхлого материала при долочении может отжиматься в затрубное пространство, а в сильно обводненных отложениях, наоборот, поступать в скважину из затрубного пространства.

В связи с недостаточно надежными данными буровой разведки россыпей результаты опробования буровых скважин требуют систематического контроля путем проходки и опробования сопряженных со скважинами шурфов. В результате этого устанавливается поправочный коэффициент, обычно превышающий единицу.

При бурении и опробовании кварцевых, стекольных, формовочных и строительных песков, суглинков, иногда диатомита, трепела и других сыпучих, сухих и влажных, но не обводненных полезных ископаемых в качестве рабочего наконечника применяют ложку. Достоверность опробования обеспечивается при условии, если обсадные трубы опережают забой скважины. Поднятый буровой ложкой материал высыпается на деревянный щит; после просмотра и документации в одну пробу объединяется материал с нескольких забурок. Длина пробы зависит от строения залежи и колеблется от 0,5 до 2,0 м. Иногда для опробования используют грунтоносы.

При бурении и опробовании каолинов, различных глин и глиноподобных материалов, некоторых адсорбентов, иногда силикатных никелевых руд в качестве рабочего наконечника применяют змеевики и шнеки. При подъеме материал загрязняется вышележащими породами и его необходимо по возможности очищать. После этого материал просматривают и документируют. В зависимости от мощности и строения залежи отбирают секционные пробы. Длина секций колеблется от 0,5 до 2,0 м и более. Отбор проб может осуществляться и различными грунтоносами.

Обработка и сокращение химических проб

Начальная масса химических проб зависит от способа пробоотбора и колеблется в широких пределах от 0,5 до 50 кг и более. Для химического анализа с учетом дубликатов требуется от 50 до 200 г материала (для анализа на благородные металлы требуются пробы большей массы). В связи с этим пробы подлежат сокращению. Сокращение начальных масс проб до конечных, отправляемых в лабораторию, должно быть выполнено так, чтобы содержание металла (или минерала) в конечной пробе было равно содержанию его в начальной пробе. Это достигается предварительным, до сокращения, повышением равномерности содержания в ней металла путем ее измельчения и тщательного перемешивания. Раздробленная и перемешанная проба может быть сокращена сразу или в несколько приемов. В последнем случае материал дробится до определенного размера кусков и сокращается, затем оставшаяся часть вновь дробится до меньших размеров кусков и вновь сокращается

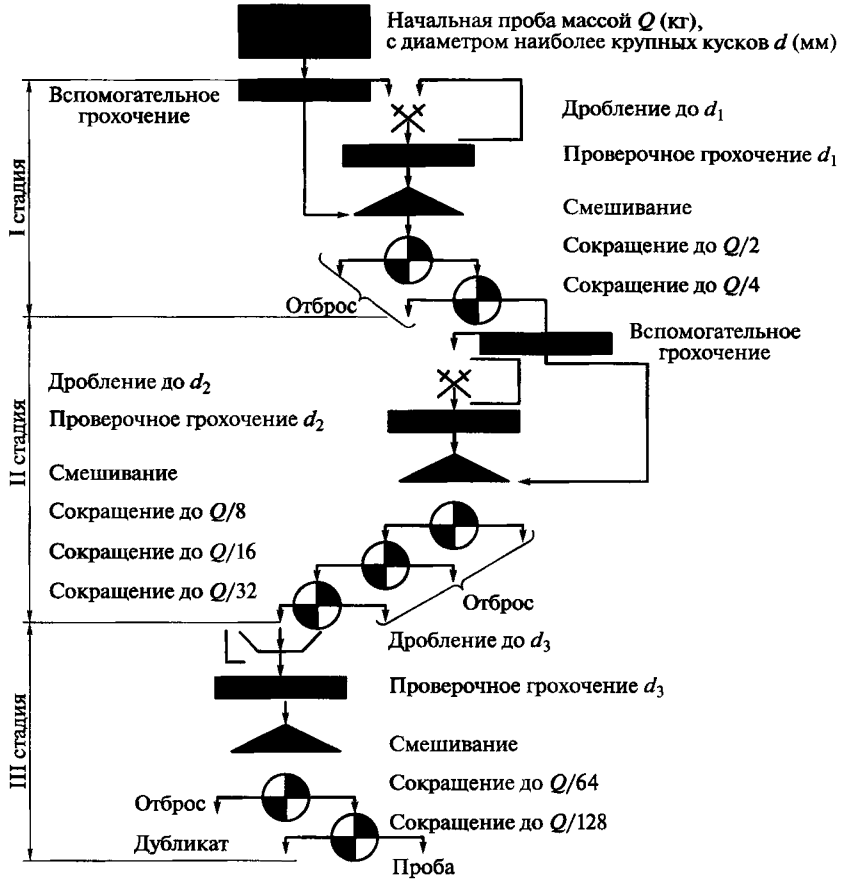


Рис. 4.41. Схема обработки пробы, рассчитанная по формуле $Q = Kd^2$ (объяснение см. в тексте)

и так далее до конечной массы пробы. Размер кусков пробы, при котором возможно ее сокращение, контролируется просеиванием на ситах.

Все операции по дроблению, просеиванию и сокращению материала проб производят в определенной последовательности по заранее составленной схеме. Для составления такой схемы используют зависимость между массой пробы (кг) и диаметром наибольших ее частиц, при которой сохраняется представительность пробы. Такая зависимость выражается формулой $Q = Kd^2$ (известной как формула Чечота—Ричардса, названная по именам российского и английского исследователей, обосновавших ее использование), где Q — масса пробы, кг; d — диаметр наибольших частиц, мм; K — коэффициент, характеризующий степень равномерности распределения

полезного компонента в руде. Величина коэффициента колеблется от 0,25 до 1.

Дробление проб производится на специальных лабораторных дробилках различных конструкций — в зависимости от крупности материала. Перемешивание осуществляется перелопачиванием, способом «кольца и конуса», в шаровых мельницах.

Для деления — квартования — проб используют ящичные, конусные делители.

Таким образом, обработку и сокращение проб ведут в такой последовательности: 1) подбирают коэффициент K, обеспечивающий правильное сокращение начальных масс проб и представительность конечных масс, направляемых для лабораторных анализов; 2) составляют общую схему обработки и сокращения проб; 3) производят измельчение материала пробы (дробление) до размера, при котором осуществляется первый этап сокращения; 4) проверяют полноту измельчения путем грохочения (просеивания); 5) перемешивают измельченный материал для сообщения ему равномерности; 6) производят сокращение пробы до предельной массы (промежуточной, иногда конечной); 7) дробление, просеивание, перемешивание и квартование повторяют до получения конечной навески. Пример последовательности операций при сокращении проб приведен на рис. 4.41.

Достоверность и представительность проб

Для характеристики качества опробования, его точности и надежности используют два основных понятия: достоверность и представительность проб.

Под ***достоверностью пробы*** понимается степень соответствия значения признака (в частности, содержания полезного компонента), показанного пробой, реальному значению этого признака в объеме пробы. Более строгое определение этому понятию дано Л. И. Четвериковым: под достоверностью понимается та точность, с которой данная проба фиксирует значение признака в области замера, т. е. в том объеме, который в идеальном случае должна иметь сплошная проба или из которого отобрана составная проба.

Достоверность проб должна обеспечивать получение несмещенной оценки среднего содержания с заданной точностью и вероятностью.

Количественным выражением достоверности пробы является ее техническая ошибка, которая складывается из погрешности отбора материала пробы, погрешности его обработки и погрешности анализа:

$$a_q = \sqrt{a_o^2 + a_c^2 + a_a^2},$$

где a_q — техническая ошибка пробы; a_o — погрешность отбора; a_c — погрешность обработки (сокращение); a_a — погрешность анализа.

Погрешности могут быть случайными и систематическими. Случайные погрешности снижают точность оценок средних содержаний в подсчетных блоках, однако с возрастанием числа наблюдений эти оценки приближаются к истинным. Отрицательное влияние случайных погрешностей тем сильнее, чем меньше число единичных наблюдений и выше уровень погрешностей. Поэтому величины случайных погрешностей не должны превышать установленных пределов.

Систематические погрешности опробования возникают в результате направленного однозначного действия каких-либо факторов в процессе отбора, обработки или анализов проб и характеризуются постоянным знаком. При наличии систематических погрешностей независимо от числа наблюдений средние результаты будут либо завышены, либо занижены по сравнению с истинными. Систематические погрешности являются наиболее опасными, каких-либо допустимых величин систематических ошибок нет и не может быть установлено. Систематическая ошибка в любую сторону (+ или –) недопустима. В каждом конкретном случае должна быть точно установлена величина систематической погрешности, выявлены и устранены причины, вызывающие ее.

Представительностью пробы принято называть степень соответствия содержания компонентов в пробе содержанию их в том объеме тела полезного ископаемого, на который распространяются данные этой пробы. Одна и та же проба обладает разной представительностью в зависимости от того, на какой объем тела распространяются ее данные. В этом понимании для оценки представительности пробы необходимо знать истинное среднее содержание компонента в соответствующем объеме, что невозможно. Поэтому, по предложению Л. И. Четверикова, следует оценивать вероятную представительность проб данного вида в пределах какого-либо геологически однородного блока. В этом случае термин «представительность пробы» можно определить как возможную точность в ее вероятностном выражении, с какой полностью достоверная проба представляет выделяемую часть объекта опробования (т. е. выделяемый блок рудного тела).

В качестве количественного показателя представительности пробы используется в общем виде погрешность аналогии пробы, т. е. вероятностная оценка коэффициента вариации случайной составляющей содержаний по пробам в пределах геологически однородного блока: $a_n = tV_o$, где a_n — представительность пробы (погрешность аналогии); t — коэффициент вероятности (степень принимаемой вероятности оценки погрешности аналогии); V_o — коэффициент вариации содержания в пробах данного вида в пределах конкретного блока.

Контроль опробования

Для выявления уровня случайных погрешностей и получения надежных данных, подтверждающих отсутствие систематических погрешностей, все основные операции по опробованию подвергаются обязательному контролю. Достоверность результатов опробования устанавливается по отсутствию систематических погрешностей, а их точность — по уровню средних случайных погрешностей.

Контроль пробоотбора. Погрешность пробоотбора может быть вызвана разными причинами: небрежностью отбора материала, использованием несовершенных инструментов и способов, свойствами объекта, например различной хрупкостью минералов, слагающих руду. Случайные погрешности пробоотбора возникают в связи с несовершенством способов отбора материала проб от монолитных пород, а систематические погрешности — в связи с резкими различиями физико-механических свойств полезных минералов, жильных минералов и вмещающих пород, что приводит к избирательным потерям хрупкого материала (или к обогащению им) в процессе пробоотбора. Оценка величины погрешности отбора проб осуществляется специальными мероприятиями по контролю пробоотбора, которые проводятся по трем направлениям.

1. Постоянно проводится проверка фактической массы отобранных проб путем сопоставления ее с теоретической массой, рассчитанной для предусмотренного заданием объема проб. Допустимыми считаются отклонения, не превышающие ±10—20 %.

2. Независимо от степени совпадения теоретической и практической масс проб периодически (один раз в квартал или полугодие) осуществляется контрольный отбор проб под строгим геологическим надзором. Отбирается не менее 2—30 проб в тех же местах, где отбирались основные (рядовые) пробы. Результаты контрольного опробования сопоставляются с рядовым для определения случайных погрешностей.

3. Во всех ответственных случаях для надежной оценки качества минерального сырья и выявления возможных систематических погрешностей пробоотбора проводят контрольное опробование другим более надежным способом по сравнению с принятым основным. Чаще всего используют валовый способ, реже задирковый или бороздовый (с большим сечением борозды).

Для контроля керновых проб используют скважины ударно-канатного бурения или отбор проб в специально пройденных горных выработках. Сопоставляя результаты основных и контрольных проб, вычисляют систематическую ошибку в абсолютном и относительном выражении для введения соответствующих поправок к результатам основного опробования.

Количество контрольных проб во всех случаях зависит от изменчивости содержания полезного компонента и определяется самостоятельно для каждой разновидности руды.

Контроль обработки проб. Контроль обработки проб сводится к выявлению погрешности обработки, которая представляет собой разницу между фактическим содержанием в исходном материале пробы и содержанием в анализируемой части этого материала после его сокращения. Ошибка обработки может быть случайной и закономерной, будучи обусловлена факторами как технического, так и методического порядка.

Существуют три возможных способа эмпирической оценки ошибки обработки.

1. Получив основную навеску, оставшийся после обработки материал собирают вместе и по той же схеме, но с максимальной тщательностью проводят повторную операцию, в результате которой выделяется дополнительная, контрольная, навеска. Расхождения между содержаниями в основной и контрольной навесках принимаются за ошибку обработки.

2. Оставшийся после получения основной навески материал дробится до возможно полного его вскрытия и затем квартованием или делением на механическом сократителе выделяется контрольная навеска, которую можно рассматривать как практически лишенную ошибки обработки. Ошибка обработки и в этом случае определяется как расхождение между основной и контрольной навесками.

3. Методически наиболее правильным является третий способ. Принцип его заключается в получении контрольных навесок после каждого этапа сокращения материала пробы в процессе его обработки. При такой методике есть возможность установить, на каком этапе обработки пробы возникает погрешность, и выяснить причины этого явления.

Контроль анализов. Достоверность химических анализов устанавливается при контрольных мероприятиях, направленных на выявление погрешностей.

Случайная погрешность — наиболее распространенная ошибка химического анализа, результат частных, непостоянно действующих факторов при анализе в каждом конкретном случае. Величина случайной погрешности — одна из характеристик качества работы лаборатории. Она может быть выявлена и оценена при внутреннем контроле, проведенном в той же лаборатории, где выполняются основные анализы рядовых проб. Контроль состоит в том, что лаборатория выполняет анализы некоторого количества дубликатов проб. Абсолютная величина средней случайной погрешности определяется как среднее арифметическое расхождений между содержаниями полезного компонента в основных и контрольных пробах без учета знака отношения:

$$\Delta = \frac{\sum \Delta i}{n}.$$

Обычно в практике опробования используют относительную величину случайной погрешности

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{\Delta}{\bar{C}_{\text{о}}} 100\ \%,$$

где $\bar{C}_{\text{о}}$ — среднее содержание, вычисленное по основным пробам. Таким образом, относительная случайная погрешность зависит от уровня содержания полезного компонента в пробах. Поэтому при организации внутреннего контроля необходимо группировать пробы по классам содержаний. Для каждого класса величина относительной случайной погрешности не должна выходить за допустимые пределы, установленные для каждого вида минерального сырья.

Внутренний контроль — обязательная операция, выполняемая в процессе опробования месторождения регулярно (1—2 раза в полугодие), для всех типов руд, участков месторождения, классов содержания.

Систематическая погрешность — результат постоянно действующего фактора, поэтому относится к ошибкам методического характера. Эти ошибки наиболее опасны, для них каких-либо допустимых пределов не существует. Использование рядовых анализов, несущих в себе систематическую погрешность, для оконтуривания и подсчета запасов всегда приводит к ошибкам и поэтому не допускается. Если выявляется наличие систематической ошибки, должна быть установлена и устранена вызывающая ее причина.

Выявление систематической ошибки проводится внешним контролем. Отобранные для контроля пробы передаются в химическую лабораторию, зарекомендовавшую себя высоким уровнем работы и имеющую соответствующий статус. Отбор материала для контроля проводится из остатков рядовых проб, хранящихся в основной лаборатории. Набирать материал из дубликатов не рекомендуется, так как в этом случае на выявляемые погрешности анализов накладываются погрешности обработки проб.

Средняя абсолютная величина систематической погрешности определяется по формуле

$$d = \sum d_i / n,$$

где d_i — расхождение между рядовой и контрольной пробами, суммируемое с учетом знака.

Средняя относительная систематическая погрешность равна

$$d_{\text{отн}} = (d / \bar{C}_{\text{о}}) 100\ \%.$$

Факт наличия систематической погрешности наиболее просто устанавливается в тех случаях, когда при сопоставлении результатов

основных и контрольных проб отчетливо наблюдается преобладание одних знаков расхождения.

Значимость систематической погрешности определяется по величине коэффициента однородности $K_o = d/\Delta$.

При отсутствии систематической погрешности должно соблюдаться неравенство

$$K_o \le \frac{2{,}45}{\sqrt{n}},$$

где величина 2,45 отвечает значению точки стандартного нормального распределения для доверительной вероятности 99 % или, что то же самое, для 1 % уровня значимости; n — количество пар основных и контрольных анализов.

При обнаружении систематической погрешности, для того чтобы подтвердить результаты внешнего контроля, иногда возникает необходимость проведения контрольных анализов в арбитражной лаборатории. После подтверждения достоверности контрольных анализов решается вопрос о применении поправочного коэффициента

$$K = \frac{C_k}{\bar{C}_o}.$$

Внешний контроль также осуществляется систематически, не реже 1 раза в квартал; пробы группируются по классам содержаний, типам руд, времени производства анализов и др.

4.3. Основы классификации запасов

Разработка месторождений полезных ископаемых сопряжена с большими капиталовложениями. Вложенные в горную промышленность средства требуют определенных гарантий возврата. Поэтому, чтобы минимизировать неизбежно существующий экономический риск, необходимы достаточно надежные критерии оценки достоверности разведанных запасов.

Подсчет запасов полезных ископаемых осуществляется на основе единичных измерений размеров рудных тел и содержаний полезных компонентов в горных выработках и скважинах и интерполяции этих значений на пространство между ними, а также экстраполяции за пределы разведочных пересечений. Поэтому подсчитанные запасы всегда отличаются от реальных. Величина данного расхождения зависит, с одной стороны, от сложности строения рудных тел, неравномерности распределения в них полезных компонентов, а с другой — от детальности разведки. Из этого следует очевидность давно известного правила: чем неравномернее рудные тела по морфологии

и распределению металлов и чем меньше детальность разведки, тем ниже достоверность цифр подсчитанных запасов.

Разведанные запасы по степени достоверности их величин подразделяются на ряд категорий запасов. Такое разделение запасов по степени их достоверности, разведанности и изученности называется классификацией запасов.

В настоящее время различные, но общие по своим принципам классификации запасов существуют во всех странах с развитой горнодобывающей промышленностью. При этом классификации постоянно совершенствуются. В России действует «Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых», утвержденная в 1997 г. Классификация определяет единые принципы подсчета, оценки и государственного учета запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых в недрах по степени их изученности и экономическому значению.

Запасы полезных ископаемых и прогнозные ресурсы. ***Запасы*** полезных ископаемых подсчитываются по результатам геолого-разведочных работ и подразделяются по степени разведанности на четыре категории: А, В, C_1 и C_2. При отнесении запасов к той или иной категории решающими условиями являются: 1) достоверность количества подсчитанных запасов; 2) полнота изучения качества и технологии переработки полезного ископаемого; 3) степень исследования природных факторов, определяющих условия ведения горно-эксплуатационных работ, в первую очередь степень изученности гидрогеологии.

К категории А относятся запасы, для которых установлены размеры, форма и условия залегания тел, оконтурены безрудные и некондиционные участки, выделены и оконтурены технологические типы и сорта руд, изучены содержания и распределение попутных ценных и вредных компонентов. Предусматривается полное выяснение качества и технологических свойств всех типов и сортов минерального сырья и факторов, определяющих природные условия проведения горно-эксплуатационных работ. Практически это означает, что в пределах каждого подсчетного блока должны быть установлены все существенные детали условий залегания и контуров тел полезных ископаемых, а детальность выяснения морфологических особенностей и строения залежей должна обеспечивать единственно возможный вариант увязки разведочных данных по смежным горным выработкам и скважинам. Оценка и оконтуривание запасов категории А осуществляются по предельно густой сети разведочных выработок только путем интерполяции данных между смежными пересечениями (рис. 4.42).

Для отнесения запасов к категории В необходимо выяснение основных особенностей формы, строения и условий залегания тел полезных ископаемых, основных закономерностей пространственной изменчивости, основных особенностей размещения участков, сло-

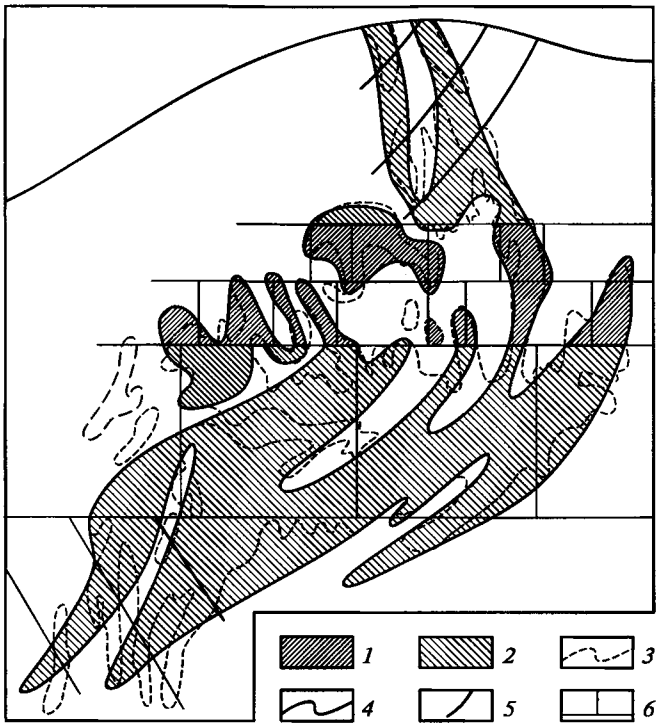


Рис. 4.42. Схема, иллюстрирующая детальность разведки запасов категорий А и В (по А. Б. Каждану):

1 — запасы категории А; *2* — запасы категории В; *3* — истинные контуры рудной залежи; *4* — контуры разведанных запасов; *5* — разведочные скважины; *6* — разведочные горные выработки

женных различными природными типами и сортами, а также участков пустых пород и некондиционных минеральных скоплений. Оконтуривание запасов категории В проводится по регулярной разведочной сети путем интерполяции разведочных данных между смежными пересечениями (см. рис. 4.42). При сравнительно простом геологическом строении тел допускается незначительная экстраполяция данных за пределы разведанного объема.

Для запасов, относимых к категории C_1, требования еще более снижаются: в этом случае должны быть выяснены размеры, характерные формы тел, основные особенности условий их залегания, оценены изменчивость и возможная прерывистость тел, выявлены природные разновидности, технологические типы полезного ископаемого и установлены общие закономерности их размещения. Для оценки запасов категории C_1 не требуется оконтуривание безрудных участков и участков, сложенных различными сортами и типами по-

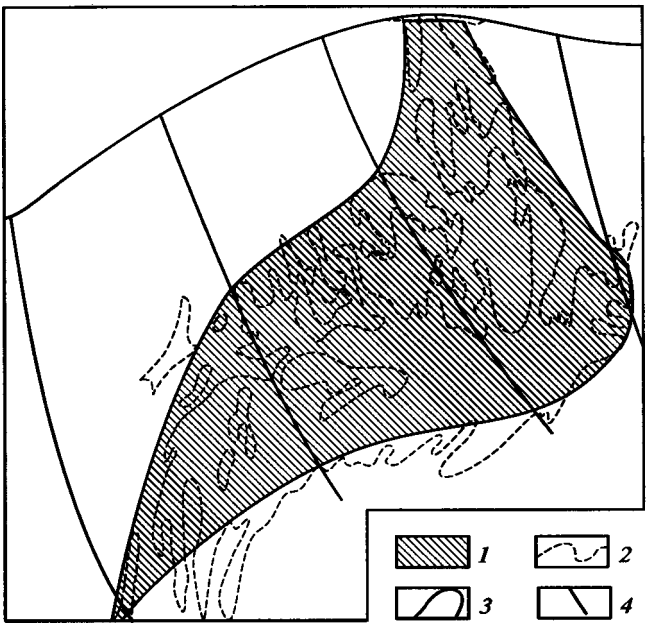


Рис. 4.43. Схема, иллюстрирующая детальность разведки запасов полезных ископаемых категории C_1 (по А. Б. Каждану):

1 — запасы категории C_1; *2* — истинные контуры рудной залежи; *3* — контуры разведанных запасов; *4* — разведочные скважины

лезного ископаемого, достаточно определение их количественных соотношений в общем промышленном контуре (рис. 4.43).

Запасы категории C_2 оцениваются по геологическим и геофизическим данным и подтверждаются вскрытием полезного ископаемого ограниченным количеством скважин и горных выработок (рис. 4.44). К запасам категории C_2 могут быть отнесены запасы неразведанных участков, примыкающих к разведанным участкам (рис. 4.45).

В зависимости от сложности строения месторождений на них могут выделяться либо все четыре категории запасов (А, В, C_1 и C_2), либо только три (В, C_1 и C_2) или две (C_1 и C_2). При этом запасы высших категорий выделяются на участках детализации, являющихся эталонными для данного месторождения.

Прогнозные ресурсы предположительно оцениваются на основе геологических предпосылок, выявленных при оценочных, поисковых и геолого-съемочных работах, и подразделяются по степени их обоснованности на категории P_1, P_2, P_3. Прогнозные ресурсы категории P_1 учитывают возможность выявления новых рудных тел на уже известных месторождениях. Оценка ресурсов основывается на геоло-

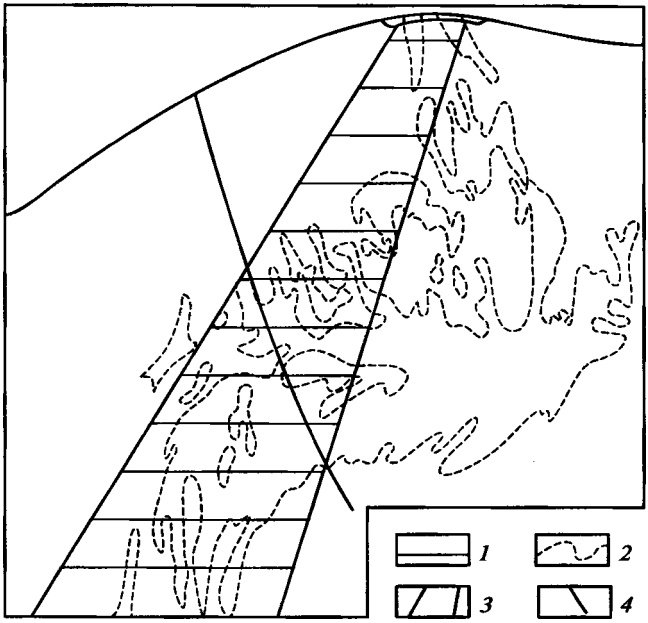


Рис. 4.44. Схема, иллюстрирующая детальность разведки запасов полезных ископаемых категории C_2 на основании единичных разведочных пересечений (по А. Б. Каждану):

1 — запасы категории C_2; *2* — истинные контуры рудной залежи; *3* — контуры разведанных запасов; *4* — разведочные скважины

гических, геофизических, геохимических соображениях, на материалах одиночных скважин и геологической экстраполяции данных, установленных на изученном месторождении. Прогнозные ресурсы категорий P_2 и P_3 оцениваются для бассейнов, районов, узлов, рудных полей (P_2) или геологически благоприятных территорий (P_3), т. е. связываются с еще не открытыми месторождениями. Количественная оценка ресурсов основывается на аналогии с известными месторождениями того же геолого-промышленного типа.

По экономическому значению запасы подразделяются на балансовые (экономические) и забалансовые (потенциально экономические).

Балансовые запасы подразделяются: а) на экономические, извлечение которых экономически эффективно; б) гранично-экономические, извлечение которых не обеспечивает экономическую эффективность, но становится возможным при определенной государственной поддержке (налоговые льготы, субсидии и т. п.).

К *забалансовым запасам* относятся: а) запасы, отвечающие требованиям к балансовым запасам, но использование которых на момент

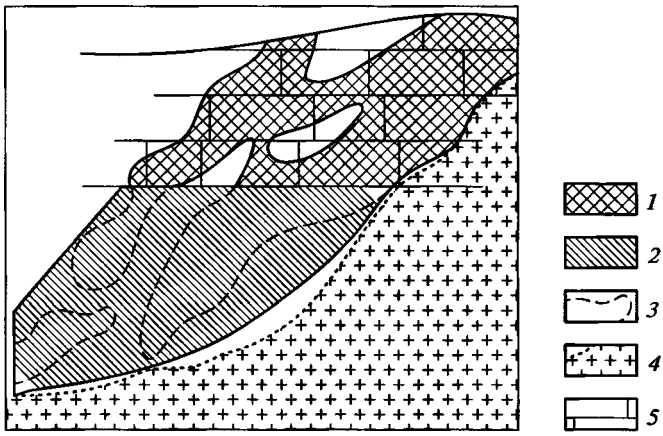


Рис. 4.45. Схема, иллюстрирующая возможность оконтуривания запасов категории C_2 по аналогии с детально изученными участками (по А. Б. Каждану):

1 — детально разведанные запасы; *2* — предварительно оцененные запасы категории C_2; *3* — истинные контуры залежи; *4* — граниты и их контакт с вмещающими породами; *5* — горные выработки

оценки невозможно по горно-техническим, правовым, экологическим обстановкам; б) запасы, извлечение которых на момент оценки нецелесообразно (вследствие низкого содержания полезного компонента, малой мощности тел и т. д.), но может стать экономически эффективным при повышении цен на ресурсы или техническом прогрессе, обеспечивающем снижение издержек производства (табл. 4.2).

В последние годы была проведена большая работа под эгидой ООН по созданию универсальной системы, которая на единых критериях рыночной экономики обеспечивала бы сопоставимость и совместимость существующих в различных странах классификаций запасов. В 1997 г. Экономическим и социальным советом ООН был одобрен проект рамочной классификации запасов и ресурсов твердых полезных ископаемых (О. Заборин, В. Коткин, 1999). Она осно-

Таблица 4.2. **Классификация запасов и ресурсов твердых полезных ископаемых РФ**

<table>
<tr><td>Экономические запасы</td><td rowspan="2">Балансовые запасы категорий А + В + C_1</td><td rowspan="2">Балансовые запасы категории C_2</td><td rowspan="3">Прогнозные ресурсы категорий P_1, P_2, P_3</td></tr>
<tr><td>Гранично-экономические запасы</td></tr>
<tr><td>Потенциально-экономические запасы</td><td colspan="2">Забалансовые запасы категорий А + В + C_1 + C_2</td></tr>
</table>

вана на квалификации запасов/ресурсов по трем укрупненным характеристикам: 1) степени геологической изученности (этапу геологической оценки); 2) уровню технико-экономической изученности; 3) степени экономической эффективности.

Графически этот подход иллюстрируется трехмерной моделью, каждая из осей которой отвечает одному из названных показателей (рис. 4.46).

Степень геологической изученности запасов отражается на оси *G* четырьмя последовательными этапами геологической оценки: рекогносцировка, поиски, предварительная разведка, детальная разведка. Им соответствуют категории запасов различного уровня достоверности.

Экономическая и технологическая изученность запасов отражается на оси *F* тремя последовательными этапами оценки технико-экономической обоснованности их разработки: 1) начальная оценка на основе геологических параметров (разработка технико-экономических соображений — ТЭС); 2) предварительная оценка (технико-

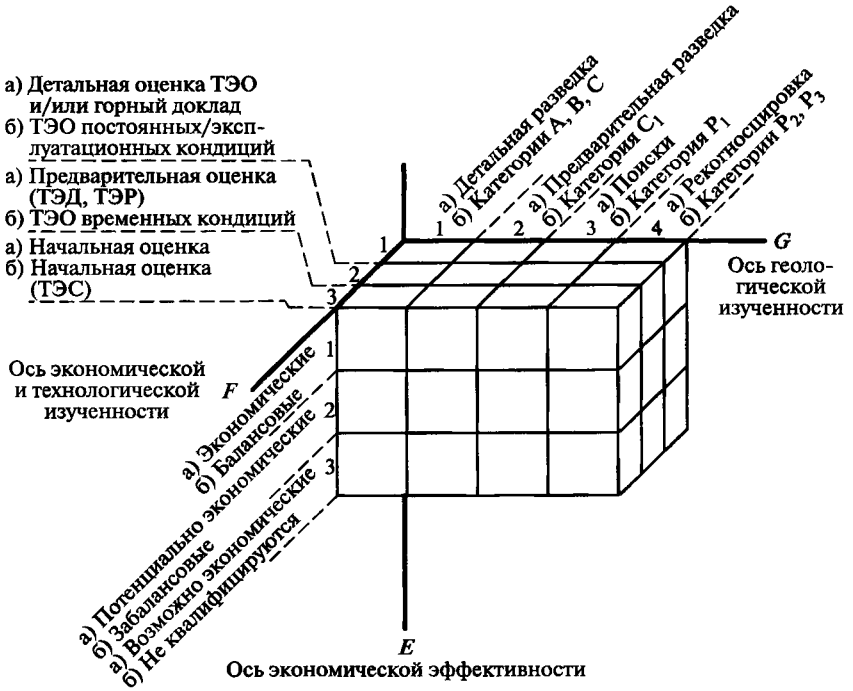


Рис. 4.46. Графическая модель Международной рамочной классификации ООН (по О. В. Заборину, В. А. Коткину):

а — терминология Международной рамочной классификации ООН; б — терминология Российской классификации

экономический доклад — ТЭД); 3) детальная оценка (технико-экономическое обоснование — ТЭО, или горный доклад).

Экономическая эффективность разработки запасов отражается на оси *E* тремя основными категориями: а) экономическими; б) потенциально экономическими; в) возможно экономическими.

Сопоставление Международной рамочной классификации ООН и действующей Российской классификации запасов полезных ископаемых позволяет констатировать общее сходство предлагаемых подходов. Для каждой категории запасов (ресурсов), выделяемых в Международной классификации, имеется соответствующий аналог в Российской классификации (см. рис. 4.46), что позволяет удовлетворительно вносить ее в предлагаемую Международной классификацией матрицу (О.Заборин, В.Коткин, 1999).

Группировка месторождений для единых методов разведки. Мировой опыт разведки месторождений и практика оценки достоверности разведанных запасов позволили прийти к выводу о том, что огромное разнообразие месторождений может быть сведено в несколько групп, для которых разведка запасов одной и той же категории требует близких приемов разведки (В. И. Смирнов, 1957; В. М. Крейтер, 1964). Основными параметрами подобных группировок (имеются в виду прежде всего рудные месторождения) должны служить размеры тел полезных ископаемых, устойчивость их морфологии, степень прерывистости и интенсивность изменчивости содержаний полезного компонента.

Размеры рудных тел: по размеру их принято разделять на три группы: а) крупные; б) средние; в) мелкие.

Крупные тела — преимущественно пласты, штокверковые залежи, иногда штоки; прослеживаются на многие сотни метров и на километры. Средние тела — линзы, жилы и другие залежи; измеряются сотнями метров. Мелкие тела — шлиры, гнезда, мелкие жилы и трубообразные залежи; имеют размеры от нескольких единиц до нескольких десятков метров.

Устойчивость морфологии тел: по степени устойчивости можно выделить три группы рудных тел: а) устойчивые; б) изменчивые; в) крайне изменчивые.

Примером устойчивых тел являются пласты и пластообразные залежи, которым свойственны лишь незначительные изменения мощности на больших расстояниях. Изменчивые залежи — жилы, линзы с частым чередованием раздувов и пережимов. Крайне изменчивые — мелкие жильные, трубообразные тела с резкими раздувами, пережимами, часто осложненные тектоническими нарушениями.

Непрерывность оруденения: степень непрерывности или прерывистости характеризуется коэффициентом рудоносности, и по этому показателю могут быть выделены четыре группы залежей; а) непрерывные, б) слабо прерывистые, в) прерывистые, г) крайне прерывистые.

Коэффициент рудоносности представляет собой отношение количества руды, заключенной в отдельных рудных обособлениях (гнездах, шлирах, прослоях, линзах), к всему объему рудоносной залежи, зоны, в которой находятся эти обособления. Коэффициент рудоносности может быть: 1) линейным, определяемым как отношение длины интервалов с кондиционной рудой к общей длине выработок, пройденных по рудному телу; 2) площадным, определяемым как отношение площади, занятой рудой, к всей площади рудоносной зоны; 3) объемным, определяемым по отношению суммарного объема рудных гнезд к всему объему рудоносной зоны.

Непрерывные тела во всем своем объеме содержат промышленное оруденение, и поэтому коэффициент рудоносности для них равен единице. В телах со слабо прерывистым оруденением наблюдаются незначительные перерывы в виде обособленных участков некондиционных руд или вмещающих пород. Коэффициент рудоносности для них колеблется в пределах от 0,7 до 1.

В прерывистых телах объем кондиционных руд соизмерим с объемом непромышленных участков, и коэффициент рудоносности изменяется от 0,4 до 0,7.

Крайне прерывистые тела представляют собой разобщенные участки, гнезда, суммарный объем которых составляет менее половины общего объема тела. Коэффициент рудоносности в этих случаях менее 0,4.

Равномерность распределения полезного компонента в рудах характеризуется величиной коэффициента вариации. Выделяют четыре группы месторождений с распределением полезного компонента: а) весьма равномерным и равномерным (коэффициент вариации ниже 40 %); б) неравномерным (40 — 100 %); в) весьма неравномерным (100 — 150 %); г) крайне неравномерным (коэффициент вариации более 150 %).

По перечисленным параметрам выделяют четыре группы месторождений различной степени сложности геологического строения.

К *первой группе* относятся месторождения (или их участки) простого геологического строения с крупными телами, устойчивой морфологией, выдержанным качеством полезного ископаемого, равномерным распределением основных ценных компонентов. Это наиболее простые по условиям разведки месторождения. В процессе разведки таких месторождений выявляют запасы категорий А, В, C_1 и C_2. Данную группу составляют большинство месторождений углей, осадочные месторождения железа, марганца, месторождения горнохимического и технического сырья и стройматериалов.

К *второй группе* относятся месторождения средней сложности с крупными и средними телами, неустойчивой морфологией и внутренним строением, невыдержанным качеством и неравномерным распределением основных ценных компонентов. В процессе разведки выявляются запасы категорий В, C_1 и C_2; изученность, соответ-

ствующая категории А, не достигается. Эту группу составляют платформенные осадочные месторождения железа, марганца и бокситов, колчеданные залежи, месторождения медистых песчаников, медно-никелевые месторождения, руды кор выветривания и др.

К *третьей группе* относятся месторождения высокой сложности геологического строения с средними и мелкими телами, интенсивно нарушенным залеганием, сильно изменчивой морфологией, невыдержанным качеством полезного ископаемого и очень неравномерным распределением основных ценных компонентов. Запасы месторождений этой группы разведываются преимущественно до категорий C_1 и C_2. Данную группу составляют большинство месторождений редких металлов, золота, гидротермальные месторождения цветных металлов и др.

К *четвертой группе* относятся месторождения (участки) очень сложного строения с мелкими телами, чрезвычайно нарушенным залеганием, резко изменчивой морфологией, крайне неравномерным качеством, прерывистым, гнездовым распределением основных ценных компонентов. Это наиболее трудные для разведки объекты. Запасы месторождений данной группы разведываются преимущественно по категории C_2. К ним относятся месторождения камнесамоцветного и пьезооптического сырья, мелкие месторождения редких металлов и золота.

Принадлежность разведуемого месторождения к той или иной из перечисленных групп позволяет определить параметры плотности разведочной сети, необходимой для достижения требуемой категории запасов.

При проектировании разведочных работ, когда сведений о геологическом строении месторождения и свойствах полезного ископаемого еще очень мало, плотность разведочной сети определяется по аналогии с другими уже разведанными и освоенными месторождениями данного промышленного типа. Для этой цели следует пользоваться инструкциями ГКЗ по применению классификации запасов к месторождениям различных видов минерального сырья.

Надо заметить, что на ранних стадиях разведки месторождений ведущим фактором при формировании разведочной сети является морфогенетический тип данного месторождения. По А. Б. Каждану, выделяется пять морфогенетических типов: 1) пластообразные месторождения; 2) плащеподобные и россыпные месторождения; 3) жильные и жилообразные месторождения; 4) трубообразные месторождения; 5) штокверковые и штокверкоподобные месторождения. Для каждой из этих групп в зависимости от размеров и других параметров рекомендуются ориентировочные размеры разведочных сетей для оценки запасов по категории C_1 (табл. 4.3—4.6).

В зависимости от особенностей месторождения (от принадлежности его к определенной группе по классификации В. И. Смирнова) для подсчета запасов категории C_1 рекомендуется соответственно 5,

Таблица 4.3. **Ориентировочные расстояния между смежными разведочными пересечениями пластообразных залежей (категория C_1)**

Залежи	Средняя мощность	Расстояния между разведочными пересечениями, м
I. Пластовые	Более 100 м Несколько десятков метров Несколько метров	800—2 000 400—800 200—400
II. Псевдопластовые в магматических породах	Несколько десятков метров Несколько метров	300—600 200—300
III. Пластоподобные эпигенетические	Несколько десятков метров Несколько метров	100—200 40—100

Таблица 4.4. **Ориентировочные размеры разведочных сетей для оценки запасов плащеподобных и россыпных месторождений (категория C_1)**

Месторождения	Средняя мощность	Показатель анизотропии формы	Размеры сети, м
Плащеподобные:			
железо и каолин	Несколько десятков метров	2—4	От 400×200 до 400×100
бокситы	Несколько метров	1—2	От 200×100 до 100×50
силикатный никель	Несколько метров — первые десятки метров	1—2	От 100×50 до 50×25
Россыпные:			
I группа	Несколько метров	10—20	От 800×80 до 800×20
II группа	То же	10—20	От 400×40 до 400×20
III группа	»	10—20	От 200×20 до 200(100)××10

Таблица 4.5. **Ориентировочные размеры разведочных сетей для жильных и жилообразных месторождений (категория C_1)**

Месторождения	Средняя мощность жил	Технические средства	Размер сети, м
Простые жилы барита, полевых шпатов, флюорита и др.	Несколько метров, десятков метров	Скважины Штреки, орты (скважины)	От 50×50 до 150×150 От 10 до 20 (на одном горизонте)
Простые жилы редких и благородных металлов	Несколько метров	Скважины Штреки восстающие	50×50 От 40 до 80
Сложные жилы	Доли метра, несколько метров	Штреки восстающие	От 40 до 60
Жило- и линзоподобные залежи	До 10 м и более	Скважины Штреки Орты (скважины)	От 50×50 до 100×100 От 80 до 120 От 10 до 40

Таблица 4.6. **Ориентировочные размеры разведочной сети при разведке штокверков и штокверкоподобных месторождений (категория C_1)**

Тип месторождения	Размер сети, м
Штокверки	От 50×50 до 100×100
Крупные минерализованные зоны	От 40×60 до 80×120
Массивы и тела вкрапленных руд	От 50×50 до 200×200

10, 20, 30 разведочных пересечений на подсчетный блок. Для подсчета запасов категорий А и В количество пересечений на блок увеличивается в 1,5—2 раза.

4.4. Требования промышленности к минеральному сырью (кондиции)

Промышленную ценность обычно представляет не все разведанное месторождение в его геологических границах, а только определенная часть, которая по качеству сырья и условиям залегания пригодна для рентабельной эксплуатации. В ряде случаев месторождения

вообще не имеют геологических границ и пригодные для промышленной отработки объемы руд определяются по некоторым предельным значениям содержаний полезных компонентов.

Таким образом, для промышленности более важными являются не геологические, а экономические границы рудных тел. Эти границы определяются не только содержаниями полезных компонентов, но и мощностью рудных тел, глубиной залегания, условиями эксплуатации и т. д.

Кондиции — это совокупность требований к качеству сырья в недрах и горно-техническим условиям эксплуатации, установленных в виде конкретных значений некоторых предельных показателей; они служат для разделения запасов в недрах на промышленную и непромышленную, балансовую и забалансовую части (А. Б. Каждан, 1985; А. П. Прокофьев, 1973; М. Н. Шумилин, 1998). Кондиции устанавливаются на основе технико-экономических расчетов с учетом современного состояния экономики, развития буровой техники, технологии добычи и переработки сырья. Поэтому периодически возникает необходимость пересмотра кондиций.

Кондиции устанавливают для каждой стадии геолого-разведочных работ. В настоящее время в России выделяют разведочные и эксплуатационные кондиции. Разведочные в свою очередь подразделяются на временные и постоянные.

Временные разведочные кондиции разрабатываются на стадии предварительной разведки месторождения и служат основой для его предварительной оценки и решения вопроса о целесообразности детальной разведки и инвестировании соответствующих средств.

Постоянные разведочные кондиции разрабатываются на стадии завершения детальной разведки. Они служат основой для промышленной оценки месторождения, проектирования разработки и целесообразности капиталовложений в создание добывающего предприятия.

Разработка кондиций осуществляется путем составления специального документа — технико-экономического обоснования кондиций (ТЭО). ТЭО разведочных кондиций должно содержать геологическое, горно-техническое, технологическое, экологическое и экономическое обоснование, разрабатываемое с максимальным учетом реальных условий, что должно обеспечить требуемый уровень достоверности. ТЭО кондиций подлежат государственной экспертизе.

После окончания разведки (иногда через значительный промежуток времени) уже в процессе разработки обычно возникает необходимость адаптации усредненных параметров разведочных кондиций к конкретным участкам месторождения. Для этой цели служат эксплуатационные кондиции.

Эксплуатационные кондиции разрабатываются на основе проекта отработки месторождения с учетом конкретных планов развития горных работ, графиков ежегодного объема добычи, уточненных величин капитальных и эксплуатационных затрат, уточненной схемы

и показателей процесса переработки сырья в конечный продукт. При этом учитываются также изменения цен на реализуемую конечную продукцию и другие изменения экономических условий.

К числу основных кондиционных показателей относятся:

1) минимальное промышленное содержание полезного компонента в подсчетных блоках;

2) бортовое содержание полезного компонента, при котором производится оконтуривание балансовых запасов при отсутствии четких геологических границ;

3) нижний предел содержания полезного компонента для оконтуривания забалансовых запасов;

4) максимально допустимое содержание вредных примесей в руде;

5) попутные компоненты, запасы которых подлежат учету, и минимальное их содержание в руде;

6) требования о выделении типов и сортов руд;

7) минимальная мощность тел полезных ископаемых, включаемая в подсчет запасов;

8) максимальная допустимая мощность прослоев вмещающих пород и некондиционных руд, включаемых в контур промышленных руд.

Рассчитываются и некоторые другие показатели.

Минимальное промышленное содержание

Минимальное промышленное содержание — наиболее ответственный обобщающий показатель кондиций, определение которого связано с трудоемкими специальными технико-экономическими расчетами. Этот показатель представляет собой нижний предел среднего содержания полезного компонента в рудах, запасы которых относятся к балансовым, рассчитывается для отдельных подсчетных блоков.

Предел экономической целесообразности промышленного использования полезного ископаемого определяется равенством издержек производства по добыче и переработке полезного ископаемого и стоимости ценных компонентов, извлекаемых из переработанного минерального сырья:

$$C_{\min} K_{\text{р}} K_{\text{об}} K_{\text{м}} \frac{\text{Ц}_{\text{м}}}{C_{\text{м}}} = S_{\text{д}} + S_{\text{об}} + S_{\text{м}};$$

отсюда

$$C_{\min} = \frac{(S_{\text{д}} + S_{\text{об}} + S_{\text{м}}) C_{\text{м}}}{\text{Ц}_{\text{м}} K_{\text{р}} K_{\text{об}} K_{\text{м}}},$$

где $C_{\min}$ — минимальное промышленное содержание полезного компонента в подсчетном блоке, %; $S_{\text{д}}$ — себестоимость добычи 1 т полезного ископаемого и доставка его до бункера обогатительной фабрики, руб.; $S_{\text{об}}$ — себестоимость обогащения 1 т полезного иско-

паемого, руб.; $S_м$ — себестоимость металлургического передела (включая транспортировку до перерабатывающего предприятия), отнесенная на 1 т полезного ископаемого, руб.; $K_р$ — коэффициент, учитывающий разубоживание $\frac{100-р}{р}$ (где р — разубоживание при добыче,%); $K_{об}$ — коэффициент извлечения полезного компонента при обогащении; $K_м$ — коэффициент извлечения полезного компонента при переделе; $Ц_м$ — цена полезного компонента в готовом продукте, руб.; $C_м$ — содержание полезного компонента в готовом продукте, %.

Все входящие в расчет показатели представляют собой переменные и взаимозависимые величины. Они зависят от геологических особенностей месторождения, проектируемого способа разработки и переработки минерального сырья, технической оснащенности и уровня организации производства, географо-экономических условий района и ряда других факторов. Это и делает минимальное промышленное содержание важнейшим обобщающим показателем кондиций, в котором находят отражение все основные факторы, определяющие реальную ценность данного месторождения. Основное назначение его — разделение разведанных запасов в недрах на балансовые и забалансовые.

Минимальное промышленное содержание является таким содержанием, при котором обеспечивается безубыточное использование данного сырья в настоящее время. Фактическое содержание полезного компонента всегда выше, чем минимальное промышленное, что обеспечивает возможность получения прибыли. Поэтому его распространение на все месторождение или на крупные его части недопустимо. Обычно оно относится к каждому подсчетному блоку, объем которого, как правило, не превышает полугодовой или годовой производительности предприятия.

Минимальные промышленные содержания полезных компонентов в комплексных рудах при их расчете выражают в условных единицах основного, ведущего, компонента. Например, для медно-колчеданных руд содержания полезных компонентов (меди, свинца, цинка) могут быть выражены в «условной меди». Перевод содержаний металлов в содержание условного основного компонента проводится с помощью переводных коэффициентов, величина которых зависит от цены на соответствующий металл и сквозного коэффициента извлечения его в готовую продукцию. Переводные коэффициенты рассчитывают по формуле

$$K_1 = \frac{Ц_1 И_1}{Ц_0 И_0},$$

где $Ц_0$ — цена основного компонента; $Ц_1$ — цена другого компонента; $И_0$, $И_1$ — сквозные коэффициенты извлечения обоих компонентов в готовую продукцию.

Таблица 4.7. **Расчет переводных коэффициентов (все цифры — условные)**

Металл	Содержание металла в руде, %	Цена 1 т металла в концентрате Ц, руб.	Извлечение металла в концентрат И, %	Переводной коэффициент K
Медь (основной металл)	0,8	$Ц_0 = 470$	$И_0 = 90$	$K_0 = 1,00$
Свинец	0,7	$Ц_1 = 420$	$И_1 = 45$	$K_1 = 0,45$
Цинк	0,6	$Ц_2 = 300$	$И_2 = 40$	$K_2 - 0,28$

Схема пересчета содержаний металлов в комплексной руде в условный металл может быть показана на примере, приведенном в табл. 4.7; товарным продуктом в данном случае является концентрат:

$$K_1 = \frac{Ц_1 И_1}{Ц_0 И_0} = \frac{420 \cdot 45}{470 \cdot 90} = 0,45; \quad K_2 = \frac{Ц_2 И_2}{Ц_0 И_0} = \frac{300 \cdot 40}{470 \cdot 90} = 0,28.$$

Содержание условной меди $C_{Cu} = (0,8 \cdot K_0) + (0,7 \cdot K_1) + (0,6 \cdot K_2) = 0,8 + (0,7 \cdot 0,45) + (0,6 \cdot 0,28) = 1,28$ %. Это содержание и сопоставляется с рассчитанным минимальным промышленным содержанием.

При расчете минимальных промышленных содержаний следует учитывать дополнительные поступления средств от реализации попутно извлекаемых редких и рассеянных элементов, от использования сопутствующих полезных ископаемых (породы вскрыши, хвосты обогатительных фабрик) и т.д. Эти средства должны быть исключены из суммы общих затрат.

Бортовое содержание

При отсутствии четких геологических границ оконтуривание тел полезных ископаемых производится на основе данных опробования по некоторым расчетным величинам содержаний. В одних случаях используют величины минимального промышленного содержания, в других (значительно чаще) специально определяют значения бортовых содержаний. Бортовое содержание — это такое минимальное содержание полезного компонента в крайней пробе, при котором данная проба еще включается в контур балансовых запасов. От величины принятого бортового содержания зависят размеры и качество выделяемых залежей. Чем ниже бортовое содержание, тем крупнее залежь и тем ниже среднее содержание полезного компонента в ней. Поэтому при оконтуривании требуется выбрать оптимальную величину бортового содержания, при которой достигается наиболее пол-

ное извлечение полезного ископаемого при обеспечении достаточной рентабельности отработки. Оптимальное значение бортового содержания может колебаться от минимального промышленного до содержания полезного компонента в хвостах обогащения. В отличие от минимального промышленного содержания обосновать оптимальное значение бортового содержания прямыми расчетами невозможно. Реально величину бортового содержания обычно находят методом вариантов, оконтуривая месторождение по нескольким значениям бортовых содержаний и просчитывая для каждого все технико-экономические показатели освоения (количество запасов, условия их залегания и разработки, качество, годовую производительность предприятия, уровень затрат, прибыль от реализации продукции и т.д.), по оптимальным значениям которых и выбирают лучший вариант и соответствующую ему величину бортового содержания.

Как было отмечено ранее, со снижением величины бортового содержания снижается и среднее содержание полезного компонента в оконтуренном объеме. Следовательно, можно найти такое бортовое содержание, при котором фактическое среднее содержание будет равно минимальному промышленному. Это значение — нижний предел ($C_{н.п}$). Таким образом, оптимальное значение находится между указанными пределами: $C_{н.п} < C_{опт} < C_{min}$. Величина нижнего предела бортового содержания может быть определена статистическим способом. Для этого строится кумулятивная кривая — по содержаниям металла во всей совокупности имеющихся по данным разведки проб (разбитых на пласты содержаний). Полученная кривая разделяется уровнем минимального промышленного содержания на два отрезка. Затем в области, ограничиваемой кривой под уровнем минимального промышленного содержания, вертикальной линией отделяется площадь, равновеликая той, которая ограничена кривой над уровнем C_{min}. Полученное на кумулятивной кривой значение и будет нижним пределом (рис. 4.47).

Для оконтуривания забалансовых запасов как раз и устанавливаются наиболее низкие значения бортового содержания, при котором еще практически возможно извлечение полезных компонентов из добытого сырья.

Разработка других из перечисленных ранее показателей кондиций также опирается на экономические расчеты.

Максимально допустимое содержание вредных примесей в руде в ряде случаев определяется техническими требованиями. Для многих видов минерального сырья уровень максимально допустимых вредных примесей для каждого типа и сорта устанавливается по результатам технологических испытаний, а расходы, связанные с удалением их при переработке, учитываются в общих затратах при расчете минимального промышленного содержания.

Попутные компоненты, запасы которых подлежат учету: помимо тех компонентов, которые учитываются в единицах услов-

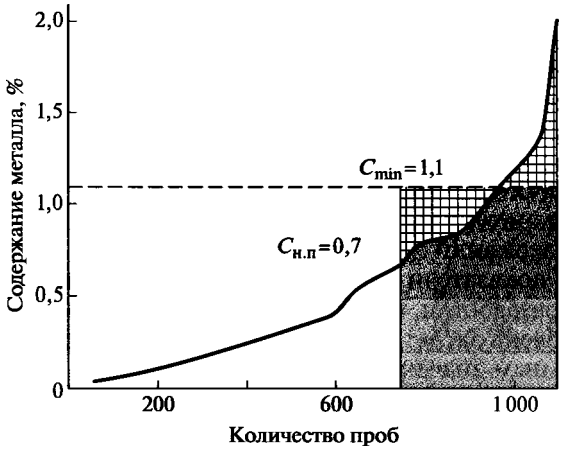


Рис. 4.47. Определение нижнего предела бортового содержания ($C_{н.п}$) полезного компонента в пробах

ного основного компонента при обосновании минимального промышленного содержания, кондициями определяется перечень подлежащих оценке сопутствующих компонентов (например, рассеянные компоненты, благородные металлы в рудах месторождений цветных металлов) и устанавливаются предельно допустимые среднеблочные содержания каждого из них.

Технологические типы и сорта минерального сырья: при наличии в месторождении нескольких типов и сортов руд каждый из них учитывается и подсчитывается раздельно. Если они могут быть оконтурены или добыты самостоятельно, для каждого из них рассчитываются минимальные промышленные содержания и другие показатели кондиций. Если же они не выделяются при разведке самостоятельными контурами, учет их производится статистическими методами.

Минимальная мощность тел полезных ископаемых, включаемая в подсчет запасов, рассчитывается в зависимости от устойчивости, формы, степени выдержанности залежи и характера ее контактов. Например, выдержанные крутопадающие тела отрабатываются при мощностях 0,7—1 м; для пологозалегающих тел рабочая мощность увеличивается до 1,5—2 м. При этом обеспечивается возможность добычи без подрыва вмещающих пород и чрезмерного разубоживания.

Для оконтуривания маломощных рудных тел с повышенными содержаниями металлов используется дополнительный кондиционный показатель — минимальный метропроцент, представляющий собой произведение рабочей мощности залежи на минимальное промышленное содержание. Применение этого показателя позволяет

включить в промышленный контур некоторые маломощные части рудных тел, но при условии, что разубоживание за счет неизбежной выемки вместе с рудой боковых пород будет компенсировано повышенным содержанием полезного компонента в данном участке.

Максимально допустимая мощность прослоев вмещающих пород и некондиционных руд, включаемых в контур промышленных руд: иногда при сложном строении залежей включение вмещающих пород в промышленный контур позволяет сделать его более простым и удобным для подсчета запасов и последующей разработки. Однако это неизбежно приводит к разубоживанию. Поэтому необходимы расчеты. Иногда приходится рассчитывать различные варианты, предусматривающие разные размеры включаемых в контур пустых пород. Расчеты данных вариантов подобны тем, что выполняют при поисках оптимального бортового содержания.

Практически все показатели кондиций связаны между собой и оказывают взаимное влияние друг на друга. Изменение любого из них приводит к изменению объема тел полезных ископаемых, запасов руды и металла, качества сырья, методов и масштабов добычи. Поэтому выбор оптимальных значений является весьма сложной и трудоемкой процедурой даже тогда, когда в простейших случаях допускается принимать некоторые показатели по аналогии с действующими горно-рудными объектами.

Расчет кондиций — это поиск таких путей и условий, при которых содержащееся в недрах сырье может быть отработано с максимально возможным экономическим эффектом.

4.5. Подсчет запасов

Запасы полезных ископаемых — массовое или объемное количество полезного ископаемого и его компонентов, заключенное в недрах на определенной территории. Это понятие определяет также и качество полезного ископаемого, т. е. возможность его использования для каких-либо целей. Запасы всегда представлены в виде геологических тел конкретной формы, характеризующихся определенными условиями залегания.

Подсчетом запасов называется определение количества промышленно пригодного минерального сырья в недрах. Подсчет запасов — завершающая операция разведки месторождения или его части и производится обычно в конце каждой стадии разведочного процесса.

Запасы минерального сырья в недрах обычно измеряются в следующих единицах: 1) руды коренных металлических месторождений и большинство остальных видов твердых полезных ископаемых — в тоннах; 2) пески россыпных месторождений, строительные материалы, мраморы и другие — в кубических метрах.

Запасы компонентов (металлов, оксидов и др.) в основном измеряются в тоннах. При этом для железа, марганца, хрома, ванадия, титана, т.е. для черных металлов, определяются и утверждаются только запасы сырой руды и средние содержания металла в ней, а запасы металлов не вычисляются. Запасы благородных металлов (золото, платина, серебро) определяются в килограммах (в некоторых западных странах запасы золота измеряются в «тройских унциях», составляющих 31,103 г). Запасы алмазов и драгоценных камней определяются в каратах (0,200 г) или в граммах.

4.6. Геолого-экономическая оценка месторождения

Геолого-экономическая оценка месторождения полезного ископаемого — это определение его промышленной значимости в данное время и в конкретных географо-экономических условиях. Промышленное значение месторождения обусловлено тем, насколько оно пригодно для использования в народном хозяйстве, т.е. каковы технические возможности и экономическая целесообразность добычи и переработки полезного ископаемого, заключенного в месторождении.

Геолого-экономическая оценка производится на всех стадиях разведки месторождения. В результате поисково-разведочных работ осуществляется ориентировочная оценка возможного промышленного значения предполагаемого месторождения. Ограниченность фактических данных и необходимость использования предполагаемых оценочных показателей обусловливают преобладание в таких перспективных оценках элементов прогноза. Тем не менее они в ряде случаев служат достаточным основанием для принятия решений о постановке или продолжении разведочных работ.

По завершении предварительной разведки полученные данные позволяют давать более обоснованную геолого-экономическую оценку вновь выявленного месторождения. На этой стадии обычно применяется метод простых аналогий, т.е. сравнение изучаемого объекта с подобным по натуральным свойствам — размерам, качеству руд, условиям залегания и т.д. Обычно при этом производят простейшие расчеты показателей оценки.

В процессе и по окончании детальной разведки промышленная оценка месторождения осуществляется на основании оценочных показателей, которые рассчитываются по достаточно надежным результатам разведки с выяснением возможностей добычи и переработки полезного ископаемого с учетом конкретных условий данного района и общей экономической обстановки. Основными разведочными данными для расчетов являются запасы месторождения, средние содержания полезного компонента в рудах, условия залегания рудных тел и др.

Запасы полезного ископаемого — важнейший показатель ценности месторождения. При оценке месторождений в расчет принимаются только данные о запасах, отнесенных к категориям А, В, C_1 и C_2. Сведения о прогнозных ресурсах (категории Р, P_2 и P_3) рассматриваются лишь как дополнительный положительный фактор. При оценке комплексных месторождений учитываются запасы всех основных полезных компонентов. Промышленная ценность месторождения определяется запасами и уровнем содержания только основных компонентов. Содержащиеся в рудах попутные компоненты, в том числе редкие и рассеянные элементы, учитываются только в том случае, если по основным компонентам месторождение может быть признано рентабельным объектом. Возможность извлечения попутных компонентов, равно как и попутное использование других видов полезных ископаемых (например, разного рода строительных материалов, которые могут быть получены при вскрышных работах), рассматриваются как возможный дополнительный источник доходов будущего предприятия, но не играют решающей роли в оценке промышленной значимости месторождения.

Величина запасов и средние содержания основного полезного ископаемого (или основных полезных ископаемых) являются базовыми оценочными характеристиками месторождения. На их основе рассчитываются более детальные показатели: потери при добыче, разубоживании, извлечении металлов при обогащении и металлургическом переделе, производительность будущего горного предприятия, срок отработки месторождения.

Потери при добыче. Запасы месторождения, подсчитанные в недрах, практически никогда не извлекаются полностью. При разработке определенная часть запасов становится неизвлекаемой — оставляется в целиках или за контуром промышленной отработки. Цифра потерь зависит от условий залегания рудных тел, сложности их морфологии и применяемой системы отработки. Обычно степень извлечения полезного ископаемого из недр колеблется в пределах 85—90 %.

Разубоживание. При любых способах отработки вместе с рудой неизбежно извлекается некоторая часть вмещающих ее пород. Это породы, либо не содержащие полезных компонентов, либо некондиционные — бедные и убогие руды. В любом случае извлекаемая из недр руда характеризуется более низкими содержаниями полезных компонентов. При этом извлекаемое из недр количество руды превышает запасы, подсчитанные при разведке.

Разубоживание особенно велико при отработке приконтурных частей рудных тел сложной конфигурации.

Величина разубоживания обычно изменяется от 5 до 30 % и зависит в первую очередь от применяемой системы разработки. Каждая из систем характеризуется своими показателями разубоживания. При наиболее дешевых системах валовой отработки (различные модифи-

кации систем с обрушением кровли) в извлекаемую рудную массу попадает большое количество вмещающих пород. Селективные системы отработки обеспечивают меньшее разубоживание, но являются значительно более дорогими. Нужно иметь в виду, что потери при добыче и разубоживание руд — явления, связанные между собой. Как правило, снижение потерь при добыче ведет к увеличению разубоживания. И наоборот — стремление к уменьшению разубоживания ведет к отказу от разработки участков со сложной конфигурацией рудных тел и тем самым увеличивает количество руды, оставляемой в недрах. По этим причинам снижение величины разубоживания и уменьшение потерь при добыче являются важнейшими и наиболее сложными задачами, оптимальное решение которых непосредственно влияет на экономическую оценку месторождения, а в некоторых случаях определяет его судьбу.

На стадии предпроектной оценки месторождения величины потерь и разубоживания могут быть определены по аналогии с другими объектами, близкими по геологическим параметрам (условия залегания, размеры и форма рудных тел), разработка которых осуществляется теми же методами, которые проектируются для разведанного месторождения.

Извлечение металлов при обогащении. Содержащийся в руде металл никогда не может быть извлечен при обогащении в концентрат полностью. Часть его неизбежно теряется в хвостах обогащения. Коэффициент извлечения определяется по формуле (%)

$$K_{\text{о}} = \frac{C_{\text{к}}(C_{\text{р}} - C_{\text{хв}})}{C_{\text{р}}(C_{\text{к}} - C_{\text{хв}})},$$

где C — содержание металла в руде ($C_{\text{р}}$), концентрате ($C_{\text{к}}$), хвостах обогащения ($C_{\text{хв}}$).

Величина извлечения металла в концентрат очень важна, поскольку непосредственно влияет на величину доходов горно-рудного предприятия. При оценке разведанного месторождения для определения коэффициента извлечения полезного компонента при обогащении используют результаты технологических испытаний — в промышленных, полупромышленных или лабораторных условиях. Если нет результатов подобных испытаний, используют данные по аналогичным рудам, которые обогащаются на той же фабрике, где предполагается обогащение руд оцениваемого месторождения. Иногда допускается использование средних по отрасли показателей извлечения. Так, в цветной металлургии извлечение металлов в кондиционные концентраты характеризуется следующими показателями: медь — 92—97 %, свинец — 88—93, цинк — 82—90, никель — 75—82, олово — 70—85, вольфрам — 75—87, молибден — 79—85 %.

Важную оценочную роль играют коэффициент обогащения и коэффициент извлечения массы.

Коэффициент обогащения ($K_{об}$) показывает, сколько тонн руды необходимо переработать для получения 1 т концентрата:

$$K_{об} = \frac{C_к}{C_р K_о}.$$

Содержание металла в концентрате регламентируется в ряде случаев жесткими требованиями металлургических предприятий или в тех случаях, когда концентрат является товарным продуктом.

Коэффициент извлечения массы ($K_{им}$) — величина, обратная $K_{об}$, и показывает, какая часть добытой руды извлекается в концентрат. Этот показатель используется при расчете транспортных расходов на перевозку концентратов.

Извлечение металла при металлургическом переделе. Извлечение металла непосредственно из руды (богатой) или из концентрата при металлургическом переделе всегда сопровождается определенными потерями. Для разных типов руд и различных технологий передела эти потери существенно различаются. Например, при обогащении и металлургическом переделе уральских медно-колчеданных руд теряется: меди — 15 %, цинка — 50, серы — 45, благородных металлов — 13—14 %. Извлечение металлов из концентратов труднообогатимых медно-колчеданных руд Николаевского месторождения (Рудный Алтай) составляет: медь — 74,29 %, цинк — 58,63 %.

В тех случаях, когда конечным продуктом проектируемого горнодобывающего предприятия является металл и технология переработки руд определена, можно пользоваться величиной сквозного коэффициента извлечения металла ($K_{извл}$), равной произведению коэффициента извлечения металла при обогащении ($K_о$) на коэффициент извлечения при металлургическом переделе ($K_м$):

$$K_{извл} = K_о K_м.$$

Коэффициенты извлечения металлов являются важной оценочной величиной и определяются как для основных металлов, так и для попутных компонентов. Например, сквозное извлечение основных металлов при переработке руд полиметаллических месторождений Рудного Алтая составляет: меди — 85,6 %, цинка — 75,2, свинца — 78 %. При этом с хвостами переработки теряется 88 % галлия, 55 % теллура, 30 % индия.

Производительность предприятия и срок эксплуатации месторождений. Производительность будущего горного предприятия является важнейшим оценочным показателем и определяется в зависимости от величины запасов полезного ископаемого и способа добычи — подземного или открытого. Она выражается в величине среднегодовой добычи полезного ископаемого, а при обогащении руд — также в среднегодовом производстве концентратов или иной товарной продукции. При оценке месторождения очень важно пра-

вильно определить годовую производительность будущего рудника. При этом учитываются многие факторы: технические ограничения, экономические соображения, связанные с окупаемостью капитальных вложений, минимизацией рисков, обусловленных колебаниями цен на металл, и т.д. Наибольшую производительность можно предусматривать для крупных месторождений, разрабатываемых открытым способом. Мощность карьера может достигать 50 тыс. т руды в сутки. Разработка маломощных жил подземным способом обеспечивает суточную производительность около 100 т руды. Технические ограничения не всегда являются определяющим фактором оценки производительности предприятия. Значительно более важную роль играет срок отработки месторождения. В современных условиях, по данным статистики, оптимальным сроком наиболее эффективной отработки месторождений считается 10 лет. Таким образом, годовую производительность рудника можно определить делением количества запасов на 10. Для месторождений с большими запасами срок полной отработки принимается равным как минимум 20—25 годам. Разумеется, речь идет о приблизительных цифрах, служащих для принципиальной общей оценки месторождения.

В одной из работ (А.Л.Дергачев и др., 2000) помимо указанного способа предлагается оптимальную продолжительность работы рудника (T, лет) определять аналитически по двум эмпирическим формулам:

$$T \approx 0{,}2Q_{\text{I}}^{0{,}25} \text{ или } T \approx 6{,}5Q_{\text{II}}^{0{,}25},$$

где Q_{I} — запасы руды, т; Q_{II} — запасы руды, млн т. Соответственно оптимальная производительность будущего предприятия определяется как частное от деления запасов руды на T. Авторы указывают, что этот аналитический метод, безусловно, является приблизительным, однако он основан на статистических данных по большому числу действующих рентабельных рудников.

Изложенные принципы и оценочные показатели используют для геолого-промышленной оценки месторождения на заключительной стадии разведки. Сама эта оценка является всего лишь основой для последующих финансово-экономических расчетов, связанных с проектами эксплуатации месторождений. Рассмотрению этих проблем посвящены специальные курсы (А.Л.Дергачев и др., 2000).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдонин В.В.* Технические средства и методика разведки месторождений полезных ископаемых. — М.: Изд-во МГУ, 1994.

2. *Авдонин В.В.* Решение геолого-разведочных задач на ЭВМ / В.В.Авдонин, Н.Н.Шатагин. — М.: Изд-во МГУ, 1989.

3. *Альбов М.Н.* Опробование месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1975.

4. *Викентьев В.А.* Экспертиза подсчетов запасов рудных месторождений / В.А. Викентьев, И.А. Карпенко, М.В. Шумилин. — М.: Недра, 1988.

5. *Дергачев А.Л.* Финансово-экономическая оценка минеральных месторождений / [А.Л. Дергачев и др.]. — М.: Изд-во МГУ, 2000.

6. *Заборин А.В.* Российская классификация запасов и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых и международная классификация ООН / А.В. Заборин, В.А. Коткин // Минеральные ресурсы России. — 1999. — № 2.

7. Классификация запасов месторождений и прогнозных ресурсов твердых полезных ископаемых утв. М-вом природных ресурсов РФ 11.12.06. — М., 2006.

8. Комплексная геолого-экономическая оценка месторождений (основы методики). — М.: Недра, 1990.

9. *Милютин А.Г.* Геология. — М.: Высшая школа, 2004.

10. Положение о порядке проведения геолого-разведочных работ по этапам и стадиям (твердые полезные ископаемые) утв. М-вом природных ресурсов РФ 05.07.99. — М., 1999.

11. *Прерис А.М.* Определение и учет ураганных проб. — М.: Недра, 1974.

12. *Прокофьев А.П.* Основы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. — М.: Недра, 1973.

13. Ресурсы, запасы и стадийность геолого-разведочных работ на твердые полезные ископаемые / [А.И. Кривцов и др.] // Отечественная геология. — 2003. — № 2.

14. *Смирнов В.И.* Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. — М.: Изд-во МГУ, 1957.

15. *Четвериков Л.И.* Методологические основы опробования пород и руд. — Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1980.

16. *Шумилин М.В.* Геолого-экономические основы горного бизнеса // Минеральное сырье. — 1998. — № 3.

Глава 5
Компьютерное моделирование месторождений

5.1. Обзор традиционных методов моделирования месторождений

Пословица о том, что лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать, отражает исключительную для человека роль зрительного восприятия визуальной и, в частности, графической информации. Емкость и быстрота восприятия зрительных образов весьма велики. Для уяснения особенностей какого-либо явления иногда достаточно нескольких секунд, в течение которых мы рассматриваем график функции, диаграмму, геологический разрез или другое наглядное изображение. Практически все геологические объекты представляют собой трехмерные пространственные фигуры. К сожалению, недра Земли непрозрачны. Поэтому отобразить в объеме изменение пространственных характеристик месторождения — задача очень сложная. Но только в такой трехмерной модели можно продемонстрировать свое понимание основных черт геологической структуры месторождения. Геологи испробовали десятки способов создания трехмерных моделей месторождений, которые можно разделить на три основные группы методов моделирования: графические, объемно-макетные и математические. Собственно математическому, а конкретнее, компьютерному моделированию посвящены подразд. 52—5.10. Их предваряет краткий обзор методов графического и объемно-макетного моделирования месторождений полезных ископаемых.

Графические методы объемного моделирования. Эти методы сводятся к тому, чтобы на плоском чертеже получить псевдообъемное изображение основных, «узловых», моментов геологического строения месторождения. Одни модели представляют собой *серии разрезов*, а другие являются моделями более крупных объемов недр и обычно называются *блок-диаграммами*.

Графические модели на базе серии разрезов строятся геологами очень часто.

Вертикальные разрезы характерны для месторождений, разведанных буровыми скважинами. Сам по себе геологический разрез тоже представляет собой модель — это представление геолога-разведчика о геологическом строении месторождения в данном сечении. Но разрез — это плоская модель. Она не может отразить закономерности изменения параметров геологических тел, например мощности рудной залежи, в пространстве. А вот серия разрезов, если их расположить на одном чертеже, помогает решить эту задачу.

В простейшем варианте модель строится в предположении, что плоскости всех разрезов параллельны плоскости чертежа. Если разведочных профилей на месторождении не очень много (не больше 20), то при построении модели используют все разрезы. Если же разрезов очень много, строят несколько моделей важнейших участков месторождения.

Порядок создания модели таков. Крупномасштабные разведочные разрезы (масштабы 1:500—1:2 000) пантографируют с уменьшением в несколько раз так, чтобы они все вместе уместились на одном листе выбранного формата. Чертежи разрезов накладывают друг на друга с таким смещением, чтобы они, с одной стороны, не перекрывали важные геологические детали друг друга, а с другой стороны, отстояли друг от друга на равное расстояние. Обычно такой «веер» разрезов раздвигают друг от друга в направлении 45°.

Если разрезов много, то чтобы их разместить на одном чертеже, потребуется сильно уменьшить масштаб, из-за чего многие важные детали будут упущены и кропотливая работа по построению трехмерной модели окажется бесполезной. В этом случае строят модели двух-трех важнейших участков или структурных элементов месторождения (замки складок, разломы, дайки и т. п.) по данным нескольких близких разрезов.

Этот вариант, как уже говорилось, предполагает, что плоскости всех разрезов параллельны плоскости чертежа. Если бы нам было нужно построить модель по разрезам с учетом частей света, то тогда пришлось бы предварительно проделать кропотливую работу по перестройке разрезов с учетом нового положения точки наблюдателя. Такая работа требует очень больших затрат времени.

Трехмерная модель по вертикальным скважинам может быть построена в *псевдоперспективной проекции*. Для этого в варианте «плоскость чертежа и плоскости разрезов параллельны» необходимо изображение каждого последующего разреза уменьшать на соответствующий коэффициент. Это проще всего сделать при пантографировании разрезов, последовательно уменьшая масштаб. Получающиеся модели создают иллюзию перспективы. В принципе можно построить модель по вертикальным разрезам и в настоящей *перспективной проекции*, но это очень трудоемкое дело.

Горизонтальные разрезы (планы горизонтов) строят в случае разведки месторождения подземными горными выработками. Использовать для построения трехмерных моделей этот тип разрезов сложнее, чем вертикальные разрезы, так как для этого требуется заново построить разрезы в аксонометрической или перспективной проекции. Построенные проекции располагают друг над другом в виде своеобразной «этажерки» — от плана самого нижнего горизонта к плану самого верхнего. При этом обычно приходится «раздвигать» планы горизонтов друг относительно друга, заметно увеличивая вертикальный масштаб, иначе разрезы будут закрывать друг

друга. Из-за этой особенности при рассмотрении модели может создаться искаженное представление о протяженности рудных тел по вертикали.

Графические модели типа блок-диаграммы используют реже, но в некоторых случаях они могут оказаться более наглядными. Блок-диаграмма — это значительный по объему элемент недр, три поверхности которого обращены на зрителя. Например, верхняя поверхность может представлять собой геологическую карту коренных пород месторождения. Заметим, что она может быть изображена с рельефом, т.е. с абсолютными отметками, меняющимися в пространстве. Две другие грани блок-диаграммы обычно изображают плоскими. На одной из граней может быть показан поперечный, а на другой одновременно и продольный разрез месторождения. Чтобы показать какой-нибудь важный участок месторождения, не попадающий на упомянутые грани блока, часть блок-диаграммы «вырезается», и через получившееся «окно» можно видеть интересные детали структуры месторождения. Для наглядности блок-диаграммы нередко рисуют «раздвинутыми».

Обычно блок-диаграммы строят в аксонометрической проекции. Эта проекция позволяет делать на любой грани блок-диаграммы метрические замеры, например расстояний между скважинами или мощностей рудного тела. Создание блок-диаграммы в перспективной проекции требует более сложных геометрических построений, связанных с появлением двух или трех «точек схода». Такие блок-диаграммы создают неплохую иллюзию трехмерности объекта. Но на перспективных блок-диаграммах сложнее проводить метрические замеры.

Объемно-макетное моделирование месторождений. Данное моделирование очень широко использовалось геологами бывшего СССР. Умело вычерченные графические модели создают иллюзию объемности месторождения, но они имеют недостаток, поскольку позволяют взглянуть на месторождение только с одной стороны, с одной точки наблюдателя. Поэтому геологи всегда стремились создать поистине объемную трехмерную модель месторождения, которую можно было бы взять в руки, повертеть и разглядеть с любой стороны.

Объемно-макетные модели можно разделить на три основных типа: макеты, составленные из разрезов; блок-диаграммные макеты; скульптурные макеты рудных тел.

Объемно-макетные модели, как и графические модели, создают либо из вертикальных, либо из горизонтальных разрезов.

В варианте с *вертикальными разрезами* модели могут создаваться из разрезов, начерченных на непрозрачном материале, или монтироваться из разрезов, нарисованных на прозрачной основе.

Модели из *непрозрачных разрезов* создают в определенной последовательности: 1) намечают масштаб макета; 2) все разрезы панто-

графируют из крупных масштабов в выбранный мелкий; 3) разрезы вычерчивают на толстом ватмане; 4) с помощью светостола чертеж разреза дублируют (повторяют) с другой стороны ватмана; 5) разрезы монтируют в общий каркас макета (обычно вклеивают в прорези несущих планок); 6) со всех сторон макет закрывают тонким плексигласом. Подобная макетная модель обычно получается легкой. Ее действительно можно вертеть в руках, разглядывая все интересующие детали строения месторождения. Но в этих «непрозрачных» моделях затруднительно прослеживать некоторые структурные элементы, попадающие глубоко в середину модели, так как при малых расстояниях между разрезами они сильно перекрывают друг друга, из-за чего некоторые части модели оказываются недоступными для просмотра.

Модели из *прозрачных разрезов* лишены этого недостатка. Такие модели специально делают прозрачными, чтобы можно было разглядеть «все закоулки» модели. Мало того, в помощь зрителю в таких моделях-макетах монтируется подсветка.

В этом варианте объемной модели разрезы вычерчивают на тонких стеклянных или плексигласовых пластинках. Черчение на этих материалах либо выполняют тушью специального состава, либо покрывают стеклянные пластинки определенным лаком, по которому уже и вычерчивается разрез. В моделях с прозрачными разрезами не приходится чертить разрез дважды — с одной и другой стороны.

Модели из прозрачных разрезов по своей наглядности очень хороши. Но, к сожалению, они получаются громоздкими и тяжелыми. Чтобы конструкция из десяти и более стеклянных листов не развалилась, приходится каркас делать крепким и жестким. Да еще нужна подводка электрического шнура и требуется установка нескольких патронов с лампочками для подсветки. Получается конструкция типа напольной тумбы. Такой макет можно назвать «переносным» только в шутку.

Читателю должно быть понятно, что прозрачную объемно-макетную модель, собираемую из *горизонтальных разрезов*, монтируют подобным же образом. Только стеклянные (или плексигласовые) листы с нарисованными погоризонтными планами устанавливают в макет горизонтально, а не вертикально.

Объемно-макетные блок-диаграммные модели можно рассматривать с разных сторон. В этом их основное преимущество перед графическими блок-диаграммами, которые можно видеть только в одном ракурсе. Кроме того, у макетных блок-диаграмм есть еще одно серьезное преимущество — они могут создаваться раздвигаемыми и разборными. Одну из сторон основания в раздвигаемых моделях делают увеличенного размера по сравнению с габаритами сомкнутой модели. На основание устанавливают своеобразные «рельсы», по которым либо вся модель, либо ее отдельные части

могут передвигаться в горизонтальном направлении. Плоскости, по которым блок-диаграмма разрезается на подблоки, выбирают в местах, наиболее интересных в геологическом отношении. Таким образом, зритель имеет возможность видеть «внутренности» геологической структуры месторождения, которые не попадают на плоскости четырех поперечных и продольных разрезов, ограничивающих блок-диаграмму.

Материалы, используемые при создании блок-диаграммных моделей, очень разнообразны: фанера, картон, папье-маше, плексиглас и многое другое. Конечный вид моделям придают художники-декораторы. Доведенные до статуса «наглядных пособий» модели многие годы используются на лекциях по геологии полезных ископаемых.

Наиболее сложны в изготовлении *разборные блок-диаграммы*. Представьте себе, что с подобной модели можно последовательно «снять»: слой вскрышных пород; одно или несколько рудных тел; залежь подстилающих метасоматических образований; пласт «подрудных» песчаников и т.д. То есть человеку, изучающему модель, предоставляется возможность разобрать ее «по косточкам», буквально «до основания».

При изготовлении таких моделей самое трудное — это достичь беззазорного смыкания всех геологических тел, слагающих недра. Обычно такие модели изготавливают из гипса (алебастра). Создатель моделей должен филигранно владеть искусством работы с этим капризным, быстро застывающим материалом. Впрочем, можно использовать и другие материалы. Так, в 80-х гг. XX в. геологи ЦНИГРИ (Центрального научно-исследовательского геолого-разведочного института) изготовили десяток разборных блок-диаграмм крупнейших в мире медно-порфировых месторождений из пенопласта.

Работа по созданию разборных блок-диаграмм сродни работе скульптора. Геолог еще больше уподобляется скульптору при создании скульптурных моделей рудных тел. Самой важной (и ответственной) частью таких макетов является модель рудного тела. Во многих месторождениях (например, в жильных) рудные тела — наиважнейшая часть геологической структуры месторождения. Поэтому для таких объектов понятие «модель рудного тела» равноценно понятию «модель месторождения».

Объемно-макетные скульптурные модели рудных тел называются так потому, что при их изготовлении используется техника скульпторов. Модели рудных тел либо лепят из пластичных, твердеющих материалов: глины, пластилина, гипса, папье-маше, либо вырезают из дерева.

Для примера рассмотрим последовательность действий в процессе создания модели с использованием пластилина. Для определенности будем говорить о линзообразном моделируемом рудном теле. Сначала на фанерные листы одинакового размера копируют контуры моделируемого рудного тела со всех разрезов. Затем с помощью

лобзика вырезают контуры рудного тела. Далее лист фанеры разрезают на две части. Обычно делается горизонтальный пропил. Полученные половинки фанерок будут использованы в качестве своеобразных лекал. Потом из большого количества пластилина лепится лепешка — очень грубая модель всего рудного тела, по размерам несколько большая, чем рудное тело в выбранном масштабе. В подготовленный каркас будущего макета с прорезями вставляют нижние половинки фанерных лекал. Пластилиновая лепешка раскладывается на этом ребристом ложе и прижимается плотно к каждому контуру. Затем вставляют верхние половинки фанерных контуров. На каждом разрезе с нажимом верхнее и нижнее лекало смыкают друг с другом.

Начиная с крайних разрезов, лепешку обрабатывают ножами и шпателями, снимая с верхней поверхности модели рудного тела лишний пластилин. Потом снимают верхнюю фанерку первого разреза и продолжают обрезку лишнего пластилина до следующей фанерки, которую потом тоже убирают. Дойдя до последнего лекала, обрабатывают окончание рудного тела. После этого все верхние половинки лекал возвращают на свои места. Модель переворачивают и в описанной последовательности обрабатывают нижнюю поверхность рудного тела.

Но это еще не модель. Пластилин — слишком мягкий, недолговечный материал. Со временем он сильно деформируется. Модель «оплывает». Поэтому пластилиновая модель используется как промежуточный продукт. Пластилиновую фигуру обмазывают маслом, кладут в ящик определенного размера и заливают жидким гипсом (алебастром). После отвердения гипсовую «чушку» извлекают из ящика и разрезают на две или большее количество частей. Количество разрезов, которое необходимо сделать, зависит от сложности формы фигуры, которую нужно извлечь. Далее пластилиновую сердцевину извлекают. Обычно с помощью мягкой проволоки части литейной формы соединяют друг с другом. Делают отверстие для заливки гипса. Если фигура имеет сложную форму, приходится делать несколько небольших отверстий для выхода воздуха. Иначе в отливке образуются каверны. Далее в отверстие заливают жидкий гипс. Выжидают несколько часов. Затем литейную форму разнимают на части. На извлеченной гипсовой модели исправляют все изъяны. Обычно скульптурную модель раскрашивают в выбранный цвет. Модель закрепляют в каркасе на растяжках и шпильках. Одну из стенок каркаса делают сплошной. На ней чертят масштабную линейку, оцифровывают линии горизонтов. Все. Скульптурная модель рудного тела готова.

Ради чего геологи проделывают эту кропотливую, отнимающую очень много времени работу по созданию объемных моделей месторождений? Они хотят, чтобы геологическое строение месторождения предстало в максимально наглядном, доступном и понятном виде.

Вообще, *главная цель трехмерного моделирования — визуализация геологической структуры месторождения.*

Компьютерное трехмерное моделирование. Данное моделирование безмерно упрощает титаническую работу геологов по созданию объемных моделей месторождений.

В геологии за последние 25 лет были освоены географические информационные системы (ГИС) и трехмерное моделирование месторождений (3D-модели). На качественно новый уровень вышли геостатистические методы подсчета запасов месторождений твердых полезных ископаемых. В начале 90-х гг. XX в. появились интегрированные пакеты прикладных программ для решения геолого-разведочных задач и в первую очередь для создания трехмерных моделей месторождений.

В настоящее время среди лидеров можно назвать такие пакеты программ, как DataMine, Surpac, MicroMine, RockWare, Вулкан. У этих программ различаются форматы файлов, интерфейсы по работе с пользователями, но во всех программах используется одно графическое ядро — огромный набор стандартных программ геометрического моделирования в трехмерном пространстве.

Главная задача трехмерного моделирования уже была названа — это *визуализация геологической структуры месторождения*. Но попутно с решением этой задачи решаются и другие.

Одной из основных задач трехмерного моделирования является *построение карт* различных *поверхностей*. Любая поверхность может быть построена в любом масштабе. Она может быть «поднята в воздух» и рассмотрена с любого ракурса, даже «с изнанки».

Отдельная задача — *изображение горных выработок и их документации*. Достаточно напомнить, что у геологов массу времени отнимали расчеты искривлений буровых скважин и вычерчивание их трассировки на разрезах и планах. Особенно больших затрат времени и сил раньше требовало проектирование карьеров.

При изготовлении точных карт, подготовке рисунков для их последующего типографского воспроизведения не всегда бывает достаточно точности человеческой руки, несмотря на наличие линеек, лекал, циркулей и других средств «малой механизации». *Автоматизация чертежно-графических работ*, таким образом, может рассматриваться как одна из насущных задач, эффективное решение которой возможно только с помощью вычислительной техники.

Конечная цель трехмерного моделирования — подготовка 3D-моделей рудных тел к подсчету запасов и производство этого подсчета. Все пакеты программ трехмерного моделирования месторождений в настоящее время нацелены на *геостатистические методы оценки запасов*. Трехмерное моделирование и геостатистика в данном случае неразрывно срослись в основное орудие геолога для подсчета запасов.

5.2. Трехмерное компьютерное моделирование месторождений

Три десятилетия назад компьютерная графика и родственная ей компьютерная (вычислительная) геометрия считались частью системного программирования, или одним из разделов CAD (Computer Aided Design) — в русском варианте САПР (система автоматизированного проектирования). Сейчас это уже вполне самостоятельные, со своими проблемами и спецификой области деятельности. Это новые эффективные технические средства для проектировщиков, конструкторов и исследователей; программные системы и машинные языки; новые научные и учебные дисциплины, родившиеся на базе синтеза таких предшественников, как аналитическая, прикладная и начертательная геометрии, программирование, методы вычислительной математики, приборостроение.

Компьютерная графика и геометрия сейчас — целый ряд направлений и разнообразных применений. Одни из них отталкиваются от задачи автоматизации вычерчивания технической документации, другие — от проблем взаимодействия человека и машины, от задач численной обработки, расшифровки и передачи изображений. Свои подходы к компьютерной графике наблюдаются у геодезистов и картографов, полиграфистов и астрономов, специалистов по космической связи и конструкторов электронной аппаратуры, кинематографистов и разработчиков компьютерных игр. Не все направления нашли должное отражение в литературе. В частности, в российской геологической литературе нет учебных пособий, посвященных трехмерному моделированию.

Графические изображения — карты, планы, разрезы — называют языком геологии. Поэтому понятен тот интерес к компьютерной графике, который сейчас наблюдается у геологов. В различных графических и геометрических системах много общего. Почти все чертежи и схемы содержат прямые и кривые линии, окружности, надписи из букв и цифр. Общей основой почти для всех применений компьютерной геометрии и графики являются двумерные и трехмерные координатные системы и их преобразования. Подобный геометрический фундамент, общие уравнения, алгоритмы, методы решения задач составляют методическое и математическое «ядро», на которое дальше уже наслаиваются специфические и оригинальные алгоритмы и программы. Таким образом, сама графическая или геометрическая программная система неоднородна, обычно состоит из ряда «слоев» или иерархических уровней.

В геологии трехмерное моделирование недр в первую очередь нужно геологам — разведчикам месторождений полезных ископаемых. Конечно, короткий раздел в учебнике не претендует на освещение всех направлений компьютерной графики. Наша основная

цель — в не очень сухой и строгой форме дать азы практического руководства для начального освоения трехмерного моделирования месторождений полезных ископаемых.

Исторически так уж получилось, что геологи стали использовать компьютерные алгоритмы трехмерной графики позже инженеров, конструкторов и архитекторов, по «социальному заказу» которых сформировалось программное ядро графических систем, не учитывавшее специфику геологии, геодезии и картографии. В частности, вместо картографических координатных систем, привычных для представителей наук о Земле, была использована бытовая, «школьная», декартовая координатная система. Что оставалось делать геологам? Либо переписывать все подпрограммы графического ядра, либо насильно менять собственную координатную систему. Создатели систем трехмерного моделирования месторождений полезных ископаемых пошли по второму пути.

Система трехмерного моделирования месторождений полезных ископаемых является преемницей той геологической и маркшейдерской дисциплины, которая ранее именовалась *геометрией недр*. Важнейшая задача геометрии недр состояла (и состоит) в том, чтобы на основе наблюдений и количественных измерений выявить форму и условия залегания залежей полезных ископаемых и вмещающих их горных пород. Она должна изучить геометрические параметры рудных тел и установить закономерности их изменения в пространстве недр, чтобы вскрыть пространственные закономерности распределения физико-химических и других свойств полезных ископаемых и отобразить эти закономерности на планах, картах, разрезах и других графиках.

Все эти процедуры в совокупности называют *геометризацией* (А. А. Трофимов, 1980). Теперь можно сказать, что геометризация (в современном понимании) — это методика *трехмерного графического компьютерного моделирования* месторождений полезных ископаемых.

5.3. Координаты в трехмерном пространстве

Географические координаты — *широта* и *долгота* — величины, определяющие положение точки на земной поверхности. Широта и долгота определяются из вычислений по геодезическим измерениям, приведенным к поверхности земного эллипсоида, а высота устанавливается в результате изучения фигуры Земли. На топографических картах высоты точек местности даются не над поверхностью земного эллипсоида, а над уровнем моря, причем в России над многолетним средним уровнем Балтийского моря. Этот уровень отмечен горизонтальным штрихом на специальной доске, прикрепленной к стенке обводного канала в Кронштадте (Кронштадтский футшток).

Геодезические координаты — долгота и широта — для многих случаев практики неудобны, в том числе и для геолого-разведочных работ. Поэтому от геодезических координат переходят к прямоугольным координатам на плоскости, на которую проектируется поверхность земного эллипсоида по тому или иному математическому закону. В России топографические карты составляют в проекции Гаусса (Гаусса—Крюгера). Эта проекция дает равноугольное отображение поверхности земного эллипсоида.

Так как с достаточно малыми искажениями на плоскость может быть развернута только ограниченная часть земного эллипсоида, поверхность земного шара при построении системы прямоугольных координат в проекции Гаусса делится на зоны, ограниченные с запада и востока меридианами. В каждой такой зоне устанавливается своя система прямоугольных координат, причем за ось x принимается изображение среднего меридиана зоны, а осью y служит изображение земного экватора. В каждой зоне абсциссы x отсчитываются от экватора к северу (положительные) и к югу (отрицательные), а ординаты y — от осевого меридиана зоны к востоку (положительные) и к западу (отрицательные). Чтобы не иметь отрицательных ординат, ко всем ординатам прибавляется 500 тыс. м и перед полученными таким способом условными координатами подписывается номер координатной зоны.

С математической точки зрения используемая географическая система прямоугольных координат называется *левой системой координат*. В ней значения координаты x увеличиваются на север, координаты y — на восток, а координаты z растут вверх (в зенит).

Геолог, начинающий работать в одной из программ трехмерного моделирования, столкнется с тем, что в программе используется *правая система координат*, в которой значения координаты y увеличиваются на север, координаты x увеличиваются на восток, а координаты z растут вверх (в зенит), т. е. координаты x и y поменяны местами. Это произошло за счет того, что было использовано ядро уже готовых графических пакетов типа AutoCAD. Такие пакеты разрабатывались не для геологов и географов, а для архитекторов, инженеров, проектирующих станки, автомобили, мебель, т. е. для людей, работающих в очень далеких от геодезии областях. Но стоит в файлах с исходными данными поменять местами столбцы с координатами x и y, как все встает на свои места.

Итак, в программах объемного моделирования используется трехмерная система координат с осями x, y и z (рис. 5.1). Такая система называется *ортогональной* (декартовой) системой координат. Любые две из этих трех осей взаимно перпендикулярны. Все три координатные оси проходят через одну общую точку начала координат O и являются бесконечно длинными. На рис. 5.1 показаны только малые части этих трех полуосей, далее называемых положительными осями. Координаты представляются в виде вещественных чисел. Точка

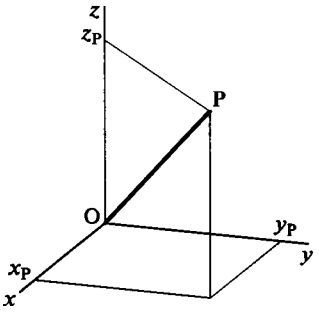


Рис. 5.1. Ортогональные координаты

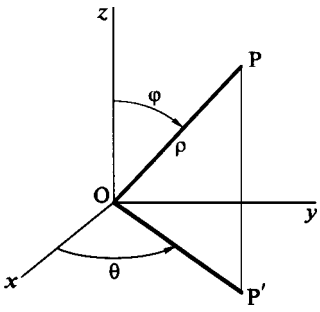


Рис. 5.2. Сферические координаты

P имеет ортогональные координаты (x, y, z), смысл которых заключается в том, что, отправляясь из точки O, можно достичь точки P, двигаясь сначала в положительном направлении оси x на расстояние x, затем на расстояние y в направлении положительной оси y и, наконец, на расстояние z в направлении положительной оси z.

Координатная система, изображенная на рис. 5.1, является *правой*. Это означает следующее. Предположим, что положительная ось x поворачивается на угол 90° вокруг оси z таким образом, что после этого поворота ось x совпадает с осью y. Это вращение можно сравнить с вращением винта, ориентированного снизу вверх, с правой (т. е. нормальной) резьбой. При таком повороте винт будет несколько перемещаться вверх в направлении оси z. Правую трехмерную систему координат в пространстве можно разместить по-разному. Как показано на рис. 5.1, можно выбрать такое ее положение, что положительная ось z направлена вверх, это предопределяет расположение оси x и оси y в горизонтальной плоскости xy.

Кроме прямоугольных координат для геологических задач нередко используют *сферические* координаты. Здесь также для определения положения точки P используют три вещественных числа. Вместо обозначений x_P, y_P, z_P (или просто x, y, z) для обозначений сферических координат применяют буквы греческого алфавита ρ, θ, φ (ро, тета, фи). Как видно из рис. 5.2, значение ρ определяет расстояние между точками P и O или, другими словами, это значение является радиусом сферы с центром в точке O, проходящей через точку P. Символами θ и φ обозначаются углы. Угол θ измеряется в плоскости xy, используя положение точки P′, являющейся проекцией точки P на эту плоскость. Точка P′ определяется путем опускания перпендикуляра из точки P на плоскость xy. Значение θ равно углу, на который потребовалось бы повернуть положительную ось x (вокруг оси z) в положительном направлении до тех пор, пока она не будет проходить через точку P′. Например, угол θ лежит между 0 и 90°, если точка P′ лежит в первом квадранте, т. е. в области между положительной осью x и положительной осью y. Угол φ — угол, измеренный в вертикальной

плоскости между осью z и прямой линией OP. Значение угла φ может быть в пределах от 0 до 180°. Существуют следующие соотношения между сферическими координатами ρ, θ, φ, с одной стороны, и прямоугольными координатами x, y, z — с другой:

$$x = \rho\sin\varphi\sin\theta;\ y = \rho\sin\varphi\cos\theta;\ z = \rho\cos\varphi.$$

5.4. Точка наблюдения и перспективное изображение

Программы трехмерного моделирования будем сокращенно именовать 3D. D — сокращение от слова *dimensions* — размерность пространства. 3D — *in three dimensions* — трехмерное пространство. При использовании программы 3D мы имеем дело с точками, отрезками прямых линий и конечными сплошными телами, которые ограничены плоскими гранями. Кривые поверхности будут аппроксимированы набором плоских граней, что аналогично аппроксимации кривых последовательностью отрезков прямых линий. Мы должны тем или иным способом определять позиции вершин этих полигонов. Для данной цели будем использовать прямоугольные координаты в правой системе координат.

Кроме того, нужно задать позицию глаза, называемого *точкой наблюдения*. Для обозначения этой точки наблюдения будем применять букву E (от слова *eye* — глаз). Точка E имеет очень важное значение в ее соотношении с центральной точкой объекта O, которая располагается более или менее близко от центра объекта. Тогда прямая линия EO будет называться *линией наблюдения*, а направление от E к O — *направлением наблюдения*. Как видно на рис. 5.3, для наблюдения доступно все, что лежит в пределах определенного конуса, ось которого совпадает с линией наблюдения EO. Для задания точки наблюдения E относительно объекта вообразим новую систему координат с началом в центральной точке объекта O, каждая ось которой параллельна соответствующим исходным осям. Затем нам нужно указать сферические координаты ρ, θ и φ точки наблюдения E относительно этой новой системы координат. Тогда буквой ρ будет обозначена длина отрезка прямой EO, как это видно на рис. 5.3.

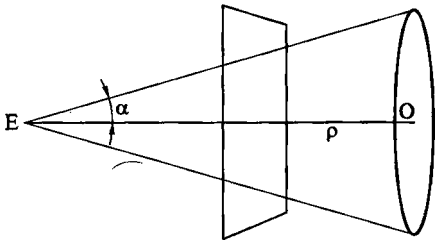


Рис. 5.3. Конус и линия наблюдения

Другими словами, это будет расстояние наблюдения. На рисунке также показана поверхность проецирования, которая представляется в виде плоскости, перпендикулярной линии наблюдения. Все видимые точки объекта посылают лучи света в глаз E. Пересечение этих лучей с плоскостью проекции образует перспективное изображение. Такой способ проецирования объекта на плоскость называется центральным проецированием, поскольку все проецирующие лучи проходят через точку наблюдения E — центр проекции.

Очевидно, что расстояние между плоскостью проекции и точкой наблюдения E определяет размер изображения. В программе 3D это расстояние часто будет выбираться автоматически таким образом, чтобы изображение всего объекта хорошо совпадало с размером нашего экрана, так что пользователю не нужно будет беспокоиться о расположении плоскости проекции. Угол α между осью конуса и его образующей должен быть достаточно малым, чтобы перспективное изображение выглядело приемлемым образом для большинства пользователей. Это достигается выбором расстояния наблюдения ρ значительно больше, чем размер объекта. Например, если мы хотим получить изображение куба с единичной длиной стороны, тогда можно рекомендовать значение $\rho \sim 5$. Для некоторых очень больших значений, скажем $\rho = 100\,000$, изображение будет примерно таким же, как и при значительно меньших значениях ρ. Тогда почему бы всегда не выбирать такие большие значения расстояния наблюдения?

Ответ заключается в том, что при очень большом расстоянии ρ фактически получится не *перспективное* изображение, а *параллельное* — все линии, параллельные на объекте, будут также параллельными и на изображении. Для понимания этого явления представим, что в последнем случае угол α на рис. 5.3 будет таким малым, что все лучи света, выходящие из различных точек объекта и проходящие через точку наблюдения E, будут практически параллельными. Таким образом, при очень больших значениях расстояния ρ будет получена приблизительно параллельная проекция, которая очень часто применяется на практике, поскольку ее проще использовать, чем реальную перспективную проекцию. На рис. 5.4 показаны три представления куба с единичной длиной стороны, которые получаются при различных значениях расстояния ρ.

Многие предпочитают изображение рис. 5.4, *а* при расстоянии ρ, равном 5. На этом рисунке видно, что ребра изображаются в виде более коротких отрезков, если они расположены дальше, что может быть полезным при интерпретации сложного изображения (особенно, если объект представляется в виде проволочной модели). Нет ничего существенно неверного в изображении рис. 5.4, *б*, где принято значение $\rho = 100\,000$, но это изображение может показаться слишком упрощенным, поскольку в нем никак не проявляется эффект перспективы. Параллельные ребра в кубе имеют отображение

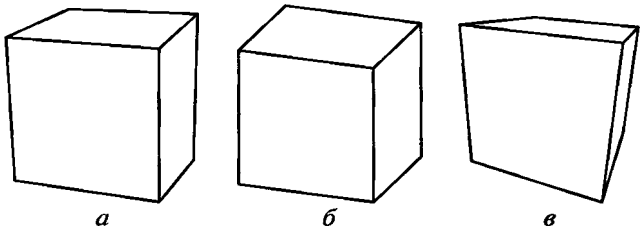


Рис. 5.4. Куб в перспективной проекции с разными расстояниями наблюдения (ρ): 5 (*а*); 100 000 (*б*); 2 (*в*)

в виде параллельных линий на рис. 5.4, *б*, и отрезки прямых линий не сокращаются, если они более удалены (фактически на изображении имеются сокращенные отрезки, но это произошло из-за их положения в пространстве, а не из-за удаленности от точки наблюдения). Строго говоря, здесь все-таки остается некоторый эффект перспективы, поскольку расстояние ρ хотя и очень большое, но не бесконечно велико и теоретически есть небольшая разница в длине отрезков для параллельных ребер куба. Однако эти различия слишком малы, чтобы их заметить, поэтому их можно проигнорировать и говорить, что проекции любых двух параллельных ребер куба параллельны и имеют одну и ту же длину.

В программах 3D могут встретиться и другие проекции.

Когда центром проектирования является бесконечно удаленная точка пространства, все проектирующие прямые параллельны и проекцию называют *параллельной* или *цилиндрической*.

Широкое применение при построении проекционных чертежей имеет тот частный вид параллельного проектирования, когда плоскость проектирования расположена перпендикулярно (ортогонально) к направлению проектирования. Проекцию в этом случае называют *прямоугольной* или *ортогональной*.

Аксонометрия — особый способ изображения пространственных фигур на плоскости. Аксонометрия по существу представляет собой обыкновенную параллельную проекцию, отличающуюся, однако, тем, что на плоскость чертежа одновременно с изображаемой фигурой проектируется выбранная в пространстве система координат. Аксонометрическое изображение пространственной фигуры позволяет полностью восстановить ее форму и расположение относительно системы координат. Любая программа 3D может любую построенную фигуру аксонометрически спроецировать на одну из 6 ортогональных плоскостей: на запад или на восток; на север или на юг; на надир (вниз) или на зенит (вверх).

С точки зрения геометрии *перспективная проекция* — способ изображения фигур, основанный на применении центрального проектирования. Для получения перспективного изображения какого-

либо предмета проводят из выбранной точки пространства — центра наблюдения (*центра перспективы*) лучи ко всем точкам данного предмета. На пути этих лучей ставят ту поверхность, на которой желают получить изображение: если поверхностью проекции является плоскость, получают *линейную перспективу*, если внутренняя поверхность цилиндра, получают *панорамную перспективу*, если внутренняя поверхность сферы, получают *купольную перспективу*. При моделировании месторождений полезных ископаемых используют линейную перспективу. Перспективное изображение параллельных прямых пересекается в так называемых *точках схода*. Угол, под которым виден наибольший размер предмета, называется *углом зрения*.

В геолого-разведочных приложениях моделируемые геологические тела имеют три точки схода — две горизонтальные и одну вертикальную. В некоторых программах трехмерного моделирования положение точек схода и угла зрения задаются автоматически, например на расстоянии, в пять раз большем размера объекта в этом направлении. Причем в некоторых программах 3D пользователь не может регулировать положение точек схода. Из-за этого моделируемый геологический объект может очень сильно искажаться — нередко глубокие буровые скважины на глубине стягиваются в один «пучок». Поэтому часто удобнее работать в прямоугольных координатах, в которых искажения не так бросаются в глаза.

5.5. Графические примитивы (простейшие элементы)

Все геологические тела и другие техногенные объекты (подземные горные выработки, карьеры и т. п.), показываемые в трехмерном пространстве, в принципе состоят из элементарных геометрических фигур — точек, линий, плоскостей.

Точка — простейший графический элемент. В файлах, в которых она записана, должна содержаться информация о трех *координатах* точки $\{x, y, z\}$. Но кроме координат точки в файле может быть записано практически неограниченное количество ее *атрибутов* (характеристик, свойств). Что относится к атрибутам точки? Например, цвет. По умолчанию точка рисуется текущим цветом. Точка может изображаться «истинной» точкой — одиночным пикселем, а может для лучшей видимости (различимости на экране дисплея) изображаться четырьмя или девятью пикселями. Вообще, могут быть заданы форма точки (круг, окружность, треугольник, квадрат и т. п.) и ее размер. Точка может быть видимой (она будет показываться на экране дисплея), а может быть невидимой (не будет показываться на экране). Точка может иметь много числовых характеристик, например может характеризоваться содержаниями 36 химических элементов,

определенных в геохимической пробе, отобранной в этой точке. Точка характеризуется несколькими номерами — своим собственным уникальным номером, номером линии, номером сегмента, номером каркаса — одним словом, номерами всех более сложных геометрических фигур, составной частью которых она является. Если точка соответствует геологической точке наблюдения, то она, естественно, будет иметь свой уникальный символьный номер, замысловатость которого зависит от воображения геолога, например CD_BH_029/177,5-а. Вся перечисленная информация тем или иным способом может быть визуализирована — выведена на экран дисплея.

Получается, что точка — наипростейший геометрический примитив — обременена ворохом дополнительной числовой и символьной информации. Все последующие геометрические фигуры, более сложные, чем точка, естественно, сопровождаются обильной дополнительной информацией.

Линия состоит из двух точек 1 и 2, у которых хотя бы одна из трех координат по значению различается $\{x_1, y_1, z_1\} \neq \{x_2, y_2, z_2\}$ и которые соединены прямолинейным отрезком. В памяти компьютера хранится следующая информация о линии: *координаты* концов линии $\{x_1, y_1, z_1\}$ и $\{x_2, y_2, z_2\}$; *толщина* вычерчиваемой линии (в пикселях); *цвет* линии; *стиль* черчения. Стиль черчения — это форма, в которой линия будет вычерчиваться. Линия может быть *сплошной*, *штриховой*, *пунктирной*, *штрихпунктирной*. Кроме того, линия может быть *невидимой*.

Так как линия включает две точки, все атрибуты, перечисленные для точки, принадлежат и линии.

Стринг в переводе с английского (*string*) — *струна*, *тетива* (*нечто натянутое*). В общем случае стринг — это ломаная кривая, которая представляет собой ряд последовательно идущих точек, соединенных (*стянутых*) прямыми отрезками (линиями). Так как стринг — серия линий, в стринг-файлах (обычное расширение файлов .str) хранится вся информация о каждой линии. Каждый стринг должен иметь уникальный идентификатор (индивидуальный номер). Например, стринг, состоящий из 11 точек и 10 соединяющих линий, занимает в стринг-файле 11 строк. И все 11 строк должны иметь один и тот же идентификатор.

Заметим, что стринг по-разному понимается в разных пакетах программ. Так, в пакете SURPAC и точка, и линия — это тоже стринги. Но в данном учебнике не хватит места проводить сравнения разных пакетов программ.

Контуром называется *замкнутый* стринг, у которого первая точка по координатам совпадает с последней. У контура в отличие от открытого стринга *количество точек* точно *равно количеству линий*.

Все атрибуты, указанные для точки и линии, присущи также стрингам и контурам.

Контур, состоящий из трех точек, является простейшей фигурой — ***пространственным треугольником*** с единственной плоскостью, проходящей через все три точки — вершины треугольника. Эту плоскость, проходящую через три точки и три прямые линии, соединяющие точки, можно *задрапировать* (*задекорировать*), *натянув* на треугольник «*материю*» (*оболочку*) того или иного цвета. Это может быть «материя» с какой-то штриховкой или рисунком. При этом можно задать стиль *прозрачности*. В разных программах это делается по-разному, но три значения прозрачности обязательно присутствуют. Во-первых, оболочка может быть задана полностью *непрозрачной*. В этом случае все, что расположено от наблюдателя за треугольником, видно не будет. Во-вторых, оболочку можно сделать *полупрозрачной*. То, что находится за треугольником, будет видно, но как «в тумане». В-третьих, сделав оболочку *прозрачной*, мы сможем наблюдать не только ребра треугольника, но и все остальное, что за ним находится.

С пространственным треугольником связано еще одно важное для визуального восприятия трехмерных фигур свойство — *освещенность плоскости* в пределах треугольника. Как это делается, будет пояснено отдельно. Здесь мы только скажем, что в зависимости от угла наклона плоскости треугольника к линии от источника света будут меняться оттенки цвета, выбранного для драпировки. Если треугольная плоскость будет видна наблюдателю и одновременно будет перпендикулярна направлению освещения, то для ее окраски будут использованы самые светлые оттенки выбранного цвета. При косом освещении оттенки будут более темными.

Все пространственные объекты в конечном счете состоят из пространственных треугольников.

В трехмерном моделировании месторождений большое значение имеют ***блочные модели***. В этих моделях стенки микроблоков, на которые разбивается месторождение, представляют собой ***пространственные четырехугольники***. Так как это не *природное*, а навязанное природе разбиение геологического пространства, плоскость в данном случае точно проходит через четыре точки. На самом деле каждая сторона блока (параллелепипеда) *невидимыми* линиями разбивается на два треугольника. Оба треугольника одинаково ориентированы в пространстве. Из-за этого у них совпадают и цвет, и освещенность. Поэтому (чисто визуально) мы воспринимаем их как общую плоскость, ограниченную четырехугольником.

5.6. Поверхности и тела

Все пространство недр разбито геологическими границами (природными или искусственными поверхностями) на геологические тела.

Основные элементы трехмерных моделей месторождений — модели геологических поверхностей и модели геологических тел.

Геологические границы только на плоских чертежах выглядят линиями, которые на самом деле являются следом пересечения ***геологической поверхности*** с другой геологической поверхностью (например, с дневной поверхностью) или с какой-нибудь условной плоскостью (например, с плоскостью вертикального разреза). Примеры: дневная поверхность, поверхность стратиграфического несогласия, поверхность сместителя разлома и т. п. Поверхность может быть реально наблюдаемым объектом, типа подошвы какого-нибудь стратиграфического горизонта, а может быть условной, невидимой. Например, она может определяться по данным опробования. Так определяются границы рудных тел во многих месторождениях.

В картографии давно выработаны различные способы псевдообъемных изображений топографических поверхностей на плоскости: карты в изолиниях, карты с цветной раскраской высотных отметок, карты с «отмывками» (с тенями), карты с перспективным аэрофотоизображением рельефа. Все эти варианты картографических изображений поверхностей воплощены в программах трехмерного моделирования месторождений, но с одной существенной разницей. Картографические изображения все равно остаются плоскими, *псевдообъемными*. А в 3D-программах мы можем модель поверхности повертеть с разными наклонами, заглянуть даже с нижней невидимой стороны. На этой модели четко можно определить, какая из гор выше, какая круче. Сюда нужно еще добавить «вайрфрэймовские» модели (*wireframe model*) поверхностей, что значит *проволочные* или *каркасные модели* поверхностей.

Недра (геологическое пространство) состоят из прилегающих друг к другу (сомкнутых друг с другом) ***объемных геологических тел***, которые имеют определенный объем и отделены друг от друга геологическими поверхностями. Ограничения геологических тел могут быть разного типа. Это могут быть чисто геологические границы: подошвы или кровли пластов, эндоконтакты интрузивов, сместители разломов. Это могут быть скорее экономические, чем геологические, границы, например контур руд, удовлетворяющих *кондициям* или принятой *глубине отработки* месторождения. Это могут быть границы лицензионно-правового характера, например *границы горного отвода* рудника. Так или иначе объемное геологическое тело — однородное (в определенном геологическом смысле) образование, полностью ограниченное в пространстве границами вышеназванного типа. Внутри этого однородного объемного геологического тела могут присутствовать другие геологические тела, например линзы пустых пород в рудном теле.

Для компьютерного трехмерного моделирования месторождений предложены два основных типа моделей — *каркасные* и *блочные*. Их смысл будет пояснен далее.

5.7. Горные выработки

Своеобразными объемными телами являются практически все горные выработки. Их своеобразие заключается в том, что это тела с «*отрицательным*» объемом — они *пустые*. Так, ствол скважины пуст — из него вынут керн. Пустым является и ствол полевого штрека — из него все безрудные горные породы вывезены в отвал. Пустым представляется и ступенчатое днище карьера. В чем-то похожи на подземные горные выработки карстовые пещеры — они тоже являются полостями с *отрицательным* объемом.

Борозды (от бороздового опробования горных выработок) можно уподобить горизонтальным («лежачим») буровым скважинам, и те и другие можно рассматривать вместе. Из-за малости поперечного сечения (радиуса) скважин и борозд по сравнению с размерами моделируемых геологических тел они изображаются как одномерные объекты в виде линий выбранной толщины. В общем случае линия криволинейна. Трассировка ствола скважины по данным инклинометрии производится заранее. Ствол скважины может раскрашиваться в соответствии с пересекаемыми горными породами или в соответствии с содержаниями полезных компонентов. Устье и забой (в случае борозды *устье* и *забой* — условные понятия) могут показываться особыми значками (символами) и сопровождаться рядом надписей (номер скважины, глубина забоя и т. п.).

В большинстве 3D-программ существуют шаблоны сечения ***подземных горных выработок***. Для горизонтальных и наклонных (уклоны) горных выработок обычно используют шаблоны в виде арок, а для вертикальных (шахты, шурфы, восстающие) — в виде окружности. Трассировка горных выработок ведется вдоль их осевой линии.

Карьеры выступают в виде проектной горной выработки, которую еще только предстоит пройти, и в виде существующей открытой горной выработки. В последнем случае предстоит ввод исходных данных в виде ступенчатого днища по результатам теодолитных замеров, произведенных по кромкам уступов карьера. Геологическая документация и документация по данным опробования также привязываются к теодолитным ходам (документация может привязываться с помощью GPS). «Винтовая» линия кромки уступа карьера должна вводиться в компьютер наподобие ввода скважины по данным инклинометрии. Здесь тоже будут присутствовать *азимут* прямой линии до следующей точки замера, *угол падения* (погружения) кромки карьера, *длина* очередного «прямолинейного» участка. В случае проектирования карьера трехмерная модель месторождения уже должна существовать — проектировать карьер «в воздухе» бессмысленно.

Траншея (обычно *подвижная*) — это своеобразная разновидность карьера для отработки субгоризонтально залегающих полезных ископаемых, например фосфоритов. Ее особенностью является неболь-

шая ширина при большой длине. Полезное ископаемое отрабатывается на всю длину траншеи. Затем траншея *передвигается* на следующую отрабатываемую полосу. В этих случаях документация эксплуатационной разведки по геологии и по качеству сырья ведется по данным вертикальных разведочных линий, которые можно уподобить вертикальным буровым скважинам. В таком виде эти данные и должны вводиться в компьютер.

Канавы в отличие от других горных выработок имеют днище, подчиненное рельефу коренных пород, до которых должна «добраться» канава. Документация канавы во многом сходна с документацией кромки карьера. Только канавы стараются делать прямолинейными. Но *азимут* очередного «*колена*» канавы, *угол падения* (скольжения) дна канавы на этом отрезке и *длина* участка должны в документации присутствовать обязательно.

Бульдозерные расчистки — это те же канавы, только более широкие и, как правило, более глубокие за счет использования механической проходки рыхлых отложений. В бульдозерных расчистках по сравнению с канавами есть две особенности, которые необходимо учитывать. Во-первых, бульдозерные расчистки — выработки довольно широкие. Рекомендуется документацию по всем расчисткам выполнять однообразно, например по западным стенкам расчисток. Во-вторых, на пересечении поперечных бульдозерных расчисток с линией профиля нередко делают взаимно перпендикулярные расчистки «по голове» жилы. Важно, чтобы в документации этих двух перпендикулярных расчисток присутствовали общие точки с одинаковыми (прямоугольными) координатами.

5.8. Графические документы

Программы 3D могут выводить на печать и графопостроители разнообразные графические документы: колонки буровых скважин; вертикальные и горизонтальные геологические разрезы (погоризонтные планы); карты в изолиниях; геологические карты; фотодокументы. Печать перечисленных графических документов возможна только после того, как произведен ввод по крайней мере основных исходных данных. А многие из документов могут быть выведены на печать только после создания трехмерной модели месторождения.

5.9. Некоторые математические задачи трехмерного моделирования месторождений

В программах 3D-моделирования используется «графическое ядро», где собраны сотни подпрограмм и функций решения отдельных

геометрических и графических задач. Вряд ли есть смысл все их перечислять. Упомянем лишь некоторые из задач: переход от одной системы координат к другой; различные преобразования координат; переход от двухмерных изображений к трехмерным и обратно; смена одной проекции на другую, например перспективной на параллельную; масштабирование одной из осей координат и т. п. Некоторые задачи и способы их решения требуют пояснений.

Внутри или снаружи? Есть пространственные задачи, которые человек «глазами» решает практически моментально, а компьютерная программа должна для ее решения «поломать себе голову». Одной из таких задач в двухмерном случае является задача определения положения точки внутри или снаружи полигональной фигуры на плоскости. Все, чем располагает компьютерная программа, это координаты точек полигона (контура) и координаты точки, про которую нужно сказать, где она находится. Оказалось, что это весьма сложная задача аналитической геометрии. В 1970-е гг. было предложено десятка два алгоритмов, из которых опытным путем была выбрана пара самых коротких и быстрых.

На самом деле задача еще сложнее, чем она сначала кажется. Дело в том, что внутри полигональной области могут быть другие полигоны. Представьте себе полигональную фигуру типа буквы «О». Нас интересует вопрос о попадании точки в черную кайму буквы.

В трехмерном случае задача выглядит гораздо сложнее, так как здесь требуется узнать, попадает ли точка в объемную фигуру, в которой могут быть инородные тела. Например, в рудном теле могут встретиться прослои пустых пород. Но геометры и программисты справились и с такой задачей. Для этого пришлось разработать методологию каркасных поверхностей объемных фигур, например рудного тела. Вся поверхность рудного тела разбивается на треугольники, координаты вершин которых известны. Через вершины треугольника проводится плоскость. Путем перебора всех плоскостей и решается вопрос о том, снаружи или внутри объемного тела находится интересующая нас точка.

Что видно, а что не видно? Важным преимуществом трехмерного моделирования является возможность вращать объемные фигуры и рассматривать их с любой точки наблюдения, под любым углом, с любого ракурса. При таких вращениях одни фигуры могут закрывать другие полностью или частично. В любой момент программа должна решить массу задач на тему, какие части фигур сейчас видны, а какие нет. Задача осложняется еще и тем, что некоторые фигуры могут относиться к полупрозрачным фигурам. За такими фигурами должны «просвечивать» другие объекты.

Задача контроля видимости или, как говорят, устранения невидимых линий (и участков поверхностей для цветных изображений) оказалась для машинного решения довольно сложной и требующей повышенного расхода машинного времени и оперативной памяти.

Основная причина состоит в том, что в общем случае каждый из элементов смоделированного в трехмерном пространстве объекта может быть закрыт при наблюдении с той или иной точки любым другим элементом. Поэтому при увеличении количества элементов число их взаимных сопоставлений увеличивается в квадрате. Для растровой графики вопрос контроля видимости иногда решается проще, чем для векторной графики. Коснемся алгоритмов, применимых для векторной графики. Линии, изображающие объемные предметы и пространственные сцены, могут иметь различный смысл. Во-первых, это могут быть тонкие нити, стержни, которые загораживают лежащие за ними части объекта лишь в пределах собственной толщины. Во-вторых, линии могут изображать рисунок, нанесенный на какую-нибудь плоскость, поверхность. Сам по себе такой рисунок тоже ничего не загораживает. В-третьих, это могут быть края, граничные линии участков поверхностей, граней, которыми часть объекта заканчивается или по которым одна грань сопрягается с другой. Наблюдая объект, можно видеть и такие очерковые, или, как иногда говорят, контурные, линии, которые для нашего глаза представляют видимую границу объекта, но на самом объекте их как таковых нет. Причины, по которым какая-либо линия может быть на проекции частично или полностью невидимой, могут быть двоякого рода: либо носитель линии (поверхность, грань, сплошное тело) повернут к наблюдателю «обратной» стороной, либо линия заслоняется более близкими к зрителю частями объекта. В связи с этим программы контроля видимости могут опираться на два критерия: критерий ориентации и критерий экранирования.

Пусть объект является выпуклым многогранником или выпуклой поверхностью, которая может быть представлена набором мелких граней. Если многогранник — сплошное тело, то ясно, что любая его грань может быть видима только с одной, наружной, стороны. Пусть и кусок поверхности обладает таким же свойством. Вопрос: как аналитически проверить, с какой стороны видна грань (часть поверхности) на проекции? Один из приемов такой. Нанесем на грань три пронумерованные точки, образующие треугольник — такой, чтобы при взгляде на эту грань с внешней стороны треугольник имел положительную ориентацию (чтобы направление обхода его вершин было положительным). Тогда на проекции признаком того, что грань видна с этой же наружной стороны, будет положительная ориентация проекции этого треугольника. Если известны координаты точек в первичной пространственной координатной системе, можно, очевидно, найти координаты их образов в системе чертежа. Можно воспользоваться простой формулой, определяющей ориентированную площадь треугольника, или сходной формулой, подсчитывающей величину векторного произведения двух сторон треугольника, принятых за векторы: $C = (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)$. Знак вели-

чины С указывает, с какой стороны мы видим грань. Для правильной работы этого способа используемые преобразования координат должны сохранять ориентацию пространственных осей.

Другой прием заключается в том, что в какой-либо точке исследуемой грани или в точке поверхности строят нормальный к ним вектор, направленный «наружу», и определяют величину его проекции на луч зрения, направленный в его основание. Если знак проекции отрицательный — конец вектора ближе к наблюдателю, чем начало, а грань видна с наружной стороны, и наоборот. При использовании этого приема преобразования координат должны быть изометрическими (в расширенном смысле).

Однако данный метод не позволяет полностью устранять невидимые линии, необходимо также использовать контроль по экранированию. Как осуществляется этот контроль, читатели могут узнать из нескольких опубликованных источников (А. Фокс, М. Пратт, 1972; Дж. Фоли, А. ван Дэм, 1985; Ю. В. Котов, 1988; Л. Аммерал, 1992).

Задача поиска ближайшей точки или ближайшей линии. В 3D-программах используется интерактивный режим общения геолога с компьютером. Этот режим подразумевает, что они рисуют (создают модель) по очереди — то рисует компьютер, то, используя курсор мыши, рисует на экране дисплея пользователь. Например, геологу нужно нарисовать линию контакта двух геологических тел между двумя скважинами. Он подводит курсор к первой скважине и просит программу (как это делается, мы не уточняем) найти точку контакта двух геологических тел на стволе скважины. Самому геологу точно навести курсор на точку трехмерного пространства на экране дисплея практически невозможно, так как каждый пиксель экрана соответствует нескольким метрам в реальности. Поэтому пользователь просит программу найти «ближайшую» точку нужного качества и произвести ее «захват». То же самое делается на следующей скважине. Потом рисуется линия контакта.

Такая задача геометрически не очень трудная, а вот с точки зрения создания понятного интерфейса, связывающего программу с пользователем, может оказаться логически довольно сложной.

Цвет. По современным стандартам любые графические пакеты должны соответствовать разным цветовым моделям. Лучше всего известна RGB-модель (Red, Green, Blue). Но кроме нее должны использоваться: CMYK (Cyan, Magenta, Yellow, Black); HSB (Hue, Saturation, Brightness); CIE Lab (Commission International d'Eclairage, L — компонента яркости, a — цветовая компонента от зеленого к красному, b — цветовая компонента от синего к желтому); Grayscale.

Пользователь должен помнить, что цвета по-разному передаются на экране дисплея, на бумаге и транспаранте (прозрачной пленке). И это происходит не только потому, что у некоторых принтеров и графопостроителей не все в порядке с драйверами. Здесь сказыва-

ются чисто технические ограничения некоторых устройств. Например, модель Grayscale способна на экране дисплея воспроизвести 256 оттенков серого цвета, а на принтере воспроизводится не более 50 уровней серого цвета.

Освещенность, блики, зеркальность, тени. В программах 3D всегда присутствует *источник освещения* (в одних программах он называется *фонарем*, в других — *прожектором*). Пользователь может менять направление освещения и его интенсивность. В большинстве программ можно включить дополнительный прожектор и точечный источник света. Все эти возможности помогают достичь максимальной выразительности модели.

На самом деле задача интенсивности освещенности объекта является сложной оптико-геометрической задачей. Предположим, что направление падающего света совпадает с направлением наблюдения, т. е. перпендикулярно плоскости экрана. 3D-программы по умолчанию действительно выбирают такое направление. Основной источник света удален очень далеко, поэтому лучи света практически параллельны. Кроме этого источника будем предполагать наличие некоторой рассеянной составляющей, которая обусловливает, что не будут совершенно темными даже те части объекта, которые непосредственно не освещаются основным источником.

Интенсивность света, отраженного от поверхности, состоит из трех составляющих:

1) рассеянная составляющая I_a вследствие наличия освещения объекта от окружающей среды, например от стен комнаты;

2) диффузионная составляющая I_d, которая в соответствии с законом косинусов Ламберта пропорциональна косинусу угла θ между направлением падающего света и нормалью к поверхности;

3) зеркальная составляющая I_s, которая особенно применима к гладким и отражающим поверхностям, подобным зеркалу. Для полностью отражающей поверхности угол отражения равен углу падения.

Способ вычисления и комбинирования этих составляющих называется моделью освещения. Не углубляясь в суть предмета, скажем, что в большинстве случаев используется модель Фонга. Важно уяснить главное, что интенсивность освещенности вычисляется для всех плоских участков модели. Некоторые модели состоят из нескольких десятков тысяч микротреугольников. При каждом минимальном повороте модели должны мгновенно осуществляться миллионы арифметических операций, для того чтобы программа «знала», какие детали модели видимы, а какие невидимы в данный момент, и чтобы успела рассчитать освещенность любого микротреугольника.

Пользователю также предоставляется возможность опробовать *стереоэффект*. В этом случае на экране появляется дубль модели, в различной степени смещенный относительно оригинала. Способ-

ности стереовидения у разных людей ощутимо отличаются. Некоторым приходится долго тренироваться, чтобы появился стереоэффект. Но зато потом они могут достичь высшей степени иллюзии объемности модели.

В некоторых других областях применения программ трехмерного моделирования, например в кинематографе, используются более продвинутые варианты графического ядра. В них уже присутствуют *тени* от высоких предметов, которые очень сложно рассчитывать, если источников освещения несколько. Все больше приближает 3D-модели к реальности учет *зеркальности* многих поверхностей — зеркал, стекол, полированной мебели. Отражение на таких поверхностях окружающих предметов — очень сложная задача проективной геометрии. То же самое можно сказать о *бликах* и *солнечных зайчиках*.

Программы трехмерного моделирования месторождений полезных ископаемых пока лишены перечисленных атрибутов «живой» реальности. Но, думается, и они вскоре появятся в этих программах.

5.10. Порядок создания трехмерной модели

Трехмерная модель (далее для краткости — 3D-модель) позволяет представить геологическую структуру месторождения самым наглядным образом. Это касается не только объемного облика рудного объекта, но и возможности рассматривать его под разными ракурсами, при разном освещении. Готовую модель можно разрезать в любом направлении, построить разные блок-диаграммы в разных системах координат и разных геометрических проекциях. Конечной целью такого моделирования является получение как можно более точного пространственного отражения всех основных параметров рудных тел, что в конечном счете позволяет произвести подсчет запасов геостатистическим способом и составить проект разработки месторождения.

Рассмотрим очень кратко самые важные шаги по созданию 3D-модели.

Исходные данные. Сначала в компьютер должна быть тем или иным способом введена максимально полная геолого-разведочная информация по месторождению — база данных. Существует минимальный набор данных. Он состоит из следующих файлов: файл координат устьев всех скважин и горных выработок; файл инклинометрии; файл геологической документации; файл данных опробования. Покажем, как выглядят эти файлы, сопровождая примеры минимальными пояснениями.

Первый файл (файл координат устьев), фрагмент которого приведен в табл. 5.1, — самый простой по структуре и прозрачности смысла столбцов, поэтому в комментариях не нуждается.

Таблица 5.1. **Фрагмент файла координат устьев**

Номер выработки	Координаты устьев выработки			Глубина (длина) забоя, м
	X (восток)	*Y* (север)	*Z* (абс. отметка)	
...	...	...	...	
166	181 039,1	52 592,7	225	225
168	181 010	53 040	240	358
...	...	...	...	

Таблица 5.2. **Фрагмент файла инклинометрии скважин**

Номер скважины	Глубина замера, м	Азимут, град	Угол, град
...	...	...	...
166	225 (забой)	198	–86
168	0	200	–85
168	20	201	–85
168	40	202	–84
...	...	...	...
168	320	198	–80
168	340	199	–80
168	358 (забой)	199	–80
170	0	200	–85
170	20	200	–85
...	...	...	...

Второй необходимый файл (табл. 5.2) содержит данные по инклинометрии скважин (или других горных выработок). В нем в столбце «Глубина замера» глубина последнего замера на забое должна совпадать с общей глубиной скважины, хранящейся в файле координат устьев скважин. Следует обратить внимание на знаки зенитных углов скважин, которые непривычны для геологов. Зенитные углы скважин, бурящихся снизу вверх, имеют положительный знак от 0 до +90°. Если скважины бурятся сверху вниз, то их зенитным углам приписывается знак минус от 0 до –90°.

Следующий файл исходных данных (табл. 5.3) должен содержать данные по геологической документации горных выработок. В качестве примера приведены данные по документации двух скважин, пробуренных на Рубцовском полиметаллическом месторождении (Алтайский край).

Таблица 5.3. **Фрагмент файла геологии (геологической документации)**

Номер выработки	Глубина от, м	Глубина до, м	Код породы
...	...	...	...
RUB-3	0,0	104,5	а
RUB-3	104,5	134,0	в
RUB-3	134,0	140,0	г
RUB-3	140,0	159,9	д
RUB-3	159,9	160,9	е
RUB-3	160,9	166,5	ж
RUB-3	166,5	208,0	з
RUB-3	208,0	310,0	и
RUB-3	310,0	518,3	к
...	...	...	...
RUB-132	0,0	96,0	а
RUB-132	96,0	109,5	б
RUB-132	109,5	140,0	в
RUB-132	140,0	150,0	г
RUB-132	150,0	166,2	д
RUB-132	166,2	166,7	е
RUB-132	166,7	178,0	ж
RUB-132	178,0	191,0	з
RUB-132	191,0	250,3	и
...	...	...	...

Примечание. В столбце «Код породы» записывается условный код породы. В нашем случае буквы значат следующее: а — кайнозойские песчано-глинистые отложения; б — алевролиты, аргиллиты, песчаники; в — надрудные вулканические породы; г — туфы кислого состава; д — зона над контактом горизонта туфов кислого состава; е — руда; ж — кварц-серицит-хлоритовый метасоматит; з — метасоматит (карбонатный); и — вулканиты кислого состава; к — субвулканы.

Таблица 5.4. **Фрагмент файла опробования**

Номер выработки	Номер пробы	От, м	До, м	Координаты			Содержание,%				
				X	*Y*	*Z*	Cu	Pb	Zn	Fe	S
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
2078	110197	34	36	52568,4	181006,5	108,9	0,0	0,1	0,2	6,1	3,7
2078	110198	36	38	52569,5	181004,9	109,4	1,5	0,1	0,4	6,7	5,6
2078	110199	38	39	52570,3	181003,7	109,7	6,8	4,1	21,2	20,8	35,4
2078	110200	39	40	52570,9	181002,9	110,0	5,9	5,5	24,7	24,9	40,2
2078	110201	40	41	52571,4	181002,1	110,2	4,8	10,3	26,4	21,1	34,6
2078	110202	41	42	52572,0	181001,3	110,4	4,3	12,1	29,2	18,2	34,3
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Примечание. Координаты каждой пробы на самом деле сначала отсутствуют в файле исходных данных, появляются после определенных расчетов. Здесь они приведены, чтобы не вводить еще одну таблицу.

Одним из самых важных является файл данных опробования. В качестве примера в табл. 5.4 приведены данные опробования одной из подземных наклонных скважин Рубцовского месторождения.

Проверка исходных данных. Одна из важных стадий в работе над созданием 3D-моделей — тщательная проверка исходных данных. Есть специальные программные средства, которые сравнивают все файлы друг с другом. Встречаются ли скважины во всех файлах? Не перепутаны ли номера скважин? Соответствует ли глубина инклинометрии общей глубине скважин? Не перепутан ли порядок проб? И другие подобные вопросы.

Исправленные данные могут быть просмотрены в трехмерном пространстве. Для этого следует сделать *трассировку* скважин и горных выработок. По данным инклинометрии рассчитывают искривления стволов скважин. Трассу скважин с шагом, например, 1 м записывают в отдельный файл. Рассчитываются координаты середины интервала каждой пробы. После этого взаимное расположение скважин можно тщательно проверить в трехмерном пространстве. Отображая цветом разные горные породы и содержания полезных компонентов, можно понять, правильно ли введены данные по геологии.

Каркасы поверхностей. В геологии основное место занимают геологические поверхности. Они разбивают пространство месторождения на отдельные объемные фигуры — геологические тела, ко-

торые заполняют целиком весь объем недр. Поэтому в 3D-моделях методы имитации поверхностей имеют исключительное значение.

Существует довольно много способов моделирования (или изображения) поверхностей. Но когда мы переходим в трехмерное пространство, все они оказываются практически одинакового типа, который называется каркасным моделированием поверхностей. В английском языке для этого типа моделей используется составной термин *wireframe*. Наиболее точный перевод этого слова — проволочный каркас или проволочный скелет. Определение «проволочный» в русскоязычных программах употребляется только тогда, когда каркас не «задрапирован», не «одет» в какую-нибудь цветную непрозрачную «ткань», и поэтому на просвет видны все ребра каркаса. В других случаях говорят просто о каркасах или о сплошных каркасах (solid frame).

Итак, в трехмерном варианте все поверхности представляются каркасами, причем вся поверхность разбивается на треугольники, как правило, разного размера. Разбиение области на треугольники (другими словами, ***триангуляция***) должно осуществляться по определенным правилам. Во всем мире общепринято производить триангуляцию по Б. Н. Делоне.

Триангуляция Делоне. Борис Николаевич Делоне (1890—1980) — крупнейший российский математик-геометр — на математическом конгрессе в Торонто (Канада) в 1924 г. предложил *метод пустого шара*. Представим себе произвольную дискретную систему точек в пространстве и пустим туда летать шар, как летает мыльный пузырь. Шар «пустой», в том смысле, что в него не должна попадать ни одна точка данной системы. Но пусть этот шар раздувается. Тогда он неизбежно наткнется хотя бы на одну точку системы, но его еще можно будет раздувать. И так до тех пор, пока на его поверхности не окажется столько точек, что дальше раздуваться он не сможет. Это заведомо наступит, если на нем окажутся четыре точки, не лежащие в одной плоскости, — вершины тетраэдра, вписанного в шар.

Если представлять себе эту картину в пространстве затруднительно, посмотрим на ее более простой вариант: на *пустой круг* среди системы точек на плоскости. Будем двигать и «раздувать» круг (рис. 5.5). Вот он уткнулся в одну точку A (рис. 5.5, *а*). Далее круг продолжает раздуваться, пока на его границе не окажется точка B. При этом центр круга, отмеченный крестиком, смещался на рисунке вправо (рис. 5.5, *б*). На следующем этапе круг наталкивается на точку C и дальше уже раздуваться не может (рис. 5.5, *в*). Если теперь заставить круг как бы «пролезть» сквозь отрезок CB, то, раздуваясь от точек C и B вправо, он наткнется на точку D. Получим два треугольника ABC и CBD, смежных по стороне CB (рис. 5.5, *г*). Так получается разбиение всей плоскости на треугольники. В плоском случае это и есть алгоритм разбиения, который называется *триангуляцией Делоне*.

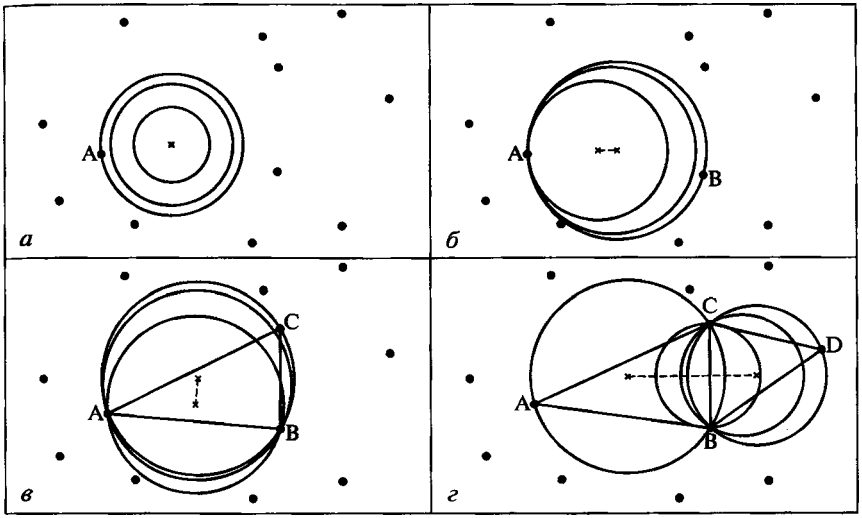


Рис. 5.5. Метод пустого шара Б. Н. Делоне (по А. Д. Александрову, 1980) (объяснения см. в тексте)

Проволочный каркас. Представим себе, что у нас есть карта точек, отмечающих устья наземных скважин, пробуренных на месторождении. Произведем триангуляцию Делоне на этой системе точек — двухмерном поле точек. Но ведь устье каждой буровой скважины имеет еще и высотную отметку. Если мы работаем в 3D-программе, то можем повернуть модель на любой угол в любом направлении и убедиться лишний раз, насколько трехмерная модель поверхности в виде проволочного каркаса нагляднее плоской карты.

В случае проволочного каркаса его ребра видны на просвет (рис. 5.6), а если он задрапирован (затянут) оболочкой, то мы видим только те грани и ребра поверхности, которые не закрыты от нас другими гранями и ребрами (рис. 5.7).

Цифровые модели поверхностей. Если создан проволочный каркас поверхности, по нему можно построить изолинии. Этот способ построения карт в изолиниях многие десятилетия назад (еще в докомпьютерные времена) использовали геологи — строили вручную треугольники, а внутри них проводили прямые интерполяционные линии. И назывался этот метод методом *линейной интерполяции*. Теперь он называется иначе — *цифровые модели поверхностей* (ЦМП), но суть его осталась прежней. В области с точками высотных отметок проводится триангуляция Делоне. Ребра, соединяющие точки, образуют каркас, каждая вершина которого имеет свою высоту. На каждом пространственном треугольнике строится плоскость и проводятся изолинии. На английском языке процедура ЦМП называется DTM (Digital Terrain Model). На рис. 5.8 показана карта

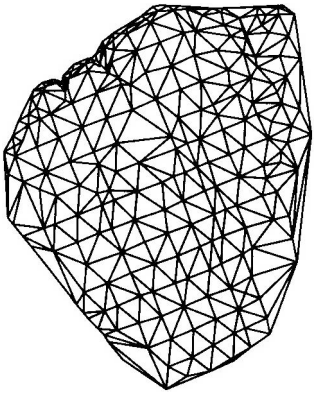


Рис. 5.6. Проволочный каркас дневной поверхности Вострянского участка Егорьевского фосфоритового месторождения, построенный триангуляцией Делоне

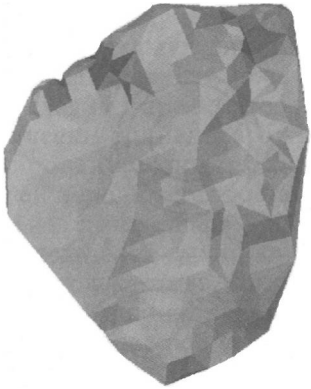


Рис. 5.7. Сплошной каркас дневной поверхности Вострянского участка Егорьевского фосфоритового месторождения. Рельеф участка «угадывается» по полутоновой раскраске пространственных треугольников

в изолиниях дневной поверхности месторождения, созданная таким способом.

Недостаток такой карты заключается в резкой изломанности изолиний. В 3D-программах есть возможность сгладить угловатые изолинии. Но так как каждая изолиния сглаживается отдельно, близко расположенные сглаженные изолинии могут пересечься. Существует еще много других методов построения карт в изолиниях. Прежде чем познакомить читателя с некоторыми из них, необходимо ввести новые термины — грид и гридинг.

Гридинг (англ. *gridding*) — процедура перехода от неравномерного распределения точек исходных данных к равномерному, правильному в узлах сети (*grid*), размеры которой задаются геологом. *Грид* — это не просто сеть, а еще и результат гридинга — интерполяции данных в узлах правильной сетки. Гридом также называется матрица, в которую записывают результаты интерполяции. Существует по меньшей мере

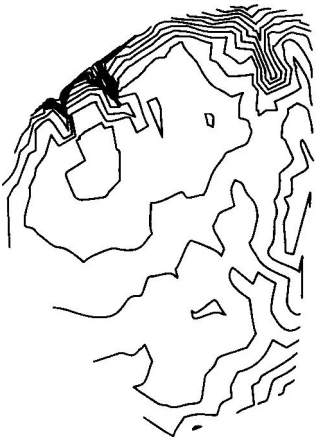


Рис. 5.8. Карта изолиний рельефа дневной поверхности, построенная по методу цифровых моделей поверхностей. Вострянский участок Егорьевского месторождения фосфоритов

15 методов интерполяции, которые дают ощутимо разные результаты: метод простого скользящего среднего; ближайшего соседа; реального ближайшего соседа; обратного расстояния в степени; модифицированный Шепарда; базисных радиальных функций (5 функций); наименьшей кривизны; полиномиальной регрессии; локальный полиномиальный; триангуляции с линейной интерполяцией; кригинга.

В большинстве 3D-программ реализована только половина этих методов. Обычный набор: метод наименьшей кривизны; метод обратного расстояния в степени; метод ближайшего соседа; метод кригинга; метод триангуляции с линейной интерполяцией (ЦМП). Можно сказать, что используется и метод полиномиальной регрессии, но не в целях интерполяции, а чтобы устранить тренд — явную закономерность в пространственном распределении изучаемого признака.

У каждого из перечисленных методов интерполяции есть и свои плюсы, и свои минусы. Но в нашу задачу не входит обсуждение «подводных камней» каждого из методов. И вообще, мы здесь приведем пример только еще одного метода — обратных расстояний в степени — как альтернативного для метода триангуляции с линейной интерполяцией.

Метод обратных расстояний дает более гладкие узоры рельефа (рис. 5.9). Поэтому он широко используется. В этом способе исходные точки входят с весом, обратным квадрату расстояния до рассчитываемой точки грида. Карту в изолиниях не трудно превратить в проволочный каркас, в котором показаны узлы правильной регулярной сети

Рис. 5.9. Карта изолиний рельефа дневной поверхности, построенная по методу обратных расстояний в степени. Вострянский участок Егорьевского месторождения

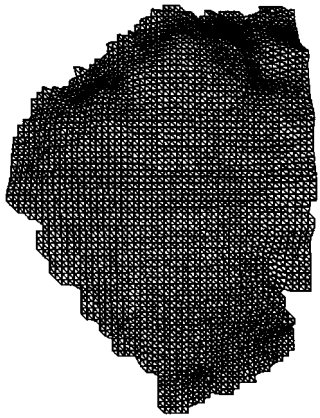


Рис. 5.10. Проволочный каркас дневной поверхности Вострянского участка Егорьевского фосфоритового месторождения, построенный по гридингу обратных расстояний в степени. Размер ячеек грида 100×100 м

Рис. 5.11. Сплошной каркас дневной поверхности Вострянского участка Егорьевского фосфоритового месторождения, построенный по гридингу обратных расстояний в степени. Размер ячеек грида 100×100 м

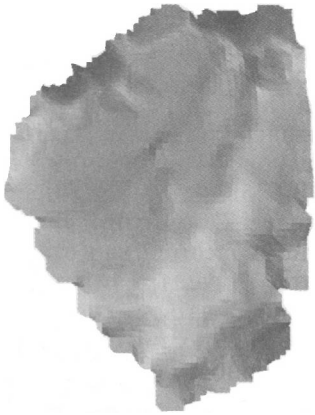


Рис. 5.12. Сплошный каркас дневной поверхности Вострянского участка Егорьевского фосфоритового месторождения, построенный по гридингу обратных расстояний в степени. Размер ячеек грида 50×50 м

(в данном случае 50×50 м), соединенные прямыми линиями (в проекции на горизонтальную плоскость). Следует обратить внимание на то, что в полученном проволочном каркасе (рис. 5.10) в каждом квадрате проведены диагонали. Благодаря этому регулярный каркас, построенный по методу обратных расстояний, состоит также из пространственных треугольников, как и каркас, построенный триангуляцией Делоне (см. рис. 5.6), но является его сглаженным вариантом.

Каждый пространственный треугольник имеет собственную ориентировку по отношению к источнику света и линии наблюдения. Поэтому, как и на рис. 5.7, мы можем показать на дисплее полутоновое изображение каркаса (рис. 5.11). Приписав каждому треугольнику среднюю отметку высот его вершин, мы можем раскрасить каждый пространственный треугольник наподобие географических карт. Полученная картина (рис. 5.12) значительно информативнее, чем проволочные каркасы или полутоновые изображения. Но настоящая иллюзия объемного изображения возникает только тогда, когда мы на экране дисплея вращаем рисунок, имея возможность заглянуть на моделируемую поверхность даже снизу («из-под нее»). К сожалению, анимация рисунков в учебниках, изготовляемых типографским способом, пока еще не достигнута.

Каркасные модели геологических тел. Объемное геологическое тело может быть построено несколькими способами. Один из способов заключается в том, что мы строим сначала каркасную модель кровли геологического тела, а затем каркасную модель его подошвы.

Далее довольно хитрым способом, который здесь не поясняется, «сшиваем» кровлю с подошвой. Получается замкнутое, объемное геологическое тело, например рудная залежь. В этом способе творческое участие геолога минимально. Каркасы подошвы и кровли рудного тела рассчитываются автоматически. Да и соединение каркасов происходит практически «на автомате». При этом в минимальной степени используют геологические разрезы, погоризонтные планы и другие виды геологической документации.

Может быть, поэтому в основные выделился метод построения каркасных моделей геологических тел с помощью стрингов.

Стринг в переводе с английского (*string*) — тетива или нить, или струна, что почти ничего не говорит геологу о смысле процедуры построения стринга. Хотя построив несколько стрингов, геолог начинает догадываться, что стринг (в самом обычном случае) — это контур геологического тела в разрезе. Построение стринга очень напоминает построение геологического тела в горизонтальном или вертикальном разрезе. На экран дисплея выводится разведочный план, на нем геолог задает линию разреза, который должен построить компьютер. Вдоль осевой линии будущего разреза с обеих сторон программа проводит еще две (штриховые) линии. Это обозначает, что при построении разреза будут учитываться все скважины, попавшие в данную зону, например ±50 м (ширину зоны задает геолог).

Программа 3D выводит на экран дисплея все скважины, попавшие в указанные границы. Она расцвечивает стволы скважин в зависимости от геологии или содержаний выбранных полезных компонентов. В нашу задачу входит «обвести контур» намеченного рудного тела в разрезе. Когда мы обводим контур тела на экране дисплея (или на дигитайзере), в файл стринга автоматически записываются три координаты всех точек, которые мы отмечаем на контуре. Таким образом, получается стринг (контур) геологического тела в данном

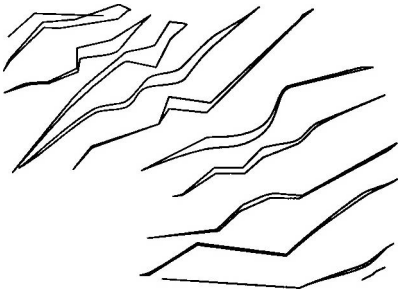


Рис. 5.13. Серия стрингов — контуров рудного тела во всех разрезах. Второе рудное тело Корбалихинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай)

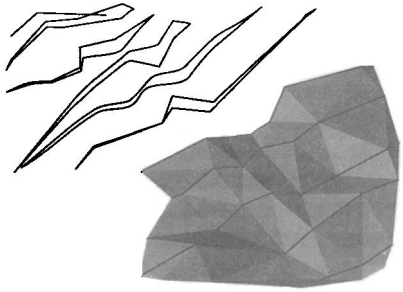


Рис. 5.14. Эпизод «натягивания оболочки» на стринги всех разрезов. Второе рудное тело Корбалихинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай)

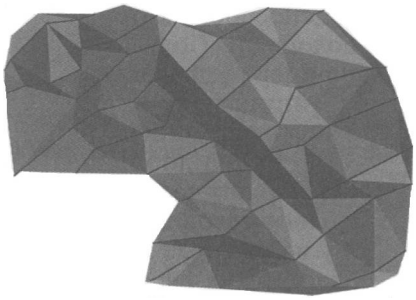


Рис. 5.15. Законченный каркас геологического тела, построенный из стрингов. Второе рудное тело Корбалихинского колчеданно-полиметаллического месторождения (Рудный Алтай)

разрезе. Причем нужно, чтобы обход контуров всегда делался в одну сторону — по часовой стрелке или против часовой стрелки. Такой способ обхода должен быть един на всем протяжении моделирования месторождения.

Мы строим стринги данного геологического тела во всех разрезах. Если изобразить все построенные стринги по этому телу вместе, то получится своеобразная блок-диаграмма внешних контуров геологического тела в 3D-пространстве (рис. 5.13). С помощью специальной процедуры эту группу стрингов можно превратить в объемное геологическое тело. Такую процедуру можно называть *драпировкой* или *декорированием*. Она представляет собой, образно говоря, «натягивание оболочки» («материи» выбранного цвета) на каркас из стрингов. На рис. 5.14 показан рабочий момент такой драпировки, а на рис. 5.15 изображен окончательный результат — объемная каркасная модель геологического тела, к которой добавляется определение *solid*, т. е. «сплошная» («цельная»).

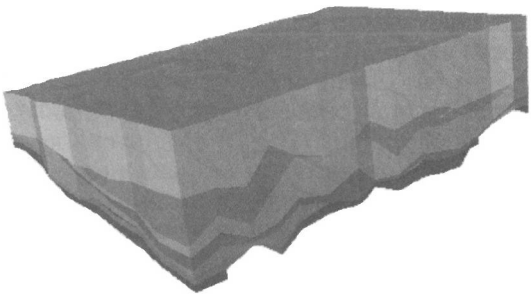


Рис. 5.16. Полная каркасная модель Рубцовского месторождения.

Сверху вниз: песчано-глинистые отложения; алевролиты, аргиллиты, песчаники; зона контакта между подрудными вулканическими и рудовмещающими породами; туфы кислого состава; горизонты туфов кислого состава; руда; метасоматит (кварц-серицит-хлоритный); метасоматит (карбонатный); вулканиты кислого состава; субвулканы

Полная каркасная модель. Создав с помощью стрингов каркасные модели всех геологических тел месторождения, можно их «собрать» в *полную* каркасную модель (рис. 5.16). Эту своеобразную блок-диаграмму можно вращать, рассматривая с разных сторон.

У такой «плотной» модели есть существенный недостаток — она не позволяет заглянуть «внутрь» недр. Но в 3D-программах есть возможность раздвинуть различные геологические слои (рис. 5.17). Такая раздвинутая полная модель значительно нагляднее отражает основные особенности геологической структуры моделируемого участка месторождения. Например, на раздвинутой модели Рубцовского месторождения хорошо видно, что метасоматические образования (второй слой снизу) распространены отнюдь не повсеместно на месторождении, а сосредоточены в западной его части.

Блочные модели. Моделируемое пространство недр можно разбить на микроблоки, например $10 \times 10 \times 10$ м. Каждому блоку можно приписать ту горную породу, которая обнаружится в центре блока. Это и будет простейшая блочная модель месторождения. В случае Рубцовского месторождения такая модель будет слишком грубой — ведь здесь в некоторых частях рудное тело имеет метровую мощность. Чтобы модель отображала тонкие прослои, необходимо уменьшить высоту блоков.

Обычно создают блочные модели не всего месторождения целиком, а только его рудной части — блочные модели рудных тел. Размеры блоков тщательно согласовывают с способом добычи и производительностью рудников. Желательно, чтобы размер блоков не превышал 1/4 часть дневной добычи. Например, если планируется, что рудник будет добывать в день 1 000 т руды, а плотность руды 2,8 т/м^3, то нетрудно прикинуть, что на каждом из четырех добычных забоев в день нужно добывать блок размером приблизительно $4{,}5 \times 4{,}5 \times 4{,}5$ м.

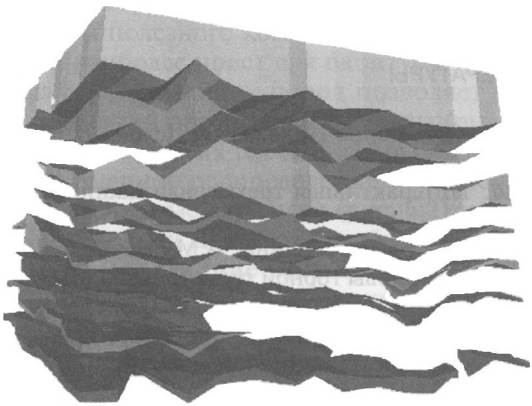


Рис. 5.17. Раздвинутая полная каркасная модель Рубцовского месторождения

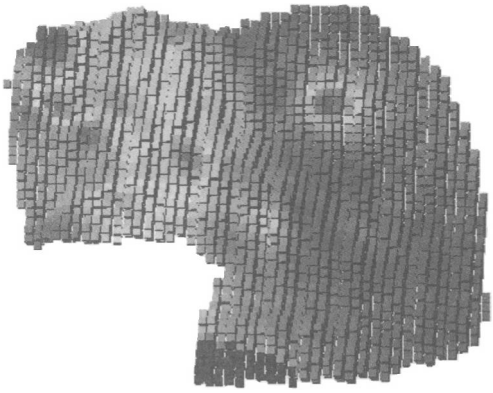


Рис. 5.18. Блочная модель второго рудного тела Корбалихинского месторождения. Тональность блоков соответствует содержанию Zn

Блочная модель строится в следующем порядке. Сначала создается «пустая блочная модель» — весь моделируемый объем заполняется пустыми блоками заданного размера. Затем для каждого рудного тела ищут блоки, пересекающиеся с каркасами соответствующих рудных тел. Только их и оставляют в модели, а остальные «выбрасывают». Далее выбирают одну из процедур интерполяции и для каждого блока определяют требующиеся параметры рудных тел — содержание полезных компонентов, средняя мощность. Если используется геостатистический метод оценки запасов, то в качестве интерполяционной процедуры применяется кригинг — специализированная операция сглаживания, которая обеспечивает минимальную дисперсию оценки. На рис. 5.18 для примера приведена блочная модель одного из рудных тел Корбалихинского колчеданно-полиметаллического месторождения на Рудном Алтае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Александров А.Д.* Борис Николаевич Делоне // Природа. — 1980. — № 3.

2. *Аммерал Л.* Интерактивная трехмерная машинная графика. — М.: «Сол Систем», 1992.

3. *Котов Ю.В.* Как рисует машина. — М.: Наука, 1988.

4. *Трофимов А.А.* Основы горной геометрии. — М.: Изд-во МГУ, 1980.

5. *Фокс А.* Вычислительная геометрия, применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. — М.: Мир, 1972.

6. *Фоли Дж.* Основы интерактивной машинной графики / Дж. Фоли, А. ван Дэм. — Ч. 1, 2. — М.: Мир, 1985.

7. *Iournel A.G.* Mining geostatistics / A. G. Iournel, Ch. J. Huijbregts. — L. — N.-Y. — S.F.: Academic press, 1979.

Глава 6
Геостатистические методы подсчета запасов

6.1. Оконтуривание рудных тел

Проведение контуров рудных тел является одной из важнейших операций при подсчете запасов месторождения. Оконтуривание — это основа создания модели месторождения. Оно оказывает влияние и на количество запасов месторождения, и на их качество в зависимости от того, какие участки минерализованных пород будут включены в промышленный контур, какие останутся за его пределами.

Грамотно выполненное оконтуривание позволяет получить максимальную выгоду от эксплуатации месторождения, а в ряде случаев способствует «созданию» рентабельного объекта даже при небольших запасах и невысоких содержаниях. И наоборот — при неправильном оконтуривании даже крупные объекты могут превратиться в совокупность мелких, малопривлекательных участков. Рассмотрим кратко некоторые принципиальные положения и технические приемы оконтуривания.

Границы тел полезных ископаемых. По характеру природных границ рудных тел можно выделить две группы месторождений: а) месторождения с четкими границами рудных тел; б) месторождения с рудными телами, не имеющими таких границ.

Месторождения с четкими границами тел подразделяются, в свою очередь, на две группы: а) с равномерным и б) с неравномерным распределением полезного компонента.

Первый случай наиболее прост для оконтуривания: резкое отличие рудного тела от вмещающих пород позволяет четко провести контур, ограничивающий промышленные руды (рис. 6.1).

При оконтуривании рудных тел второй группы, имеющих четкие границы и неравномерное распределение полезного компонента, могут возникнуть различные варианты (рис. 6.2).

Первый вариант — если при всех колебаниях в содержании полезного компонента его средние величины всегда остаются выше минимального промышленного содержания, то независимо от степени изменчивости вся залежь представляет промышленный интерес и оконтуривание упрощается.

Второй вариант — если среднее фактическое содержание ниже кондиционного, то данная часть рудного тела признается непромышленной. Однако при внимательном изучении характера, закономер-

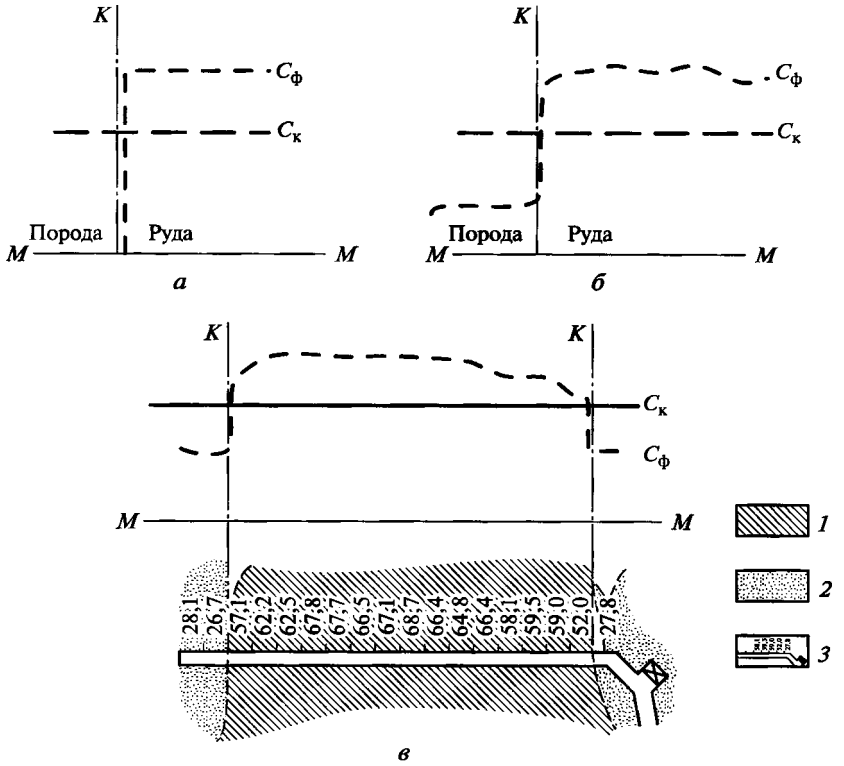


Рис. 6.1. Схема соотношения содержания полезного компонента в теле полезного ископаемого и вмещающих породах при четком контакте и равномерном распределении компонента:

а — идеализированная схема; *б* — общая схема; *в* — часть плана железорудной залежи; *1* — рудное тело; *2* — вмещающие породы; *3* — горные выработки; $C_ф$ — фактическое содержание полезного компонента; $C_к$ — кондиционное содержание; *K* — контакт рудного тела с вмещающими породами; линия *MM* — условно нулевой уровень содержания. Вертикальными штрихами отмечены интервалы опробования; цифры — содержание железа в пробах, на основании которых построена кривая $C_ф$

ностей распределения безрудных участков в ряде случаев можно предусмотреть селективную отработку таких участков — оставление их в целиках или организацию обогащения рудной массы сортировкой и т. д. При этих условиях (исключение безрудных участков) среднее содержание может превысить кондиционный уровень, и участок будет отнесен к промышленным рудам. Выяснение возможности получения более богатого по содержанию минерального сырья за счет исключения безрудных участков имеет большое, а в некоторых случаях решающее значение для промышленной оценки рудного тела или его части.

Наиболее яркими представителями объектов этой группы являются жильные месторождения вольфрама, олова, золота и др.

Месторождения с рудными телами, не имеющими четких границ, также делятся на две группы: а) с равномерным и б) с неравномерным распределением полезного компонента.

Первая группа характеризуется однородным, одинаковым составом рудных тел и вмещающих пород, различие между которыми заключается только в концентрации полезного компонента; четких границ рудных тел нет: наблюдается постепенный переход минерального сырья в породу (рис. 6.3, *а*). Граница тела для подсчета запасов проводится через ту точку на кривой распределения полезного компонента, в которой содержание становится равным кондиционному. Подобная ситуация имеет место на месторождениях вкрапленных сульфидных руд, некоторых железорудных и бокситовых месторождениях.

В месторождениях второй группы рудные тела по составу также не выделяются среди вмещающих пород, отличаясь от них лишь уровнем содержания полезного компонента. При этом на фоне постепенного снижения концентрации (от рудного тела к вмещающим породам) наблюдаются локальные колебания, часто довольно резкие, которые вуалируют границу перехода (рис. 6.3, *б*).

Данная группа месторождений является наиболее сложной для оконтуривания. Здесь также приходится решать вопрос о возможно-

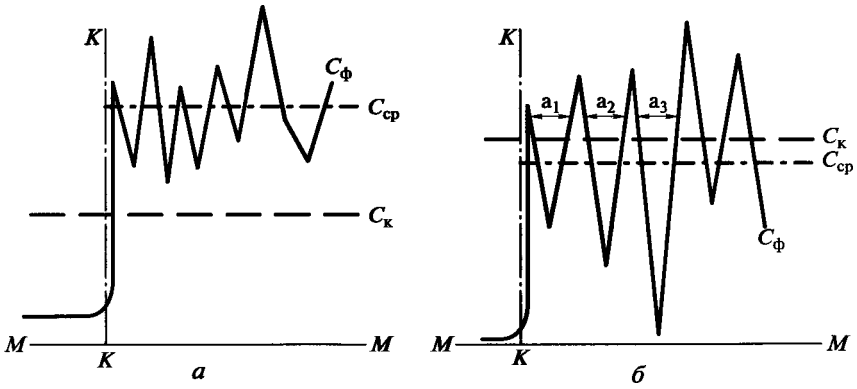


Рис. 6.2. Схема соотношения содержания полезного компонента в теле полезного ископаемого и вмещающих породах при четком контакте и неравномерном распределении компонента:

а — содержание компонента изменяется в пределах кондиций; *б* — среднее содержание компонента в теле полезного ископаемого ниже кондиционного; $C_ф$ — фактическое содержание полезного компонента; $C_к$ — кондиционное содержание; $C_{ср}$ — среднее содержание; *K* — контакт рудного тела с вмещающими породами; линия *MM* — условно нулевой уровень содержания; a_1, a_2, a_3 — участки с некондиционными содержаниями

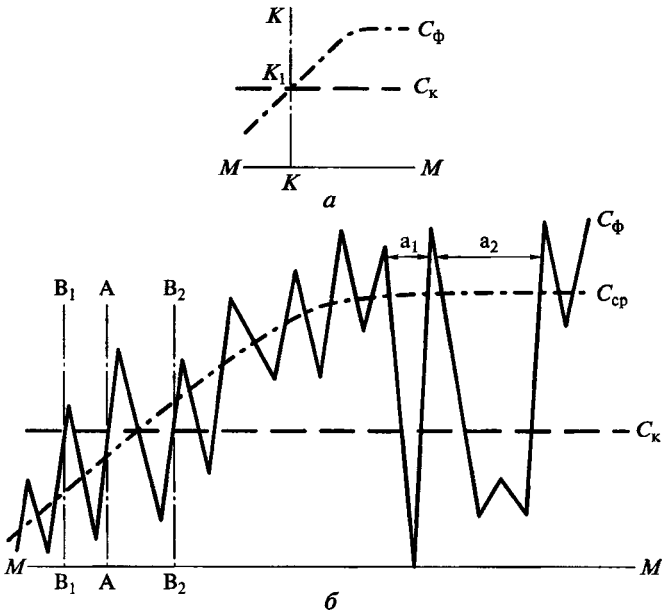


Рис. 6.3. Схема соотношения содержания полезного компонента в теле полезного ископаемого и вмещающих породах при отсутствии четкого контакта:

а — при равномерном распределении компонента; *б* — при неравномерном распределении компонента; $C_ф$ — фактическое содержание полезного компонента; $C_к$ — кондиционное содержание; $C_{ср}$ — среднее содержание; *K* — контакт рудного тела с вмещающими породами; линия *MM* — условно нулевой уровень содержания; a_1, a_2 — участки с некондиционными содержаниями; B_1 — место, где содержание компонента ниже кондиционных значений; B_2 — место, где содержание компонента выше кондиционных значений; АА — примерное положение границы рудного тела

сти исключения безрудных участков. Комментируя ситуацию, изображенную на рис. 6.3, *б*, можно заключить, что контур тела должен пройти где-то между линиями B_1 и B_2. Более точно наметить его можно, лишь решив вопрос о судьбе безрудных участков. Если участки a_1 и a_2 при отработке месторождения могут быть исключены, то контур можно провести по линии B_1. Если же эти участки будут обязательно отработаны, то контур пройдет по некоторой линии А, положение которой определяется специальным расчетом. В этом случае необходимо определить бортовое содержание.

К этой группе относятся практически все месторождения штокверкового типа, большинство золоторудных, многие месторождения редких металлов.

Распределение естественных сортов и типов минерального сырья. Нередко в пределах рудных тел выделяются различные сорта или типы руд. Их следует оконтуривать, поскольку руды разных типов и сортов отрабатываются раздельно, обрабатываются по инди-

видуальным технологическим схемам и запасы их подсчитываются также раздельно. Взаимоотношения между отдельными сортами и типами минерального сырья, в общем, сходны с рассмотренными ранее взаимоотношениями между телами полезных ископаемых и вмещающими породами. Поэтому принципы и приемы оконтуривания рудных тел полностью применимы и для оконтуривания отдельных типов и сортов руд, выделяемых внутри тел.

Оконтуривание участков, различных по гидрогеологическим и горно-техническим условиям. Горно-технические и гидрогеологические условия оказывают существенное влияние на способы отработки месторождения, затраты на отработку, себестоимость руды и конечного продукта. Поэтому участки месторождения, находящиеся в разных условиях, оконтуриваются и запасы по ним подсчитываются раздельно. Из числа наиболее важных и часто встречающихся можно указать следующие примеры.

1. На месторождениях, отработку которых планируется вести открытым способом, отдельно оконтуривают и подсчитывают запасы участков с различной мощностью вскрыши. Часто специально составленные для этой цели карты с изолиниями мощности вскрыши (или изолиниями коэффициента вскрыши) служат для установления очередности отработки участков и решения других вопросов.

2. Разработка месторождений (особенно открытая), расположенных в районах развития многолетнемерзлых пород, сопряжена с определенными сложностями. При подсчете запасов таких месторождений необходимо изучать распределение мерзлоты и оконтуривать участки: а) сплошного развития мерзлых пород; б) островной мерзлоты; в) талики.

3. Важнейшими задачами являются изучение гидрогеологических условий, определение степени обводненности месторождения, его различных участков, расчет величины ожидаемых водопритоков при эксплуатации. Нередки случаи, когда ценные богатые руды не могут быть отработаны только из-за неблагополучных гидрогеологических условий их залегания. Поэтому требуется выделять и оконтуривать запасы, находящиеся в резко различных гидрогеологических условиях.

4. Запасы в целиках (шахтных, под железнодорожными путями, производственными зданиями, поселками и т. д.) должны быть оконтурены на планах и разрезах и подсчитаны отдельно. Если по качеству эти запасы удовлетворяют кондициям, они должны быть отнесены в группу балансовых.

При оконтуривании тел для подсчета запасов различают следующие виды контуров:

1) контур, характеризующий полное окончание (выклинивание тела). Он называется нулевым контуром и строится путем соединения крайних точек, в которых мощность тела равна нулю или содержание полезного компонента равно нулю;

2) промышленный контур, отделяющий промышленные участки тела от непромышленных. Он проводится через точки с наименьшими значениями показателей, т. е. через точки с минимальной мощностью, минимальным промышленным или бортовым содержанием полезного компонента. Промышленный контур в некоторых участках может совпадать с нулевым;

3) сортовой контур, разделяющий различные сорта и типы руд внутри общего промышленного контура.

Контуры по способу построения делятся на два вида.

Первый — внутренний контур интерполяции. Он проводится путем соединения опорных точек, расположенных в крайних положительных («рудных») разведочных или эксплуатационных выработках.

Второй — внешний контур. Он проводится за пределами крайних положительных выработок или проб, расположенных по периферии разведанного тела. При этом выделяют две разновидности: а) внешний контур ограниченной экстраполяции — проводится между выработками, вскрывшими руду, и безрудными выработками; б) внешний контур неограниченной экстраполяции — проводится, если за рудными выработками безрудных выработок нет (рис. 6.4).

Оконтуривание тел для подсчета запасов проводится двумя последовательными операциями: а) установлением опорных (граничных) точек по естественным обнажениям, горным выработкам, скважинам и другим данным; б) проведением через опорные точки линий контуров.

Оконтуривание тел выполняются на планах, проекциях, разрезах по совокупности разведочных данных.

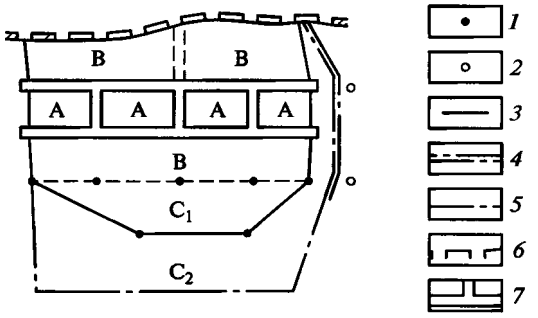


Рис. 6.4. Оконтуривание крутопадающего рудного тела для подсчета запасов полезного ископаемого (продольная вертикальная проекция):

1 — скважины, пересекающие рудное тело, *2* — скважины, показавшие отсутствие рудного тела, *3* — внутренний контур интерполяции, *4* — внешний контур ограниченной экстраполяции, *5* — внешний контур неограниченной экстраполяции, *6* — наносы, вскрытые канавами, *7* — подземные горные выработки; A, B, C_1, C_2 — категории запасов

На тех участках, где границы рудных тел вскрываются горными выработками или скважинами, опорные точки контуров устанавливаются непосредственно в них с использованием тех приемов, которые упомянуты ранее, при характеристике границ рудных тел.

На тех участках, где границы рудного тела располагаются за пределами выработок, опорные точки определяются либо методами интерполяции (между выработками, одна из которых вскрывает кондиционные руды, другая — некондиционные), либо методами ограниченной или неограниченной экстраполяции. Во всех подобных случаях производятся расчеты, в которых учитываются геологические особенности рудных тел: характер распределения полезного компонента, структурные особенности месторождения и т.д.

Особенно сложной задачей является проведение контуров за пределами разведочных выработок: на неизученных флангах или глубоких горизонтах. В этих случаях используют всю совокупность имеющихся сведений по месторождению: особенности морфологии тела, закономерности изменчивости, геофизические данные, статистические характеристики и т.д.

Иногда допускаются геометрические или формальные приемы оконтуривания, когда граница рудного тела экстраполируется на расстояния, кратные размеру разведочной ячейки, и т.д.

6.2. Определение параметров для подсчета запасов

Запасы какого-либо компонента, например металла в недрах рудного месторождения, определяют по формуле $P = Q\bar{C}$, где P — запасы полезного компонента; Q — запасы минерального сырья, руды; $\bar{C}$ — среднее содержание металла в руде. Если $\bar{C}$ выражено в процентах, то $P = Q\bar{C}/100$. Запасы руды Q рассчитывают по формуле $Q = Vd$, где V — объем тела полезного ископаемого или той его части, по которой производится подсчет запасов; d — объемная масса минерального сырья в недрах. Объем тела полезного ископаемого определяют по формуле $V = S\bar{m}$, где S — площадь тела полезного ископаемого или его части; $\bar{m}$ — средняя мощность тела в пределах контура подсчитываемых запасов.

Таким образом, запасы металла можно выразить в следующем виде: $P = S\bar{m}d\bar{C}$.

В России запасы полезных ископаемых принято оценивать количеством их в недрах, без учета возможных потерь при добыче. В западных странах обычно указывают извлекаемые запасы, т.е. запасы в недрах минус возможные потери.

Итак, практически для любого способа подсчета запасов твердых полезных ископаемых необходимо знать основные параметры: пло-

щадь и мощность рудного тела, объемную массу руды и среднее содержание металла в ней.

Измерение *площадей* рудных тел проводится на вертикальных, горизонтальных или наклонных проекциях различными способами: геометрическим по формуле ориентированной площади, с помощью планиметра, курвиметра или палетки.

В пределах контура подсчета запасов *мощность* рудного тела определяется по данным горных выработок или буровых скважин либо непосредственными измерениями (для рудных тел с четкими границами), либо по данным опробования. Среднее значение мощности определяется способом среднего арифметического, если изменение мощности тела не подчиняется какой-либо закономерности или эта закономерность не выявлена:

$$\bar{m} = \frac{\sum m_i}{n}.$$

Если изменение мощности является закономерным (например, плавное сокращение мощности при выклинивании тела), то при резко неравномерном распределении пунктов замера мощностей средняя мощность должна определяться способами средневзвешенного:

$$\bar{m}_I = \frac{\sum m_i I_i}{\sum I_i},$$

где I_i — интервал влияния i-й пробы. При крайне сложной форме тела величину I_i заменяют площадью влияния отдельного замера (S_i):

$$\bar{m}_s = \frac{\sum m_i S_i}{\sum S_i}.$$

Объемную массу, влажность и другие физико-механические свойства минерального сырья определяют лабораторными методами, иногда полевыми (объемную массу).

Содержания полезных компонентов. Ценные компоненты определяют в пробах в виде элемента, его простейших соединений или в виде ценного минерала. Для коренных месторождений твердых полезных ископаемых содержание элемента или его химических соединений подсчитывается в процентах или в граммах (миллиграммах) на 1 т.

Содержание висмута, железа, никеля, олова, ртути, свинца и многих других металлов определяется в виде элементов. Бериллий, ванадий, вольфрам и другие определяются в виде оксидов: BeO, V_2O_5, WO_3, Li_2O, TiO_2, U_3O_8. Содержание барита, графита, корунда подсчитывается в процентах этих минералов к массе минерального сырья. Содержание слюды определяется в килограммах на 1 $м^3$ сырья,

а оптических минералов — в килограммах на 1 м^2 площади тела полезного ископаемого.

Для россыпных месторождений содержание ценного компонента определяется на 1 м^3 породы: золота, платины — в граммах (миллиграммах), ильменита, вольфрамита, касситерита, киновари, корунда, монацита — в граммах или килограммах, алмазов — в каратах или миллиграммах.

Среднее содержание полезного компонента в выработках, разрезах, разведочных сечениях для подсчета запасов рассчитывается обычно среднеарифметическим или средневзвешенным способом:

$$\bar{C}_i = \frac{\sum C_i}{n}.$$

При вычислении средневзвешенного содержания взвешивание можно производить на опробованную мощность тела (m_i), длину влияния отдельных проб (l_i), объемную массу руды (d_i), площадь влияния отдельных проб (S_i) и на комбинированные значения этих величин, например:

$$\bar{C}_{\text{в}} = \frac{\sum C_i m_i l_i d_i S_i}{\sum m_i l_i d_i S_i}.$$

Выявление и учет ураганных проб. В некоторых случаях при вычислении средних содержаний встречаются пробы, выделяющиеся своим исключительно высоким содержанием. Учет таких проб наравне с остальными приводит к резкому завышению среднего содержания, точнее, к искажению фиксируемого опробованием среднего содержания на величину, превышающую вероятную ошибку данного опробования.

Основные особенности ураганных проб могут быть сведены к следующему (Прерис, 1974):

1. Ураганными считаются единичные пробы с большими содержаниями, которые по величине несоизмеримы с основной массой проб и наличие которых в подсчетных выборках приводит к резкому искажению средних содержаний.

2. Эффект ураганных проб наблюдается только при вычислении средних содержаний.

3. Ураганные пробы наблюдаются на месторождениях редких и драгоценных металлов. Никто не отмечал появления ураганных проб при вычислении мощностей или средних содержаний черных металлов. Причина заключается в том, что распределения редких и драгоценных элементов в рудах обладают резко выраженной положительной асимметрией.

4. Эффект ураганных проб наблюдается редко и только при сравнительно малых объемах подсчетных выборок (обычно до сотни единиц).

Единых способов выявления и учета ураганных проб нет, хотя известно множество различных рекомендаций. Их можно подразделить на две группы: эмпирические и аналитические.

Эмпирические методы учета выдающихся проб достаточно разнообразны. Среди них В. И. Смирнов указывает следующие приемы:

1) вычисление среднего содержания металла без учета выдающихся проб при их полном исключении;

2) замена выдающихся проб максимально высоким содержанием, принятым для данного месторождения на основании опыта его изучения, разведки и эксплуатации;

3) замена выдающихся проб средним содержанием по выработке или по блоку, вычисленным без учета выдающихся проб;

4) замена выдающихся проб средним содержанием по выработке или по блоку, вычисленным без учета выдающихся проб и проб с очень низким содержанием;

5) замена выдающихся проб средним содержанием по выработке или по блоку, вычисленным с учетом всех проб, включая выдающиеся;

6) замена выдающейся пробы средним содержанием, вычисленным по двум соседним пробам, примыкающим по местоположению к выдающейся;

7) замена выдающейся пробы средним содержанием, вычисленным по трем пробам: выдающейся и двум средним, к ней примыкающим;

8) уменьшение вдвое удельного значения выдающейся пробы.

Аналитические методы также многочисленны. Из их числа можно выделить те, в которых содержится попытка более или менее точных вычислений предельных величин нормальных проб.

1. Способ Н. В. Володомонова. Предельное верхнее содержание компонента в нормальных пробах определяется по формуле

$$\mathrm{H_c} = \bar{C} + \frac{\bar{C}(n+1)A}{100},$$

где A — коэффициент влияния выдающихся проб, принимаемый равным 10, 15 или 20 % (для разных условий).

2. Способ Г. И. Вилисова. К ураганным пробам рекомендуется относить те, которые превышают величину

$$H_c = \bar{C} + t_\alpha S,$$

где t_α — значение стандартизованного нормального распределения для доверительной вероятности α; S — среднеквадратическое отклонение.

3. Способ В. И. Кузьмина. Граница между нормальными и выдающимися пробами определяется по формуле

$$H_c = \bar{C}(1 + 0{,}045V) + \sigma_c,$$

где $\sigma_c = \frac{t_\alpha S}{\sqrt{n}}$ — погрешность определения среднего для доверительной вероятности α; V — коэффициент вариации.

4. Способ В. Н. Гудкова. Граница принимается равной $H_c = \sigma_c n + \bar{C}$, где σ_c — погрешность определения среднего содержания.

5. Способ Н. Христова. Предельная величина нормальных проб $H_c = \bar{C} + KS$, где K — коэффициент, зависящий от объема выборки (от 10 до 220 ед.), его величина изменяется от 5,42 до 3,3.

6. Способ А. П. Прокофьева. Коэффициент влияния наибольшей пробы на среднее содержание определяется по формуле

$$M_{вл} = \frac{\bar{C} - \bar{C}_{б.у.}}{\bar{C}_{б.у.}},$$

где $\bar{C}_{б.у.}$ — среднее без учета ураганной пробы, и не должен превышать 0,2. В противном случае проба считается ураганной и заменяется величиной верхнего предела: $C = \bar{C}_{б.у.}(M_{вл}n + 1)$, где $M_{вл}$ — предельный коэффициент влияния, принимаемый равным 0,2, иногда 0,1.

6.3. Обзор традиционных способов подсчета запасов

Методы подсчета запасов разделяются на традиционные и геостатистические. Принципиальное различие заключается в том, что в традиционных способах разведочные параметры рудных тел считаются случайными переменными, а в геостатистических — случайными функциями. В самой математической статистике нет четкой границы между случайными переменными и случайными функциями.

Пожалуй, самое главное отличие геостатистики заключается в том, что изменчивость значений изучаемых признаков не остается постоянной, а меняется в пространстве.

Все традиционные способы подсчета запасов основаны на двух главных принципах: 1) распространении фактических данных о параметрах подсчета, полученных в отдельных естественных обнажениях, горных выработках и скважинах, на прилегающие участки; 2) преобразовании сложных по форме тел полезных ископаемых в равновеликие им по объему простые тела и округлении объема, а следовательно, и запасов минерального сырья в пределах последних.

При геостатистическом подсчете первый названный принцип, пожалуй, сохраняется (в несколько измененном виде). А вот преобразование рудных тел в равновеликие простые геометрические фигуры уже не делается. Это произошло благодаря появлению программ

трехмерного моделирования месторождений. Бóльшая часть данной главы посвящена геостатистике. Поэтому здесь для сравнения приводится краткий обзор традиционных методов.

В настоящее время известно более двадцати традиционных способов подсчета запасов твердых полезных ископаемых, из них наиболее часто используют три — геологических блоков, эксплуатационных блоков и геологических разрезов. Другие методы применяют в единичных случаях или используют в качестве параллельных методов для получения сравнительных данных. Дело в том, что сейчас в связи с широким применением компьютерной техники имеется возможность вести подсчет запасов одновременно несколькими методами, что нередко используется геологами для сопоставления данных, полученных разнымм методами, и их сравнительной оценки.

Способ геологических блоков. Этот способ, впервые описанный В. И. Смирновым, самый простой и наименее трудоемкий. Частным случаем его является метод *среднего арифметического* или, как его иногда называют, суммарный метод, когда все тело полезного ископаемого рассматривается как один геологический блок.

Оконтуривание рудного тела производится обычным способом. Площадь тела на графической проекции измеряется планиметром или палеткой, либо любым другим способом. Мощность $\bar{m}$ вычисляется как среднее арифметическое по данным всех горных выработок и скважин, пересекших тело полезного ископаемого:

$$\bar{m} = \sum \bar{m}_i / n.$$

Объем тела V вычисляется как произведение площади на среднюю мощность. Таким образом, при подсчете запасов этим способом ограниченное сложными поверхностями тело приравнивается к равновеликой фигуре, имеющей форму пластины с постоянной высотой и периметром, соответствующим внешнему контуру тела (рис. 6.5).

Среднее содержание компоненты $\bar{C}$ определяется, как и среднее арифметическое всех частных содержаний по отдельным выработкам:

$$\bar{C} = \sum C_i / n.$$

Так же вычисляется средняя величина объемной массы. Запасы сырья Q определяют по формуле $Q = Vd$, запасы компонентов P — по формуле $P = Q\bar{C}$.

Способ среднего арифметического применяется в основном для ориентировочной оценки запасов, однако при достаточно большом количестве пересечений рудного тела выработками или скважинами он дает достаточно точные результаты. К недостаткам этого метода относятся излишнее упрощение формы и недостаточная надежность результатов в случае месторождений со сложными телами. Кроме

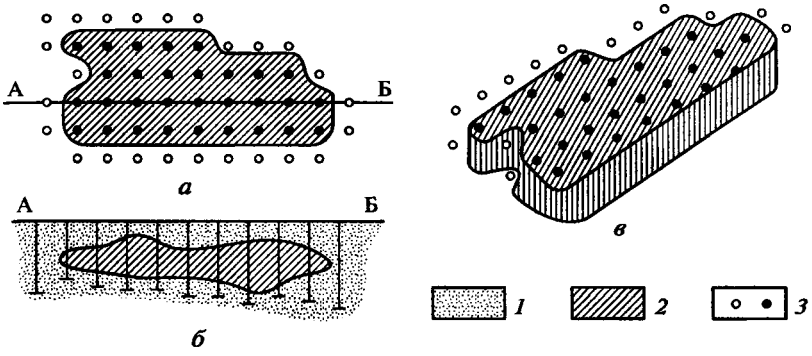


Рис. 6.5. Схема преобразования формы тела полезного ископаемого при подсчете его запасов методом среднего арифметического (по А. П. Прокофьеву):

а — план; *б* — разрез; *в* — аксонометрическая проекция преобразованного тела; *1* — вмещающие породы; *2* — тело полезного ископаемого, *3* — горные выработки, вскрывшие (черные кружки) и не вскрывшие (белые кружки) полезное ископаемое

того, метод среднего арифметического не дает возможности раздельного подсчета запасов различных сортов и типов руд.

При подсчете запасов способом геологических блоков площадь тела полезного ископаемого разделяется на отдельные участки и подсчет запасов в пределах выделенных таким образом блоков производится по способу среднего арифметического. Тело полезного ископаемого в данном случае как бы преобразуется в совокупность сомкнутых призм, высота которых равняется средней мощности каждого блока (рис. 6.6).

Графические построения сводятся к общему оконтуриванию рудного тела наиболее приемлемым в каждом данном случае способом и расчленению охваченной общим контуром площади на блоки. Разделение рудного тела на блоки может производиться по различным признакам, но обязательно существенным для характеристики качества, условий залегания, надежности оценки запасов или других особенностей месторождения. К числу таких признаков относятся: 1) сорта и типы полезного ископаемого, отличающиеся уровнем содержания полезных и вредных компонентов, технологическими свойствами и др.; 2) степень разведанности запасов и возможность выделения запасов различных категорий; 3) различная мощность уча-

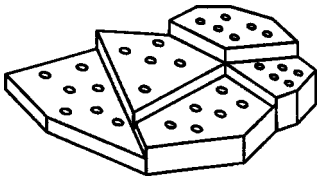


Рис. 6.6. Преобразование тела полезного ископаемого в группу сомкнутых разновеликих фигур при подсчете запасов по способу геологических блоков (по В. И. Смирнову)

стков тел, определяющая особенности систем разработки; 4) существенные особенности горно-технических или гидрогеологических условий.

Разделять площадь тела полезного ископаемого на блоки по другим признакам (в частности, с единственной целью получения большего количества блоков малых размеров) не рекомендуется. Точность подсчета запасов зависит при прочих равных условиях от количества исходных данных; поэтому чем крупнее будут блоки и чем на большее количество пересечений будет опираться подсчет, тем точнее будут результаты.

Общие запасы минерального сырья и компонентов получают суммированием запасов по отдельным участкам и блокам.

Метод геологических блоков рекомендуется для подсчета запасов как простых, так и сложных тел полезных ископаемых. Основным достоинством метода является необычайная простота графических построений и вычислительных операций. Кроме того, при этом методе с достаточной полнотой и наглядностью удается учесть почти все особенности геологического строения рудных тел.

Способ эксплуатационных блоков. Этот способ применяется при подсчете запасов жильных или маломощных пластовых месторождений, рудные тела которых в процессе подготовки к эксплуатации нарезаны горными выработками на эксплуатационные блоки (рис. 6.7).

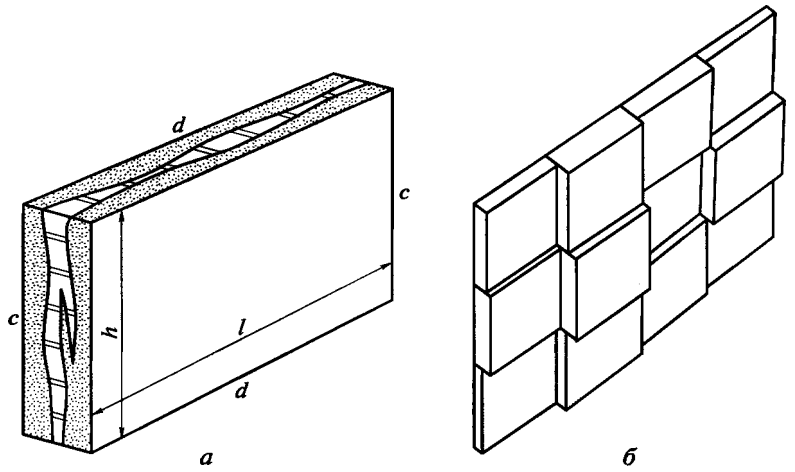


Рис. 6.7. Способ эксплуатационных блоков:

а — эксплуатационный блок, оконтуренный с четырех сторон горными выработками: *d* — штреки, *c* — восстающие (горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на поверхность), *l* — длина блока, *h* — высота блока; *б* — преобразование тела полезного ископаемого в группу сомкнутых по штрекам и восстающим параллелепипедов при подсчете запасов по способу эксплуатационных блоков

Блоками являются части рудного тела, оконтуренные и опробованные с четырех сторон: сверху и снизу — штреками, а по бокам — восстающими. Некоторые блоки могут быть оконтурены не полностью, и тогда в расчет принимаются только те их стороны, которые ограничены горными выработками.

Запасы в пределах каждого блока подсчитывают по среднеарифметическому способу, а общие запасы определяют суммированием запасов всех блоков.

Таким образом, сложная форма тела полезного ископаемого как бы преобразуется в ряд сомкнутых по штрекам и восстающим разновеликих параллелепипедов (или напоминающих их тел), высота которых равняется средней мощности по каждому блоку, а основание — площади блоков.

Графические построения сводятся к изображению продольной проекции тела полезного ископаемого на основании маркшейдерских данных.

Запасы минерального сырья по каждому блоку определяют произведением площади блока на среднюю мощность по блоку и на среднюю величину объемной массы, запасы компонента — произведением запасов сырья на среднее содержание, вычисленное для блока.

Достоинства способа эксплуатационных блоков заключаются в простоте графических построений и вычислительных операций, возможности выделения участков минерального сырья различного качества, а главное в удобстве для проектирования эксплуатационных работ.

Недостатками этого способа являются ограниченные возможности его применения — только при условии нарезки рудных тел горными выработками; при этом мощность рудного тела, как правило, не должна превышать ширину выработок.

Способ геологических разрезов. Данный способ широко используется при подсчете запасов месторождений, разведанных выработками, расположенными по разведочным линиям, на основании которых можно построить геологические разрезы.

Строить разрезы, пересекающие тела полезных ископаемых, можно в плоскостях, секущих тело либо в вертикальном направлении, когда разведка осуществлялась по вертикальным линиям, либо в горизонтальном, когда разведка проводилась по горизонтам. В связи с этим различают две разновидности данного метода — метод вертикальных и метод горизонтальных разрезов. Принципы подсчета запасов для этих разновидностей одни и те же.

Геологические разрезы расчленяют тело на отдельные блоки. Все блоки, кроме краевых, ограничены двумя секущими плоскостями. Крайние блоки ограничены плоскостью сечения только с одной стороны, а с остальных их ограничивает неправильная поверхность тела полезного ископаемого (рис. 6.8).

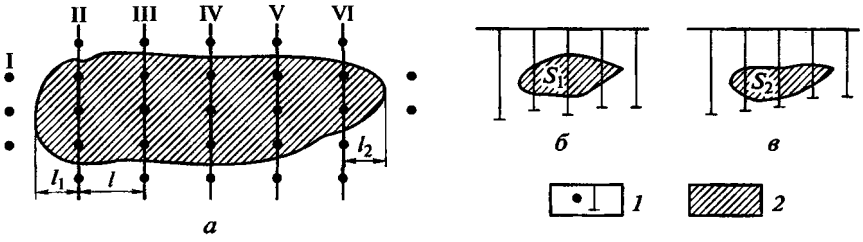


Рис. 6.8. Схема расположения подсчетных блоков при определении запасов полезного ископаемого методом разрезов (по А. П. Прокофьеву):

а — план; *б* — разрез по линии II; *в* — разрез по линии III; *l* — расстояние между разрезами; l_1, l_2 — расстояния от разрезов до выклиниваний; S_1 — площадь сечения рудного тела в разрезе по линии II; S_2 — площадь сечения рудного тела в разрезе по линии III; *1* — разведочные выработки, *2* — рудное тело

Запасы минерального сырья и компонентов определяются раздельно для каждого блока. Общие запасы получают суммированием запасов всех блоков.

Для вычисления объема блока используют определенные формулы.

1. Когда площади сечений тела полезного ископаемого на разрезах, ограничивающих блок, более или менее равновелики, а сечения близки к параллельным, используют формулу призмы

$$V = \frac{S_1 + S_2}{2} l,$$

где V — объем блока; S_1 и S_2 — площади сечений тела на разрезах; l — длина блока (расстояние между разрезами).

2. Если площади параллельных сечений, ограничивающих блок, имеют изометрическую форму и подобны, но по величине резко отличаются друг от друга (более чем на 40 %), объем блока вычисляют по формуле усеченной пирамиды

$$V = \frac{S_1 + S_2 + \sqrt{S_1 - S_2}}{3} l.$$

Для крайних блоков, которые опираются только на одно сечение, объем может быть определен также по соответствующим формулам, в зависимости от характера выклинивания тела.

1. По формуле клина

$$V = \frac{S_1 l_1}{2},$$

где l_1 — расстояние от плоскости сечения до точки выклинивания тела полезного ископаемого.

2. По формуле конуса $V = \frac{S_2 l_2}{3}$ при тех же значениях параметров.

Запасы минерального сырья (руды) определяют путем умножения объема блока на объемную массу. Средняя величина объемной массы, как и средние содержания полезных компонентов для блока, вычисляется по замерам в выработках для каждого сечения, а затем, если блок ограничен двумя сечениями, из данных двух разрезов способом среднего арифметического или среднего взвешенного на площади сечений.

Запасы полезного компонента (металла) в блоке определяют путем умножения среднего содержания на величину запасов сырья (руды).

Способ разрезов обеспечивает наиболее правдоподобное преобразование объемов залежей, позволяет наиболее полно учесть и отразить геологические особенности строения месторождений. Применение этого способа эффективно и, по существу, безальтернативно при подсчете запасов залежей сложной формы и большой мощности. Наиболее существенный недостаток способа разрезов — ограниченность его применения только для объектов, разведанных системами поперечных разведочных разрезов.

Линейный способ является разновидностью способа разрезов; наиболее широко применяется при подсчете запасов россыпных месторождений. По описанию В. И. Смирнова, подсчет запасов по линейному способу осуществляется последовательным суммированием запасов от мельчайших участков тела полезного ископаемого, расположенных на разведочной линии, до общего учета запасов на площадях, расположенных между линиями. Подсчет производится следующим образом:

1) определяются запасы участков, расположенных между двумя соседними выработками или скважинами на разведочной линии при ширине этих участков 1 м (измеряемых вкрест линии);

2) суммируются запасы указанных в п.1 участков, что дает запасы в ленте шириной 1 м, следующей по разведочному сечению;

3) благодаря запасам в лентах по сечениям определяются запасы участков между сечениями или участков, прилегающих к каждому сечению;

4) суммируются запасы отдельных участков, что дает общие запасы по месторождению.

Запасы участков, расположенных между двумя соседними выработками или скважинами на разведочной линии при ширине 1 м (рис. 6.9, *а*), рассчитывают по формуле

$$q = [(m_1 + m_2)/2] l_1 d,$$

где q — запасы участка; m_1 и m_2 — мощность тела полезного ископаемого по выработкам; l_1 — расстояние между выработками или

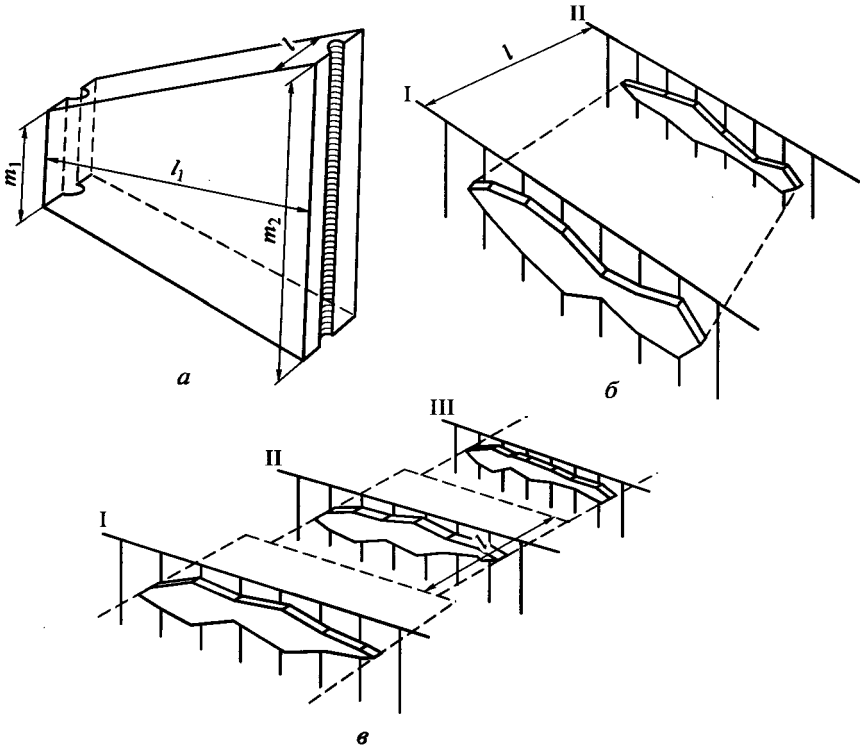


Рис. 6.9. Подсчет запасов полезного ископаемого линейным способом (по А. П. Прокофьеву):

а — на участке между двумя выработками на разведочной линии шириной 1 м: *l* — ширина разведочной линии 1 м, l_1 — расстояние между скважинами 1 и 2 в разрезе, m_1 — мощность рудного тела по скважине 1, m_2 — мощность рудного тела по скважине 2; *б* — на площади между двумя разведочными линиями: *l* — расстояние между смежными разрезами I и II; *в* — на площади, прилегающей к разведочным линиям: *l* — расстояние от середины расстояния между разрезами I и II до середины расстояния между разрезами II и III

скважинами на разведочной линии; *d* — объемная масса минерального сырья (руды).

Запасы полезного компонента (металла) каждого выделенного участка определяют как произведение запасов минерального сырья на среднее содержание компонента.

Запасы руды и металла в разведочном сечении на ширину его 1 м подсчитывают суммированием частных запасов по отдельным участкам.

Запасы сырья между линиями (рис. 6.9, *б*) определяют по формуле

$$Q = [(Q_I + Q_{II})/2]l,$$

где Q — запасы сырья на площади между разведочными линиями I и II; Q_I и Q_{II} — запасы сырья в лентах шириной 1 м по разведочным линиям (линейные запасы); l — расстояние между линиями.

Запасы компонента (металла) определяют по формуле

$$P = [(P_I + P_{II})/2]l,$$

где P — запасы компонента на площади между разведочными линиями I и II; P_I и P_{II} — запасы компонента в лентах шириной 1 м по разведочным линиям (линейные запасы); l — расстояние между линиями.

Если подсчетный блок опирается на одну разведочную линию, то запасы на участке (рис. 6.9, *в*), прилегающем к линии (на площади влияния линии), определяют по формуле

$$Q = Q_I l^1, \quad P = P_I l^1,$$

где Q и P — запасы соответственно руды и металла на площади, прилегающей к разведочной линии; l^1 — ширина влияния разведочной линии, равная полусумме расстояний до соседних линий.

Интересно, что в руководствах по работе с 3D-программами Surpac и Micromine наряду с геостатистическими методами подсчета запасов рекомендуется использование полигонального метода подсчета запасов, который, по сути, очень близок описанному.

Приведенные формулы применимы в тех случаях, когда линии разведочных выработок или горизонты их расположены более или менее параллельно друг другу. Если же линии разведочных выработок непараллельные, то определение объемов блоков, расположенных между сходящимися разрезами, производится *способом непараллельных сечений*, предложенным А. П. Прокофьевым. Суть его можно пояснить следующим примером. На плане подсчета запасов (рис. 6.10, *а*) блок между разведочными линиями I—I и II—II делится вспомогательной линией на две части (по принципу ближайшего района). Для этого вспомогательные линии $a_1 - a_2$ и $b_1 - b_2$ делятся пополам и полученные точки C_1 и C_2 соединяются прямой, которая делит площадь подсчетного блока на две площади S_1' и S_2'. Нетрудно показать, что объем части блока, прилегающей к разрезу I—I, можно определить по формуле

$$V_1 = S_1 \times S_1'/l_1,$$

где V_1 — объем части блока, прилегающей к разрезу I—I; S_1 — площадь сечения тела по разведочной линии I—I; S_1' — площадь влияния разведочной линии I—I; l_1 — длина разведочной линии I—I ($a_1 b_1$).

Объем части блока, прилегающей к разрезу II—II, определяют по аналогичной формуле. Общий объем подсчетного блока будет равен сумме $V_I + V_{II}$. Среднее содержание полезного компонента и объем-

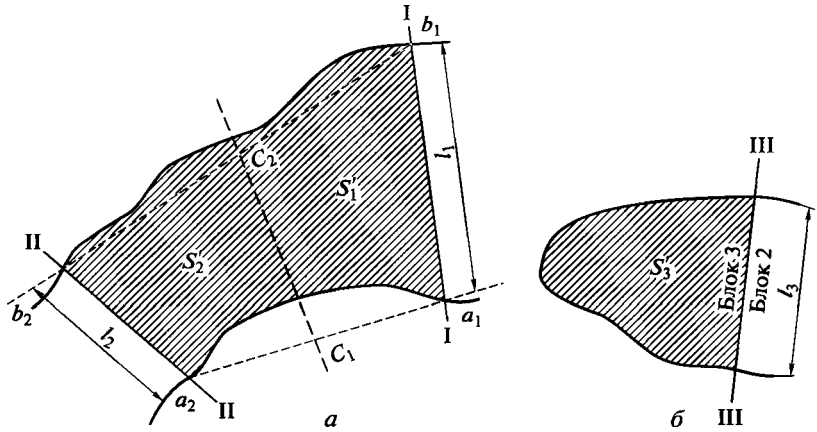


Рис. 6.10. Схема подсчета запасов полезного ископаемого (по А. П. Прокофьеву):

а — между непараллельными сечениями; *б* — в пределах неровного контура блока (пояснения см. в тексте)

ная масса принимаются как средние значения между данными по разрезам.

Объем блоков, имеющих неровные границы (например, блок 3 на рис. 6.10, *б*), предлагается определять по формуле

$$V_{III} = S_3 \times S_3' / 2l_3,$$

где V_{III} — объем блока, имеющего неправильный контур; S_3 — площадь сечения тела по разведочной линии III—III; S_3' — площадь блока в плане; l_3 — длина разведочной линии.

Способ разрезов часто комбинируется с другими способами. Например, запасы верхних горизонтов крутопадающего тела, разведанных горными выработками с нарезкой эксплуатационных блоков, подсчитывают способом эксплуатационных блоков, а нижних горизонтов, разведанных небольшим количеством горных выработок или буровыми скважинами, — способом разрезов. В зависимости от особенностей методики разведки могут быть использованы и другие комбинации способов подсчета запасов.

Способ многоугольников. В геологии этот способ называется также способом ближайшего района, или способом Болдырева, по имени А. В. Болдырева, обосновавшего его применение для подсчета запасов. В геометрии ближайшие к точкам районы именуются областями Вороного в честь крупнейшего русского петербургского геометра начала XX в. А. Б. Вороного.

Сущность способа сводится к выделению вокруг каждого пункта пересечения тела полезного ископаемого горной выработкой или скважиной участка, все точки которого ближе к этой выработке, чем

к любой соседней. Вспомогательные построения заключаются в том, что на плане подсчета запасов каждую выработку соединяют с соседними прямыми линиями. Затем каждая такая вспомогательная линия делится пополам перпендикуляром к ней. Перпендикуляры, встречаясь друг с другом, замыкают вокруг каждой выработки многоугольник, являющийся «ближайшим районом», все точки которого ближе к расположенной в центре выработке, чем к любой соседней, и на который распространяются данные, полученные по этой выработке (рис. 6.11). Таким образом, весь подсчетный план расчленяется на систему многоугольников, а тело полезного ископаемого как бы преобразуется в группу сомкнутых многогранных призм, основанием которых служат построенные многоугольники, а высотой является мощность тела по выработке, расположенной в центре многоугольника (см. рис. 6.11).

Запасы полезного ископаемого вычисляют в каждой призме на основании данных одного разведочного пересечения. Общие запасы тела определяют суммированием запасов всех призм.

Способ многоугольников прост, но обладает рядом крупных недостатков, главнейшим среди которых является невозможность надежно выделять сорта и типы полезного ископаемого, поскольку формальные контуры многоугольников не соответствуют природным границам, разделяющим тела на участки различного состава. Кроме того, этот метод применим только при разведке месторождения скважинами, которые перпендикулярны рудному телу. Например, горизонтальное рудное тело разведано вертикальными буровыми скважинами. Если месторождение разведуется наклонными буровыми скважинами, этот способ неприменим. По названным причинам способ многоугольников имеет весьма ограниченное применение.

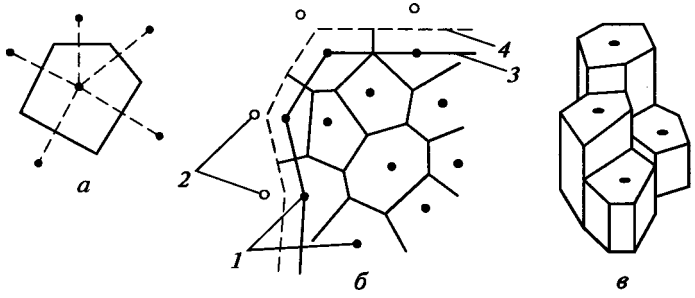


Рис. 6.11. Подсчет запасов полезного ископаемого по способу многоугольников:

а — построение многоугольника на подсчетном плане вокруг одной из разведочных скважин; *б* — фрагмент подсчетного плана: *1* — скважины, пересекающие тело полезного ископаемого, *2* — скважины, показывающие отсутствие тела полезного ископаемого, *3* — внутренний контур, *4* — внешний контур; *в* — перспектива фрагмента тела полезного ископаемого, трансформированного в группу многогранных призм

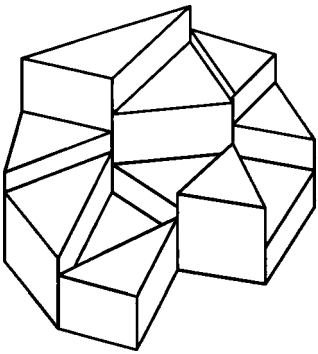


Рис. 6.12. Подсчет запасов полезного ископаемого по способу треугольников.

Перспективное изображение фрагмента тела полезного ископаемого, трансформированного в группу трехгранных призм

Способ треугольников. Если всю плоскую область разбить на треугольники, то рудное тело окажется разделенным на треугольные призмы (рис. 6.12). По трем значениям мощностей, зафиксированных в скважинах, пробуренных в вершинах соответствующего треугольника, вычисляется средняя мощность треугольной призмы. Путем умножения площади треугольника на среднюю мощность определяют объем треугольной призмы. По трем средним содержаниям полезного компонента в каждой из трех скважин рассчитывается общее среднее содержание в призме. Общие запасы рудного тела определяют суммированием запасов по всем треугольным призмам.

Данному способу присущи те же недостатки, что и методу многоугольников. Кроме того, этот способ применим только в случае, когда стволы всех скважин пробурены строго параллельно друг другу. Например, в случае разведки горизонтально залегающего рудного тела все скважины должны быть пробурены строго вертикально. У этого способа к тому же есть определенные неясности в проведении внешнего контура рудного тела.

Провести триангуляцию плоской области (разбить ее на треугольники) можно по-разному. Любой четырехугольник можно разбить на два треугольника двумя способами. Чтобы получить однозначное разбиение на треугольники, используют алгоритм разбиения, предложенный в 1924 г. российским математиком-геометром Б. Н. Делоне. Этот алгоритм подробно описан в гл. 5 о компьютерном моделировании месторождений полезных ископаемых.

Способ треугольников как процедура подсчета запасов геологами практически не применяется. Но одна из его главных частей — триангуляция Делоне — широко используется при каркасном моделировании месторождений. Тем самым в несколько завуалированном виде способ треугольников присутствует в геостатистических методах оценки запасов.

Способ изолиний. Сущность способа состоит в том, что тело полезного ископаемого, ограниченное со всех сторон сложными поверхностями, преобразуется в равновеликое тело, ограниченное

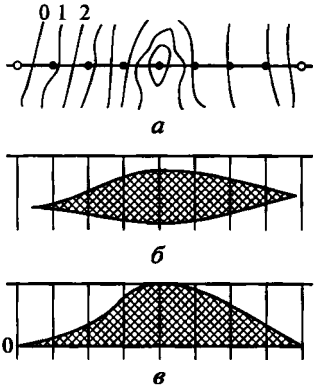


Рис. 6.13. Подсчет запасов полезного ископаемого по методу изолиний (по А. П. Прокофьеву) (пояснения см. в тексте):

а — план части тела полезного ископаемого в изолиниях мощности; *б* — разрез тела полезного ископаемого по разведочной линии; *в* — разрез равновеликого тела, ограниченного с одной стороны плоскостью, а с другой — топографической поверхностью

с одной стороны плоскостью, а с другой — топографической поверхностью, т. е. поверхностью, которая может быть изображена системой замкнутых изолиний равной высоты (рис. 6.13).

Объем такого тела, а следовательно, и запасы его могут быть вычислены по известным формулам определения объема, ограниченного топографической поверхностью.

Графические построения при этом способе сводятся к следующему. На подсчетном плане рядом с каждой выработкой, пересекшей залежь, указывается ее мощность. Затем обычным способом интерполяции проводят изолинии мощности. Объем тела, ограниченного топографической поверхностью (т. е. системой изолиний мощностей), определяется одним из трех способов по формулам: 1) приближенного интегрирования; 2) усеченного конуса; 3) трапеций.

Вычисление по формуле приближенного интегрирования

$$V = \frac{h}{3}\left[\left(S_0 + S_n\right) + 4\left(S_1 + S_3 + S_5 + \ldots\right) + 2\left(S_2 + S_4 + S_6 + \ldots\right)\right] \pm \frac{1}{3}\sum S_m h.$$

Вычисление по формуле усеченного конуса

$$V = \frac{h}{3}\sum\left(S_{n-1} + S_n + \sqrt{S_{n-1}S_n}\right) \pm \frac{1}{3}\sum S_m h.$$

Вычисление по формуле трапеций

$$V = h\left(\frac{S_m}{2} + S_1 + S_2 + \ldots + S_{n-1} + \frac{S_4}{2}\right) \pm \sum S_m h.$$

Во всех формулах: V — объем тела, ограниченного системой изолиний равных высот; h — расстояние между сечениями (цена сечения): S_0 — площадь, ограниченная нулевой изолинией; S_1, S_2, ... — площади, ограниченные соответствующими изолиниями; S_m — площадь конечных впадин и выступов: площади впадин берутся со знаком «минус», а площади выступов со знаком «плюс».

Вычисление объема можно проводить и другими способами.

Запасы руды вычисляются как обычно умножением объема на среднее значение объемной массы, запасы металла — умножением объема тела на среднюю объемную массу и среднее содержание металла.

Вместо изолиний равных мощностей можно строить сразу изолинии произведения мощности на объемную массу, тогда при вычислении получается запас руды. Если строить изолинии равных произведений мощности на содержание и объемную массу, то при вычислении получаются сразу запасы металла.

Главное достоинство метода изолиний — наглядность, недостаток — сложность графических построений. Наиболее часто этот способ используют при подсчете запасов месторождений строительных материалов, разрабатываемых открытым способом. Для подсчета запасов некоторых подобных месторождений могут быть использованы топографические карты.

При использовании 3D-программ расчеты объема рудного тела производят мгновенно. Но главное в другом. Совершенно нет необходимости в построении равновеликого тела. В каркасной модели все точки остаются на своих местах и не происходит никаких искажений формы рудного тела при его проецировании на плоскость.

6.4. Точность подсчета запасов

Точность подсчета запасов зависит от сложности геологического строения объекта, детальности его разведки и точности определения основных параметров, входящих в подсчет. Погрешности, возникающие при подсчете, подразделяют на три основные группы: 1) геологические (ошибки аналогии), связанные с распространением фактических данных, полученных при разведке по отдельным выработкам и скважинам, на ближайшие участки: 2) технические, связанные с техникой замеров и определения исходных параметров для подсчета запасов, к которым относятся точность замеров мощности, точность химических анализов, точность определения объемной массы и др.; 3) связанные с применением различных методов подсчета запасов.

Погрешности аналогии подвержены резким колебаниям, величина их зависит от степени изменчивости месторождения, а также от плотности и равномерности разведочной сети. Геологическими по-

грешностями обусловлены наиболее крупные ошибки подсчета запасов. Установлено, что геологическая погрешность при подсчете запасов высоких категорий А и В может доходить до 10—15 %. В отдельных случаях при неправильном понимании особенностей геологического строения месторождения она может быть и выше.

Технические ошибки могут быть случайными и систематическими. Неизбежные случайные погрешности обычно не оказывают существенного влияния на точность определения запасов, поскольку, обладая переменным знаком, они взаимно компенсируются.

Систематические погрешности, обладая одним знаком, оказывают одностороннее влияние на результаты подсчета и искажают их, в чем и заключается их чрезвычайная опасность. Поэтому, если имеются данные о возможности таких погрешностей, категории запасов должны быть снижены.

Наличие систематических погрешностей и величина устанавливаются специальными контрольными методами. На основании контрольных работ данные основных наблюдений могут быть откорректированы путем введения соответствующих поправочных коэффициентов. К их числу относятся, в частности, коэффициент рудоносности, поправочный коэффициент к результатам химических анализов, объемной массе и др.

Применение того или иного метода подсчета запасов не оказывает существенного влияния на результаты подсчета. Конечные цифры запасов, подсчитанные различными методами, в пределах одних и тех же контуров тел полезных ископаемых различаются на 1—5 %, что не превосходит пределов точности технических операций подсчета. Поэтому наиболее целесообразным считается применение таких методов подсчета, которые в полной степени соответствуют методике разведки, дают возможность полнее учитывать и отражать геологические особенности строения месторождения, его структуру, распределение сортов и типов минерального сырья и в то же время позволяют сократить затраты времени и средств, связанные с подсчетом запасов.

6.5. Геостатистические методы подсчета запасов

Под геостатистическими методами оценки запасов понимается целый комплекс взаимосвязанных процедур, которые можно примерно выстроить в такую последовательность: 1) создание базы геологических данных по изучаемому месторождению → 2) создание трехмерных каркасных моделей рудных тел → 3) создание трехмерных блочных моделей рудных тел → 4) вариография (изучение и описание изменчивости) всех интересующих признаков в месторождении (мощности, содержаний полезных компонентов, объемной массы) →

5) подбор модельных вариограммных функций → 6) перекрестная проверка пригодности кригинговых оценок → 7) подсчет запасов (кригинговая оценка запасов во всех блоках 3D-моделей всех рудных тел).

Начиная с момента завершения детальной разведки и вплоть до полной отработки месторождения рекомендуется пользоваться геостатистическими методами оценки запасов месторождений.

Геостатистика была введена в обиход геологов в начале 60-х гг. XX в. французским ученым Жоржем Матероном и его учениками А. Журнелем, М. Давидом, Ч. Хуйбрехтом, А. Марешалем. В 1962 г. Ж. Матерон защитил свою диссертацию. В 1964 г. она была издана в виде двухтомной монографии во Франции. Пропагандируя свои идеи, ученый опубликовал несколько статей в научных журналах, выступил с лекциями в ряде стран. Так, в 1966 г. Ж. Матерон прочел несколько лекций на геологическом факультете МГУ им. М. В. Ломоносова. В 1968 г. его монография, специально им переработанная, вышла в переводе на русский язык в СССР.

В 1970-е гг. ученики Матерона собрали и обработали громадный материал по месторождениям разных типов полезных ископаемых. Они развили и отшлифовали многие идеи своего учителя, опубликовали несколько монографий и учебников (А. Марешаль, 1975; М. Давид, 1977; А. Журнель и Ч. Хуйбрехт, 1978). До середины 1980-х гг. в журналах по математической геологии нет-нет да и появлялись статьи с критикой геостатистического подхода к решению задач подсчета запасов. Но к концу 80-х гг. геостатистика, можно сказать, завоевала уже весь мир. Она была признана всеми странами, кроме СССР и его преемницы — России.

Сложилась парадоксальная ситуация — Россия была первой страной в мире, в которой в переводе была издана книга Ж. Матерона, и именно она оказалась чуть ли не последней страной, в которой до сих пор геостатистика официально (на уровне ГКЗ — Государственного комитета по запасам) не «узаконена». В чем здесь дело?

Рудопотоки и микроблоки. А дело здесь в том, что в СССР горно-рудная и металлургическая промышленность была построена совсем по другим организационным и хозяйственным принципам, чем в развитых капиталистических странах. В этих странах редко бывает, когда одна и та же фирма и разрабатывает месторождение, и перерабатывает руду. Даже когда горняки и обогатители входят в одну корпорацию, взаимоотношения у них строятся на контрактной основе. Например, в контракте записано, что рудник должен поставлять на обогатительную фабрику каждые сутки 1 тыс. т медной сульфидной руды с содержанием меди $5{,}0 \pm 0{,}3$ %. Вариант поставки руды больше (или меньше), чем заявленные 1 тыс. т, даже не обсуждается. Рудник должен привезти на обогатительную фабрику ровно 1 тыс. т руды. К тому же она по качеству должна укладываться в заданный интервал содержаний меди — от 4,7 до 5,3 %. Если рудник поставит

более бедную руду, скажем 4 % меди, то несколько тонн дорогих флотационных агентов (в случае флотационного обогащения) израсходуется впустую. Если же рудник привезет более богатую руду (6 %), 1 % меди уйдет в хвосты, так как этих же флотационных агентов не хватит в растворах, чтобы извлечь этот один «лишний» процент меди. А это опять прямой убыток.

Значит, рудник должен *держать рудопоток постоянным по качеству и количеству*. А руда в разных местах месторождения разная — то богаче, то беднее. Поэтому нельзя отрабатывать один богатый участок или один бедный. Нужно руду из них смешивать, чтобы рудопоток не выходил за определенные пределы содержаний меди. Лучше отрабатывать сразу несколько участков с разными рудами, чтобы иметь простор для варьирования состава руд. Из практики известно, что неплохо, когда разрабатываются сразу четыре (или более) участка или блока. Какого размера должны быть эти блоки?

Пусть, как уже говорилось, рудник должен поставлять каждые сутки 1 тыс. т руды. Пусть объемный вес руды равен 3 т/м^3. Значит, 1 тыс. т руды будет занимать объем (в недрах до разрыхления) примерно 333,33 м^3. Если мы будем разрабатывать этот объем в четырех блоках, то каждый блок должен иметь объем приблизительно 83,33 м^3. Этот объем равен объему прямоугольного параллелепипеда со сторонами 5×4×4,17 м.

Конечно, размеры блока зависят от того, каким методом будет разрабатываться месторождение. В карьере размер блока будет определяться высотой добычного уступа. Если это подземная добыча, то она может осуществляться многими способами: слоевым обрушением, лавой, слоевым штреком, системами с магазинированием и др. Такие элементы горных выработок, как высота кровли подземной горной выработки, диктуют один из возможных размеров добычного блока — его высоту. Например, при сечении горной выработки 3×3 м (добыча слоевым штреком) для того, чтобы добыть 83,33 м^3 руды, придется нарезать блоки размером 3×3×9,26 м. Такую длину блока (9,26 м) можно будет пройти только за несколько уходок — циклов: бурение шпуров → отпалка → уборка руды и породы. За день провести несколько таких циклов не удастся. Тогда придется увеличить количество добычных забоев и, соответственно, снизить размеры блоков.

В общем, на размер блока влияют геологические причины, горные условия, особенности технологии обогащения, имеющееся добычное и транспортное оборудование. И решать вопрос о размерах блока, составляя проект будущего рудника, должны все вместе: геологи, горняки, технологи, специалисты по оборудованию и даже финансово-экономические деятели.

Блочные модели рудных тел. В соответствии с намеченными в дискуссиях разных специалистов размерами блоков и их ориентацией строится блочная модель каждого рудного тела месторождения

(или каждого *геологического блока* неоднородной залежи). Построение блочной модели начинается с создания *пустой блочной модели*. Пустая блочная модель строится с учетом размеров рудного тела по всем трем координатам. Модель протягивается от одного конца рудного тела на западе до другого конца на востоке, от точки выклинивания рудного тела на глубине до его самой верхней кромки (или до выхода на дневную поверхность) и от самой северной границы рудного тела до его южной границы. Одним словом, нужно задать границы прямоугольного параллелепипеда таким образом, чтобы рудное тело полностью в нем поместилось. Так как по всем трем направлениям должно укладываться целое количество блоков, размеры этого *макроблока* всегда берутся с некоторым избытком по сравнению с размерами рудного тела в соответствующем направлении.

Затем прямоугольный параллелепипед разбивается на блоки. Обычно таких блоков оказывается сотни тысяч, а в крупных месторождениях нередко речь идет о десятках миллионов блоков. Но, к счастью, все эти блоки не нужны. Необходимо хранить лишь те блоки, которые пересекаются с рудным телом, упрощенно говоря, лишь те блоки, в которых есть руда. Отбор «*рудных*» блоков производится специальными процедурами, присутствующими во всех программах трехмерного моделирования месторождений. Эти процедуры ищут взаимное пересечение *каркасной модели* рудного тела с пустой блочной моделью.

Как правило, рудных блоков оказывается (в зависимости от геологической структуры месторождения) в 10, а то и в 100 раз меньше общего числа блоков в пустой блочной модели. Но все равно в блочной модели оказываются десятки и сотни тысяч рудных блоков. По всем этим блокам приходится хранить массу информации, которая будет охарактеризована далее. Здесь же отметим то, что блочные модели могут быть двух типов: факторные и субблочные.

Факторная блочная модель отличается тем, что все блоки в этой модели имеют одинаковые размеры. Но каждый блок характеризуется своим *фактором* (коэффициентом, множителем, долей), показывающим, какая доля объема блока занята рудным телом. Если блок целиком состоит из руды, то фактор равен единице ($f = 1{,}0$). Если бы в блоке совсем не было руды, то фактор равнялся бы нулю ($f = 0{,}0$). Но такие «пустые» блоки, как уже говорилось, удаляют из модели. Блоки с малыми значениями факторов характерны для граничных областей рудного тела. Блоки со значениями, близкими к единице, характерны для центральных частей рудных тел.

Субблочная модель отличается тем, что блоки в ней могут быть разного размера. Геолог заранее решает вопрос, на какие по размеру части исходный («родительский») блок может быть *дискретизирован* (разбит) по каждой из сторон блока. В принципе родительский блок можно разбить на любое количество субблоков. Но при разбиении

на субблоки нужно руководствоваться здравым смыслом. Слишком маленький размер субблоков неразумен. В нашем примере речь шла о блоках размером 5×4×4,17 м. Если каждую сторону блока дискретизировать на десять частей, то конечный размер субблоков будет 0,5×0,4×0,4 м. Вряд ли кто-нибудь будет отдельно отрабатывать кубический микроблок размером 50 на 40 см. Некоторые ограничения на разбиение накладывают кондиции. Например, нередко в кондициях указывается, что рудное тело разрабатывается при мощности, скажем, не менее 1,2 м. Вероятно, и разбиение блока по направлению мощности на субблоки, меньшие этой величины, неразумно.

Субблок — это элементарный блок, который создается системой в пределах заданного родительского блока в случае, если через родительский блок проходит поверхность каркасной модели. Иными словами, при пересечении родительского блока каркасной моделью блок нарезается на блоки меньшего размера (субблоки).

В связи с употреблением субблоков или факторной модели обычно возникает вопрос: какие модели лучше использовать — с факторами или с субблоками? Если в проекте используются простые каркасные модели без взаимных пересечений, то лучше создавать факторные модели. Если же в проекте существует несколько взаимно пересекающихся каркасных моделей, то лучше использовать субблоки, так как в этом случае не возникнет путаницы с факторами и не надо создавать формул для вычисления факторов блоков в местах пересечения каркасных моделей.

Субблоковые модели дают возможность более точно передать форму рудного тела, особенно если мощность рудного тела изменчива и встречаются участки, где мощность рудного тела существенно меньше исходного размера блока. Кроме того, моделями с субблоками точнее передается кромка рудного тела. По этой причине и по ряду других обстоятельств многие геологи отдают предпочтение субблочным моделям. В нашем примере размер родительского блока равен 5×4×4,17 м. Если разрешить программе проводить дискретизации каждой стороны на три субблока, то родительский блок может быть разбит на 27 субблоков размером 1,67×1,33×1,39 м.

6.6. Непригодность традиционных методов подсчета запасов в микроблоках

Российские геологи на многолетнем опыте убедились, что традиционные методы подсчета запасов месторождений полезных ископаемых — метод геологических блоков, методы разрезов и другие — дают удовлетворительные результаты. В целом по всему месторождению (или по его самым крупным рудным телам) погрешности подсчета запасов по разным видам полезных ископаемых не превышают ±10 %. Но сейчас при разработке месторождений по

современным технологиям требуется не только точность подсчета запасов по всему месторождению в целом, но и точность подсчета запасов в небольших блоках рудного тела. В такой ситуации, оказывается, традиционные методы непригодны. Рассмотрим два примера.

Пример 1. Пусть на рис. 6.14 изображен разрез рудного тела простейшей формы в виде равнобедренного треугольника. Допустим, что рудное тело «пробурено» десятком скважин, которые не показаны с единственной целью — не затемнять смысл рисунка. Нам нужно оценить площадь сечения рудного тела. Рассчитаем его среднюю мощность и отразим ее на чертеже. Любому мало-мальски сведущему в геометрии человеку ясно, что площадь прямоугольника со средней мощностью равновелика треугольнику. Это однозначно говорит о том, что *средняя мощность* позволяет получить *точную оценку площади сечения рудного тела.* Но здесь сразу же нужно добавить то, что средняя мощность позволяет получить точную оценку сечения *всего рудного тела целиком.* А если нам нужно получить оценку мощности рудного тела в каком-то определенном месте разреза? Подойдет ли тогда для этой цели средняя мощность? Ни в коем случае.

Посмотрите на рис. 6.14. Там есть всего два места (две точки), в которых средняя мощность является точной оценкой. А во всех других местах эта оценка не подходит. Она всюду дает ошибку. Причем ошибка от этих двух мест нарастает в разные стороны. По *традиционной вариационной статистике* основные характеристики распределения исследуемой переменной — *среднее* и *дисперсия* — принимаются *постоянными* на всем изучаемом пространстве. Но это же не так! Причем чем закономернее изменяется изучаемая переменная в пространстве, тем очевиднее несостоятельность этих оценок.

Пример 2. Пусть на скарновом полиметаллическом месторождении в трех буровых скважинах было отобрано по 10 керновых проб длиной 1 м. Они были проанализированы на содержание свинца. Полученные результаты приведены в табл. 6.1.

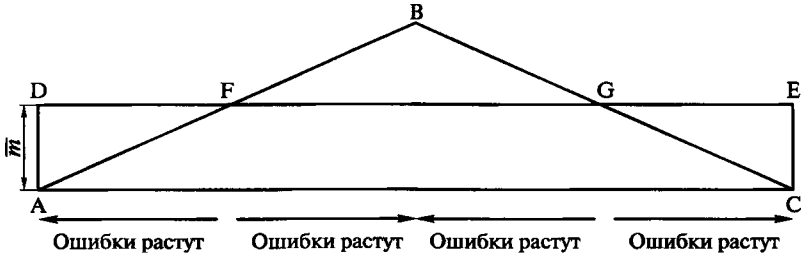


Рис. 6.14. Разрез треугольного по форме рудного тела. Равновеликий треугольнику прямоугольник с высотой, равной средней мощности $\bar{m}$

Таблица 6.1. **Содержания свинца (%) в трех скважинах**

№ скв.	Порядковый номер пробы									
	1-я	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я	9-я	10-я
1	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0
2	2,0	1,0	4,0	7,0	3,0	6,0	9,0	5,0	10,0	8,0
3	7,0	4,0	8,0	1,0	9,0	3,0	5,0	10,0	3,0	6,0

Для наглядности эти данные приведены также на рис. 6.15.

На рис. 6.15, *а* содержания свинца абсолютно закономерно увеличиваются от 1 до 10 % от первой до десятой пробы. На рис. 6.15, *б* содержания Pb проявляют тенденцию к возрастанию от первой до десятой пробы, но эта тенденция выступает в виде тренда (дрифта). На рис. 6.15, *в* содержания Pb изменяются достаточно случайным образом.

Если мы для каждого из этих случаев рассчитаем основные статистические характеристики содержаний свинца, которые обозначим x:

среднее арифметическое $\bar{x} = \frac{1}{10}\sum_{i=1}^{10} x_i$;

стандартное отклонение $\sigma = \sqrt{\frac{1}{9}\sum_{1=1}^{10}(x_i - \bar{x})^2}$;

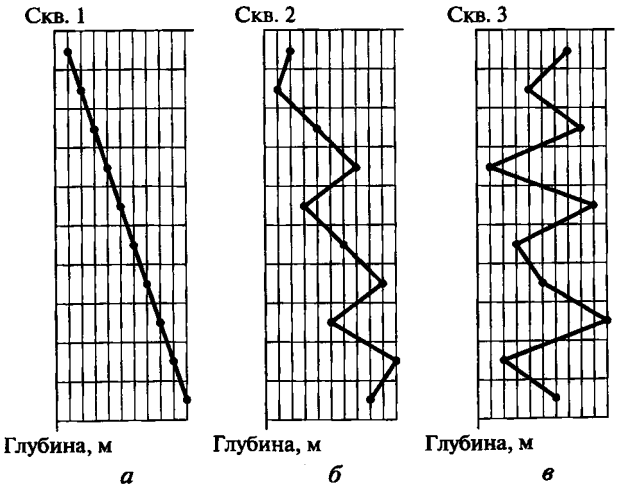


Рис. 6.15. Графики изменения содержаний свинца (Pb, %) по трем вертикальным буровым скважинам (*а*, *б*, *в*)

коэффициент вариации $V = \frac{\sigma}{\bar{x}} 100\%$,

то мы с удивлением обнаружим, что во всех трех случаях они абсолютно одинаковы:

$$\bar{x} = 5{,}5; \quad \sigma = 3{,}35; \quad V = 61\%.$$

Это однозначно свидетельствует о непригодности среднего, стандартного, отклонения и коэффициента вариации для характеристики изменчивости основных разведочных параметров.

Значит, нужно искать какой-то другой способ учета пространственной изменчивости геолого-разведочных параметров.

6.7. Вариограммы

Используя для оценки площади рудных тел методы вариационной статистики, мы убедились в том, что средняя мощность позволяет достаточно точно вычислить площадь всего рудного тела целиком. Но если нам нужно будет оценивать площади в небольших частях рудного тела, то средняя мощность для этой цели явно не годится. Столь же мало подходит дисперсия для оценки ошибок определения площади небольших участков рудного тела. Коэффициент вариации также плохо подходит в качестве показателя изменчивости, так как он не реагирует на закономерную составляющую изменчивости.

В подходе описания изменчивости с точки зрения вариационной статистики все замеры сравниваются со средней величиной. Отклонения от средней величины суммируются, и вычисляется среднее отклонение. Мы убедились, что этот способ не подходит к оценке запасов в малых блоках рудного тела.

А если в качестве показателя изменчивости сравнивать величину замеренного параметра не с его средним значением, а с величиной параметра, измеренной в соседних точках?

Вариограмма мощности рудного тела. Мощность является одним из самых устойчивых и плавно меняющихся параметров рудного тела. В горной выработке мы можем измерить мощность золоторудной жилы в каком-то месте. Отступив на 10 см в сторону и произведя новый замер мощности, мы скорее всего получим значение, очень близкое предыдущему значению мощности. В далеко отстоящих точках друг от друга значения мощностей жилы будут отличаться сильнее. Обозначим разницу мощности в двух соседних точках i и $i + 1$ греческой буквой Δ: $\Delta_{i,i+1} = m_i - m_{i+1}$. Разница в мощности может оказаться положительной или отрицательной. Это неудобно при сравнении значения разницы между разными парами точек. Поэтому придется либо брать абсолютную величину разницы $\Delta_{i,i+1} = |m_i - m_{i+1}|$, либо

возводить ее в квадрат $\Delta^2_{i,i+1} = (m_i - m_{i+1})^2$. Математики пошли по второму пути.

Если измерить разницу в значениях мощности на одинаковом расстоянии между точками в разных местах рудного тела, то выяснится, что эта разность может существенно меняться от места к месту. Значит, нам придется пользоваться какой-то усредненной величиной

$$\gamma = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\Delta^2_{i,i+1} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}(m_i - m_{i+1})^2,$$

где n — количество точек замеров. Обратите внимание, что суммируются $n - 1$ разниц между мощностями, на единицу меньше числа точек замеров. По общему виду эта формула близка формуле расчета дисперсии. Только при расчете дисперсии вычитается значение средней мощности, а не значение мощности в соседней точке. В математике $\Delta_{i,i+1}$ называют первыми последовательными разностями.

Если увеличивать расстояние между сравниваемыми точками, то разность между мощностями скорее всего станет больше. Это — *ключевой момент*. В этом направлении мы и будем двигаться — изучать, как меняется разность с увеличением расстояния между точками замеров.

Представим себе, что на рис. 6.16 изображен разрез рудного тела, «осажденного» на горизонтальную плоскость. В серии равноотстоящих буровых скважин измерена мощность рудного тела. Посчитаем первые разности между ближайшими скважинами, отстоящими друг от друга на расстояние d:

$$\gamma_d = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n-1}\Delta^2_{d(i,i+1)}.$$

Теперь посчитаем первые разности между скважинами, отстоящими друг от друга на расстояние $2d$ (через одну скважину):

$$\gamma_{2d} = \frac{1}{n-2}\sum_{i=1}^{n-2}\Delta^2_{2d(i,i+2)}.$$

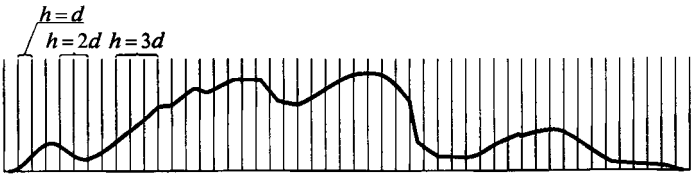


Рис. 6.16. Разрез «осажденного» рудного тела по данным 51-й разведочной скважины (пояснения см. в тексте)

То же самое проделаем для утроенного расстояния $3d$ (через две скважины):

$$\gamma_{3d} = \frac{1}{n-3}\sum_{i+1}^{n-3}\Delta^2_{3d(i,i+3)}.$$

Аналогично поступим для нарастающих расстояний $4d$, $5d$ и т.д. Примем, что $h = \{d, 2d, 3d, ..., kd\}$, а $N = \{(n-1),(n-2),(n-3),...,(n-k)\}$. Тогда обобщающую формулу для меняющегося расстояния h можно записать так:

$$\gamma_h = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Delta^2_{h(i,i+k)}.$$

Теперь попытаемся построить график этой функции. По оси ординат мы отложим h, а по оси абсцисс величину γ. Ось h разобьем на шаги d. Последовательно нанесем на график значения γ для расстояний d, $2d$, $3d$, ..., kd. У нас получится график примерно такой, какой показан на рис. 6.17. Ломаная кривая довольно круто будет подниматься, а потом станет пологой, субпараллельной оси ординат — выйдет на какой-то постоянный уровень. Интересно, что это за уровень?

Если по всем n точкам замеров мощности посчитать обычную дисперсию

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(m_i - \bar{m})^2$$

Рис. 6.17. Вариограмма, построенная по данным рис. 6.16

и отложить ее значение на графике, то окажется, что она равна половине значения γ, отвечающего постоянному уровню, на который поднимается график.

Нарисованный нами график Ж. Матерон назвал *вариограммой*. Но он резонно решил, что сравнивать вариограмму удобнее с общей дисперсией признака. Поэтому ученый во все приведенные выше уравнения поставил в знаменателе двойки. И стал называть этот график *полувариограммой*. Сейчас очень часто приставку «полу» опускают и называют *полувариограмму* просто вариограммой.

Рассмотренный пример относится к малореальному случаю производства массы замеров в точках, расположенных на равных расстояниях друг от друга. Как быть, когда расстояния разные? В этих случаях следят за тем, чтобы точка попала в определенный интервал. Берут *допуск* (*tolerance*), который обычно принимается равным половине наименьшего из изученных расстояний d. Всем точкам, расстояние между которыми попадет в интервал $h \pm d/2$, будет условно приписано «точное» расстояние h.

Вариограмма содержаний. Обычно для исследования выбирают самый изменчивый разведочный параметр. В рудных месторождениях таким параметром являются содержания полезных (или вредных) компонентов. Матерон и его ученики предпочитают обозначать изучаемый параметр руд (в данном случае, для определенности, содержание металла) буквой Z. Возьмем сначала случай изотропного месторождения. В таком месторождении изменчивость содержания металла одинаковая в любом направлении. Это сильно упрощает картину, так как можно обходиться одной координатой, точнее говоря, расстоянием между точками.

Обозначим нашу пространственную переменную — содержание металла — в точке x как $Z(x)$. Содержание металла в точке $x + h$, отстоящей от точки x на расстояние h, обозначим $Z(x+h)$. Нас, как и в случае мощности, будет интересовать разность в содержании металла в этих двух точках $[Z(x) - Z(x+h)]^2$. Естественно, что значения разности в двух соседних точках будут различаться для разных пар точек. Чтобы получить устойчивое представление о величине разности в двух точках, отстоящих друг от друга на расстояние h, нужно вычислить среднее арифметическое по всем N сравниваемым парам:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2,$$

здесь $N(h)$ — количество пар с расстоянием между точками h; $\gamma(h)$ — это и есть вариограмма для случая изотропного месторождения.

Если мы теперь будем последовательно увеличивать расстояние h на значение выбранного шага, рассчитывать по этой формуле очередное среднее значение и наносить его на график, то получим вариограмму, показывающую, как растет изменчивость содержания металла с увеличением расстояния между точками.

На рис. 6.18 показано, как в изотропном случае происходит поиск пар к центральной точке x при заданном расстоянии h. От радиуса h в обе стороны откладываются радиусы $h - d/2$ и $h + d/2$, где d — шаг (лаг) построения вариограммы. Все точки, которые попадают в заштрихованный кольцевой интервал, считаются приблизительно находящимися на расстоянии h от центральной точки x.

В случае, когда в месторождении присутствует анизотропия изменчивости изучаемого содержания металла, все заметно усложняется. В уравнении вариограммы расстояние h становится векторной величиной $\vec{h}$:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2N(\vec{h})} \sum_{i=1}^{N(\vec{h})} [Z(x) - Z(x+\vec{h})]^2.$$

В разных направлениях в этом случае нужно будет искать точки, парные к исходной на разном расстоянии. Это настолько сложно, что геостатистики основные усилия прилагают к тому, чтобы путем разного рода преобразований координат прийти вновь к изотропному варианту. Но узнать, присутствует ли анизотропия в месторождении или отсутствует, можно, только просчитав вариограммы изменчивости содержаний металла по разным направлениям.

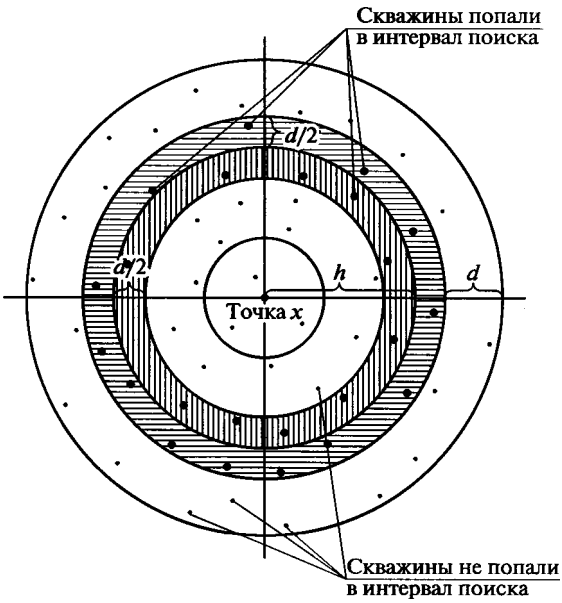


Рис. 6.18. Схема поискового круга при построении вариограммы в месторождении, изотропном по изменчивости

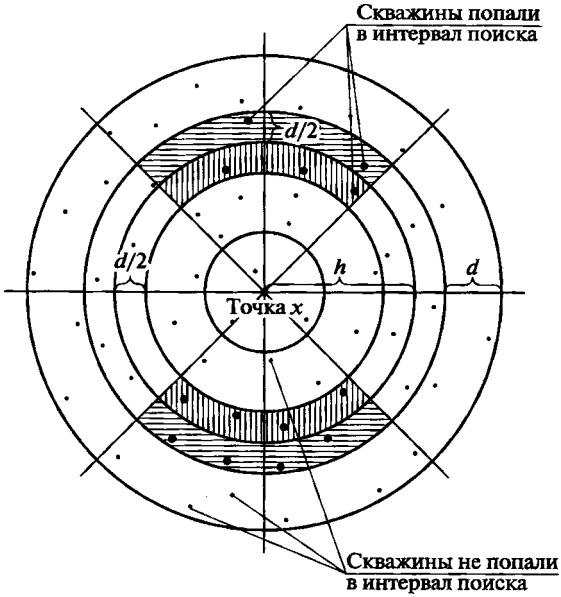


Рис. 6.19. Схема поискового сектора при построении вариограммы по определенному направлению (по направлению юг—север или север—юг)

Проведем прямую линию в соответствии с выбранным направлением поиска. Пусть для определенности это будет направление на север. Вряд ли хоть одна точка попадет непосредственно на эту прямую линию. Здесь мы снова воспользуемся *допуском*, но теперь по углу. Будем считать, что в этом направлении требованию равенства расстояния h отвечают все точки, для которых выполняется условие $h-d/2 \le r \le h+d/2$, где r — расстояние между центральной и очередной проверяемой точками. Кроме того, направление на точку должно отвечать условию: север –45° и север +45°, или {315° – 45°} (рис. 6.19). Значение допуска по углу, равное ±45°, выбрано условно для примера. Вообще, при выборе величины допуска руководствуются правилом: чем больше точек, тем меньше угол. И наоборот, чем меньше точек, тем больше угол. При допуске по углу ±90° в поиске участвуют все точки. Обратите внимание на то (см. рис. 9.19), что в поиске точек участвует не только северный сектор, но и южный, т.е. направления на север и на юг равноправны.

Так как при расчете вариограммы место центральной точки x последовательно занимают все точки, каждая пара невольно просчитывается два раза. Если сравниваемые точки индексируются буквами i и j, то мы получаем сначала пару $(Z_i - Z_j)^2$, а потом $(Z_j - Z_i)^2$. Вот поэтому-то в уравнении вариограммы и получается 2 в знаменателе.

Типы вариограмм. Вариограмма — это график, отражающий, как изменчивость изучаемой пространственной переменной (в виде дисперсии) меняется с увеличением расстояния. На рис. 6.20 представлен общий вид вариограммы. По вертикальной оси откладываются значения вариограммы, обозначаемой $\gamma(h)$. Расстояния h откладываются по горизонтальной оси. Основными параметрами вариограммы являются порог и зона влияния.

Порог численно равен общей дисперсии изучаемой переменной Z:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Z_i - \bar{Z})^2,$$

где n — количество наблюдений (проб); Z_i — значение переменной в i-м наблюдении; $\bar{Z}$ — среднее значение переменной по n наблюдениям. Английское название порога — ***sill***. В некоторых переводных работах порог так и называется ***силлом***. Напомним, что силлом в геологии называются трапповые послойные интрузии, которые в обрывах сибирских рек образуют ступенеобразные выступы типа полок или порогов. Вариограммы, тем или иным способом выходящие на порог, называются ***пороговыми вариограммами***. В противоположность этому вариограммы, график которых пересекает порог и уходит выше, называются ***беспороговыми вариограммами***.

Зона влияния (область влияния) — это расстояние, на котором вариограмма достигает порога. Подразумевается, что на этом расстоянии перестает ощущаться взаимное ***влияние*** значений переменной (например, содержаний элементов в руде) в точках замеров, разнесенных друг от друга на эту дистанцию. В англоязычной геостатистической литературе зона влияния называется ***range***. В российской литературе теперь нередко термин «зона влияния» заменяется термином ***рэйндж***.

Эффект самородков. В месторождениях с сильной изменчивостью содержаний может проявиться свойство, которое Ж. Матерон назвал ***эффектом самородков***. Это ситуация, когда две пробы, взятые рядом друг с другом, могут довольно сильно отличаться по со-

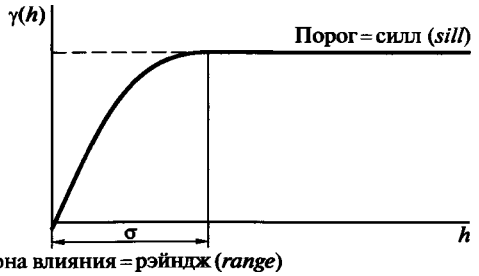


Рис. 6.20. Типичная пороговая вариограмма

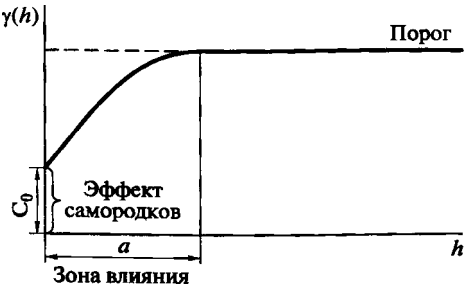


Рис. 6.21. Пороговая вариограмма с эффектом самородков

держаниям полезного компонента. Так, в золоторудных месторождениях в одну пробу может попасть крупный самородок, а другая проба, отобранная рядом, покажет лишь убогое содержание золота. Этот вариант отражен на рис. 6.21, на котором кривая вариограммы начинается не с начала координат, а с некоторого расстояния по вертикальной оси C_0, как общепринято обозначать эффект самородков.

В практике встречаются варианты, отраженные на рис. 6.22. Этот тип вариограмм называется *чистым эффектом самородков*. Вариограмма на всем изученном расстоянии остается на уровне порога и не проявляет тенденции к спуску в районе начала координат.

Данный тип вариограмм практически не встречается на стадии эксплуатационной разведки. Он характерен для стадий предварительной разведки и отчасти детальной. Этот график однозначно говорит о том, что месторождение не доразведано и нужно сгущать разведочную сеть. В противном случае использование геостатистических методов подсчета запасов бесполезно.

Поведение графиков вблизи начала координат. Очень важно знать, как ведет себя вариограмма около нуля (рис. 6.23). Медленный, как говорят, *параболический* подъем графика вблизи начала координат (сплошная линия на рис. 6.23) характерен для переменных с постепенными, плавными изменениями. Видя такой график, геолог вправе говорить о *непрерывном оруденении*. Если кривая поднима-

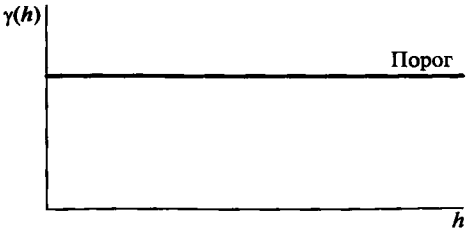


Рис. 6.22. Пороговая вариограмма с чистым эффектом самородков

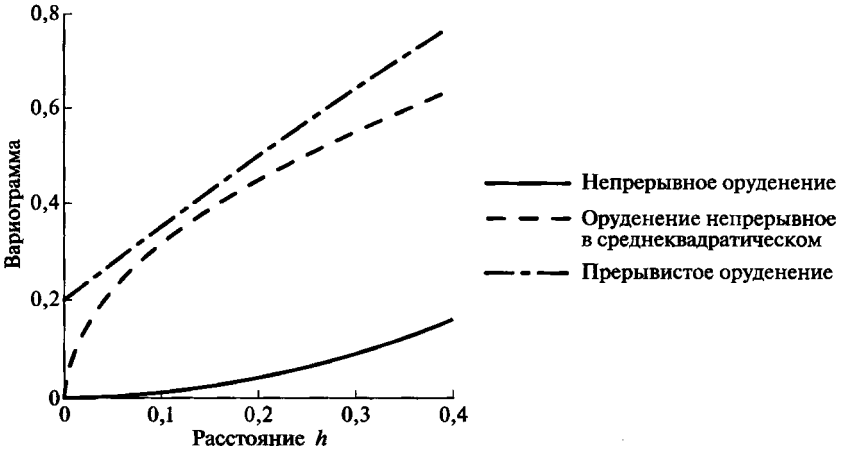


Рис. 6.23. Три типа поведения вариограммы вблизи начала координат

ется быстро, но выходит из нуля, говорят об *оруденении непрерывном в среднеквадратическом* (пунктирная линия на рис. 6.23). Графики вида, изображенного на рис. 6.21 и тем более на рис. 6.22, позволяют делать вывод о *прерывистом характере оруденения* (штрихпунктирная линия на рис. 6.23).

Эффект включений. Если кривая вариограммы пересекает порог, поднимается над ним на некоторую высоту, а затем опускается вниз на уровень порога (рис. 6.24), говорят, что в вариограмме проявлен *эффект включений*. Первоначально так этот эффект называл и Ж. Матерон. Но сейчас в западных странах предпочитают именовать его *дырочным эффектом* (*hole effect*). Такие вариограммы свидетельствуют о том, что в изучаемом рудном теле есть участок или участки (их размер можно определить непосредственно на графике) с более богатыми содержаниями полезного компонента или, наоборот, с меньшими содержаниями этого элемента (отсюда, наверное, и «дырочный эффект»). В любом случае вариограмма выявляет не-

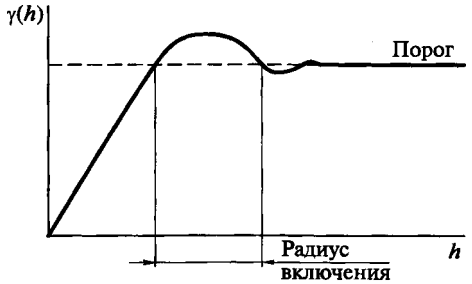


Рис. 6.24. Вариограмма с эффектом включений (с дырочным эффектом)

однородность в рудном теле. Если «включение» составляет одну треть и более от размера рудного тела, стоит попробовать выделить этот участок в качестве однородного геологического блока и снова пересчитать вариограмму. В принципе новая вариограмма должна нормально выйти на уровень порога, не пересекая его. Наличие эффекта включений говорит о том, что нарушена одна из заповедей геостатистики — проводить геостатистические исследования нужно только в однородных (хотя бы в геологическом смысле) геологических блоках. Наличие включений свидетельствует о том, что геолог чего-то не доглядел и неправильно выделил однородные геологические блоки.

Квазипериодические вариограммы. Бывает, что вариограмма несколько раз оказывается то выше, то ниже порога (рис. 6.25). С расстоянием амплитуда колебаний снижается, и вариограмма выходит на порог, если так можно выразиться, «с двух сторон». Одни геостатистики называют это явление *волновым эффектом* (*wave effect*), другие предпочитают называть это дырочным эффектом, считая, что данная структура является своеобразным эффектом включений, затухающим на больших расстояниях. Но чаще всего волновой эффект получается на вариограммах, построенных, как говорят, «по стволу скважины», пробуренной перпендикулярно слоистости в осадочных рудах (железных, марганцевых, вулканогенно-осадочных колчеданных). В этом направлении в осадочных рудах естественным образом чередуются богатые и бедные слои. Это ритмичное чередование и находит свое отражение в волновой структуре вариограмм.

Беспороговые вариограммы. На беспороговых вариограммах кривая спокойно пересекает уровень порога и продолжает увеличивать свое значение (см. рис. 6.34 и 6.35). Такие вариограммы получаются в тех случаях, когда в пространстве сильно проявлена закономерность в изменении значений изучаемой переменной. Например, перед нами стоит задача оценить объем вскрыши над угольным пластом, который очень полого погружается в определенном направле-

Рис. 6.25. Вариограмма с волновым эффектом (квазипериодическая вариограмма)

нии. Если мы построим вариограмму глубины кровли угольного пласта, она обязательно получится беспороговой. По этому признаку мы однозначно определяем, что нужно рассчитывать тренд, или дрифт (закономерную составляющую), и стремиться этот тренд удалить. Тренд-анализ — это особая статистическая процедура (множественная регрессия на географические координаты), разъяснение которой не входит в содержание учебника.

6.8. Анизотропия

Основной вопрос, который нас интересует, — изменчивость в недрах изучаемого разведочного параметра. Для определенности будем говорить об изменчивости содержаний полезных компонентов. Есть месторождения, в которых содержания меняются примерно одинаково по разным направлениям. Такие месторождения являются *изотропными*. В геостатистике разработаны методы подсчета запасов только для изотропных месторождений. А если месторождение анизотропное? Что тогда делать?

Прежде чем отвечать на этот вопрос, нужно выяснить, проявлена ли анизотропия в месторождении и к какому типу она относится. Допустим, что мы изучаем линзообразное рудное тело с соотношением мощности, ширины и длины 1:40:160. Из опыта мы знаем, что наибольшая изменчивость в рудном теле обычно наблюдается по его мощности. Изменчивость по ширине рудного тела должна быть больше изменчивости по его длине. Если мы построим вариограммы в направлении мощности, ширины и длины, то можем получить картину, показанную на рис. 6.26.

Все три вариограммы имеют один уровень порога, так что общая изменчивость, выраженная в общей дисперсии, одинакова по всем направлениям. Но у них разные зоны влияния: меньше всех зона влияния a_1 — по мощности; зона влияния a_2 — по ширине рудного

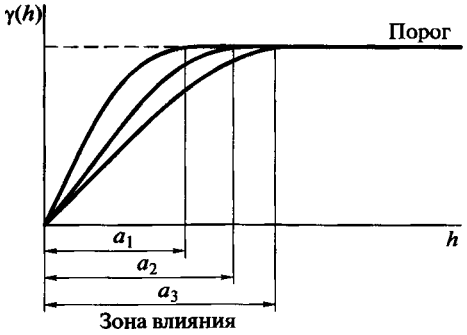


Рис. 6.26. Вариограммы с геометрической (аффинной) анизотропией

тела имеет средний размер; самая большая зона влияния a_3 —по длине рудного тела. Значит, общая изменчивость по всем трем направлениям одинакова. Только «амплитуды» изменчивости разные. Такая анизотропия называется *геометрической* или *аффинной анизотропией*. Аффинной она называется потому, что путем простых аффинных преобразований координат анизотропное месторождение превращается в изотропное, к которому можно применять все геостатистические процедуры.

Высокую изменчивость по мощности рудного тела устраняют одним из двух способов.

Первый способ. Если это возможно, рудное тело по мощности делят на 2—3 рудных тела, которые будут добываться самостоятельно. Так на баритополиметаллических месторождениях Рудного Алтая раздельно добывают полиметаллические и баритовые руды. В разделенных рудных телах изменчивость значительно снижается.

Второй способ (более часто используемый). Рудное тело отрабатывается на полную мощность, руда смешивается и в усредненном виде поступает на обогащение. В этом случае следят за изменчивостью средних содержаний по скважинам в направлениях по длине и ширине рудного тела.

Таким образом, задача из трехмерной становится двухмерной. Не исключено, что изменчивость средних содержаний по разным направлениям окажется примерно одинаковой, т.е. с известной долей уверенности можно будет считать рудное тело изотропным. В этом случае относительное расстояние h между точками 1 и 2 рассчитывается по следующему уравнению:

$$h = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{a},$$

где $\Delta x = x_1 - x_2$, $\Delta y = y_1 - y_2$; a — зона влияния (для сферических и квадратических функций).

Если же анизотропия изменчивости будет очевидной, считать относительное расстояние, разделяющее точки, придется по следующему матричному уравнению:

$$h = \sqrt{\left\{ \begin{bmatrix} \Delta x & \Delta y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (1/a)^2 & 0 \\ 0 & (\rho/2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \right\}},$$

где $[\Delta x \Delta y]$ — разделяющий вектор в координатах карты; θ — угол анизотропии; ρ — отношение (коэффициент) анизотропии, $\rho = a_1/a_2$ (a_1 — зона влияния по одному направлению, a_2 — зона влияния по другому направлению, перпендикулярному первому).

Анизотропия изображается в виде эллипса. Короткая ось эллипса соответствует направлению наибольшей изменчивости изучаемого признака, а длинная ось — наименьшей изменчивости. Угол ани-

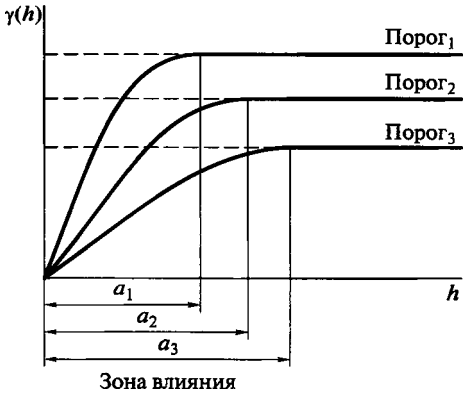


Рис. 6.27. Вариограммы с зональной анизотропией

зотропии θ отсчитывается от положительного направления координатной оси x от востока против часовой стрелки до направления короткой оси эллипса, т. е. совсем не так, как это делается в геологии и географии.

Это и есть аффинное преобразование координат для перехода к изотропной модели в случае проявления геометрической анизотропии. Но дело в том, что кроме аффинной анизотропии может быть выявлена *зональная*, или *стратификационная*, *анизотропия*. В этом случае вариограммы, построенные для разных направлений, выходят на пороги разного уровня, как показано на рис. 6.27. Зональной анизотропия этого типа называется потому, что она характерена для месторождений с ярко проявленной зональностью в распределении содержаний основных компонентов. Например, в ликвационных медно-никелевых месторождениях Норильска содержания меди и никеля постепенно нарастают сверху вниз от убогих вкрапленных руд до сплошных богатых донных залежей в нижней части массива.

Это сложный случай. «Борьба» с зональной анизотропией протекает значительно сложнее, чем с геометрической. При желании можно ознакомиться с несколькими способами по фундаментальной монографии А. Журнеля и Ч. Хуйбрехта (1978). Здесь дело осложняется тем, что появление вариограмм, выходящих на разные уровни порогов, может быть связано не с зональной анизотропией, а с двумя другими явлениями.

Вариограммы, построенные по пробам разного объема. Нельзя забывать, что на любом месторождении отбираются пробы разного объема. Например, в подземных выработках отбираются бороздовые, задирковые и валовые пробы. Они имеют разную геометрию: линейную (бороздовые); плоскостную (задирковые); объемную (валовые). Кроме того, эти пробы имеют разный вес, отличающийся на порядок, — килограммы, центнеры и тонны.

Если построить по каждому типу проб вариограммы, то они выйдут на резко отличающиеся друг от друга пороги (рис. 6.28). Ясно, что многотонные валовые пробы должны иметь существенно меньшие дисперсии, чем килограммовые борозды.

Именно поэтому в геостатистике существует одно из важнейших требований — вариограммы можно строить только *по пробам одного типа*, или, как говорят, *основания*. В английском языке используется термин *support*. Бороздовая проба имеет основание (сечение в поперечном срезе) 10—30 см^2. У задирковых проб основание часто доходит до 10 000 см^2. А валовые пробы нередко имеют основание в виде полного сечения горной выработки около 100 000 см^2.

Эффект пропорциональности. Похожая по виду картина выхода вариограмм на разный уровень может объясняться еще одним феноменом — эффектом пропорциональности. Оказывается, существуют месторождения, в которых содержания полезного компонента связаны с дисперсией. Например, на рис. 6.29 на точечном графике показана *прямая зависимость*, но несколько раз описывался и *обратный эффект пропорциональности*, когда дисперсия снижается по мере роста содержаний.

Выявление эффекта пропорциональности проводят следующим образом. Изучаемая совокупность проб разбивается на интервалы. Например, выборка разбивается на группы в зависимости от содер-

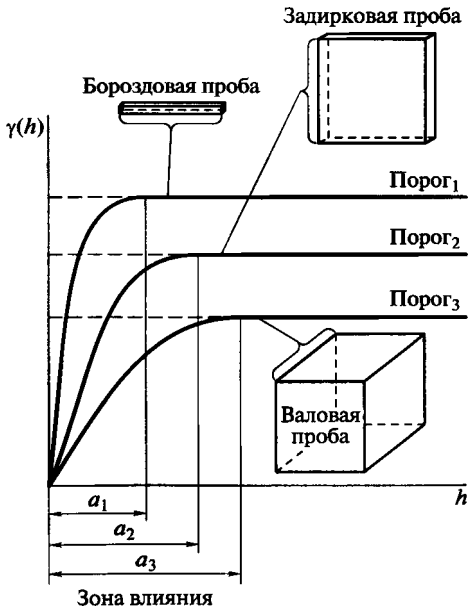


Рис. 6.28. Вариограммы, построенные по пробам разных типов

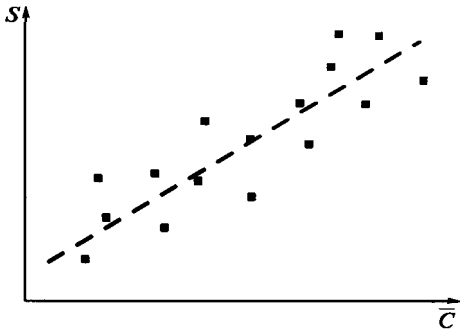


Рис. 6.29. Зависимость дисперсий (S) от средних содержаний металла ($\overline{C}$)

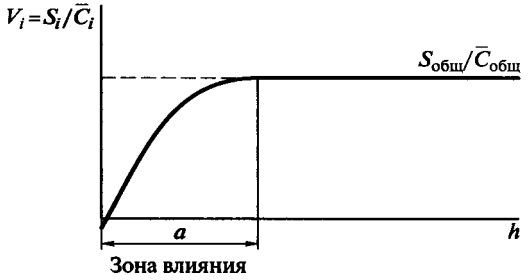


Рис. 6.30. Пропорциональная вариограмма (см. текст)

жания меди от 0 до 0,5 %, от 0,5 до 1 %, от 1 до 1,5 % и т.д. Для каждого интервала вычисляются среднее содержание меди и ее дисперсия. Соответствующая точка наносится на график (см. рис. 6.29). Облако точек должно подсказать: есть ли зависимость или ее нет. В нашем примере она выглядит очевидной.

В этом случае вместо обычной вариограммы, в которой по вертикальной оси наносится дисперсия, строится *относительная вариограмма*. В ней вместо дисперсии наносится своеобразный коэффициент вариации — дисперсия, деленная на среднее содержание металла в данном интервале (рис. 6.30). В литературе приводятся примеры, когда построение относительных вариограмм оканчивалось успешно. В таком относительном виде вариограммы для разных направлений выходили на одинаковое значение порога.

6.9. Модельные функции вариограмм

Вариограмма, вычисленная и построенная указанным ранее способом, называется *экспериментальной*. Для нее характерна сильная изломанность графика (рис. 6.31). Естественно желание заменить эту

ломаную кривую какой-нибудь плавно, регулярно изменяющейся линией. Опытным путем геостатистики установили, что экспериментальные вариограммы могут быть подогнаны несколькими классами функций. Они называются *модельными функциями вариограмм* или просто *моделями вариограмм*. Модели могут быть пороговыми или беспороговыми.

Пороговые модели. Порог вариограммы равен дисперсии изучаемого параметра по всему рудному телу или по его большой части (по геологическому блоку). Он может обозначаться по-разному: либо $\sigma^2_{\text{общ}}$, либо σ^2_{∞}, либо γ_{∞}. Есть математические функции, которые тем или иным образом выходят на уровень порога, — они называются пороговыми моделями вариограмм.

Модель чистого эффекта самородков (см. рис. 6.22):

$$\gamma(h) = C_0 = \gamma_{\infty}.$$

В этой модели вариограмма постоянна на всем протяжении изучаемого рудного тела. Отдельно данная модель не применяется, так как отражает чисто случайный тип вариограммы, но очень часто используется в комбинациях с другими моделями.

Сферическая модель (сплошная линия на рис. 6.32):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C\left(\dfrac{3h}{2a} - \dfrac{h^3}{2a^3}\right) + C_0, & h < a; \\ C + C_0, & h \geq a; \\ 0, & h = 0. \end{cases}$$

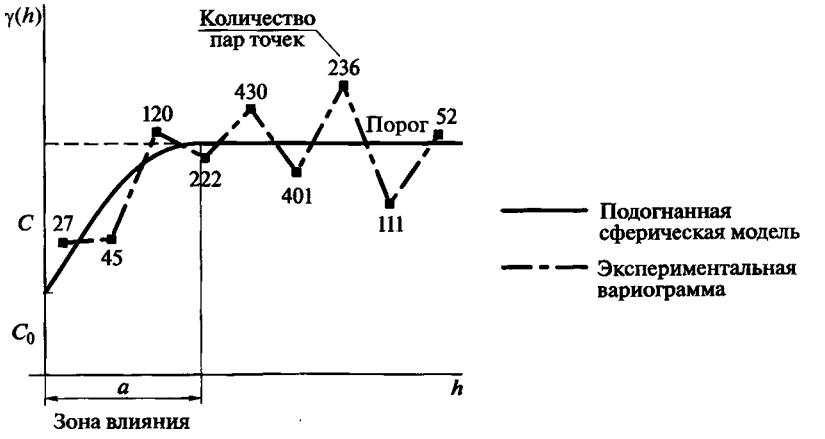


Рис. 6.31. Сглаживание (подгонка) экспериментальной вариограммы модельной функцией

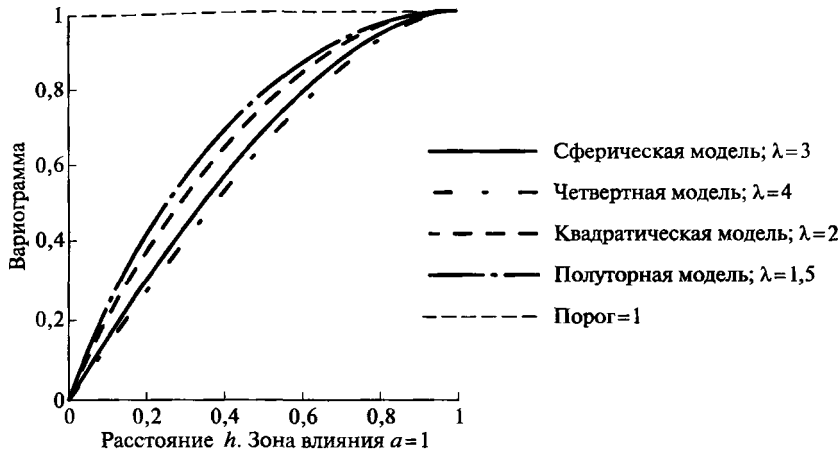


Рис. 6.32. Сферическая и квадратическая модельные функции

Это наиболее употребительная модель вариограммы. Она имеет два параметра: радиус (интервал, зону) взаимовлияния проб (точек замеров) — a; порог, равный общей дисперсии признака, — $\gamma(\infty) = C + C_0$. Возрастая, функция выходит на порог на расстоянии $h = a$. На рис. 6.32 и на всех других рисунках пороговых функций для упрощения принято, что порог $\gamma(\infty) = 1$ и $a = 1$. Касательная к функции, проведенная из начала координат, пересекает линию порога на расстоянии $h = \frac{3}{2}a$. Математически эта функция описывает левый верхний квадрант эллипса.

Квадратическая модель (пунктирная линия на рис. 6.32):

$$\gamma(h) = \begin{cases} C\left(\frac{2h}{a} - \frac{h^2}{a^2}\right) + C_0, & h < a; \\ C + C_0, & h \geq a; \\ 0, & h = 0. \end{cases}$$

Данная функция очень похожа на сферическую модель, но вблизи от нуля возрастает более круто. Если показатели степени в этих двух моделях сделать третьим параметром λ, то основную часть функций можно выразить так: $C\left(\frac{\lambda h}{(\lambda-1)a} - \frac{h^\lambda}{(\lambda-1)a^\lambda}\right)$. Проверяем: λ = 3, $C\left(\frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3}\right)$ — это сферическая модель; λ = 2, $C\left(\frac{2h}{a} - \frac{h^2}{a^2}\right)$ — квадратическая модель. Квадратическая функция с математической точки зрения представляет собой левый верхний квадрант окружности.

На самом деле степень λ не обязательно должна быть целочисленной. Например, λ может быть равна 1,5. Эта функция (штрихпунктирная линия на рис. 6.32) восходит к порогу заметно круче, чем сферическая и квадратическая функции. Нужно помнить, что должно соблюдаться условие $\lambda > 1$. Этот параметр может быть больше 3. На рис. 6.32 показана функция, названная четвертной, со степенью $\lambda = 4$. При больших степенях функция вырождается в прямую линию.

Таким образом, сферическая и квадратическая функции входят в одно семейство сложных степенных (ограниченных сверху) функций, причем степень $\lambda > 1$.

Экспоненциальная модель (рис. 6.33):

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-|h|/a}).$$

Эта модель по форме кривой похожа на сферическую, но вблизи начала координат она восходит сначала более круто, чем сферическая, а затем, наоборот, имеет более пологий подъем и выходит на порог только условно, достигая его на расстоянии $h = 3a$. Считается, что касательная к функции, проведенная от начала координат, пересекает порог при $h = \alpha$.

Гауссовская модель (см. рис. 6.33):

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-h^2/a^2}).$$

По виду уравнения гауссовская модель вроде бы близка к экспоненциальной, но она в начале координат растет очень медленно,

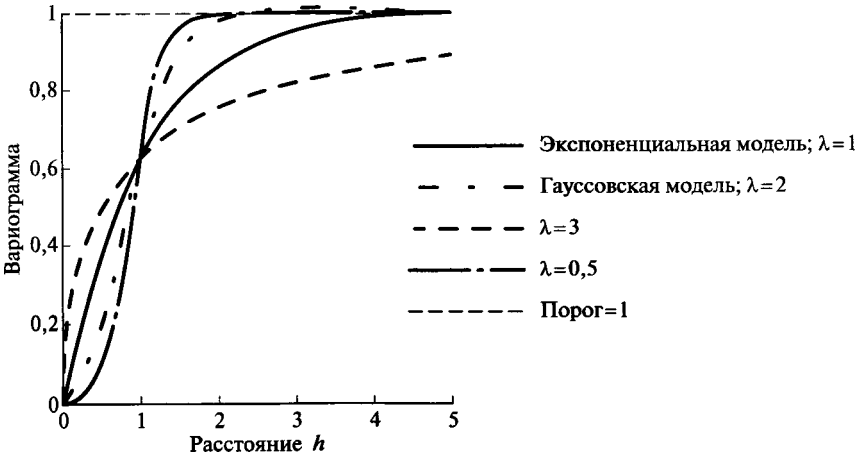


Рис. 6.33. Экспоненциальные модельные функции, в том числе гауссовская

отражая тем самым непрерывность оруденения. На уровень порога функция выходит не на значении радиуса a, а асимптотически. Гауссовская модель используется для описания пространственного поведения непрерывных признаков типа мощности в простых по форме рудных телах.

Похожесть экспоненциальной и гауссовской моделей очевидна. Стоит ввести третий параметр — степень λ, и можно получить общее уравнение этих функций:

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-|h^{\lambda}|/a^{\lambda}}).$$

При $\lambda = 1$ мы имеем экспоненциальную модельную функцию, а при $\lambda = 2$ — гауссовскую. Но не обязательно, чтобы степень была целочисленной. Главное, чтобы она была больше нуля: $\lambda > 0$.

В предыдущем случае мы имели семейство сферических и квадратических функций. Здесь же мы имеем семейство экспонентных функций, закрывающих широкий интервал моделей для описания изменчивости непрерывного оруденения и оруденения непрерывного в среднеквадратическом.

Квазипериодические модели. При наличии квазипериодического эффекта можно использовать теоретические модели трех типов: модель «затухающего синуса», экспоненциально-косинусную модель, смешанную модель Паддингтона. Рассмотрим только первую из названных моделей.

Модель «затухающего синуса» (см. рис. 6.25):

$$\gamma(h) = C\left(1 - \frac{\sin \omega h}{\omega h}\right),$$

где $\omega = 1{,}4\pi/H$ — частотная характеристика периодической компоненты, H — величина полупериода синусной волны.

Данная модель «эффекта включений» хорошо подходит для описания ритмичного переслаивания руд разного состава или для описания рудных тел с гнездовым распределением минерализации. Порог в этой модели имеет иной смысл, чем в других моделях, так как график вариограммы оказывается то ниже порога, то выше него. Она приближается к нему «с двух сторон».

Беспороговые модели. Нередко вычисленные и построенные вариограммы преодолевают порог и уходят выше него. Для описания таких вариограмм приходится обращаться к функциям, которые обобщенно названы беспороговыми.

Линейная модель (сплошная линия на рис. 6.34):

$$\gamma(h) = \begin{cases} Bh + C_0, h > 0; \\ 0, \qquad h = 0, \end{cases}$$

где B — угловой коэффициент наклона прямой линии. Самая простая функция довольно удовлетворительно описывает многие топографические поверхности.

Степенная функция (штриховые и штрихпунктирные линии на рис. 6.34):

$$\gamma(h)=\begin{cases} Bh^{\lambda}+C_0, & h>0; \\ 0, & h=0, \end{cases}$$

где B — положительный коэффициент, равный среднему квадрату приращений изучаемого параметра за единицу расстояния; λ — показатель степени, который должен быть $0 \le \lambda \le 2$. Подходит для описания переменных с разным соотношением закономерной и хаотической составляющей.

Логарифмическая модель (рис. 6.35):

$$\gamma(h)=B\ln h,$$

где B — угловой коэффициент. Эта модель широко использовалась при «ручном» счете задач. Формула дает бессмысленные (отрицательные) результаты при $h < 1$, поэтому в компьютерных вариантах подсчета запасов не используется.

Модели вариограмм с вложенными структурами. Кроме рассмотренных модельных функций существуют и другие: рациональная квадратическая модель, кубическая модель, пентасферическая модель. Может оказаться, что не все они реализованы в той программе трехмерного моделирования месторождений полезных ископаемых, которая будет в распоряжении геолога. Приобретя навыки подгонки

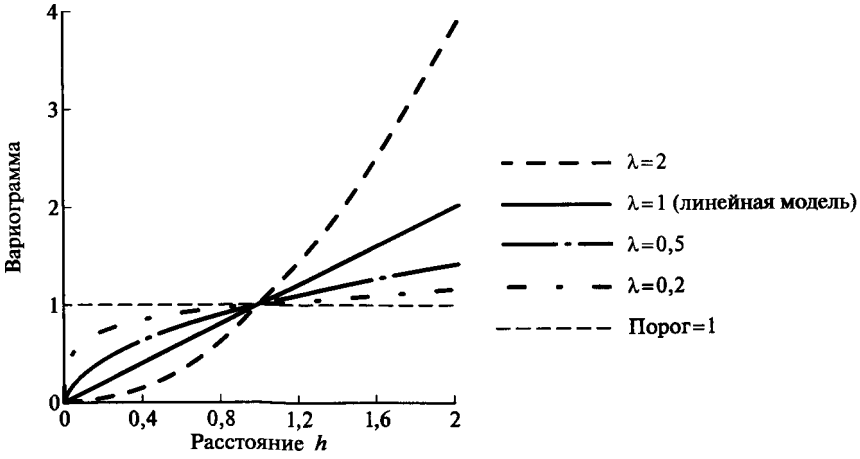


Рис. 6.34. Беспороговые степенные модельные функции

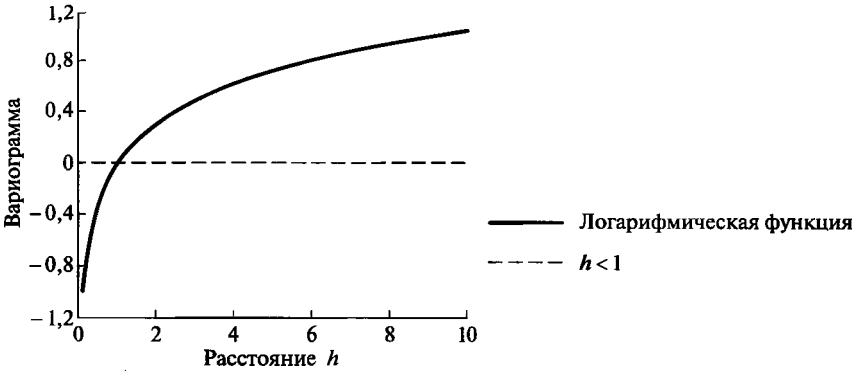


Рис. 6.35. Логарифмическая модельная функция (при расстояниях меньше 1 функция имеет отрицательные значения)

разных моделей к экспериментальным вариограммам, можно попробовать и эти более редко используемые варианты моделей.

Но почти наверняка настанет момент, когда окажется, что ни одна из моделей не позволяет провести удовлетворительную подгонку модели к экспериментальной вариограмме. Тогда придет время осваивать технологию так называемых *вложенных структур*. Раздел о вложенных структурах затруднительно доступно изложить в рамках вводного, ознакомительного курса геостатистики. Освоение этого раздела — следующий шаг к самостоятельному углубленному изучению геостатистики.

6.10. Структурный анализ

В математической статистике то, что мы здесь называем *вариограммой*, именуют *структурной функцией*. Всестороннее исследование вариограмм, построенных на разных основаниях и в разных направлениях, А. Журнель и Ч. Хуйбрехт (1979) определили как *структурный анализ*. Сейчас в связи с полной компьютеризацией геостатистических методов подсчета запасов очень часто такой анализ называют *вариографией* месторождения. Но мы здесь будем «по старинке» говорить о структурном анализе.

Чтобы структурный анализ был многосторонним, необходимо построить и исследовать вариограммы всех основных разведочных параметров изучаемого рудного тела: мощности рудного тела, мощности вскрыши, содержаний всех основных полезных (и вредных) ископаемых, содержаний попутных компонентов, объемной массы руды, пористости, влажности и др. При этом нужно внимательно следить, чтобы соблюдались основные требования к проведению геостатистических исследований.

Во-первых, вариограммы должны строиться в *однородном блоке рудного тела*, однородном хотя бы в геологическом смысле.

Во-вторых, вариограммы должны строиться на *одном основании* (пробы должны быть одинаково ориентированы в пространстве, иметь одинаковый объем, одинаковую длину, должны быть проанализированы в одной лаборатории по одной и той же методике, желательно за небольшой промежуток времени).

При наличии достаточного количества проб, заметно отличающихся по объему, лучше построить вариограммы отдельно для каждого типа проб и сравнить их друг с другом (см. рис. 6.28). Это позволит наглядно охарактеризовать феномен *регуляризации* пространственной изменчивости изучаемой переменной в пробах большого объема.

Если длина исходных проб сильно варьирует, нужно рассчитать *композитные пробы*, чтобы исключить влияние длины проб на вариограмму. При большой мощности рудного тела полезно построить вариограммы по композитам разной длины. Построив эти вариограммы на одном графике, можно наглядно убедиться, что с увеличением длины пробы происходит регуляризация вариограмм — заметно снижается значение порога.

Вариограммы нужно строить в разных направлениях с тем, чтобы совершенно определенно можно было ответить на вопрос о наличии или отсутствии анизотропии в пространственной изменчивости изучаемого признака.

Если анизотропия присутствует, нужно определить ее тип. Если это аффинная анизотропия, нужно осуществить преобразования всех координат, а потом снова рассчитать вариограмму в условиях уже изотропной пространственной изменчивости. Можно применить способ, изложенный в подразд. 6.8.

Если будет выявлена картина, похожая на зональную анизотропию с разными порогами по разным направлениям, то сначала нужно проверить, не является ли это «отзвуком» эффекта пропорциональности. Если же это не связано с эффектом пропорциональности, то что здесь можно рекомендовать только поискать в литературе похожий пример и попытаться воспроизвести на своих данных способы, там предложенные.

Если получается беспороговая вариограмма с трендом, рекомендуется на первых порах пригласить на помощь более опытного геостатистика, чтобы он помог *снять тренд*.

В конце концов к окончательно построенной вариограмме требуется *подогнать* модельную функцию. Общая рекомендация сводится к тому, чтобы выбирать наиболее простые модели, избегать многоструктурных моделей, не усердствовать с уменьшением эффекта самородков.

Необходимо тщательно документировать (записывать в журнал) все параметры подобранных моделей. Когда две или три модельные функции ***на глаз*** будут почти одинаковыми, следует отложить реше-

ние вопроса о лучшей модели до стадии *перекрестной проверки* (см. далее). Обязательно распечатывайте на принтере все построенные вариограммы.

Если месторождение является полиметаллическим, вариограммы для каждого металла нужно строить отдельно. Но желательно, чтобы подгоночные модели у всех металлов были одного типа.

Не жалейте времени на то, чтобы улучшить вид вариограммы, меняя величину шага (лага) построения, допуски по расстояниям и по углам. Меняя эти величины, часто удается существенно повысить качество подгонки модельных функций, а значит, и доверие к произведенным подсчетам запасов руд и металлов.

6.11. Задачи интерполяции, гридинг

Задачи интерполяции могут быть одномерные (данные по профилю), двухмерные (карты) и трехмерные (в объеме). Все эти варианты встречаются в практике геологической разведки месторождений. Но, пожалуй, чаще всего геолог сталкивается с задачами интерполяции на плоскости, т.е. с двухмерной интерполяцией. Рассмотрим упрощенный пример.

Пусть в точках с известными координатами с дневной поверхности пробурено шесть вертикальных буровых скважин. Известны абсолютные отметки устьев скважин. Точки на площади разбросаны неравномерно (рис. 6.36). Нам нужно построить топографическую карту дневной поверхности участка в изолиниях.

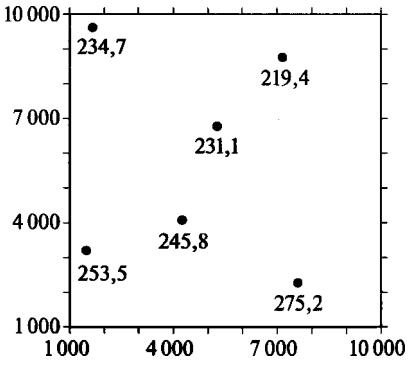


Рис. 6.36. Шесть неравномерно расположенных точек с высотными отметками

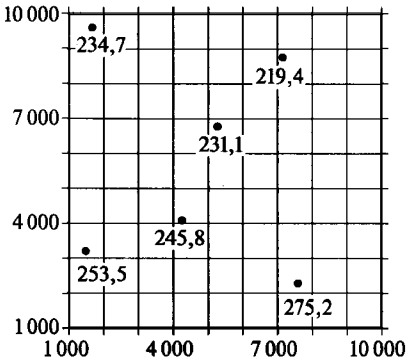


Рис. 6.37. Превращение шести неравномерно размещенных точек в 100 равномерно расположенных точек в узлах грида (значения высотных отметок рассчитывают методом интерполяции)

Один из самых распространенных способов построения карт в изолиниях заключается в следующем. Интересующая нас площадь разбивается на правильные прямоугольники или квадраты (рис. 6.37). Образуется правильная регулярная сеть, которая издавна называется *гридом*. Мы (каким-то образом) определяем значения высотных отметок в узлах грида. Количество узлов — по вертикали 10 и по горизонтали 10. Всего нужно определить высотные отметки в 100 узлах и записать их в матрицу (она называется *грид-матрица*). По этой уже *регулярной* сети точек с помощью стандартных графических программ мы получаем топографическую карту в изолиниях.

Тем самым мы совершаем переход от шести *нерегулярно расположенных точек* к 100 *регулярно расположенным точкам* в узлах грида. Значение высотной отметки в каждом из узлов грида определяется выбранным *методом интерполяции*. А вся эта процедура перехода от нерегулярной разведочной сети к регулярной с попутным определением значений переменной в каждом узле сети называется *гридингом*.

6.12. Методы интерполяции

Методов интерполяции известно более 20. Перечислим здесь наиболее часто употребляемые, но не раскрывая их сути, поскольку на это в данном учебнике нет места:

- скользящее среднее;
- обратное расстояние в степени;
- минимальная кривизна;
- реальный сосед;
- ближайший сосед;
- полиномиальная регрессия;
- локальная полиномиальная регрессия;
- радиальные базисные функции;
- модифицированный метод Шеппарда;
- триангуляция с линейной интерполяцией;
- кригинг.

Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и свои недостатки. Прочувствовать их можно только опытным путем. Из них кригинг — метод интерполяции с наименьшей дисперсией — был введен в обиход геологов-разведчиков Ж. Матероном. Этот способ получил свое название в честь учителя Ж. Матерона южно-африканского геолога Дэни Криге. Кригинг — конечно, один из лучших способов интерполяции. Но прежде чем его применять, геолог должен проделать большую предварительную работу, в том числе строя многочисленные карты в изолиниях. Поэтому волей-

неволей геологу придется пользоваться и другими методами интерполяции.

В большинстве методов интерполяции, за исключением методов наименьшей кривизны и полиномиальной регрессии, в которых используют все точки, сначала задается диаметр поискового круга (или эллипса). Все точки, попавшие в поисковый круг, используют для расчета взвешенного среднего, которое будет приписано очередному узлу грида. Веса, с которыми будут учитываться исходные точки, в той или иной мере зависят от расстояния от узла до данной точки. Разные методы интерполяции — это разные способы взвешивания исходных данных в зависимости от расстояния.

Кригинг. В кригинге как методе интерполяции взвешивание проводится, пожалуй, сложнее, чем во всех других методах. Частично иллюстрирует этот процесс рис. 6.38.

Допустим, что в наш поисковый круг попали три точки: 1, 2 и 3. В левом верхнем прямоугольнике показаны их взаимное расположение и их положение вокруг оцениваемой точки О (она помечена крестом). В левом верхнем прямоугольнике точки 1, 2 и 3 соединены между собой. В правом верхнем прямоугольнике показаны те же точки, но они соединены с оцениваемой точкой О. В средней части рисунка два раза повторена сферическая модельная функция, подогнанная под экспериментальную вариограмму.

В нижней части рисунка приведено линейное матричное уравнение, в левой части которого (в колонке) стоят веса точек a_1, a_2 и a_3. Их и нужно определить, для чего надо заполнить матрицу $\gamma_{ij}\{i=1,2,3;\ j=1,2,3\}$ и колонку $\gamma_{Oi}\{i=1,2,3\}$. Это делается так.

Берем расстояние от точки 1 до точки 2 и откладываем его на левой вариограмме (следите за стрелками). Значение модельной функции, соответствующее расстоянию между точками 1 и 2, заносим в два места матрицы, обозначенные γ_{12} и γ_{21}. Матрица симметричная, и эти члены матрицы равны друг другу. Точно так же поступаем со следующей парой точек. По расстоянию между точками 1 и 3 находим значение вариограммы и вставляем его на места γ_{13} и γ_{31}. Аналогично находим и вписываем на соответствующие места значения γ_{23} и γ_{32}. По диагонали этой матрицы стоят значения γ_∞. Они равны общей дисперсии изучаемой переменной $\gamma_\infty = \sigma^2$.

Теперь нам остается заполнить правую колонку матричного уравнения. Сюда помещают значения модельной вариограммы γ_{O1}, γ_{O2}, γ_{O3}, соответствующие расстояниям между центральной точкой О и точками 1, 2 и 3. Теперь матричное уравнение решается одним из многих способов нахождения коэффициентов системы линейных уравнений. При решении способом, выбранным Ж. Матероном, появляется небольшое по величине число μ — множитель Лагранжа. Чем множитель меньше, тем лучше решена система линейных уравнений.

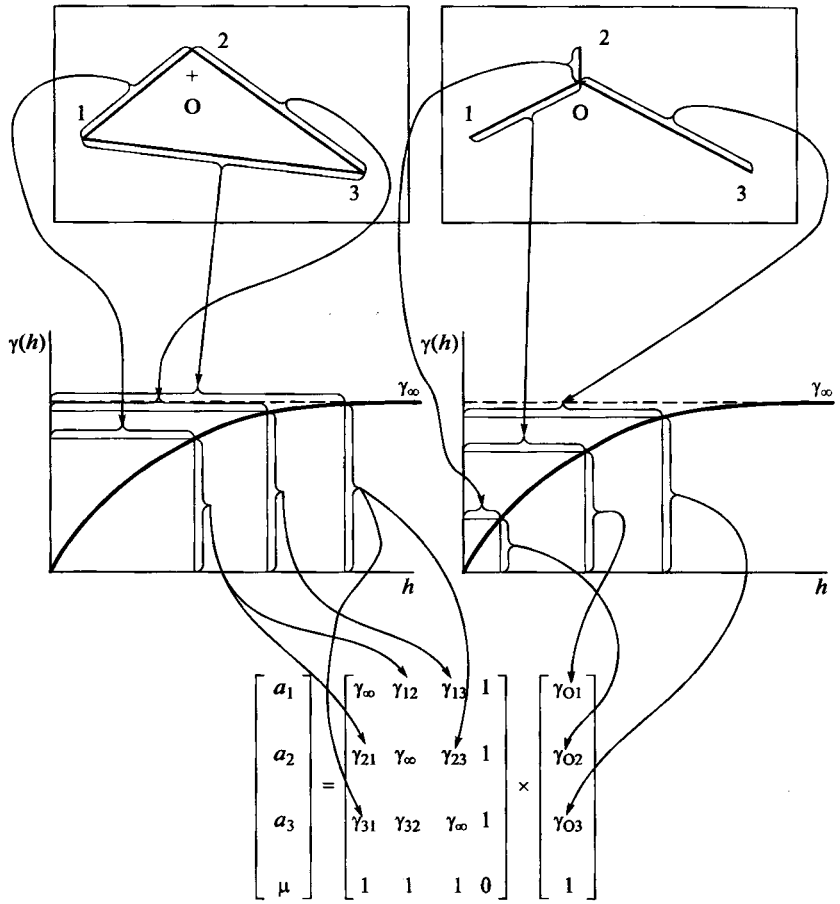


Рис. 6.38. Схема формирования матричной системы линейных уравнений с помощью расстояний между точками и соответствующих им значений модельной вариограммы (объяснение см. в тексте)

Такова схема формирования системы уравнений для нахождения коэффициентов кригинга a_i. Сама кригинговая оценка равна

$$\widehat{Z_k} = \sum_{i=1}^{n} a_i Z_i,$$

где $\widehat{Z_k}$ — кригинговая интерполяционная оценка изучаемой переменной; Z_i — значения переменной в n точках, попавших в круг поиска. В нашем примере в поисковый круг «попали» всего три точки. Обычно же на практике в поисковый круг попадает несколь-

ко десятков или сотен окружающих проб. Соответственно и матричное уравнение расширяется до сотен строк и столбцов.

Считается, что кригинг — это интерполяционная процедура, дающая оценки с наименьшей дисперсией. Дисперсия кригинга равна

$$\sigma_k^2 = \sigma_\infty^2 - \sum_{i=1}^{n} a_i \sigma_{Oi} - \mu,$$

где σ_∞^2 — порог; a_i — коэффициенты (веса) кригинга; σ_{Oi} — ковариация между точкой оценивания и i-й точкой; μ — множитель Лагранжа.

Чем меньше дисперсия кригинга по сравнению с общей дисперсией, тем лучше качество полученной оценки.

Точечный кригинг. Существует несколько разновидностей кригинга: точечный (или ординарный); блочный (или кригинг блоков); универсальный; индикаторный; полииндикаторный; ко-кригинг. В настоящем учебнике дается только ознакомительный курс геостатистики. Поэтому здесь приводятся начальные сведения о наиболее важных и понятных процедурах, а именно о точечном и блочном кригинге. Остальное читатель должен будет осваивать сам по мере накопления опыта решения геостатистических задач.

Точечный, или *ординарный*, кригинг. Авторы советуют использовать термин «точечный», так как он подчеркивает суть этого метода — интерполяционную оценку значения исследуемой пространственной переменной *«в точке»*. Альтернативное название — ординарный — толком ничего не проясняет. Английское слово *ordinary* имеет множество возможных переводов (обычный, обыкновенный, простой, заурядный, посредственный и т. п.), ничего не говорящих о сути этого способа.

А суть данного метода как раз и заключается в том, что найденное значение переменной относится к точке, имеющей вполне определенные три координаты x, y и z. Как это делается, достаточно подробно рассказано ранее.

Перекрестная проверка. Перекрестная проверка (от англ. *cross validation*) была придумана для того, чтобы выбирать лучшие модельные функции вариограмм, если оказалось несколько альтернативных моделей. Попробуем освоить метод перекрестной проверки на упрощенном примере.

Допустим, что при разведке пластовое рудное тело медистых песчаников было пробурено 100 скважинами по сети 100×100 м. Рудное тело залегает субгоризонтально. Средняя мощность рудного тела довольно выдержана. Самым изменчивым параметром рудного тела являются содержания меди. Руда опробовалась по керну скважин. Длина проб в среднем 1 м. По каждой скважине были подсчитаны средние содержания меди. По средним содержаниям в 100 скважинах были построены вариограммы содержаний меди в руде в разных направлениях. Месторождение оказалось изотропным. Можно ли уз-

нать, насколько правильно подобрана модельная сферическая вариограмма (небольшой эффект самородков и радиус зоны влияния около 200 м)? Да, можно.

Перекрестная проверка проводится следующим образом. Для каждой скважины по схеме точечного кригинга рассчитывают содержание меди. При этом используют данные по всем скважинам, исключая ту, для которой ведется расчет. Таким образом, у нас есть два столбца истинных и расчетных содержаний меди (табл. 6.2). Их нужно всесторонне сравнить.

Но прежде введем условные обозначения: $Z_i^{\text{и}}$ — истинное содержание меди в i-й скважине; $Z_i^{\text{р}}$ — расчетное содержание меди в i-й скважине; n — количество скважин (в нашем примере $n = 100$); $\bar{Z}^{\text{и}} = \frac{\sum_{i+1}^{n} Z_i^{\text{и}}}{n}$ — среднее истинное содержание меди; $\bar{Z}^{\text{р}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Z_i^{\text{р}}}{n}$ — среднее расчетное содержание меди; $\delta_i = Z_i^{\text{и}} - Z_i^{\text{р}}$ — отклонение i-го истинного содержания меди от i-го расчетного содержания с учетом знака отклонения; $\Delta_i = \left| Z_i^{\text{и}} - Z_i^{\text{р}} \right|$ — отклонение i-го истинного содержания меди от i-го расчетного содержания без учета знака отклонения; $\bar{\delta} = \frac{\sum_{i}^{n} \delta_i}{n}$ — средняя абсолютная систематическая погрешность; $\bar{\delta}_{\text{отн}} = \frac{\bar{\delta}}{\bar{Z}^{\text{и}}} \cdot 100\%$ — средняя относительная систематическая погрешность; $\bar{\Delta} = \frac{\sum_{i}^{n} \Delta_i}{n}$ — средняя абсолютная случайная погрешность; $\bar{\Delta}_{\text{отн}} = \frac{\bar{\Delta}}{\bar{Z}^{\text{и}}} \cdot 100\%$ — средняя относительная случайная погрешность; $K_{\text{о}} = \frac{\bar{\delta}}{\bar{\Delta}}$ — коэффициент однородности.

Результаты перекрестной проверки записывают в таблицу (см. табл. 6.2). По ней рассчитывают величины $\bar{\delta}$, $\bar{\delta}_{\text{отн}}$, $\bar{\Delta}$, $\bar{\Delta}_{\text{отн}}$, $\bar{K}_{\text{о}}$. В идеале величины $\bar{\delta}$ и $\bar{\delta}_{\text{отн}}$ должны быть равны нулю. Это будет означать, что кригинг не дает систематических смещений, и сумма отрицательных отклонений расчетных содержаний от истинных равна сумме положительных отклонений расчетных содержаний от истинных. В этом случае должны быть равны друг другу средние содержания, рассчитанные по истинным и расчетным содержаниям: $\bar{Z}^{\text{и}} \equiv \bar{Z}^{\text{р}}$. Если же $\bar{\delta} \neq 0$, нужно, чтобы величина относительной ошибки (погрешности) кригинга $\bar{\delta}_{\text{отн}}$ не превышала заранее заданной геологом

Таблица 6.2. **Результаты перекрестной проверки**

№ п/п	Содержание меди		
	истинное $Z_i^{\text{и}}$	расчетное $Z_i^{\text{р}}$	отклонение $\delta_i = Z_i^{\text{и}} - Z_i^{\text{р}}$
1	5,53	5,41	+0,12
2	4,98	5,05	–0,07
...	...	...	...
i	3,66	3,40	+0,26
...	...	...	...
99	4,82	5,13	–0,31
100	5,12	5,01	+0,11

величины такой ошибки, например $\overline{\delta}_{\text{отн}} < 5\,\%$ среднего содержания меди по всему месторождению.

Если же этот критерий не выполняется, это означает, что кригинг дает смещенные оценки содержаний меди. Это недопустимо. Значит, модель неправильно подогнана. Нужно проверить все параметры модельной функции: значение эффекта самородков C_0; радиус зоны влияния a; величину порога σ^2. Возможно, неправильно выбран тип модели.

Случайная ошибка не столь опасна как систематическая, но и она характеризует другую сторону качества кригинговых расчетных содержаний. В принципе возможна такая ситуация. Средняя систематическая погрешность равна нулю: $\overline{\delta} = 0$, т.е. сумма положительных отклонений равна сумме отрицательных отклонений. Но сами отклонения могут быть большими. И здесь тоже нужно задаваться критерием того, чтобы среднее относительное отклонение не превышало определенного значения. Существует критерий, который совместно проверяет соотношение систематической и случайной погрешностей. Это коэффициент однородности. Он должен быть меньше $K_{\text{о}} \le \frac{2{,}45}{\sqrt{n}}$. Величина 2,45 отвечает значению точки стандартного нормального распределения для доверительной вероятности 99 %, или для 1%-го уровня значимости. Вообще, полезно построить два графика — гистограмму отклонений и точечную диаграмму зависимости расчетных и истинных содержаний.

Гистограмма отклонений 1) должна быть симметричной, одновершинной, островершинной; 2) пик гистограммы должен приходиться

на 0; 3) отдельные большие отклонения (выбросы) должны отсутствовать.

На точечной диаграмме «расчетные содержания — истинные содержания» точки должны ложиться вблизи диагонали — линии, идущей под 45°. Желательно рассчитать коэффициент корреляции между расчетными и истинными значениями. Он не только должен быть значимым с высокой доверительной вероятностью (99 % и выше), но по своей величине должен быть никак не ниже 0,90.

Эти же критерии могут быть применены при выборе между альтернативными модельными функциями вариограмм. В общем случае из двух сравниваемых моделей лучше та, у которой меньше и случайные, и систематические погрешности, а также больше коэффициент корреляции.

Кригинг блоков. Точечный кригинг находит оценку пространственной переменной *в точке*. А у нас рудное тело разбито на тысячи блоков. Блок — объемная пространственная фигура — в общем случае имеет форму прямоугольного параллелепипеда. Как с помощью кригинга оценить, например, содержание металла в целом по блоку?

Здесь геостатистики прибегают к маленькой хитрости. Они просчитывают содержание металла 9 раз — в 8 угловых точках блока и в центре блока, который чаще всего называют *центроидом*. По этим 9 точкам рассчитывают среднее содержание:

$$\bar{Z} = \frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9} Z_i,$$

которое и является содержанием металла в блоке. Пользуясь тем, что содержание определяется 9 раз, попутно рассчитывают оценку дисперсии содержания металла в блоке:

$$\sigma_Z^2 = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{9}(Z_i - \bar{Z})^2$$

и среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_Z = \sqrt{\sigma_Z^2}.$$

Не нужно забывать, что для каждой точки кригинг позволяет считать не только оценку значения изучаемой пространственной переменной, но и дисперсию кригинга. Благодаря этому мы можем рассчитать среднюю дисперсию кригинговых оценок в блоке:

$$\bar{\sigma}_K^2 = \frac{1}{9}\sum_{i=1}^{9}\sigma_{K,i}^2,$$

и, мало того, можем рассчитать *дисперсию дисперсии*:

$$\sigma_\sigma^2 = \frac{1}{8}\sum_{i=1}^{9}(\sigma_{K,i}^2 - \bar{\sigma}_k^2).$$

Дисперсия дисперсии звучит непривычно, тем не менее геостатистики (Матерон, 1968; Журнель и Хуйбрехт, 1978) придают этому параметру большое значение.

На первых порах перечисленным величинам можно не уделять большого внимания, но при дальнейших углубленных геостатистических исследованиях они понадобятся. Поэтому нужно помнить, что в отчет по подсчету запасов для каждого блока «впрок» записывается следующая информация для каждого полезного компонента (металла): среднее содержание металла в блоке; среднеквадратическое отклонение кригинговых оценок содержаний от среднего содержания; дисперсия дисперсии.

Кригинговая оценка запасов. Собственно говоря, после того как произведена оценка содержаний всех компонентов (и полезных, и вредных) в рудах, можно считать, что подсчет запасов уже осуществлен. Напомним, что блочные модели рудных тел бывают двух типов. В факторных блочных моделях объем всех блоков одинаков, а фактор показывает, какую долю объема блока занимает руда. Помножив объем блока на фактор и на объемный вес руды, мы получим запас руды в блоке. Помножив затем запас руды на содержание металла в блоке, получим запас металла в блоке.

А в субблочной модели рудного тела благодаря тому, что все пустые части «больших» исходных блоков отброшены, оставшиеся субблоки оказываются на 100 % рудными. Помножив их объем на объемный вес руды и на содержание компонента, мы получим его запасы.

Все оцененные и подсчитанные параметры залежи заносятся в *громадную таблицу*. Почему громадную? Да потому, что даже в среднем по размерам месторождении получаются десятки тысяч блоков. Каждый блок — это строка в таблице. Но и столбцов в этой таблице тоже набирается несколько десятков.

В качестве примера рассмотрим таблицу подсчета запасов по Рубцовскому колчеданно-полиметаллическому месторождению (Рудный Алтай). В этом месторождении три *основных полезных компонента*: Cu, Pb, Zn. Кроме того, по разработанным кондициям требовалось подсчитать запасы следующих ценных *попутных компонентов*: Au, Ag, Bi, Te, Cd, Se, Ga, S (пиритная).

Итак, в матрицу (таблицу) подсчета записывается масса сведений. Таблица подсчета запасов по Рубцовскому месторождению включает 50 колонок. Первые 11 колонок являются общими для всех полезных компонентов:

1 — идентификатор блока (индивидуальный номер);
2 — координата X центра блока;
3 — расстояние до западной и восточной стенки блока $\pm\Delta X$;
4 — координата Y центра блока;
5 — расстояние до южной и северной стенки блока $\pm\Delta Y$;
6 — координата Z центра блока;
7 — расстояние до дна и потолка блока $\pm\Delta Z$;

8 — среднее количество точек, попавших в поисковый эллипс при 9 вычислениях;

9 — объем блока;

10 — объемный вес руды;

11 — запас руды в блоке.

Дальше в таблице идут группы по 4 колонки для каждого основного полезного компонента. Для меди:

12 — среднее содержание Cu в блоке;

13 — дисперсия кригинга содержаний Cu;

14 — стандартное отклонение содержаний Cu в блоке;

15 — запас Cu в блоке.

Аналогичные группы колонок по 4 штуки следуют для Pb (колонки 16—19) и Zn (колонки 20—23). Следующая группа колонок (24—33) содержит сведения о ценных попутных компонентах, запасы которых могут быть оценены по уравнениям множественной регрессии. На каждый химический элемент выделено по 2 колонки. Например, для кадмия:

24 — среднее содержание Cd в блоке;

25 — запасы Cd в блоке.

Аналогичные сведения приводятся для Se, Ag, Bi и Te. После них идет группа колонок (34—36), содержащих сведения по ценным попутным компонентам, для которых не удалось составить уравнения регрессии. Это Ga, Au, $S_{пир}$. Они оцениваются по простым средним содержаниям по всему месторождению. Поэтому им отводится по одной колонке, в которую записывается запас данного элемента в блоке.

Сведения о разбраковке блоков содержатся в колонках 37—49. Что подразумевается под разбраковкой? У нас есть кондиции, в соответствии с которыми минимальное промышленное содержание в подсчетном блоке должно быть больше 6 % условного цинка для сульфидных и смешанных руд. Коэффициенты для перевода в условный цинк: Cu — 1,3; Pb — 1,4. Значит, нужно устроить проверку блоков на содержание условного цинка. В колонке 37, которая условно называется «индекс», ставится 1 (единица), если условие $Zn_{условный} > 6\ \%$ выполняется. Если же оказывается, что $Zn_{условный} < 6\ \%$, блок бракуется, и в графе «индекс» ставится 0.

Если теперь колонки, в которых размещаются запасы руды и отдельных элементов, помножить на колонку «индекс», то запасы в блоках с индексом = 0 обнулятся. В колонках 38—49 размещаются результаты перемножения колонок с запасами с колонкой «индекс»: 38 — запасы руды; 39 — запасы Cu; 40 — запасы Pb; 41 — запасы Zn; 42 — запасы Cd; 43 — запасы Se; 44 — запасы Ag; 45 — запасы Bi; 46 — запасы Te; 47 — запасы Au; 48 — запасы Ga; 49 — запасы $S_{пир}$. Если теперь сложить по каждой колонке чуть больше 20 тыс. блоков (столько блоков получилось в субблоковой модели рудного тела № 1), то получим запасы нужного химического элемента в месторождении.

Операция разбраковки блоков — полезная процедура. Выборочное удаление бедных блоков приводит к общему повышению качества руд.

Содержимое каждой колонки таблицы может быть визуализировано — превращено в 3D-модель, в которой каждый блок будет раскрашен в соответствующий цвет, например в соответствии с содержаниями Cu в блоке.

Но важно знать, насколько можно доверять этой картинке. Для проверки надежности рассчитанных величин можно построить блочную модель рудного тела. Каждый блок раскрашивается в соответствующий цвет в зависимости от количества точек, попавших в круг поиска при оценке параметров блока. Участки с малым количеством точек, возможно, потребуется доразведать.

На карте дисперсий кригинга должны вызывать беспокойство те части залежи, где велика дисперсия кригинга. Нужно ее сравнить с вариограммой меди. Если дисперсия кригинга приближается по величине к пороговому значению вариограммы, то надежность этой оценки будет вызывать сомнение.

На картах стандартных отклонений содержаний нужно обращать внимание на участки с высокими значениями стандартных отклонений. В этих местах 9 кригинговых оценок в блоке, вероятно, имеют широкий разброс значений.

Карта разбракованных блоков ясно показывает местоположение участков с небогатыми содержаниями и малой мощностью рудного тела.

Очень интересная 3D-модель получается, если в качестве картируемого параметра выступает стоимость 1 $м^3$ руды при условии, что из нее полностью будут извлечены все металлы. На 13 октября 2006 г. стоимость основных металлов Рубцовского месторождения на Лондонской бирже металлов составляла, долл. за 1 кг: Cu — 3,4117; Pb — 0,7230; Zn — 1,7282. Были сделаны соответствующие пересчеты. Получилось, что лучше всего разведанный участок месторождения оказался и самым богатым. Стоимость металлов, содержащихся в 1 $м^3$ руды, доходит здесь до 2 000 долл. На периферийных участках стоимость оказывается ниже 100 долл. (опускается до 65). Вряд ли найдется кто-нибудь, кто захочет добывать эту бедную руду себе в убыток.

Геостатистический метод подсчета запасов имеет то неоспоримое преимущество перед традиционными методами, что дает возможность оценить надежность полученных результатов. Он позволяет отразить в каждом блоке десятки параметров руды. В том числе можно сделать наглядными финансово-экономические показатели руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давид М.* Геостатистические методы при оценке запасов руд. — Л.: Недра, 1980.

2. *Матерон Ж.* Основы прикладной геостатистики. — М.: Мир, 1968.

3. Подсчет запасов месторождений полезных ископаемых / [В. И. Смирнов и др.]. — М.: Госгеолтехиздат, 1960.

4. *Прокофьев А. П.* Основы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. — М.: Недра, 1973.

5. *Смирнов В. И.* Геологические основы поисков и разведок рудных месторождений. — М.: Изд-во МГУ, 1957.

6. *Iournel A. G.* Mining geostatistics / A. G. Iournel, Ch. J. Huijbregts. — L.—N.-Y.—S.F.: Academic press, 1979.

Глава 7
Разработка месторождений полезных ископаемых

7.1. Правовые аспекты разработки

По окончании детальной разведки месторождения (его участка), оценки разведанных запасов, технико-экономического обоснования (ТЭО) постоянных кондиций и определения подготовленности месторождения для промышленного освоения в Государственной комиссии по запасам (ГКЗ РФ) месторождение передается на государственный баланс запасов полезных ископаемых. Составление государственного баланса запасов полезных ископаемых осуществляется органом управления государственным фондом недр.

Недра Российской Федерации находятся в государственной собственности и не могут быть предметом купли-продажи, наследования, дарения, вклада, залога или отчуждаться в иной форме. Они предоставляются в пользование на основе лицензирования, на определенных условиях и на установленный срок: для геологического изучения — до 5 лет, для добычи полезных ископаемых и в целях, не связанных с добычей, — до 20 лет или на срок отработки месторождения, исчисляемый исходя из ТЭО разработки месторождений полезных ископаемых, при совмещении геологического изучения и добычи — до 25 лет.

Предоставление недр для разработки разрешается только после проведения государственной экспертизы запасов полезных ископаемых, геологической, экономической и экологической информации о предоставляемом в пользование участке недр. Экспертиза проводится ГКЗ РФ для оценки условий комплексного использования недр, уточнения границ горного отвода и определения платы за пользование недрами.

7.2. Способы разработки месторождений

Разработка месторождения — комплекс работ по извлечению полезного ископаемого из недр. Ввиду разнообразия вещественного состава и физико-химических свойств полезных ископаемых, формы и условий залегания рудных тел разработка месторождений осуществляется различными способами. Твердые полезные ископаемые — руды металлов и неметаллов, уголь, строительные материалы — из-

влекают *открытым*, *подземным* или *комбинированным способами*, жидкие и газообразные — фонтанированием и откачкой из скважин, рассолы — растворением и выпариванием.

При открытом способе выемка полезного ископаемого проводится непосредственно с поверхности. Подземным способом разрабатывают глубокозалегающие под толщей перекрывающих пород месторождения. При комбинированном способе верхнюю часть месторождения отрабатывают открытыми горными работами, глубинную — подземными, иногда совмещая во времени оба способа разработки.

Существуют и иные, специальные, способы, например разработка полезного ископаемого гидроспособом с применением гидравлического способа отбойки и гидротранспорта.

Некоторые скважинные способы добычи полезных ископаемых (метод Фраша, подземное растворение солей) стали разрабатываться и применяться в XX в., систематическое развитие этого направления началось после Второй мировой войны и к концу 1960-х гг. завершилось формированием *физико-химической геотехнологии* — совокупности специальных методов добычи.

Масштабы и интенсивность освоения недр традиционными способами в настоящее время стали столь велики, что перед горным делом возникли проблемы экономической эффективности разработки месторождений, минимизации ущерба окружающей среде и решения задач безопасности горного производства.

Стадии разработки месторождений. Разработка месторождений включает три основные стадии: вскрытие, подготовку и очистную выемку.

Вскрытие — это установление грузотранспортной связи между горизонтами разработки и пунктами приема горной массы на земной поверхности. Месторождения вскрывают горными выработками (шахтными стволами, штольнями, капитальными траншеями), обеспечивающими доступ от поверхности земли или какой-либо разрабатываемой части месторождения к вновь создаваемым рабочим горизонтам. По этим выработкам транспортируют добытое полезное ископаемое (руду, уголь и др.) и вмещающие породы на поверхность, доставляют людей, оборудование и материалы, проветривают подземные выработки и т. д.

Очистная выемка — извлечение полезного ископаемого из вскрытой части месторождения. Ей предшествует проведение подготовительных выработок на месторождении или по вмещающим породам.

Подготовительные выработки разделяют вскрытую часть месторождения на отдельные выемочные участки — этажи, блоки, панели, обеспечивающие возможность его отработки.

Подготовительные и очистные работы выполняются в определенном порядке и последовательности, которые характеризуют систему разработки месторождения или его части.

Система разработки — это порядок проведения подготовительных и очистных работ, обеспечивающий для данного месторождения безопасную, экономичную и наиболее полную выемку кондиционных запасов.

При открытом способе разработки существенным признаком системы разработки является порядок выполнения вскрышных работ — удаления необходимого для добычи полезного ископаемого определенного количества перекрывающих и вмещающих его пород.

Извлечение полезного ископаемого и пустых пород включает ряд производственных процессов: отделение части полезного ископаемого или породы от общего массива (выемки); погрузка их в средства транспорта; перемещение и выдача на поверхность. Эта совокупность процессов по удалению вмещающих пород и добыче полезного ископаемого и есть *горные работы*.

Добычу полезного ископаемого горные предприятия ведут на отведенных для них месторождениях или их участках (горных отводах). Различают следующие горные предприятия: рудник, шахта, карьер (разрез). Рудник и шахта разрабатывают месторождение или его часть подземным способом, карьер (разрез) — открытым. В соответствии с этим различают рудничные, шахтные и карьерные поля месторождения (его части), разрабатываемые одним рудником, шахтой или карьером.

Шахтное поле по падению месторождения разделяется подготовительными выработками на участки — этажи, вытянутые, как правило, по простиранию. *Этажом* называется часть месторождения, ограниченная по падению откаточными выработками, а на флангах — границами шахтного поля. Высота этажа определяется расстоянием между двумя смежными откаточными горизонтами. В пределах этажа полезные ископаемые извлекаются отдельными блоками, образующими самостоятельные выемочные участки. Месторождение обычно отрабатывается подземным способом поэтажно сверху вниз. Шахтные поля горизонтальных и весьма пологих пластообразных залежей разделяются на панели — прямоугольные или квадратные участки, ограниченные продольными и поперечными или только продольными откаточными выработками.

При открытой разработке, прежде чем начать добычу полезного ископаемого, необходимо удалить породы, покрывающие рудное тело (пласт полезного ископаемого). Работы по удалению наносов и боковых пород (вскрыша) включают выемку и погрузку пустых пород, транспортирование пород до отвала (места их размещения на поверхности), отвалообразование — порядок размещения горной массы в отвале. Выемку полезного ископаемого и вскрышу обычно проводят горизонтальными слоями (уступами) сверху вниз. По мере выемки запасов на данном горизонте работы переходят на следующий нижележащий горизонт.

Эксплуатационные горные выработки. Горная выработка — пространство, образованное искусственным путем в толще полезного ископаемого или вмещающих пород для поисков, разведки или разработки месторождения полезного ископаемого.

Эксплуатационные горные выработки проходят в целях добычи полезного ископаемого из месторождений открытым, подземным или другим способом. Эксплуатационные горные выработки делятся на капитальные, подготовительные и очистные.

Капитальные — выработки, проходимые для вскрытия месторождения и обеспечения транспортной связи месторождения с земной поверхностью.

Подготовительные — выработки, рассекающие месторождение на выемочные участки и блоки и подготавливающие его для очистной выемки.

Очистные — выработки, образованные непосредственно при выемке полезного ископаемого из месторождения.

7.3. Факторы, определяющие выбор способа разработки

Основные сведения, необходимые для выбора способа и систем разработки месторождения, получают при его изучении в процессе геолого-разведочных работ. Выбор способа разработки определяют главным образом горно-геологические, гидрогеологические и инженерно-геологические условия месторождения, изученные с детальностью, достаточной для составления проекта разработки. Именно эти условия определяют рациональные способы разработки месторождения и комплекс специальных мероприятий по их осуществлению.

Горно-геологические условия включают запасы месторождения, вещественный состав и технологические свойства полезного ископаемого, форму, размеры, условия залегания рудных тел и вмещающих пород и их изменчивость, характер контактов и выклинивания, тектоническую нарушенность.

Форма залежей. Морфоструктурные особенности месторождения (форма, размеры, пространственное положение тел полезных ископаемых среди вмещающих пород, закономерности внутреннего строения, тектоническая нарушенность и др.) имеют первостепенное значение при решении вопросов его рациональной разработки, влияют на способы разработки, способы и схемы вскрытия и подготовки, выбор параметров систем разработки и производственных процессов. Оценка названных показателей — одна из важнейших задач изучения месторождения при разведке и эксплуатации.

Форма и размеры тел полезных ископаемых (в плане) определяют общие размеры горного отвода, карьерных, рудничных и шахтных полей, способы и схемы вскрытия и подготовки месторождений,

схему их деления на шахтные поля и выемочные участки, некоторые параметры системы разработки, развитие транспортной сети, схему вентиляции.

Форма тел полезных ископаемых и характер ее изменчивости оказывают влияние на производительность и экономичность систем разработки.

Мощность и условия залегания залежей. При разработке различают рабочую (кондиционную) и нерабочую (некондиционную) мощность тел полезных ископаемых.

В практике геолого-разведочного и горного дела пользуются понятиями выдержанности мощности или выдержанности залежи. По выдержанности выделяют четыре типа залежей:

1) ***выдержанные*** — непрерывно протягивающиеся, имеющие рабочую мощность в пределах шахтного поля, месторождения, района и даже бассейна; иногда на осадочных месторождениях площадь рабочего контура залежи достигает нескольких десятков и сотен квадратных километров;

2) ***относительно выдержанные*** — в площади рабочего контура которых наблюдаются отдельные точки и даже небольшие блоки с нерабочей мощностью; суммарная площадь таких блоков составляет не более 25 % всей площади рабочего контура;

3) ***невыдержанные*** — прерывистые; внутри рабочего контура блоки с нерабочей мощностью или пустые породы занимают в сумме до 50 %;

4) ***крайне невыдержанные*** — в которых блоки рабочей мощности встречаются спорадически среди пустых пород или участков с нерабочей мощностью и занимают менее 50 % всей площади залежи.

Угол падения рудных тел, его изменчивость ограничивают возможности применения целого ряда систем разработок. Величина угла падения и особенно его изменчивость заметно сказываются на производительности систем разработки, величине потерь и разубоживания.

Характер контактов (границ тела полезного ископаемого с вмещающими породами) и характер выклинивания (окончания тела по простиранию) являются главными причинами потерь полезного ископаемого и засорения его пустой породой.

Величина мощности тела полезного ископаемого вместе с углом падения определяет возможную ширину или высоту очистного пространства и таким образом существенно сказывается на производительности системы разработки.

Тела полезных ископаемых по их мощности разделяют на классы, численные пределы которых неодинаковы для разных способов разработки и условий залегания.

Для ***открытой разработки*** месторождений различают залежи весьма маломощные (до 2 м), малой (2—10 м) и средней (10—20 м) мощности, мощные (20—50 м) и весьма мощные (более 50 м).

Для *подземной разработки* рудные тела разделяют по мощности на следующие классы:

1) *тонкие* (мощность до 0,7—0,8 м) — при очистной выемке которых проводят подработку вмещающих боковых пород для создания нормальных условий работы в забое; отбойка руды мелкошпуровая;

2) *маломощные* (0,8—3 м) — подработка в которых проводится лишь при проходке подготовительных выработок; отбойка тем же способом;

3) *средней мощности* (3—8 м) — подготовительные выработки и очистные работы в которых ведут без подработки вмещающих пород; они разрабатываются с установкой составной крепи; отбойка руды шпурами или штанговыми скважинами небольшой длины;

4) *мощные* (8—30 м) — которые при соответствующих условиях могут разрабатываться блоками по простиранию; отбойка руды шпурами, штанговыми или глубокими скважинами;

5) *весьма мощные* (более 30 м) — в которых по условиям управления горным давлением необходима разработка участками, расположенными вкрест простирания; так же ориентированы и целики между участками (камерами). При мощности тел более 40—50 м рудные залежи с крутым падением иногда разделяются по мощности на панели, при пологом и горизонтальном залегании — на этажи.

Глубина залегания. Залежи полезных ископаемых могут занимать относительно поверхности рельефа различное положение. Для открытого способа разработки по глубине залегания выделяют залежи следующих типов:

1) *поверхностные* — непосредственно выходящие на поверхность или расположенные под наносами небольшой (до 50 м) мощности;

2) *глубинные* — перекрытые толщей пород мощностью более 50 м; в пределах этого типа выделяют залежи средней (50—250 м), большой (250—500 м) и весьма большой (более 500 м) глубины залегания;

3) *высотные* — выше господствующего уровня поверхности;

4) *высотно-глубинные* — выше и ниже поверхности рельефа.

Факторы, определяющие выбор способа и системы разработки. Выбор способа разработки месторождения определяют горно-геологические, горно-технические, экономические и экологические факторы.

Совокупная оценка горно-геологических, гидрогеологических и инженерно-геологических условий месторождения влияет на определение основных технико-экономических показателей горно-добычных работ, себестоимость добычи 1 т минерального сырья и полезных компонентов с учетом потерь и разубоживания руд в процессе разработки месторождения.

Разработка месторождения осуществляется горным предприятием на основе проекта. Проект выполняется проектным институтом или

организацией. Различают горно-добывающие предприятия, товарным продуктом которых является руда, горно-обогатительные комбинаты (ГОК), продукция которых — различные концентраты; горно-металлургические комбинаты (ГМК), производящие один или несколько металлов.

При проектировании разработки месторождения главная роль принадлежит созданию геолого-экономической модели месторождения и сравнительному анализу нескольких вариантов разработки по различным геолого-промышленным параметрам. Выбор оптимального варианта может осуществляться по нескольким показателям: себестоимость производимого продукта; комплексность извлечения полезных компонентов; минимизация ущерба окружающей среде (ОС); срок разработки месторождения; чистый дисконтированный доход (ЧДД) и ряд других.

7.4. Разработка месторождений открытым способом

Открытый способ разработки месторождений на протяжении 50 лет занимает в нашей стране ведущие позиции, что объясняется его неоспоримыми преимуществами экономического, технического, технологического, организационного и социального характера по сравнению с подземным способом. В России в последние годы открытым способом ежегодно добывают около 90 % железной руды, 90 % горной массы, 62 % руд цветных металлов, 60 % угля, почти 100 % алмазов и сырья для производства строительных материалов. Себестоимость добычи 1 т руды или угля открытым способом в 1,5—2 раза меньше, чем подземным, а потери при добыче меньше в среднем в 4—5 раз. Сроки строительства карьеров меньше сроков строительства шахт равной производственной мощности, а удельные капитальные затраты на строительство соответственно в 2—2,5 раза меньше. Это обусловлено использованием мощной и высокопроизводительной техники, размеры которой не ограничиваются поперечным сечением подземных горных выработок, легкостью контроля в ряде случаев контуров рудных тел. В результате этого горные предприятия, разрабатывающие месторождения открытым способом — карьеры, достигают весьма большой единичной мощности, на порядок превышающей мощность подземных рудников. К недостаткам открытого способа разработки следует отнести большие объемы вскрышных пород, значительные площади отчуждаемых земель, зависимость от климатических условий, негативное воздействие горного производства на окружающую среду.

Для размещения только одного карьера, его отвалов, хвостохранилищ и промплощадки комбината требуется 2 000—3 000 га земель.

По мнению многих специалистов, глубина карьеров по экономическим, экологическим и социальным причинам не должна превышать 500—700 м. С ростом глубины карьеров при существующей технологии постоянно ухудшаются показатели работы из-за резкого увеличения затрат на транспортирование добытых пород на поверхность. Установлено, что при ежегодном углублении карьеров на 15 м эффективность открытой разработки снижается на 5—15 %.

Горно-технические понятия и термины. *Карьером* называется горное предприятие, осуществляющее открытую разработку месторождения. Это понятие включает всю совокупность открытых горных выработок, служащих для разработки месторождения. Открытая разработка угольных месторождений осуществляется *разрезами*, а россыпей — *приисками*. Схема открытого способа разработки показана на рис. 7.1, *а*.

При разработке открытым способом месторождение разбивают на горизонтальные слои. Карьер имеет ступенчатую форму, так как часто одновременно отрабатывают несколько слоев. Одна ступень, т. е. часть слоя, имеющая ступенчатую форму, называется *уступом* (рис. 7.1, *б*). Угол, образованный плоскостью откоса уступа с горизонтальной плоскостью, называется *углом откоса уступа*. Понятия «верхняя площадка» и «нижняя площадка» относительны: верхняя площадка нижнего уступа является одновременно нижней площадкой для вышележащего уступа. Расстояние между верхней и нижней площадками по вертикали — *высота уступа*. Наиболее часто высота уступа равна 10—15 м.

Площадка уступа, на которой располагается добычное оборудование, называется *горизонтом*. Карьер на рис. 7.1, *а* имеет три рабочих горизонта.

В отличие от подземной разработки при открытых горных работах наряду с рудой приходится извлекать большое количество пустых пород, окружающих рудное тело. Процесс извлечения руды называют *добычными* работами, а удаление пустых пород — *вскрышными*.

До начала вскрышных или добычных работ каждый горизонт вскрывают, т. е. проходят к нему с вышележащего горизонта въездную траншею. *Въездная траншея* представляет собой наклонную канавообразную выработку. Для подготовки горизонта к добычным или вскрышным работам проходят *разрезную траншею*, являющуюся продолжением въездной траншеи. Разрезная траншея в отличие от въездной не имеет уклона.

Добычные или вкрышные работы начинают отработкой одного или обоих бортов разрезной траншеи отдельными полосами — *заходками*. После отработки одного из бортов въездной траншеи она принимает форму съезда.

В процессе добычных или вскрышных работ выделяют следующие производственные операции: отбойку, погрузку, транспортирование и отвалообразование.

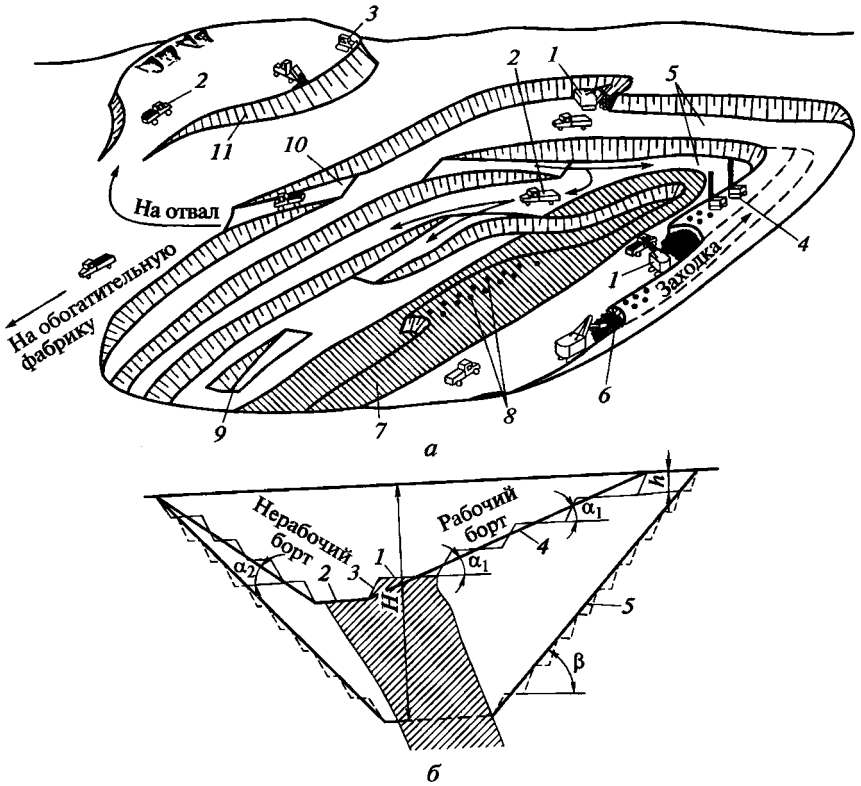


Рис. 7.1. Схема открытого способа разработки угольного месторождения (*а*) и элементы уступа карьера (*б*) (по С. С. Борисову):

а: *1* — экскаватор; *2* — автотранспорт; *3* — бульдозер; *4* — буровой станок; *5* — рабочие горизонты; *6* — взорванная масса; *7* — рудное тело; *8* — скважины; *9* — въездная траншея на 4-й горизонт; *10* — съезд на 1-й горизонт; *11* — отвал пустых пород; *б*: *1*, *2* — верхняя и нижняя площадки; *3* — откос уступа; *4*, *5* — верхняя и нижняя бровки месторождения; α_1, α_2 — углы разгона рабочего и нерабочего бортов; β — угол погашения; *h* — высота уступа; *H* — глубина карьера

Отбойка (буровзрывные работы) заключается в бурении станками вдоль заходки нисходящих скважин, заряжании их взрывчатыми веществами и последующем взрывании.

Погрузка осуществляется, как правило, экскаваторами. При наличии мягких пород экскаватор может работать без предварительного рыхления их взрывными работами. Участок заходки, отведенный для отработки одним экскаватором, называется *блоком*.

Транспортирование руды на обогатительную фабрику, а пустых пород в отвалы осуществляют различными видами транспорта — автомобильным, рельсовым, конвейерным.

Отвалообразование заключается в размещении пустых пород в специально отведенные для этой цели места. При автомобильном транспорте процесс отвалообразования состоит из разгрузки автосамосвала на отвале и сваливания пустой породы под откос бульдозером.

Таким образом, открытая разработка включает следующие стадии: вскрытие, подготовку, вскрышные и добычные работы. Каждая из этих стадий состоит из отбойки, погрузки, транспортировки горных пород и отвалообразования (если извлекаются пустые породы).

Боковые поверхности, ограничивающие карьер, называют *бортами* карьера. Борт карьера, на котором ведут добычные или вскрышные работы, называют *рабочим*. Если в борту карьера горных работ не производят, он называется *нерабочим* (см. рис. 7.1, *б*). На нерабочем борту обычно располагаются транспортные и предохранительные площадки. Транспортные площадки служат для расположения транспортных путей. Размеры их определяются габаритами подвижного состава и количеством путей. Предохранительные площадки служат для безопасности: на них задерживаются куски породы, обрушающиеся с откоса уступа. Ширина площадок безопасности принимается равной 2—4 м (не менее 0,2 высоты уступа). Через каждые 30 м глубины карьера ширину площадок безопасности принимают не менее 6 м. Эти площадки служат для периодической очистки с них обрушившейся породы.

Максимальную глубину карьера, принятую проектом, называют *предельной*, а линию, соединяющую верхнюю бровку карьера с нижней бровкой нижнего уступа в предельном положении бортов карьера, — *линией погашения*, Угол, образованный этой линией с горизонтальной плоскостью, называется *углом погашения*. Величина этого угла зависит от устойчивости пород и глубины карьера и составляет 35—50°. Линия, соединяющая верхнюю и нижнюю бровки карьера в период его разработки, называется *линией разгона*, а угол, образованный этой линией с горизонтальной плоскостью,— *углом разгона*. Угол разгона рабочего борта α_1 всегда меньше, чем нерабочего α_2, и составляет 15—30°.

Системы открытой разработки. Система разработки — важнейшая составная часть технологии горного производства как при открытом, так и при подземном способе добычи. Под системой открытой разработки месторождения понимают определенный порядок ведения горно-капитальных, вскрышных и добычных работ, обеспечивающий для данного месторождения полную выемку кондиционных запасов. Рационально выбранная для конкретных горно-геологических и организационно-экономических условий система разработки во многом определяет экономическую эффективность и безопасность горных работ, а также их воздействие на окружающую среду. Число систем открытой разработки относительно невелико.

Основными элементами системы разработки являются рабочие уступы и площадки, разрезные траншеи, внутренние отвалы.

Основные параметры системы: высота и угол откоса рабочих уступов; ширина заходок рабочих площадок, угол наклона рабочего борта; параметры рабочей зоны; углы наклона выемочных слоев, разделяющих залежь полезного ископаемого и толщу вскрыши; число рабочих уступов (вскрышных, добычных и на внутреннем отвале); длина фронта работ; число рабочих бортов; величина вскрытых и готовых к выемке запасов.

Основные показатели: скорость подвигания уступов; скорость углубления карьера; производительность рудного и породного фронтов работ; производительность рабочей зоны (вскрышной, добычной).

Система разработки неразрывно связана с комплексами оборудования карьера. Если система разработки определяет порядок и последовательность выполнения горных работ, то комплексы оборудования — средства и методы их выполнения.

Способы вскрытия. Вскрытие — комплекс горных и строительных работ по созданию на карьере системы капитальных и временных траншей и съездов, а также других горных выработок и сооружений, обеспечивающих грузотранспортную связь между рабочими горизонтами и приемными пунктами на поверхности.

Вскрытие осуществляется горно-капитальными и строительными работами, в процессе выполнения которых удаляется первоначальная вскрыша и создается доступ к полезному ископаемому, проводятся капитальные и разрезные траншеи, создается система транспортных коммуникаций.

Месторождение считается вскрытым, когда закончены горно-капитальные работы и созданы вскрытые запасы полезного ископаемого в объеме, достаточном для начала работ по эксплуатации карьера.

Различают способ, схему и систему вскрытия. На различных карьерах и даже на одном в различные периоды его эксплуатации могут применяться различные способы вскрытия.

Способ вскрытия — это комплекс вскрывающих горных выработок и сооружений на карьере, характеризуемый их структурой, конструкцией, количеством, пространственным положением, динамичностью.

Выбор способа вскрытия определяют многие факторы: условия залегания месторождения; рельеф местности; расположение приемных устройств (обогатительной фабрики, отвалов, станций и т.д.) и других поверхностных сооружений; виды горного и транспортного оборудования, принятого для разработки месторождения; система разработки месторождения; производительность карьера (годовые объемы вскрышных работ и распределение объема вскрыши по годам разработки).

В практике проектирования горных предприятий и управления их эксплуатацией существенное значение имеет *схема вскрытия* —

совокупность всех вскрывающих выработок, которые обеспечивают в данный период грузооборотную связь рабочих горизонтов карьера с горизонтами доставки горной массы. Схема вскрытия характеризуется типом, числом и пространственным положением вскрывающих выработок.

Система вскрытия — последовательность изменения схем вскрытия за период существования карьера.

Условия залегания залежей и схемы их открытой разработки. Залежи полезных ископаемых, разрабатываемые открытым способом, разделяют по углу падения на следующие группы: горизонтальные и пологие (8—10°); наклонные (от 8—10 до 25—30°); крутонаклонные (от 25—30 до 55°); крутые, или крутопадающие (от 55 до 90°); сложные, характеризующиеся переменными значениями азимутов и углов падения, залегающие в складчатых структурах, зонах разрывных нарушений, и др.

От угла падения залежей зависит выбор систем разработки. Размещение отвалов в выработанном пространстве карьера возможно при разработке горизонтальных и пологих залежей с применением сплошных систем (рис. 7.2, *а*). Реже это допускается при разработке вытянутых наклонных и крутонаклонных залежей.

Условия залегания наклонных и крутопадающих тел, распространяющихся на значительную глубину, не позволяют использовать выработанное пространство для размещения пустых пород. В этих условиях широко применяют углубочные системы разработки с перевозкой вскрыши на внешние отвалы средствами транспорта (рис. 7.2, *б*, *в*).

При наклонном и крутом залегании горные породы разрабатываются в глубину. Рабочая зона, т. е. число уступов, находящихся в одновременной работе, в процессе эксплуатации изменяется. Горно-подготовительные работы выполняют в течение всего срока существования карьера. Их относительный объем на каждом уступе обычно возрастает с углублением рабочей зоны. Длина фронта уступа уменьшается, а расстояние транспортирования внутри карьера увеличивается.

При разработке наклонных залежей по условиям устойчивости конечных бортов карьера и размещения вскрывающих выработок обычно не требуется выемка вскрышных пород лежащего бока залежи (см. рис. 7.2, *б*). При крутом падении необходимо производить разработку вмещающих пород как висячего, так и лежачего бока залежи (см. рис. 7.2, *в*).

Глубина эрозионного среза тел полезных ископаемых может иметь различное положение относительно поверхности рельефа. Как упоминалось ранее, для условий открытой разработки по глубине залегания выделяют залежи следующих типов:

– *поверхностные* — непосредственно выходящие на поверхность или расположенные под наносами небольшой (до 50 м) мощности;

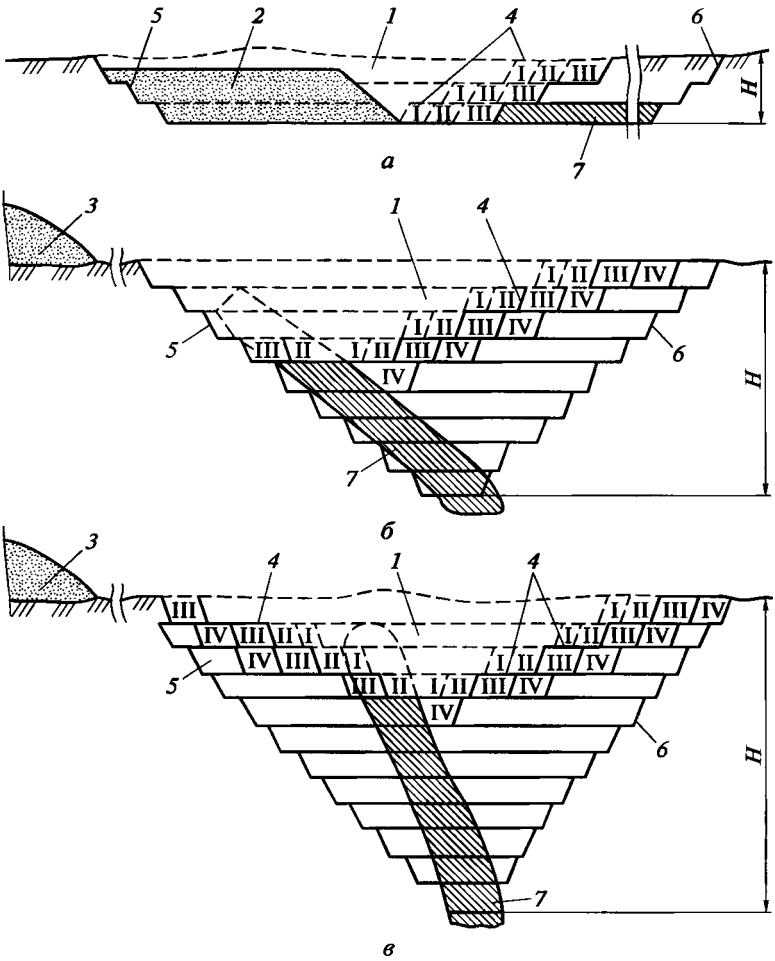


Рис. 7.2. Схемы открытой разработки месторождения:

а — сплошная система разработки при горизонтальном и пологом залегании рудного тела; *б, в* — углубочные системы разработки при наклонном (*б*) и крутом (*в*) залегании; *1* — выработанное пространство; *2, 3* — отвалы; *2* — внутренний, *3* — внешние; *4, 5* — рабочий и нерабочий борта; *6* — конечный контур карьера; *7* — рудное тело; I—IV — последовательность развития работ на уступах; *H* — глубина карьера

– ***глубинные*** — перекрытые толщей пород мощностью более 50 м; в пределах этого типа выделяют залежи средней (50—250 м), большой (250—500 м) и весьма большой (более 500 м) глубины;

– ***высотные*** — расположенные выше господствующего уровня поверхности;

– ***высотно-глубинные*** — залегающие выше и ниже поверхности рельефа.

Определение глубины разработки открытым способом. С увеличением глубины открытой разработки себестоимость добычи 1 т руды возрастает пропорционально росту коэффициента вскрыши. При его определенной величине (а следовательно, и глубине карьера) себестоимость добычи 1 т руды открытым способом становится равной себестоимости добычи 1 т руды при разработке подземным способом. Эта глубина карьера называется конечной. Существует несколько основных коэффициентов вскрыши, из которых следует упомянуть средний и граничный.

Средний коэффициент вскрыши $K_{ср}$ — отношение объема пустых пород в пределах всего карьерного поля к извлекаемым запасам полезного ископаемого в тех же границах.

Граничный коэффициент вскрыши $K_{гр}$ характеризует экономическую эффективность открытого способа разработки в сравнении с подземным.

Считается, что когда полная себестоимость открытой добычи полезного ископаемого будет равна стоимости полезного ископаемого в данном регионе, открытая добыча будет прекращена.

7.5. Специальные способы открытой разработки

К специальным способам относятся гидромеханизированная и подводная горные технологии, т. е. способы разработки полезных ископаемых с помощью воды и из-под слоя воды. Объекты разработки — месторождения, залегающие в обводненных породах (россыпи золота, платины, алмазов, касситерита, ильменита, рутила, циркона, монацита, песков и других полезных ископаемых), по руслам и в поймах рек, на дне озер, континентальном шельфе, в зоне глубокой акватории морей и океанов. Они сложены преимущественно рыхлыми осадочными породами. Разработка этих объектов обычными способами невозможна по технико-экономическим и экологическим причинам.

Гидромеханизированные способы разработки осуществляются при гидравлическом воздействии струй или потока воды на объект разработки с гидротранспортировкой разрушенных пород в отвалы или потребителям. К ним относятся гидравлический (гидромониторный) способ разработки россыпных, торфяных и вскрышных пород угольных месторождений, добыча озерного сапропеля, гидровскрышные работы, добыча галечно-гравийно-песчаных отложений, а также гидромеханизация гидротехнического, транспортного и специального строительства.

Промышленные технологии применяют со второй половины XIX в. по настоящее время, при этом используют два типа оборудования — землесосные снаряды и драги.

Землесосный снаряд — плавучая землесосная установка, предназначенная для выемки полезных ископаемых и пород из-под воды и транспортирования пульпы на обогатительную фабрику, в отвал или на места возведения намывных насыпей (дамб, плотин, планировки территорий и т. д.). Он имеет грунтозаборное устройство, всасывающее грунт непосредственно при работе землесоса или после предварительного рыхления механическим или гидравлическим (напорной струей воды) способом.

Разработка рыхлых отложений землесосными снарядами на рубеже XIX—XX вв. использовалась в основном для дноуглубительных работ в портах, на реках, при строительстве каналов, например во Франции с 1859 г.

В России гидравлический способ добычи золота был успешно применен в 1867 г. на приисках озера Байкал.

Гидравлический способ разработки торфа в России был предложен в 1914 г.; внедрение этого способа в производство в 1920-е гг. обеспечило создание торфяной промышленности, снабжавшей топливом районные торфяные электростанции, сооруженные в соответствии с планом ГОЭЛРО. В 50-е гг. гидромеханизация нашла широкое применение на угольных карьерах и шахтах. На рудных месторождениях гидровскрышные работы были применены на КМА. В настоящее время ежегодный объем землесосных работ (не считая дноуглубительных) в стране превышает 1 млрд $м^3$.

При затруднениях использования земснарядов применяют *драги* — плавучие выемочно-транспортные и обогатительные комплексы, оснащенные рабочим органом для добычи полезных ископаемых из-под воды, промывочно-обогатительными агрегатами для их первичного обогащения и транспортно-отвальным оборудованием для укладки отходов обогащения в отвал.

Значительная часть россыпных месторождений, залегающих в руслах рек, отвод вод которых затруднен или невозможен, отрабатывается драгами. Первая дражная разработка золотоносных россыпей была осуществлена в Новой Зеландии в 1863 г. В России первая разработка россыпей дражным способом введена в эксплуатацию в 1893 г.; в настоящее время ведется в различных климатических зонах: на Урале, Алтае, в Восточной и Западной Сибири, Забайкалье, Якутии и на Дальнем Востоке, включая его северо-восточную часть.

Освоение минеральных ресурсов дна Мирового океана становится первоочередной задачей. К числу наиболее перспективных геолого-промышленных типов относятся месторождения железомарганцевых конкреций (ЖМК) и залежи кобальтоносных железомарганцевых корок (КМК).

Конкреции свободно залегают на субгоризонтальных поверхностях океанического дна, образуя крупные скопления — залежи. Они лежат на весьма слабых по несущей способности отложениях — радиоля-

риевых илах. Верхний слой этих пород мощностью до 0,1 м представлен слабо- и вязкотекучими осадочными отложениями с несущей способностью < 7 кПа, конкреции погружены в него на половину или до 2/3 своего объема; иногда они полностью погружены в активный слой. Ниже, до глубины 0,4 м от уреза дна, расположен слой с несколько большей несущей способностью.

Российскими специалистами разработаны две технологии добычи железомарганцевых конкреций. *Первая технология* — отдельная машина для сбора конкреций и их отмыва от вмещающих пород. Собранные конкреции по вертикальному трубопроводу системой грунтовых насосов поднимают на судно, а отработанную воду, поднятую из придонных слоев вместе с невыделенной из пульпы минеральной массой, необходимо во избежание экологических нарушений закачивать в глубокие воды океана. Подобные решения в различных вариациях предлагались и в других странах. Эффективность технологии определяется полнотой сбора конкреций с дна, качеством их отмыва от ила придонных слоев и устойчивостью конкреций при подъеме.

Вторая технология — ленточно-конвейерная система подъема. Ее отличает то, что сетчатые ковши-контейнеры, двигаясь в одном направлении, осуществляют через боковую открытую грань снятие конкреций с поверхности за счет подпиливания верхнего слоя при движении судна в перпендикулярном направлении. Эксперименты в Балтийском море и Канарской котловине на глубине 3 500 м подтвердили возможность такого способа сбора конкреций и их отмыва от вмещающих пород и достаточную полноту извлечения запасов океанических месторождений данного типа. Система, близкая описанной, была спроектирована и опробована в Японии.

Экономические расчеты показали, что по первой технологии затраты на разработку с учетом создания гидрометаллургического завода для выделения металлов из конкреций соизмеримы с затратами на горно-металлургических предприятиях такого же масштаба на суше. Рентабельность океанического предприятия менее 6 %. Вторая технология позволяет повысить производительность каждого судна в четыре раза, резко снизить эксплуатационные расходы, обеспечить в пять раз большую рентабельность подводной добычи.

Корковые образования в виде протяженных покровов залегают на скальных и твердых породах на склонах подводных гор крутизной не более 12—20°. Субстратом корок являются породы различного состава (выветрелые базальты, известняки и др.). Корки имеют слоистое строение и характеризуются повышенным содержанием кобальта (от 0,5 до 0,8 %). Распространены корки преимущественно в батиметрическом интервале 1 000—3 500 м, они облекают верхние части гайотов. Плотность материала корок 1 800—2 110 кг/м^3 при

плотности субстрата 2 180—2 400 кг/м^3. Пористость 10—20 %. По прочностным характеристикам корки близки к углям, сравнительно легко отделяются от субстрата и крошатся.

Экспериментальными исследованиями МГГУ и Камчатского филиала АО «Дальморгеология» установлено, что добиться отделения корки только крупными кусками весьма сложно. Поиск технологии добычи корок идет по двум направлениям.

Первое направление — гидроподъем корковой пульпы, сформированной выемочным устройством, с возвратом отработанной воды с мелкими частицами на дно.

Такая система исключает негативное воздействие на поверхностные воды поступающих донных вод.

Выемка корок осуществляется комплексом, представляющим собой систему фрез, которые могут изменять свое высотное взаиморасположение, а система вала предотвращает вращение фрез при выемке пород с прочностью, выше заданной. Отдельные куски засасываются погружным грунтовым насосом и подаются на борт судна при консистенции 1:10 или выше, где намываются в трюм. Чтобы исключить сброс за борт мелких фракций, необходимо доизмельчать на дне корковое вещество до крупности 0,16 мм и складировать его на борту в виде пульпы при содержании жидкого состава не более 50 %.

Ширина захвата выемочного органа должна быть порядка 14 м, а скорость перемещения установки к якорю 0,02 м/с.

В США предложен выемочный агрегат массой 100 т, передвигающийся по поверхности корки на восьми гусеницах, которые не только перемещают агрегат, но и разрушают корку раздавливанием.

За гусеничным механизмом находятся режущие головки. Отделенная масса засасывается. Размеры агрегата 13×8 м, установленная мощность 900 кВт.

Второе направление — использование для подъема ковшовых систем, обеспечивающих подъем на судно только крупнокусковых фракций.

В Японии для выемки корок предложена система ковшей на бесконечном канате, аналогичная известной системе для добычи конкреций, но отличающаяся конструкцией ковша. Производительность российского агрегата для снятия корок 40—150 т/ч. Для подъема пульпы могут быть использованы трубопроводный транспорт и сетчатые контейнеры.

Решающим при оценке эффективности и выборе нетрадиционной технологии добычи в океане является соотношение риска и возможной прибыли при получении минерального сырья из океанических и альтернативных сухопутных источников.

По данным американских горно-добывающих компаний, оптимальный вариант получения прибыли не менее 30 % против 10—15 % на месторождениях суши.

7.6. Разработка месторождений подземным способом

Широкое распространение подземного способа разработки обусловлено значительными глубинами залегания большинства рудных месторождений. Наибольшая глубина очистных работ на рудниках РФ составляет в настоящее время около 1 км (рудники «Октябрьский» и «Таймырский» Норильского ГМК, Таштагольский рудник) и постоянно возрастает. За рубежом горные работы ведутся на больших глубинах: в Чехии — 1,6 км, Канаде и США — 2—2,5, Индии (Чемпион Риф, Колар) — 3,5, ЮАР (Витватерсранд, Ист Рэнд) — свыше 4 км.

Большая глубина осложняет ведение горных работ из-за резкого возрастания горного давления, проявляющегося в виде горных ударов и увеличения температуры на глубине. Залежи небольших размеров даже на больших глубинах разрабатываются с применением тех же систем разработки, что и на незначительных, но при уменьшении размеров камер, увеличении целиков.

Залежи значительных размеров на глубинах 0,6—1,5 км разрабатываются без оставления камер и целиков системами со сплошной выемкой. Для мощных месторождений исключаются все системы с естественным поддержанием очистного пространства. При разработке крупных залежей на глубинах более 1—1,5 км предъявляются еще более жесткие требования к параметрам систем с искусственным поддержанием очистного пространства.

Горно-технические понятия и термины. При геолого-разведочных работах и подземном способе разработки месторождений в зависимости от пространственного расположения различают вертикальные, горизонтальные и наклонные горные выработки. Расположение выработок показано на рис. 7.3.

Шахтный ствол 1 — вертикальная, реже наклонная горная выработка круглого, прямоугольного (иногда эллиптического) сечения, имеющая выход на земную поверхность. Он служит для подъема полезного ископаемого и пород, спуска и подъема людей, различного оборудования и грузов. Через ствол осуществляются энергоснабжение и вентиляция добычных забоев, водоотлив. Стволы оборудуют подъемными установками, лестничным отделением. По ним прокладывают электрические кабели, трубы для воды и сжатого воздуха. *Слепой ствол 2* не имеет непосредственного выхода на поверхность. Его назначение аналогично обычным шахтным стволам. *Штольня 3* — горизонтальная выработка, имеющая непосредственный выход на земную поверхность; ее назначение то же, что и шахтных стволов.

Квершлаг 4 — горизонтальная горная выработка, которая проходится от шахтного ствола по вмещающим породам вкрест простирания месторождения. Такая же выработка, пройденная вкрест про-

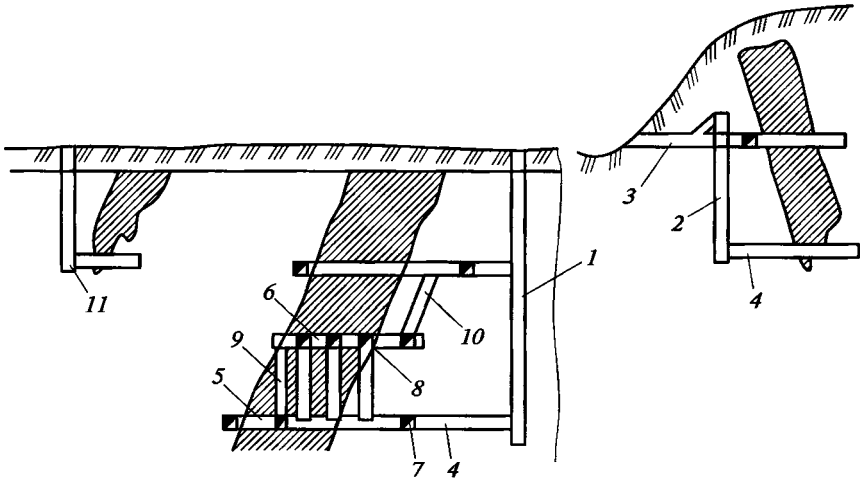


Рис. 7.3. Схема расположения подземных горных выработок (по Г. С. Советову) (пояснения см. в тексте)

стирания по полезному ископаемому, называется *ортом*. Различают орты *откаточные 5* и *подэтажные 6*. Орты проходят из *штреков 7* — горизонтальных выработок, пройденных обычно из квершлага по простиранию пласта или рудного тела. Штреки различают *полевые 7*, пройденные по пустым породам, и *рудные 8* — в рудном теле. Штреки, расположенные на горизонте доставки, называют подэтажными. Для стока воды и уменьшения энергоемкости откатки грузов горизонтальные выработки имеют небольшой уклон в сторону ствола. В зависимости от типа крепи горизонтальные выработки имеют трапециевидную, сводообразную или прямоугольную форму. В слабых и неустойчивых породах откаточным выработкам придают круглую форму.

Восстающий 9, 10 — вертикальная или наклонная горная выработка, не имеющая непосредственного выхода на земную поверхность. Он служит для спуска под действием собственного веса полезного ископаемого и породы, подъема и спуска материалов, перемещения людей, проветривания. В отличие от слепого шахтного ствола *2* восстающий проходится снизу вверх. Капитальные восстающие, обслуживающие один или несколько горизонтов, крепят бетоном. *Шурф 11* — вертикальная горная выработка небольшого сечения и малой глубины, который проходится с поверхности для разведки месторождения, вентиляции, осушения и др.

Уклон — наклонная горная выработка, пройденная по падению залежи или пласта *для подъема* механическим способом грузов с нижнего горизонта на верхний. Он не имеет непосредственного выхода на поверхность.

Бремсберг — наклонная горная выработка. В отличие от уклона он предназначен *для спуска* полезного ископаемого с верхнего горизонта на нижний механическим способом.

Совокупность выработок, обслуживающих подъемное хозяйство и расположенных на каждом горизонте непосредственно у ствола шахты, называют *околоствольным* (*рудничным*) *двором*. Форма и размеры ствола зависят от способа подъема (клетевого или скипового) и производительности шахты.

К капитальным подземным горным выработкам относятся горные выработки — шахтные стволы, штольни, квершлаги, околоствольные дворы, которые служат весь срок отработки месторождения.

К подготовительным подземным выработкам относят штреки, орты и восстающие. Они обеспечивают транспортный доступ к отдельным участкам месторождения, по мере отработки которых эти выработки оставляются или ликвидируются. Схема разработки месторождения подземным способом приведена на рис. 7.4.

Для доступа к месторождению его вскрывают, т. е. с поверхности проходят *шахтный ствол 1*, от которого проводят горизонтальные *штреки 2, 3, 4*, разбивающие все месторождение по вертикали на этажи. Над стволом расположен *копер 5*, вблизи него в специальном здании *6* установлена подъемная машина, которая перемещает по

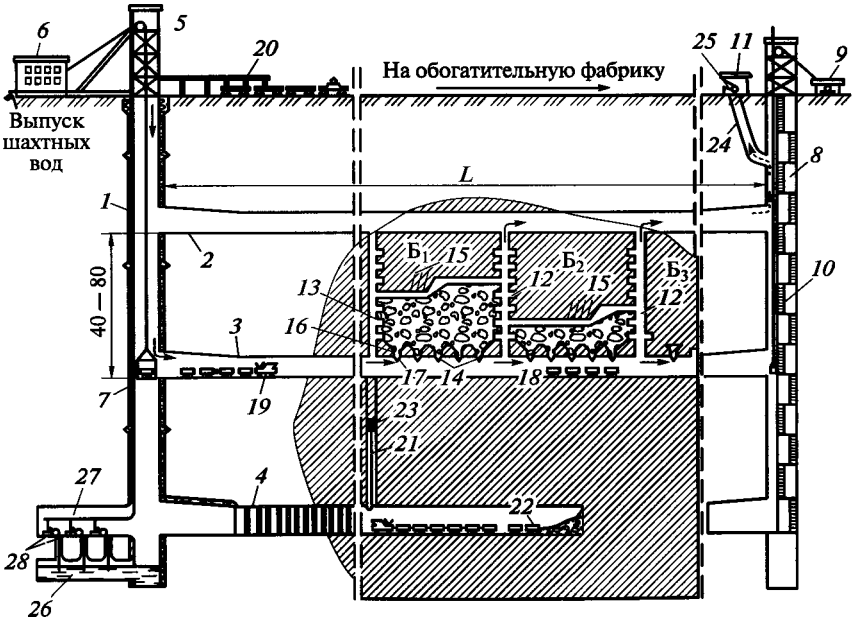


Рис. 7.4. Схема разработки месторождения подземным способом (по С. С. Борисову) (пояснения см. в тексте)

стволу подъемный сосуд — *клеть 7*, служащую для спуска и подъема людей, материалов, полезного ископаемого и т. д.

Помимо главного подъемного ствола проходят *вспомогательный ствол 8*, служащий в качестве запасного выхода на поверхность и обеспечивающий нормальные условия для проветривания. Как правило, этот ствол оборудуется вспомогательной *подъемной установкой 9* и имеет *лестничное отделение 10* (в главном стволе обычно тоже устраивают лестничное отделение). На поверхности вблизи вспомогательного ствола расположено *здание вентиляционной установки 11*. Расстояние L между главным и вспомогательным стволами зависит от способа вскрытия и изменяется в широких пределах от нескольких десятков метров до 2—3 км.

Отработка рудного тела ведется, как правило, в нисходящем порядке, т. е. сначала извлекается руда верхнего этажа между штреками *2* и *3*, затем нижележащего этажа между штреками *3* и *4* и т. д. Процесс извлечения руды носит название *очистной выемки*.

Производству очистной выемки предшествуют подготовительные работы. Этаж вертикальными выработками — *восстающими 12* — делят на блоки ($Б_1$, $Б_2$ и т. п.), в пределах которых проходят целый ряд горизонтальных и вертикальных выработок (*ходки 13*, *рудоспуски 14* и др.). Определенный порядок производства подготовительных работ и очистной выемки называется *системой разработки*.

Процесс очистной выемки при системе с магазинированием руды состоит из нескольких производственных операций. Отделение руды от массива — отбойку осуществляют взрыванием зарядов, располагаемых в *шпурах 15*. Шпуры бурят бурильными машинами-перфораторами непосредственно с поверхности отбитой руды. Взорванная руда под действием собственного веса поступает к *рудоприемным воронкам 16* и *рудоспускам 14*, где через *люки 17* ее выпускают в *вагонетки 18* и затем транспортируют *электровозами 19* к стволу шахты. Вагонетки по одной или по две поднимают в клети на поверхность и на *эстакаде 20* разгружают в большегрузные вагоны, в которых руду отвозят на обогатительную фабрику. Обогащение руды на фабрике заключается в повышении содержания металла в руде за счет удаления из нее части пустых пород.

Проведение очистной выемки блоками $Б_1$ и $Б_2$ и подготовительных работ блоком $Б_3$ на этаже часто осуществляется одновременно. Вместе с очистной выемкой на верхнем этаже вскрывают и подготавливают нижний этаж — проведение откаточного штрека *4* и проходка *восстающего 21*. Погрузка руды при проведении выработок производится *погрузочными машинами 22*, бурение шпуров — *перфораторами 23*.

В процессе разработки подземные выработки необходимо проветривать, так как при взрывах образуется много вредных газов и пыли. Загазованный и запыленный воздух (пунктирные стрелки) отсасывается через вспомогательный ствол и *вентиляционный канал*

24 вентилятором 25. Свежий воздух (на рисунке — сплошные стрелки) поступает через главный ствол.

Подземная разработка связана с большими притоками грунтовых вод, которые собираются в *водосборнике 26.* Для откачки этих вод (водоотлива) в насосной камере *27* установлены *насосы 28.*

Подземный способ разработки включает три основные стадии — вскрытие, подготовка, очистная выемка — и различные производственные операции — отбойка, доставка или погрузка руды, крепление выработок, проветривание и водоотлив, подземный транспорт и подъем.

Горное предприятие, разрабатывающее месторождение и состоящее из одной или нескольких производственных единиц (шахт, карьеров), называется *рудником.* Часть месторождения, отрабатываемая рудником или шахтой, называется соответственно *рудничным,* или *шахтным,* полем и разделяется горными выработками на горизонты, этажи, блоки, панели. *Горизонтом* называется совокупность выработок в горизонтальной плоскости, предназначенная для ведения горных работ в этаже, *этажом* — часть шахтного поля, ограниченная по падению и восстанию основными откаточными выработками *2* и *3*, *блоком* — выемочный участок в пределах этажа, *панелью* — часть шахтного поля, образующаяся в результате его деления (подготовки) главными откаточными и вентиляционными штреками. При крутом и наклонном падении залежи ее разделяют по вертикали на этажи, при пологом и горизонтальном — по площади на панели.

Высота этажа изменяется на металлических рудниках от 30—40 до 100—150 м (наиболее часто составляет 50—75 м). Запасы руды в этаже могут достигать нескольких десятков миллионов тонн. Этажи по вертикали разделяют на подэтажи, а этажи по простиранию (при весьма мощных залежах — и по мощности) — на выемочные блоки — части этажа, в которых осуществляют все процессы очистной выемки. Выемочные блоки обладают самостоятельной системой проветривания.

Панели имеют форму прямоугольника с длиной сторон до нескольких сотен метров. Запасы руды в панели варьируют от нескольких сотен тонн до 2—3 млн т.

Порядок подземной разработки месторождений. Разработка месторождения осуществляется частями в несколько этапов. При строительстве горного предприятия последовательно ведут вскрытие и подготовку месторождения. С очистной выемки начинается первый этап эксплуатации месторождения, когда предприятие наращивает в течение ряда лет годовую производительность до проектной величины. Во время второго наиболее длительного этапа предприятие работает с проектной производительностью. Третий заключительный этап затухания горных работ и ликвидации предприятия и последствий горных работ наступает с завершением отработки балансовых запасов.

В процессе эксплуатации месторождения стадии разработки часто проходят одновременно, т. е. параллельно с очистной выемкой на одних участках месторождения ведется подготовка других и осуществляется вскрытие третьих.

В большинстве случаев месторождения отрабатывают сверху вниз по падению. Это позволяет быстрее и дешевле вскрыть их верхние части и ускорить начало добычи.

При резком колебании качества руды применяют более дорогой и менее производительный выборочный порядок выемки, т. е. набирают плановые объемы добычи по руднику из разных блоков или панелей с различным содержанием полезных компонентов в руде. Иногда для этого приходится вести добычу одновременно на нескольких этажах.

Технологические процессы подземной разработки месторождений. Различают основные и вспомогательные технологические процессы разработки.

Основные процессы включают:

– проведение горных выработок, обеспечивающих доступ к полезному ископаемому и его добычу;

– отбойка руды — отделение руды от массива с дроблением ее на куски;

– доставка руды — перемещение отбитой руды в пределах выемочного блока или панели;

– вторичное дробление чрезмерно крупных кусков (негабарита), его применяют в большинстве случаев, однако оно может не понадобиться при мелком дроблении руды;

– поддержание очистного пространства;

– подземное транспортирование и подъем руды и пустой породы на поверхность, их складирование и отгрузка потребителям;

– отбойка, доставка руды, вторичное дробление негабарита, поддержание очистного пространства — процессы, обеспечивающие в совокупности выемку руды, их называют добычными (или очистными) работами.

Вспомогательные процессы обеспечивают эффективное и безопасное выполнение основных работ:

– водоотлив (откачка воды на поверхность);

– вентиляция (проветривание) подземных выработок;

– энергоснабжение и освещение;

– транспортирование материалов, оборудования, перевозка людей;

– монтажно-демонтажные работы;

– ремонтные работы.

Системы подземной разработки месторождений. Система разработки — взаимное расположение и порядок проведения подготовительных и очистных выработок, а также взаимосвязь и порядок выполнения основных технологических процессов.

Система разработки должна соответствовать ряду требований:

1) обеспечение безопасности труда рабочих;

2) минимально возможные затраты на добычу руды;

3) максимальная производительность труда рабочих по системе в целом;

4) минимально возможные потери и разубоживание руды.

Разнообразие условий залегания и форм рудных залежей, их мощности, углов падения, прочности, устойчивости, трещиноватости руд и вмещающих пород обусловило применение множества систем разработки при подземном способе разработки. Основных систем разработки, распространенных только на металлических рудниках, насчитывают около 20. С учетом их вариантов число систем возрастет до более чем 100.

Одна из наиболее доступных классификаций систем разработки содержит три класса. Основным признаком выделения классов является способ поддержания очистного пространства на основной стадии очистной выемки руды в блоке или панели (табл. 7.1). Названия классов систем разработки отражают сущность способов управления горным давлением, что облегчает понимание данной классификации.

Таблица 7.1. **Классификация систем разработки** (по проф. В. Р. Именитову)

Класс	Группа	Наиболее типичные системы разработки
I. Системы разработки с естественным поддержанием очистного пространства	I.1. Системы с механизированной доставкой руды по очистному пространству	1. Сплошная 2. Камерно-столбовая
	I.2. Системы с доставкой руды под действием собственного веса по очистному пространству	3. Камерная (этажно-камерная, с подэтажной отбойкой) 4. С отбойкой из магазина (с магазинированием)
II. Системы разработки с обрушением руды и вмещающих пород (без поддержания очистного пространства)	II.1. Системы этажного обрушения	1. Этажное принудительное обрушение со сплошной выемкой 2. Этажное принудительное обрушение с отбойкой на компенсационное пространство 3. Этажное самообрушение

Окончание табл. 7.1

Класс	Группа	Наиболее типичные системы разработки
	II.2. Системы подэтажного обрушения	4. Подэтажное обрушение с донным выпуском 5. Подэтажное обрушение с торцевым выпуском
III. Системы разработки с искусственным поддержанием очистного пространства	III.1. Системы с закладкой	1. Горизонтальные слои с закладкой 2. Нисходящая слоевая выемка с твердеющей закладкой 3. Раздельная выемка тонких жил
	III.2. Системы с креплением	
	III.3. Системы с креплением и последующим обрушением	4. Столбовая система с обрушением 5. Слоевое обрушение

Примечание. В скобках указаны варианты названий систем разработки, часто встречающиеся в технической литературе.

Особенность *систем I класса* — поддержание очистного пространства естественными (рудными) целиками. Очистное пространство остается при этом открытым и называется обычно камерой. Большинство систем этого класса двухстадийные: на первой стадии отрабатывают запасы руды в камерах, на второй — извлекают целики. Их отличает высокая производительность труда и низкие затраты на добычу. Недостаток — при неизвлекаемых целиках значительные потери руды.

Системы II класса характеризует то, что очистное пространство в них не поддерживают и выпуск руды из него ведут в основном под обрушенными налегающими породами. Применение этих систем возможно, если допустимо обрушение поверхности и налегающих пород, а также если отбитая руда не слеживается и не самовозгорается. Мощность рудных тел должна быть выше средней. Для систем II класса характерны низкие затраты на добычу, высокая производительность труда, высокие потери и разубоживание.

В *системах III класса* очистное пространство поддерживают крепями или закладкой. Эти системы можно применять в сложных условиях, где неприменимы системы других классов. Они характеризуются довольно высокими затратами на добычу, малыми потеря-

ми и разубоживанием. Системы III класса применяют при добыче руд ценных металлов.

Условия залегания залежей и схемы их подземной разработки. При подземном способе разработки рудные залежи делят на группы:

- горизонтальные и весьма пологие (углы падения до 5—10°);
- пологие (от 5—10 до 25—30°);
- наклонные (от 25—30 до 45°);
- крутопадающие (45—90°).

По мощности рудные тела подразделяют следующим образом:

- тонкие (мощность до 0,8 м);
- маломощные (0,8—5 м);
- средней мощности (5—15 м);
- мощные (15—60 м);
- весьма мощные (более 60 м).

Горно-технические условия разработки месторождений в значительной мере определяются физико-механическими свойствами пород и руд. По устойчивости к обнажениям они делятся на слабые и неустойчивые (не допускают обнажений и требуют крепления), малоустойчивые (допускают обнажения без крепления шириной до 3 м), средней устойчивости (допустимая площадь обнажения до 50—100 м^2), устойчивые (допустимая площадь обнажения до 200—500 м^2), весьма устойчивые (допустимая площадь обнажения 800—1 000 м^2 и более).

Влияние мощности залежи на технологию подземной разработки необходимо рассматривать в зависимости от условий залегания.

При *крутом падении залежей* применяются системы разработки:

1) камерная — при мощности более 3 м;

2) с отбойкой из магазинов — при малой (но не менее 1—1,3 м) мощности;

3) с простой распорной крепью — при малой (<3 м) мощности;

4) этажного обрушения — при мощных залежах;

5) подэтажного обрушения — при мощности не менее 2—3 м (во избежание чрезмерного разубоживания руды обрушающимися боковыми породами);

6) горизонтальными и наклонными слоями с закладкой, нисходящая слоевая выемка с твердеющей закладкой, с креплением — при любой мощности;

7) слоевого обрушения — при мощности не менее 1,5—2 м;

8) раздельная выемка тонких жил — при мощности не более 0,3—0,4 м.

При *пологом и наклонном падении залежей* применяют системы разработки:

1) сплошная и камерно-столбовая — при средней и малой мощности;

2) камерная, с отбойкой из магазинов, этажного обрушения — в мощных залежах (в маломощных велик объем полевой подготовки);

3) горизонтальными слоями с закладкой, нисходящей слоевой выемки с твердеющей закладкой, с креплением, слоевого обрушения — при большой мощности (при малой — залежь разрабатывают одним слоем);

4) с однослойной выемкой — с закладкой, с усиленной распорной крепью, столбовой с обрушением — в маломощных залежах.

Характеристика типичных систем разработки. Основная выемочная единица сплошной системы разработки — панель. Сущность системы заключается в выемке руды по всей ширине панели на всю мощность рудного тела. Очистное пространство панели ограждают с четырех сторон панельными (барьерными) целиками, кровлю поддерживают изолированными целиками, оставляемыми в очистном пространстве.

Условия применения системы: устойчивые руды и породы; мощность рудного тела 1—25 м; угол падения от 0—10° (при использовании самоходного оборудования) до 30—40° (при применении переносного оборудования); ценность руд средняя вследствие больших потерь в целиках, которые, как правило, не извлекают; содержание металлов в руде должно быть примерно постоянным (рис. 7.5).

Размеры панелей по ширине 150—300 м, по длине 400—600 м. Ширина панельных целиков 10—40 м. Опорные целики в плане размещены по квадратной сетке на расстоянии 20 м друг от друга, диа-

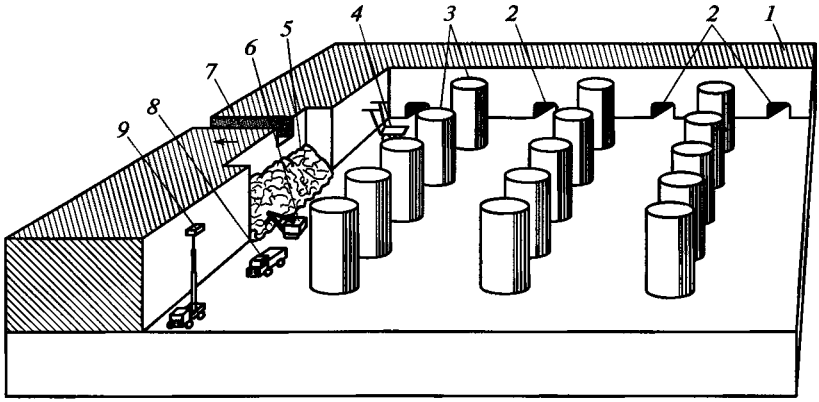


Рис. 7.5. Сплошная система разработки месторождения (по А. О. Баранову):

1 — панельный целик; *2* — сбойки с панельным целиком; *3* — опорные целики; *4* — самоходная бурильная установка; *5* — навал отбитой руды; *6* — экскаватор; *7* — вентиляционный панельный штрек; *8* — автосамосвал; *9* — машина для крепления и оборки кровли

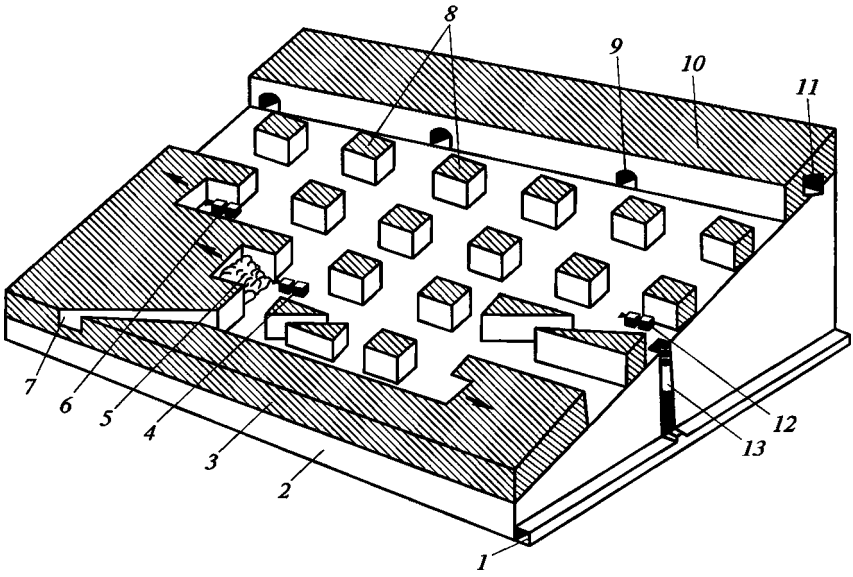


Рис. 7.6. Камерно-столбовая система разработки месторождения (по А. О. Баранову):

1 — погрузочный квершлаг откаточного горизонта; *2* — подстилающие породы; *3* — рудное тело; *4* — погрузочно-доставочная машина типа ПД; *5* — навал отбитой руды в камере; *6* — самоходная бурильная установка; *7* — наклонный заезд; *8* — опорные целики; *9* — сбойка с вентиляционным штреком; *10* — панельный целик; *11* — вентиляционный штрек; *12* — погрузочно-доставочная машина на разгрузке; *13* — рудоспуск

метр круглых целиков изменяется от 3 до 8 м в зависимости от их высоты.

При отработке забоя уступами анкерную крепь устанавливают с верхнего уступа высотой 5—6 м, а над рабочей зоной очистного пространства нижних уступов осуществляют только осмотр кровли, оборку заколов или ремонт крепи.

Основная выемочная единица камерно-столбовой системы разработки — также панель, которая рядами целиков разделена на камеры, расположенные по простиранию или падению залежи. Выемку панельных запасов руды осуществляют отдельными забоями в камерах. В каждой камере поочередно выполняют все основные производственные процессы. В остальном система сходна со сплошной (рис. 7.6).

Условия применения этой системы: устойчивость руд и пород может быть ниже, чем при использовании сплошной системы, из-за уменьшенных размеров камер; если мощность рудного тела составляет от 2—3 до 12—15 м, то угол падения — до 20—25°, при мощности 15—20 м — до 45—50°. Ценность руд может быть достаточно

высокой при частичном или полном извлечении целиков; качество руд (содержание металлов) может колебаться в довольно широких пределах, так как выемка изолированными камерами позволяет при необходимости добывать руду раздельно по сортам.

Размеры панелей по падению 120—180 м, по простиранию до 150—200 м. Изолированные опорные целики размещают рядами по простиранию. В плане они имеют прямоугольную форму и отделены друг от друга просечками. Ширина камер 5—10 м, ширина целиков 3—6 м.

Очистные работы в панели ведут сверху вниз по падению, а в каждой камере — по простиранию.

Опорные целики могут не отрабатываться. В случаях, когда допустимо обрушение поверхности, целики частично отрабатывают после выемки запасов из камер, а затем их остатки взрывают, вызывая обрушение кровли. Это значительно снижает потери руды в панели.

Производительность по панели 150—350 тыс. т/год; производительность труда забойного рабочего 40—100 т в смену; протяженность подготовительных выработок 4—6 м на 1 000 т запасов руды; потери руды при частичной выемке целиков 12—14 %; разубоживание 10—14 %.

Основная выемочная единица камерной системы — блок, состоящий из одной или нескольких камер, разделенных междукамерным целиком. Выемка камерных запасов при этой системе осуществляется под защитой окружающих камеру целиков. Отбитая руда по камере самотеком поступает в воронки или траншеи в основании блока, откуда ее выпускают и грузят в транспортные средства либо доставляют в них по рудоспускам. Целики обычно извлекают на второй стадии отработки блока.

Камерную систему (рис. 7.7) широко применяют на рудниках цветной металлургии и железорудных шахтах в Кривбассе, на Урале, в КМА.

Условия применения системы: устойчивые руды и породы; падение залежей крутое при малой и средней мощности и любое для мощных залежей; мощность крутых залежей не менее 3—5 м, пологих — не менее 15—20 м. Ценность руд различная; при высокой ценности руд целики извлекают после отработки и закладки камер.

Размеры блоков по высоте равны высоте этажа и составляют от 50—60 до 150 м и более. Камеры при мощности крутых залежей до 15—25 м располагают по простиранию. Длина их определяется устойчивостью боковых пород и достигает 40—60 м, ширина междукамерных целиков 8—20 м. В мощных залежах камеры располагают вкрест простирания, длина их определяется устойчивостью руды и мощностью залежи. Ширина камер при этом 10—30 м, а ширина междукамерных целиков 8—15 м.

Технико-экономические показатели системы: производительность по блоку 70—250 тыс. т/год; производительность труда забойного

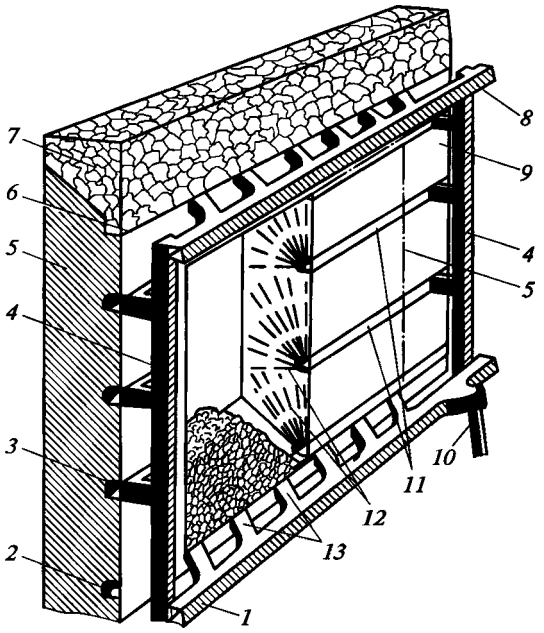


Рис. 7.7. Камерная система (по А. О. Баранову):

1 — доставочный штрек; *2* — траншейный штрек; *3* — сбойка восстающего с буровыми подэтажами; *4* — блоковые восстающие; *5* — границы камеры; *6* — междуэтажный целик (наклонная потолочина); *7* — обрушенная порода; *8* — вентиляционный штрек; *9* — междукамерный целик; *10* — рудоспуск; *11* — буровые подэтажные штреки; *12* — взрывные скважины; *13* — погрузочные заезды

рабочего 35—100 т в смену; протяженность выработок 3—9 м на 1 000 т запасов руды. Потери: в камерах 3—8 %, по блоку при выемке целиков между заложенными камерами — 3—10 %, при обрушении целиков — 12—25 %; разубоживание имеет почти такие же величины, что и потери.

7.7. Комбинированный способ разработки

Комбинированный способ разработки месторождений в настоящее время широко применяется в мировой практике. Его доля в объеме способов разработки свыше 60 %. Характерная особенность этого способа — наличие карьерного и подземного очистных пространств, находящихся в непосредственной близости. Совмещение открытых и подземных работ выдвигает на первый план геомеханические аспекты выбора технологических схем и параметров разработки. Карьерная выемка значительно усложняет геомеханическую

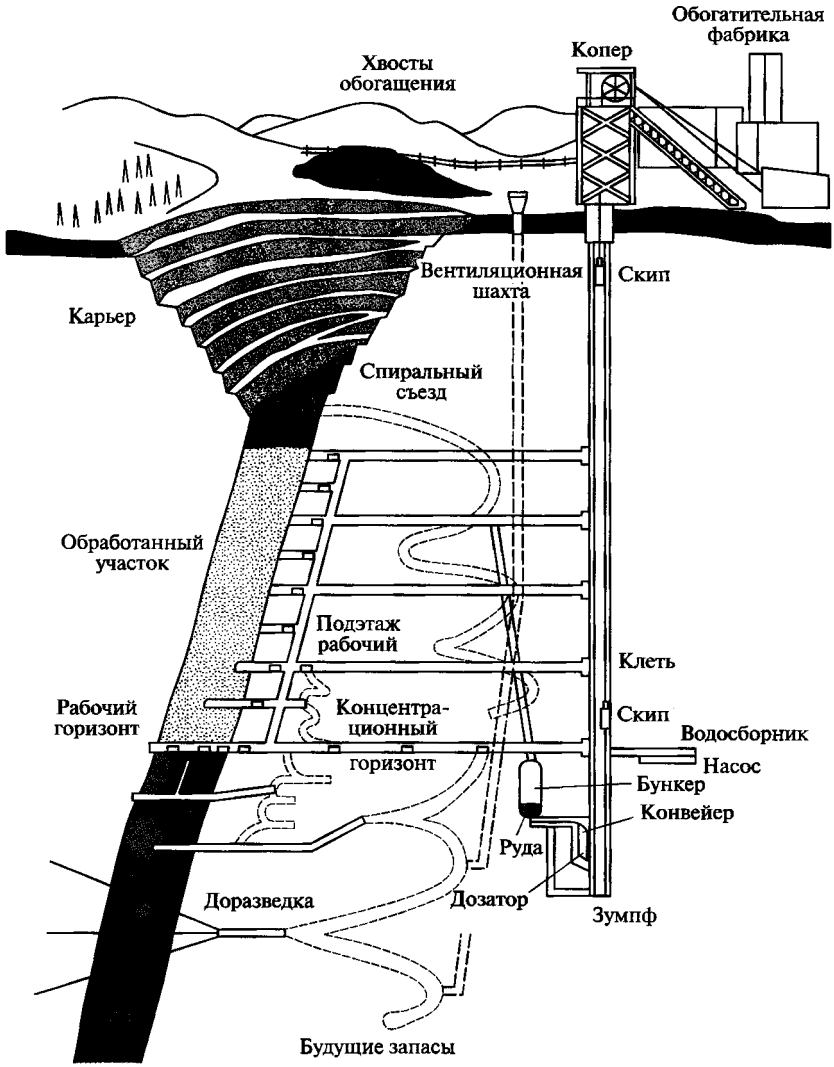


Рис. 7.8. Комбинированный способ разработки месторождения Кируна (по Е. В. Кузьмину)

обстановку в зоне подземных работ, увеличивая концентрацию напряжений в элементах системы подземной разработки, а создание обширных выработанных пространств под землей, особенно при использовании систем с обрушением, ведет к разрушению и разупрочнению налегающего массива горных пород, ухудшая состояние бортов карьера и разделительного целика.

Комбинированный способ разработки наиболее часто применим к условиям крутозалегающих месторождений (рис. 7.8). Границы открытых горных работ в этом случае определяются на основе экономических критериев, которые не всегда совпадают с геологическими особенностями и границами месторождения — пространственным распределением полезного ископаемого, контуром балансовых запасов и т. п.

Применение комбинированного способа разработки определяется еще и тем, что с глубиной неизбежна смена открытого способа разработки подземным. Открытый способ как самый мощный и экономически эффективный обоснован в настоящее время до глубин 500—750 м и глубже должен сменяться подземным способом.

7.8. Специальные способы разработки

Интенсивная разработка крупных месторождений России (медных и железорудных на Урале; медно-никелевых в Норильске и на Кольском полуострове; золота, олова и вольфрама в Магаданской области; золота, алмазов и сурьмы в Якутии; олова и вольфрама в Приморье) в основных горно-добывающих регионах привела к значительному качественному ухудшению и сокращению разведанных запасов важнейших полезных ископаемых. В новых экономических условиях это не обеспечивает рентабельного освоения многих из них. Минерально-сырьевая база страны характеризуется снижением качественных показателей полезного ископаемого разрабатываемых и проектируемых к освоению месторождений, резким увеличением глубины их разработки, усложнением горно-геологических и экономико-географических условий промышленного освоения месторождений.

В настоящее время не разрабатывается значительное число средних и мелких по запасам месторождений. В связи с этим необходимость отработки бедных по содержанию, мелких по запасам и глубокозалегающих месторождений становится все более актуальной. Сюда же следует отнести и проблему утилизации отвалов некондиционных руд, отложений гидроотвалов, хвостохранилищ, золо-, шлакохранилищ и т. п.

В ряде случаев горно-геологические, экономические и экологические условия разработки месторождений не отвечают требованиям традиционных горных технологий разработки, а низкое содержание металлов, весьма высокая обводненность и другие особенности месторождений ограничивают либо исключают использование традиционных технологий подземной разработки.

Истощение минерально-сырьевой базы металлов и перераспределение запасов сырья в сторону бедных и убогих по содержанию полезных компонентов руд вызывают необходимость применения

специальных способов разработки месторождений, выемка которых традиционными технологиями невозможна.

Сущность специальных способов разработки месторождений. Сущность этих способов заключается в переводе минералов или содержащихся в них полезных компонентов из связного состояния в подвижное путем растворения водой или реагентами, гидродинамического перемещения, выщелачивания, плавления, возгонки и т. п. Инструментом активизации процессов добычи служат энергетические агенты, вводимые в рабочую зону: растворы, электрический ток, вода, теплоносители и т. д. Под воздействием агентов полезное ископаемое изменяет исходное агрегатное состояние, образуя продуктивные флюиды (раствор, расплав, газ или гидросмесь), которые способны перемещаться к местам переработки в горных выработках или на поверхности.

Специальные способы разработки полезных компонентов включают растворение минералов водой или реагентом, разрушение струей воды, подземную выплавку, газификацию угля, гидравлическое перемещение полезных компонентов и другие процессы, отличающиеся от традиционных горных способов добычи.

Подземное выщелачивание — избирательный перевод полезного компонента в жидкую фазу на месте залегания в недрах с последующей переработкой металлосодержащих растворов гидрометаллургическими методами.

Скважинное выщелачивание — вскрытие, подготовка и перевод полезных компонентов в подвижное состояние с выдачей к местам переработки через скважины.

Бактериальное выщелачивание — вскрытие, подготовка и перевод полезных компонентов в подвижное состояние с извлечением химических элементов из руд, концентратов и горных пород с помощью специализированных штаммов бактерий.

Подземная газификация углей — перевод угля в газообразное состояние на месте залегания посредством высокотемпературного нагрева без предварительной подготовки массива.

Подземная выплавка — способ перевода полезного компонента в жидкое состояние на месте залегания посредством высокотемпературного теплоносителя с выдачей продуктов по скважинам.

Гидрометаллургия — извлечение металлов из руд водой или растворами химических реагентов и металлов из растворов с помощью специальных технологических процессов типа сорбции, электрохимии и т. п.

Ядерный взрыв — взрывное выделение внутриядерной энергии, используемое в целях подготовки массивов к выщелачиванию полезных компонентов.

Возгонка подземная — перевод полезных компонентов из твердой фазы в газовую на месте залегания посредством высокотемпературного нагрева.

Перегонка подземная — перевод горючих ископаемых в газообразное и жидкое состояние на месте залегания высокотемпературным нагревом без доступа кислорода.

Разработка морских месторождений — добыча полезных ископаемых с дна морей и океанов с помощью специальных технологических приемов и оборудования.

Солеварение — получение пищевых и других солей из природных и технологических растворов путем выварки и последовательного выпаривания воды температурным нагревом.

Растворение подземное — перевод полезных ископаемых в водный раствор с выдачей на поверхность и извлечением из растворов с помощью специальных технологических процессов.

Гидродобыча — разрушение и перевод твердого полезного ископаемого в подвижное состояние гидродинамическим воздействием водовоздушной струи с выдачей на поверхность в виде смеси и последующим обезвоживанием.

Основные процессы. Специальные способы подземной разработки месторождений. Эти процессы предусматривают, как правило, бурение скважин, через которые осуществляются доступ к полезному ископаемому и его добыча. Рудник включает три основных элемента: блок приготовления рабочих агентов, добычное поле (рудное тело, где протекает процесс), блок переработки продуктивных флюидов.

Значительная часть специальных способов добычи разработана давно и широко применяется в США, Германии, Бельгии, Великобритании, Чехии, Польше, Венгрии, Казахстане, России и ряде других стран. Так, добыча соли подземным растворением на территории России датируется XI в., подземное выщелачивание цветных металлов в Испании — XVI в. Идея подземной газификации угля предложена Д. И. Менделеевым в 1888 г. Метод подземной выплавки серы разработал американец Г. Фраш в 1891 г.

Основные процессы специальных способов подземной разработки приведены в табл. 7.2.

Способы подземной разработки по процессам добычи, в основе которых лежит вид, и способ перевода полезного ископаемого в подвижное состояние подразделяют на физические, химические и комбинированные.

Специальные способы подземной разработки месторождений, базирующиеся на *физических процессах*:

- разрушение руд струей воды, высокой температурой, током, вибрацией или другими воздействиями;
- выплавка серы, озокерита и др.;
- возгонка ртути из реальгара и киновари;
- сорбция метана углем;
- перемещение компонентов водой или воздухом.

Способы подземной разработки, основанные на *химических процессах*:

Таблица 7.2. **Типизация специальных способов разработки месторождений**

Способ	Добываемые полезные ископаемые	Полезные ископаемые, перспективные для добычи
Подземное растворение	Каменная и калийная соли	Бишофит, сода, глауберова соль
Подземное выщелачивание	Уран, золото, медь	Марганец, сульфидная медь, свинец и цинк, никель, титан, бурые железняки, фосфориты, известняки
Подземная газификация	Каменные и бурые угли	Сера, битум, горючие сланцы
Подземная возгонка	Ртуть	Мышьяк
Скважинная гидродобыча	Фосфориты, гравий, пески, уголь, железо, золото	Осадочные металлы, титан, алмазы, касситерит, фосфориты, бокситы и др.
Добыча из подземных вод	Йод, бром, бор, уран, стронций	Сточные воды горных предприятий

– подземное растворение водой каменных, калийных, магнезиальных и урановых солей, сульфатов и сульфаткарбонатов, соды, буры и т. п.;

– подземное выщелачивание растворами (рис. 7.9): кислот — серной (целестин, азурит, куприт, некоторые урановые минералы и др.), соляной (сфалерит, молибденит, уранит и др.) и азотной (аргентит, висмутин, сфалерит и др.); щелочей (бокситы, антимонит); солей — сернистого натрия, хлористого железа, цианистого калия (золото); других реагентов;

– подземная термическая переработка полезного ископаемого сжиганием (например, подземная газификация угля, сланца, нефти) и обжигом (пирит, халькопирит, антимонит и др.).

Комбинированные способы подземной разработки — совместное использование физических и химических процессов (например, выщелачивание металлов в электрических полях), а также методы бактериального выщелачивания.

Подземное растворение — способ скважинной добычи солей путем их перевода в недрах в водный раствор. Уже к концу XIX в. были разработаны и освоены способы растворения каменной соли в подземных выработках и через буровые скважины с поверхности.

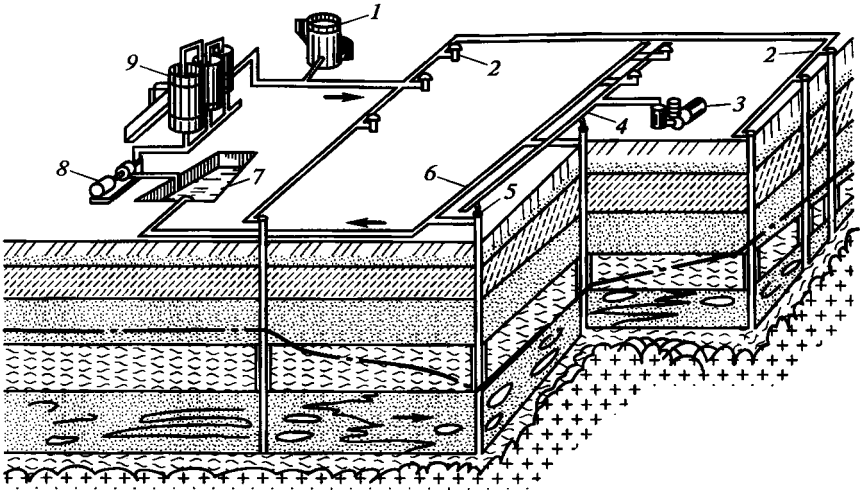


Рис. 7.9. Схема разработки пластового месторождения выщелачиванием через скважины (по В. Ж. Аренсу):

1 — узел приготовления раствора; *2* — нагнетательная скважина; *3* — компрессор; *4* — воздуховод для эрлифта; *5* — дренажная скважина; *6* — коллектор для продуктивного раствора; *7* — отстойник; *8* — насос; *9* — установка для переработки раствора

В стране работает около 20 предприятий по добыче природных солей через буровые скважины и ежегодно добывается более 30 млн $м^3$ хлоридно-натриевых рассолов.

Система разработки включает бурение скважин с диаметрами технологических колонн до 219 мм и рассолоподъемных колонн до 146 мм.

При добыче поваренной соли путем подземного растворения в скважину закачивается вода, которая, растворяя соль, выносит ее на поверхность. Рассол выпаривается, а соль остается и используется в качестве сырья. Соли извлекают с глубины до 1 800 м. Выемка через скважины осуществляется в два этапа. На первом этапе создают начальную поверхность растворения соли размывом горизонтальной полости — гидровруба. Время создания гидровруба 360—540 сут. На втором этапе осуществляется добыча камерным или сплошным растворением. Способ послойной выемки и гидровруб обеспечивают высокую производительность (70 $м^3$/ч) и возможность отработки залежей с большим (до 30 %) содержанием нерастворимых включений.

Технологию отличают простота организации и высокие показатели. По сравнению с шахтным способом производительность труда в четыре раза выше, а затраты в семь раз ниже.

Камеры подземного растворения используют впоследствии для хранения нефтепродуктов и сжиженных газов, захоронения отходов предприятий, подземной очистки рассолов.

Скважинная гидродобыча использует явление перевода твердого полезного ископаемого в подвижное состояние гидродинамическим воздействием гидромонитора с выдачей продукта на поверхность через скважины в виде смеси. В России первые опытные работы по подземной гидравлической отбойке угля были проведены на шахте «София» в Макеевке в 1915 г. Развитие технологии ускорилось после разработки озокерита в 1928 г. на о. Челекен в Каспийском море с применением землесоса.

Гидромеханическая добыча основана на разрушении и выдаче на поверхность пористых, рыхлых и слабосвязанных минералов гидромониторными струями.

Технология включает бурение скважины до продуктивного пласта, спуск и цементирование эксплуатационной колонны, вскрытие продуктивного горизонта, расширение призабойной части скважины по продуктивному горизонту и собственно очистные работы.

В пробуренную скважину опускается снаряд, оборудованный гидромонитором и выдающим устройством. Руда, размываемая струей воды под давлением, в виде пульпы по скважине выдается на поверхность. Используются гидроэлеваторы, эрлифты, скважинные насосы или их комбинация.

Подземное скважинное выщелачивание (ПСВ) — один из основных методов добычи урана в мире. Этот метод применялся в СССР, а в настоящее время успешно используется в Казахстане, Узбекистане, США.

Опыт выщелачивания урана из руд, в том числе залегающих в слабопроницаемых скальных породах, насчитывает около 50 лет. Метод ПСВ для гидрогенных инфильтрационных месторождений широко распространен и поставлен на промышленную основу.

Выщелачивание — один из важнейших процессов в металлургии урана. Основная цель выщелачивания — селективное растворение урановых минералов. Эффективность процесса характеризуется, прежде всего, степенью извлечения урана в раствор.

Гидрометаллургическая операция выщелачивания в технологии производства урана имеет универсальное значение. Она применяется для урановых руд, не поддающихся механическому обогащению, для рудных концентратов после радиометрического, гравитационного и флотационного обогащения, а также для обоженных урановых руд и спеков.

Для выщелачивания урана из руд применяются кислотные и карбонатные реагенты: серная, азотная и соляная кислоты, сода, бикарбонат натрия и карбонат аммония.

Выбор выщелачивающих реагентов определяется характером урановой минерализации.

Кислотное выщелачивание урановых руд и концентратов в настоящее время — наиболее распространенный метод. Серная кислота — достаточно эффективный и дешевый реагент. При сернокис-

лотном выщелачивании извлекаются почти в том же количестве (70—80 % и выше) сопутствующие урану ванадий и фосфор.

Карбонатное выщелачивание урановых руд также является довольно распространенным методом переработки урансодержащего сырья. Метод основан на взаимодействии соединений U^{6+} с водными карбонатными растворами (сода, карбонат аммония), в результате которого образуются хорошо растворимые в воде и довольно устойчивые соли уранилкарбоната с щелочными металлами и аммонием.

Разработка месторождений урана способом шахтного выщелачивания (ШВ) велась на ряде месторождений, главным образом для доработки балансовых и забалансовых запасов, оставшихся после разработки традиционными горными работами.

Способ ШВ урановых руд в скальных породах применяется в двух случаях: при отработке забалансовых запасов и балансовых запасов в целиках и в оставленных блоках на месторождениях и участках, основная часть запасов которых уже отработана традиционным горным способом, и при отработке не затронутых эксплуатацией месторождений и участков. При этом используются два принципиально различных по эффективности и затратам варианта метода ШВ:

1) отработка месторождения с разрыхлением горной массы с использованием буровзрывных скважин и выдачей части руды из компенсационного пространства, подготовительных и нарезных выработок на поверхность с последующей ее переработкой в кучах и на ГМЗ;

2) отработка месторождений в проницаемых структурах — зонах дробления и трещиноватости, пластах и слоистых толщах без обустройства компенсационного пространства и предварительного рыхления, т.е. в естественном залегании.

Подземная выплавка серы (ПВС) — метод, основанный Г.Фрашем в 1891 г. Суть метода — выплавка серы перегретой водой непосредственно под землей и извлечение ее на поверхность в жидком состоянии. В настоящее время метод ПВС позволяет получать дешевую серу, а иногда извлекать ее из месторождений, разработка которых иными способами нерентабельна. Около 2/3 всех месторождений самородной серы мира разрабатывается этим способом. Особенно широко он применяется на месторождениях США и Мексики. Недостатками метода являются его применимость лишь при определенных характеристиках месторождений (мощные пласты с высоким содержанием серы, залегающие на больших глубинах) и значительные безвозвратные потери серы в недрах.

Добычная скважина представляет собой три вложенные друг в друга колонны труб: водоподающую, серовыдачную и воздушную. Нагнетание теплоносителя осуществляется через кольцевое пространство между водной и серной трубами, а откачка серы по выдачной трубе. Теплоноситель — вода с температурой 160 °С (температура плавления серы 112,8—119,3 °С, минимальная вязкость при 158 °С) —

через перфорацию водной колоны поступает в серосодержащий пласт и, распространяясь по нему, вытесняет пластовую воду и нагревает рудное тело. В результате вокруг добычной скважины образуется зона плавления серы, которая расширяется по пласту по мере нагнетания теплоносителя, а расплавленная сера, будучи вдвое плотнее воды, стекает к забою скважины. Под действием гидростатического давления сера поднимается по серовыдачной трубе до определенного уровня, а при подаче сжатого воздуха по воздушной трубе в жидком состоянии поднимается на поверхность и направляется на склад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аренс В.Ж.* Физико-химическая геотехнология. — М.: Изд-во МГГУ, 2001.

2. *Баранов А.О.* Подземная разработка рудных месторождений. — М.: Недра, 1986.

3. Горно-химическая технология добычи урана / [В. В. Кротков и др.]. — М.: ГЕОС, 2001.

4. *Колесников В.И.* Скважинная гидродобыча железных руд / В. И. Колесников, В. И. Стрельцов. — М.: НИА-Природа, 2005.

5. *Кузьмин Е.В.* Основы горного дела / Е. В. Кузьмин, М. М. Хайрутдинов, Д. К. Зенько. — М.: ООО «АртПРИНТ+», 2007.

6. Разработка рудных и нерудных месторождений / [М. И. Агошков и др.]. — М.: Недра, 1983.

7. *Хохряков В.С.* Открытая разработка месторождений полезных ископаемых. — М.: Недра, 1991.

Глава 8
Экологические проблемы разведки и разработки месторождений

8.1. Геолого-разведочные работы и окружающая природная среда

Любая природная система стремится к сохранению своего состояния и обладает некоторой устойчивостью относительно внешних факторов.

Под экологической устойчивостью понимают способность экосистемы противостоять техногенному воздействию без изменения своих основных параметров, вымирания или деградации отдельных компонентов.

Экосистема — сообщество живых существ и сред их обитания, объединенное в единое функциональное целое.

Окружающая среда (ОС) — среда обитания и производственной деятельности человека. Основные компоненты ОС — литосфера (включая почвы), гидросфера, атмосфера и биосфера. Важной составной частью ОС является подсистема — *геологическая среда* — совокупность горных пород, подземных и поверхностных вод, газов, организмов и продуктов их преобразований. Помимо основных компонентов ОС на геологическую среду активно воздействуют климат, рельеф, растительный покров и человечество.

Разность между существующей и предельно допустимой нагрузкой характеризует экологический резерв системы.

По результатам комплексной оценки экологической обстановки и прогнозу возможных ее изменений регулируется качество окружающей среды. Важный элемент такого регулирования — определение допустимых нагрузок на окружающую среду.

Под допустимым техногенным воздействием понимают такое воздействие, которое складывается из отдельных однородных и разнородных воздействий, не влияет на качество окружающей среды или допускает ее изменение в определенных пределах, т. е. не разрушает существующую экосистему и не вызывает неблагоприятных последствий у важнейших популяций и в первую очередь у человека.

К наиболее опасным видам техногенного воздействия на ОС относится загрязнение токсичными элементами и их соединениями.

Проведение геолого-разведочных работ (ГРР) на месторождении требует строительства грунтовых дорог, поселков, объектов инфраструктуры геолого-разведочного предприятия и т. д. ГРР осуществляются бурением скважин, проходкой горных выработок, сопрово-

Таблица 8.1. **Нарушения природных сред при ведении геолого-разведочных работ**

Почва и недра	Атмосфера	Гидросфера
Нарушения почв и растительного покрова при использовании бездорожного транспорта, строительстве и ремонте дорог и площадок	Загрязнение выхлопными газами и пылью транспортных и технолого-энергетических машин и механизмов	Загрязнение промывочной жидкостью буровых скважин
Нарушения почв и пород при проходке открытых горных выработок (канав, шурфов и т. п.)	Газопылевое загрязнение воздуха при взрывах при проходке открытых горных выработок и строительстве дорог и площадок	Загрязнение при некачественном тампонаже разведочных скважин
Нарушения почвенного слоя при размещении отвалов	Загрязнение воздуха проветриванием подземных горных выработок	Загрязнение водами из подземных горных выработок
Загрязнение почв буровым шламом и временными отвалами	Пыление нерекультивированных поверхностей отвалов и открытых горных выработок	Загрязнение при водной эрозии отвалов

ждаются загрязнением вод поверхностного и подземного стока, газово-пылевым загрязнением атмосферного воздуха и др.

Интенсивность и объемы ущерба окружающей среде от геолого-разведочных работ определяются стадией поисков или разведки, принятой методикой разведки, объемами горно-буровых работ на месторождении. Основные виды нарушений и загрязнения окружающей среды при ведении от геолого-разведочных работ на месторождении представлены в табл. 8.1.

Основными видами негативного воздействия ГРР на площади месторождения являются механические нарушения ландшафта и загрязнение элементов ОС техногенными источниками.

ГРР — первый значительный шаг нарушения равновесного состояния компонентов окружающей природной среды. При промышленной разработке месторождений негативная нагрузка на компоненты природной среды возрастает на несколько порядков и становится в ряде случаев экологически опасной.

8.2. Экологические проблемы разработки месторождений

Горно-промышленный комплекс России — один из крупнейших источников нарушения земель и загрязнения окружающей среды (ОС). Ежегодно горно-промышленным комплексом страны выбрасывается в атмосферу около 50 млн т вредных веществ, сбрасывается в водоемы более 2 млрд $м^3$ загрязненных сточных вод и складируется на поверхности земли более 8 млрд т твердых отходов.

Крупное горное производство сконцентрировано в 7 из 15 районов страны с крайне неблагополучной экологической обстановкой, в 5 районах добыча совмещена с переработкой минерального сырья. В ряде районов Урала и Кузбасса высокая загрязненность и деградация природной среды достигли критических значений, тяжелая обстановка сложилась в Центральном и Центрально-Черноземном экономических районах, на Кольском полуострове, в Прикаспии и Приангарье, Норильском районе и на Ямале.

Причина нарушения экологического равновесия на половине изъятых для промышленного использования земель — разработка месторождений и связанные с ней негативные воздействия на ОС.

В современных условиях в основу выбора способа разработки месторождения должен быть положен *экологический принцип* — принцип постоянного восстановления нарушаемой окружающей среды по мере освоения месторождения.

На новой концептуальной базе необходимо переосмыслить достоинства и недостатки способов разработки месторождений, поскольку существующая относительно кратковременная оценка не может учесть всей полноты необратимых процессов долговременного изменения экологической ситуации. Другими словами, обоснованию проектных решений по разведке и разработке месторождения или реконструкции действующего ГОКа должна предшествовать разработка общей стратегии освоения месторождения — открытым, подземным, физико-химическим и комбинированными способами с приоритетом экологического фактора, т. е. любой проект разработки необходимо подвергать экологической экспертизе. Правовые и экономические аспекты проектирования горных предприятий в связи с экологическими факторами отражены в ряде государственных нормативных документов.

Открытая разработка месторождений и вопросы экологии. Основные экологические факторы, подлежащие учету при проектировании горных предприятий, — нарушения земной поверхности, атмосферы и гидросферы вокруг предприятий.

Территории, на которых фиксируют ухудшение состояния ОС вследствие деятельности горно-рудного предприятия, распространяются далеко за пределы земельного отвода. Земельный отвод для горного предприятия, как правило, в 2—10 раз превышает площадь

карьера. При разработке крутых месторождений размеры среднего карьера составляют приблизительно 1×2 км, или 2—3 тыс. га, а земельный отвод, требуемый для размещения не только карьера, но и отвалов, промплощадки, транспортных коммуникаций и обогатительной фабрики, может достигать размеров 5×10 км, или 10—50 тыс. га. Протяженность зоны загрязнения атмосферы может составлять 10—15 км, радиус зоны нарушения гидробаланса — десятки километров.

Для открытой разработки месторождений отчуждаются обширные площади пахотных земель, сельскохозяйственных угодий, экологически уязвимых пойменных, таежных, тундровых и других участков. Площадь земельных отводов крупных горно-обогатительных комбинатов составляет от 2 тыс. до 10 тыс. га. Большие площади отводятся для складирования отходов, загрязняющих ОС. Хвостохранилища, вмещающие сотни миллионов кубических метров отходов, на комбинатах черной металлургии занимают площади до 3 тыс. га.

В связи с этим особое внимание при проектировании предприятий и разработке месторождений уделяется рекультивации нарушенных горным производством земель.

Общий земельный фонд РФ оценивается в 1 710 млн га. Предприятия горнодобывающей и перерабатывающей промышленности и объекты энергетики занимают земли площадью 2,7 млн га. В структуре нарушенных земель более 40 % общей площади занимают земли, нарушенные разработкой полезных ископаемых открытым способом, занятые отвалами вскрышных и вмещающих пород, золо-, шлако-, гидроотвалами и хвостохранилищами. В России на 1 января 2007 г. учтено около 1 200 тыс. га нарушенных земель.

Разработка месторождений содержит два взаимоисключающих аспекта:

– наращивание объемов добычи с максимально возможным извлечением полезного компонента;

– минимизация отчуждаемых для разработки площадей.

Рекультивация — комплекс работ по восстановлению ценности и продуктивности земель, а также улучшению ОС. Рекультивация на карьерах включает горные, мелиоративные, сельскохозяйственные и гидротехнические работы.

Результат рекультивационных работ — создание участков земли, пригодных для сельского и лесного хозяйства, организации зон отдыха, устройства водоемов различного назначения, жилищного и промышленного строительства и т. п.

Подземная разработка месторождений и вопросы экологии. Разработка месторождений подземным способом требует значительно меньших территорий под горный отвод по сравнению с открытыми горными работами, не вызывает столь масштабных нарушений и изменений ландшафтов и инфраструктуры, однако и ей сопутствуют существенные изменения ОС.

Степень нарушения поверхности подземными горными работами зависит от ряда факторов: размеров рудного тела, условий его залегания в толще пород, системы разработки и ее параметров, технологии ведения работ.

В большинстве случаев нарушения поверхности выражаются в формировании прогибов, мульд проседания, а иногда и провалов.

При использовании геотехнологических способов разработки происходят обычно незначительные нарушения поверхности. Этим способам присуще химическое загрязнение верхнего плодородного слоя почв (рис. 8.1).

Нарушения земной поверхности на рудниках связаны также с необходимостью складирования выдаваемых из недр и после переработки руд, пустых пород в отвалы и хвостохранилища, что принципиально не отличается от их воздействия на ОС при открытом способе разработки месторождений.

Основные мероприятия по сокращению поверхности, занимаемой отвалами и хвостохранилищами рудника, — это использование пустых пород и отходов обогатительных фабрик для закладки подземных выработок, что одновременно решает проблему сохранности земель от оседания и провалов над выработанным пространством, а также использование пустых пород для нужд народного хозяйства (строительные материалы, дорожные покрытия, минеральные удобрения, техническая соль и т. д.). Важным направлением является сокращение выдачи пустых пород из-под земли за счет разделительных и усреднительных процессов при очистной выемке. Схематично взаимодействие рудника с окружающей средой представлено на рис. 8.2.

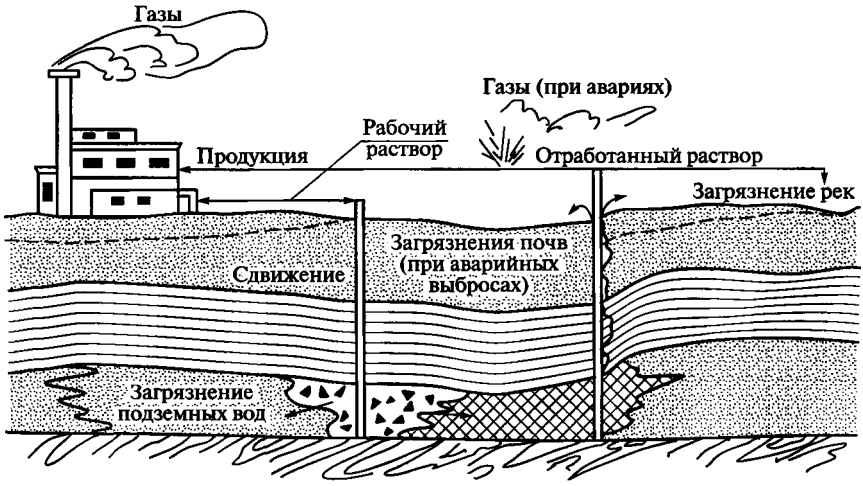


Рис. 8.1. Схема взаимодействия геотехнологического предприятия с окружающей средой (по А. М. Гайдину)

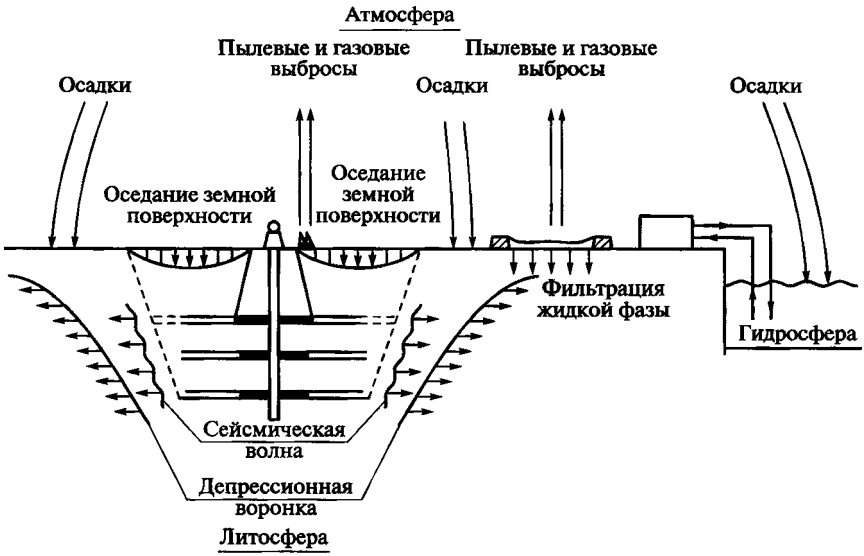


Рис. 8.2. Схема взаимодействия подземного рудника (шахты) с окружающей средой (по М. Е. Певзнеру и В. П. Костовецкому)

Кардинально решить вопрос о предотвращении нарушения поверхности при ведении горных работ подземным способом можно только за счет перехода на системы разработки с закладкой. Подземные горные работы оказывают большое влияние и на гидрогеологию прилегающих территорий. При извлечении значительных объемов полезного ископаемого, особенно с использованием систем разработки с обрушением налегающих пород, в зону сдвижения вовлекаются и водоносные горизонты, часто на больших площадях. Подсеченные водоносные горизонты дренируются горными выработками, в результате чего возможны просадки поверхности при дренаже.

Масса вод, которые откачиваются из рудников, оказывает негативное воздействие на состояние гидросферы и почв не только вблизи места ведения горных работ, но и на прилегающих территориях. Рудничные воды формируются за счет грунтовых вод, запертых, трещинных и карстовых подземных вод, а также дренирующих вод из гидрографической сети и инфильтрации атмосферных осадков, технологических вод основного производства. Отдельные рудники обычно откачивают из недр от нескольких кубических метров до нескольких десятков тысяч кубических метров воды в сутки. Шахтные воды сильно загрязняют поверхность и грунтовые воды, не позволяя использовать почву в традиционных для данного района направлениях. Наиболее распространенные загрязнители рудничных вод — это хлористые соединения и свободная серная кислота, которой часто сопутствуют растворимые соли, главным образом сульфа-

ты Fe, Cu, Zn, Mn, Ni и др. По хлористым и сернистым соединениям, а также содержанию Ca, Mg, Na, K рудничные воды превосходят техническую в 5—15 раз, что исключает возможность их использования без предварительной очистки и нейтрализации даже в технологических целях

Особую опасность из металлов-загрязнителей представляют тяжелые металлы. Накопление их в почве или воде, особенно таких, как Cd, Ni, Mn, может быть опасно для всего живого. Еще опаснее накопление Hg, Pb, As, Se.

Большой ущерб окружающей среде наносят водоотлив и предварительное водопонижение, осуществляемое на рудниках. Откачка вод из шахт изменяет гидрогеологический режим целых районов: на прилегающих территориях исчезают источники, пересыхают колодцы, полностью осушаются водоносные горизонты.

Методы и степень очистки сточных вод должны определяться в зависимости от местных условий с учетом возможного использования очищенных сточных вод для промышленных или сельскохозяйственных нужд. Проектирование установок для очистки рудничных вод осуществляется на основании исследований и разработки технологии для конкретного рудника и, как правило, не может быть применено к условиям другого предприятия.

Горные предприятия, ведущие подземную разработку, по сравнению с карьерами оказывают незначительное отрицательное влияние на атмосферу. Основной источник загрязнения атмосферы — отвалы пустых пород и хвостохранилища, подверженные ветровой и химико-биологической эрозии.

8.3. Правовые аспекты охраны окружающей среды при разработке месторождений

Аспекты охраны окружающей среды можно рассмотреть с двух позиций — международной и государственной. Объектами международно-правовой охраны ОС являются международные территории нашей планеты (космос, Мировой океан, Антарктида и т.д.) и природные среды и комплексы, принадлежащие в соответствии с международным правом двум или более государствам (пограничные реки, леса, полезные ископаемые).

Международно-правовая охрана окружающей среды основана на следующих принципах:

– ОС вне государственных границ — общее достояние человечества;

– свобода исследования и использования ОС и ее компонентов;

– запрет вне границ государства присвоения ОС и ее компонентов;

– рациональное использование ОС;

– предотвращение загрязнения ОС;
– международное сотрудничество в области изучения и использования ОС.

Основным документом международно-правовой охраны ОС является международный договор. Решения международных организаций могут стать источником права, если они одобрены государствами и содержат элементы нормативности.

Деятельность по охране ОС при разработке месторождений в пределах одного государства регламентируется национальным законодательством. Общими чертами для большинства национальных законодательств являются требования бережного отношения к ОС, необходимость восстановления нарушенных земель, благоустройства ландшафтов и т.д.

Основные направления государственного управления природопользованием:
– государственный учет природных ресурсов;
– лицензирование видов деятельности в сфере природопользования и охраны окружающей среды;
– экологическое нормирование;
– экологический мониторинг;
– экологическая сертификация;
– экологическая экспертиза;
– экологический аудит.

Добыча полезных ископаемых (включая нефть и газ) в соответствии с рядом нормативных документов относится к опасным видам хозяйственной деятельности и подлежит в РФ обязательной государственной экологической экспертизе.

В основу государственной политики России в области охраны ОС и рационального использования природных ресурсов положена концепция перехода РФ к устойчивому развитию. Понятие *устойчивого развития* как развития, при котором потребности нынешнего поколения удовлетворяются, не ущемляя возможность будущих поколений реализовать собственные нужды, а нагрузки на природную среду соизмеримы с ее восстановительными способностями, сформулировано в 1987 г. в тексте заключительного доклада Международной комиссии по окружающей среде и развитию. Это развитие должно удовлетворять ряду социальных, экономических и экологических требований, которые были определены на Всемирном экологическом форуме под эгидой ООН в г. Рио-де-Жанейро (Бразилия) в 1992 г.

Экологический аспект такого развития предполагает широкий комплекс мер, направленных на сохранение ОС и рациональное использование природных ресурсов (охрана атмосферы, рациональное использование земельных, водных и минеральных ресурсов, сохранение лесов, борьба с опустыниванием и засухой, сохранение биологического разнообразия, экологически безопасное использование

биотехнологии, повышение безопасности использования токсичных химических веществ, решение проблемы отходов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горное дело и окружающая среда / [С. В. Сластунов и др.]. — М.: Логос, 2001.

2. *Певзнер М.Е.* Горная экология. — М.: Изд-во МГГУ, 2003.

3. Техногенные массивы и охрана природных ресурсов / [А. М. Гальперин и др.]. — М.: Изд-во МГГУ, 2006. — Т. 1, 2.

4. Экология и охрана природы при открытых горных работах / [П. И. Томаков и др.]. — М.: Изд-во МГГУ, 1994.

ЧАСТЬ III

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОКЕАНИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД

Глава 9

Геологические строение, методика поисков и разведки месторождений железомарганцевых конкреций

9.1. Методы и инструменты исследований

Важнейшими особенностями, определяющими методику проведения геолого-разведочных работ на ЖМК, являются: глубоководное залегание скоплений ЖМК, площадное размещение полей ЖМК и гигантские размеры потенциально перспективных участков морского дна, контролирующее влияние локальных форм рельефа и структуры осадочного чехла на структуру конкреционных месторождений. Вследствие этого аппаратурно-технический комплекс, используемый для проведения геолого-разведочных работ на ЖМК, должен включать аппаратуру, технику и технологии, которые позволяют изучить на больших глубинах и значительных площадях тектоническое строение и рельеф дна региона, структуру осадочного чехла, масштабы оруденения, характер распределения рудных образований на поверхности дна и их качество.

Для изучения *рельефа дна* применяют промер дна с использованием многолучевых эхолотов, а также поверхностное и придонное геоакустическое профилирование, включающее гидролокационную (сонарную) съемку и съемку с использованием акустических профилографов.

На ранних стадиях изучения океанического конкреционного оруденения при рекогносцировочных и региональных исследованиях применялся эхолотный промер ***однолучевыми эхолотами***. Для измерения глубин по профилям и на станциях могут использоваться разные модификации штатных судовых эхолотов (например, промерный эхолот ПЭЛ-Д на базе компьютера «ADVANTECH» в комплексе с универсальным навигационным модулем). В настоящее время для изучения рельефа дна применяют ***многолучевые***

эхолоты, использование которых обеспечивает сплошную площадную съемку поверхности дна, скрытого многокилометровой толщей воды. При этом получают цифровые массивы данных глубин и амплитуд обратно рассеянного сигнала, на основе которых изготовляют кондиционные батиметрические карты соответствующего масштаба, карты сонарного изображения и карты уклонов дна. Конструкция многолучевых эхолотов (Simrad EM-12, SeaBeam 2000, HydroSweep и др.) предусматривает максимально полную автоматизацию управления процессом сбора данных при минимальной необходимости вмешательства оператора. В качестве примера может быть приведен многолучевой эхолот EM12S-120 норвежской фирмы Simrad. Данный эхолот позволяет получать данные о глубине и амплитуде обратно рассеянного акустического сигнала на глубинах от 50 до 11 000 м в полосе захвата шириной от 2 до 3,5 глубин места (в зависимости от гидрологических условий, глубины и сложности рельефа).

В районах, перспективных относительно обнаружения месторождений железомарганцевых конкреций, с глубиной дна от 4 700 до 5 400 м ширина полосы съемки составляет от 3,15 до 3,25 глубины, что обеспечивает межпрофильное расстояние от 11,5 до 12,5 км с перекрытием соседних полос обзора на 15—25 %. На таких глубинах промер со скоростью порядка 8 узлов в эквидистантной системе с углом обзора 120° обеспечивает получение кондиционной батиметрической карты масштаба 1:200 000 с сечением изобат через 25 м. Проведение сплошной съемки многолучевым эхолотом дает возможность получить детальную батиметрическую карту участка, однозначно увязать между собой структуры, выделенные по результатам профильных придонных гидроакустических исследований, выявить на всей площади бесперспективные с геоморфологической точки зрения участки дна, связанные с областями крутых (круче 10°) склонов, и благоприятные для конкреционного оруденения субгоризонтальные поверхности.

Картирование морского дна в целях выяснения геолого-геоморфологической обстановки залегания скоплений ЖМК и оценки горно-геологических условий месторождения осуществляется также посредством применения *геоакустических методов* исследований в приповерхностном и придонном вариантах (рис. 9.1).

Приповерхностная гидролокационная (сонарная) съемка с использованием низкочастотного гидролокатора бокового обзора дальнего действия (ГЛБО ДД типа GLORIA, SeaMARC II, «Океан» и др.) дает общие сведения о строении дна района, обеспечивая получение непрерывной площадной информации о поверхности дна в полосе шириной до 30 км и картирование крупных объектов, имеющих размеры от нескольких сотен метров до нескольких десятков километров. Сонография гидролокатором дальнего действия выполняется в комплексе с промером дна судовым эхолотом и в отличие от использо-

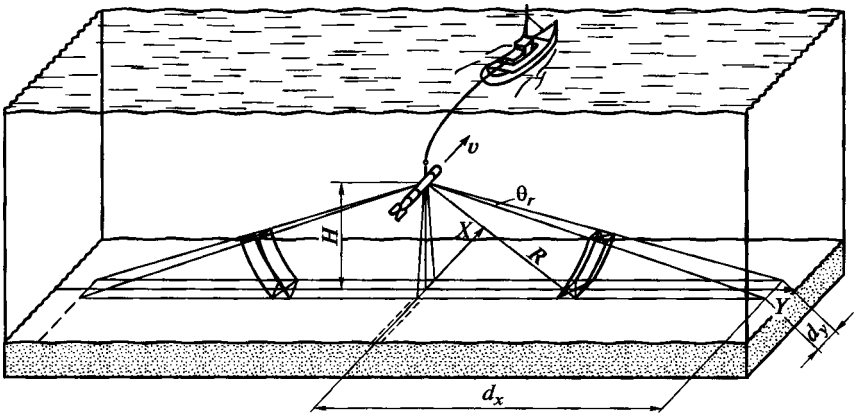


Рис. 9.1. Принципиальная схема съемки морского дна методом ГЛБО (гидролокатора бокового обзора) (Обработка и интерпретация материалов локации бокового обзора для определения вещественного состава поверхностных образований шельфа. — Л., 1989):

υ — скорость судна; H — высота антенны над поверхностью морского дна; R — наклонная дальность; X — линия пути; Y — направление строки сонограммы; d_x, d_y — соответственно продольная и поперечная составляющие разрешающей способности гидролокатора; θ_r — угол раскрытия диаграммы гидролокатора в горизонтальной плоскости

вания многолучевого эхолота не обеспечивает получения цифровых данных о глубинах и амплитудах обратно рассеянного сигнала, поэтому в настоящее время успешно заменяется многолучевым эхолотированием, содержащим сонарные подсистемы.

Придонная геоакустическая (гидроакустическая) съемка в комплексе с многолучевым эхолотированием выполняет при картировании морского дна уточняющую роль вследствие преимуществ придонного эхолота в разрешающей способности, как горизонтальной, так и вертикальной. Глубоководные сонары высокого разрешения, такие, как ГИК-6000, МАК-1М (Морской акустический комплекс) и TOBI (Towed Ocean Bottom Instrument), обеспечивают съемку в полосе обзора шириной до 1 000 м (МАК-1М) и даже до 3 000 м на каждый борт (TOBI) и масштабы мозаик 1:25 000 — 1:50 000, в которых уверенно прослеживаются объекты размером от нескольких до сотен метров. Примером может служить глубоководный придонный акустический комплекс МАК-1М разработки ГНЦ ФГУГП «Южморгеология», который в своем составе содержит двухсторонний гидролокатор бокового обзора средней дальности (ГЛБО СД), двухсторонний гидролокатор бокового обзора высокого разрешения (ГЛБО ВР) — в среднем около 1 м, акустический профилограф (АП), освещающий осадочный разрез мощностью до 150 м вдоль линии профиля, эхолот «вниз» и датчики давления для определения глуби-

ны дна и позволяет выявить локальные батиметрические и геоморфологические особенности месторождения.

Для изучения *тектоники* региона используются ***гидромагнитная*** и ***гравиметрическая съемки***, в результате которых получают карты аномалий силы тяжести в различных редукциях и аномального магнитного поля. На основе интерпретации этих материалов может быть осуществлено районирование изучаемой площади по характеру потенциальных полей, мощности и возрасту фундамента, определена мощность земной коры, выделены тектонические блоки. Полученные геофизические данные позволяют выделять участки локального вулканизма, зоны разломов, тектонической активизации и т. п. Данные методы используют на стадии поисков месторождений ЖМК.

Для изучения *осадочного разреза* применяют сейсмоакустику, придонное геоакустическое профилирование, геологическое опробование.

Многоканальная цифровая сейсмоакустическая съемка применяется на региональной стадии работ в качестве основного метода изучения осадочного чехла, суммарная мощность пород которого в областях распространения ЖМК составляет обычно от 100 до 500 м. На основе данных сейсмоакустической съемки проводится расчленение осадочного комплекса по сейсмостратиграфическим признакам на отдельные так называемые сейсмокомплексы (интервалы осадочного разреза с различными характеристиками волнового поля) и изучаются особенности их пространственного распространения, а также определяется мощность верхнего акустически прозрачного слоя, с которым ассоциируют железомарганцевые конкреции.

Более детальное расчленение верхнего слоя осадочного чехла обеспечивает применение упомянутых ранее *высокоразрешающих профилографов* (разрешающая способность 0,5—1,0 м), входящих в состав придонных геоакустических комплексов, таких, как МАК-1М. Их использование позволяет детально изучить структуру осадочного разреза до глубины 150 м и выделить участки, благоприятные в стратиграфическом и литологическом отношении для развития ЖМК.

Донное опробование на геологических станциях призвано решать целый спектр задач, включая подтверждение сейсмокомплексов, выделенных на основе сейсмо- и геоакустических исследований. Отбор проб донных осадков позволяет выяснить литологический состав единицы разреза, соответствующей тому или иному сейсмокомплексу, и его возрастную привязку, а кроме того, вещественный состав и физико-механические свойства донных грунтов, информация о которых важна для разработки и последующей эксплуатации добычных агрегатов с соответствующими параметрами. Геологическое опробование проводится с использованием пробоотборников грейферного (дночерпатели «Океан 0,25», ДГ—1,5 и др.) или коробчатого типа (например, бокскореры КП-0,15-1,5; КП-2,5 и др.), а также грунтовыми трубками различных конструкций. С помощью пробоотборни-

ков грейферного и коробчатого типов изучаются отложения верхних 3—5 дм разреза, прямоточные грунтовые гравитационные трубки (например, АХК-005) позволяют изучать разрез нескольких верхних метров (обычно до 5 м). Существуют комбинированные пробоотборники, объединяющие в разных модификациях и сочетаниях дночерпатель, грунтовую трубку и трал.

Основная задача работ при поисках и разведке месторождений ЖМК — *выяснение масштабов оруденения изучаемой площади* и *изучение изменчивости его количественных и качественных параметров*. Для этого используют как контактные (геологическое опробование), так и дистанционные (сонография, фотографирование морского дна, в том числе фототелепрофилирование) методы.

Геологическое опробование дночерпателями и пробоотборниками коробчатого типа, обычно оснащенными глубоководными фотоустановками (типа ГФУ-6-8), позволяет определять площадную и весовую концентрации железомарганцевых руд в точке опробования, их состав и свойства. Пробоотборники должны отвечать требованиям получения представительных проб в ненарушенном состоянии, отобранных с площади дна не менее 0,25 $м^2$ при глубине внедрения в осадок не менее 0,3 м. Площадь фотоснимка морского дна должна быть не менее 1 $м^2$ с разрешением не ниже 0,5 см. Для получения крупнообъемных проб ЖМК в целях определения технологических свойств руды разработаны специальные пробоотборники (например, трал типа «Сигсби»).

К дистанционным методам определения масштабов конкрециеносности относятся локация бокового обзора (сонография), непрерывное фототелепрофилирование и фотографирование на станциях. Материалы ***придонной съемки гидролокатором бокового обзора***, как и карты интенсивности обратно рассеянного сигнала, построенные по данным многолучевого эхолота, дают важную информацию для решения задач, связанных с выяснением структуры конкреционного месторождения. Известно наличие связи между масштабами конкреционного оруденения дна и интенсивностью обратно рассеянного сигнала, однако оценка масштабов оруденения донной поверхности по сонарным данным имеет вероятностный характер и может проводиться только на качественном уровне, т. е. на уровне выделения участков практического отсутствия конкреций, рассеянного залегания и скоплений повышенной плотности.

Данные ***непрерывного фототелевизионного профилирования*** в отличие от сонографии относятся к разряду прямых методов оценки масштабов конкреционного оруденения на поверхности дна. Фототелевизионная съемка является исключительно важной составляющей геолого-разведочной стадии, поскольку получаемая с ее помощью информация о положении границ рудных залежей и других элементов структуры месторождения ЖМК носит наиболее надежный и достоверный характер. Основной геологической задачей непре-

рывного фотопрофилирования является определение площадной концентрации (покрытия) конкреций, по результатам которого осуществляется оконтуривание. Кроме того, выясняются размеры, форма (т. е. фототип) рудных образований, характер залегания и степень «присыпанности» донным осадочным материалом (вернее, степень погруженности конкреций в донный осадок) (рис. 9.2). По материалам этого метода проводится анализ литодинамической обстановки, особенностей мезорельефа дна и выявляются донные препятствия литологического типа.

Телевизионный осмотр дна, выполняемый в реальном времени съемки в комплексе с фотопрофилированием, позволяет проводить те же наблюдения, что и дискретное фотографирование по профилям. Преимущества телесъемки состоят в непрерывности наблюдений, что позволяет отследить объекты, попавшие в межкадровое пространство при фотосъемке.

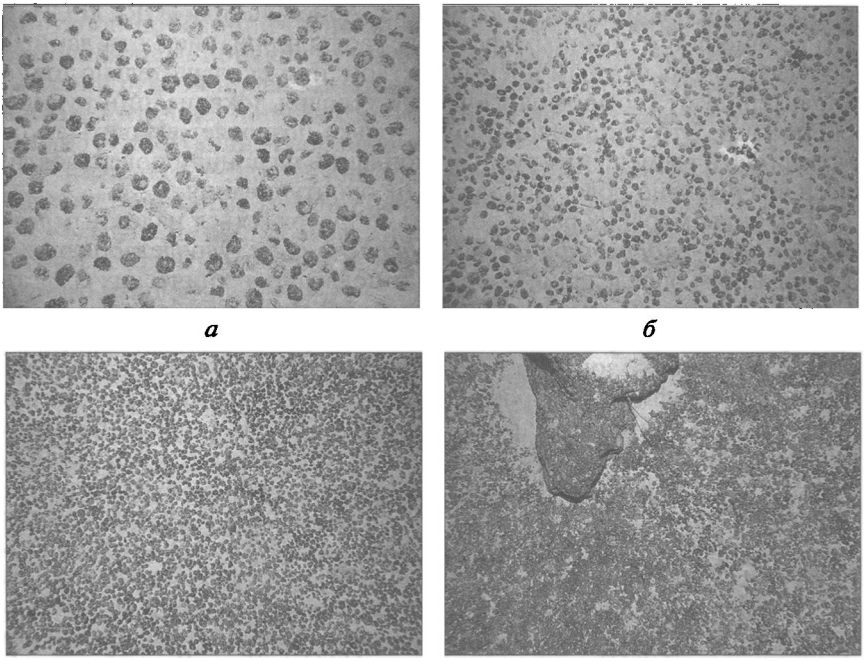


Рис. 9.2. Железомарганцевые конкреции различных фациальных разновидностей (промышленных сортов) в естественном залегании по данным непрерывного фотопрофилирования (материалы ГНЦ ФГУГП «Южморгеология»):

а — сорт С; *б* — сорт В; *в* — сорт А; *г* — сорт А в ассоциации с корками на базальтовых породах на склоне вулканической постройки. Площадь фотоснимка ~3,5 м^2

Профилирование осуществляется глубоководным придонным фототелекомплексом (например, различные модификации фототелекомплексов «Мир» или «Нептун») при движении судна со скоростью 1—2 узла. Фотосъемка производится автоматически через постоянный интервал времени (от 15 до 40 с, что в зависимости от скорости движения аппарата соответствует расстоянию от 10 до 30 м) на заданном отстоянии от дна (первые метры), площадь кадра обычно составляет от 2 до 6—8 м^2. Современные глубоководные фотокомплексы, оснащенные цифровыми фотокамерами, осветительными приборами, эхолотами «вверх» и «вниз», а также маяками-ответчиками, позволяют получать со строго определенного отстояния от дна координированные, т.е. с координатной привязкой высокой точности, фотокадры высокого качества, соответствующие постоянной площади фотографируемого участка дна.

Весьма информативными являются материалы фототелепрофилирования, используемого в варианте совмещения с придонной гидроакустикой (съемка комплексом типа «Абиссаль» или «ORETECH»). По сравнению с обычным фототелепрофилированием эти данные обладают очень важным преимуществом: они исключительно точно характеризуют геоморфологические условия локализации рудных скоплений. Это обстоятельство не только позволяет выявить закономерности размещения рудных скоплений на донной поверхности, но и значительно облегчает задачу их оконтуривания.

Все виды морских работ должны сопровождаться надежным ***навигационно-гидрографическим обеспечением***, удовлетворяющим требованиям определения координат подводно-технических средств (ПТС) с погрешностью, соответствующей масштабу съемки. Удовлетворение этого требования возможно двумя способами. Первый основан на использовании комбинированного варианта навигационно-гидрографического обеспечения, включающего в свой состав спутниковую (СНС) и гидроакустическую (ГАНС) навигационные системы. СНС используется для определения координат судна, ГАНС — для привязки ПТС относительно судна. В качестве существующих прототипов спутниковой навигационной системы могут быть названы СНС NAVSTAR и ГЛОНАС, обеспечивающие точность привязки судна не более ±5 м, для гидроакустической навигационной системы — ультракороткобазисная акустическая система подводной навигации POSIDONIA, обеспечивающая среднеквадратическую погрешность (СКП) местоположения ПТС ± 35 м. Второй способ ориентирован на непосредственное определение координат ПТС с применением донных (использование стационарных донных буев) или мобильных (использование свободно плавающих буев) гидроакустических навигационных систем, дающих абсолютную погрешность определения координат в размере ±10 м и ±5 м соответственно.

Наряду с определением координат важной задачей навигационно-гидрографического обеспечения ГРР является удержание судна на

проектном профиле или в точке позиционирования с заданной точностью. Для этого судно должно быть оснащено системой управления движением (типа системы АСУД «МОРЕХОД»).

Методическая основа геолого-геофизических исследований конкрециеносных районов океанского дна однотипна на всех стадиях геолого-разведочных работ и заключается в комплексировании контактных и дистанционных методов исследований. В зависимости от задач, стоящих на той или иной стадии геолого-разведочных работ, применяют различные комплексы методов и их модификаций.

9.2. Поиски месторождений железомарганцевых конкреций

Цель поисковых работ. Поисковые работы проводят на площади рудной провинции (абиссальной котловины или ее фрагмента). Основная цель поисковых работ — исследование геологического строения рудной провинции и выделение потенциального месторождения железомарганцевых конкреций. Для достижения этой цели решаются следующие основные задачи:

– изучение климатических, океанографических, гидрологических и других природных условий исследуемой акватории;

– выявление общих особенностей батиметрического, геоморфологического, геологического, литологического строения дна исследуемого района;

– изучение масштабов и характера распространения ЖМК в исследуемом районе;

– изучение вещественного состава конкреций;

– предварительное изучение технологических свойств конкреций по результатам испытаний минералого-технологических и малых технологических проб;

– изучение физико-механических свойств конкреций и вмещающих их донных осадков;

– оценка прогнозных ресурсов ЖМК и заключенных в них компонентов по категории P_3 по провинции в целом, по категории P_2 по рудному полю и категории P_1 на участках детализации;

– сбор исходных данных для обоснования оценочных кондиций и составления технико-экономических соображений (ТЭС) о целесообразности постановки поисково-разведочных (оценочных) работ;

– выбор участка Международного района морского дна, в пределах которого локализовано рудное скопление, которое по ресурсам и качеству руд удовлетворяет требованиям, предъявляемым к месторождению ЖМК на условиях, определяемых Международным органом по морскому дну ООН (МОД ООН);

– обоснование рекомендаций по очередности проведения поисково-оценочных работ на отдельных участках месторождения.

Поисковые предпосылки. Поисковые предпосылки обнаружения месторождений ЖМК, особенно важные при поисковых работах, определяются основными закономерностями размещения скоплений ЖМК.

Тектонические предпосылки: промышленно значимые скопления ЖМК располагаются в пределах абиссальных котловин или их крупных, однородных в структурно-тектоническом отношении частей. Благоприятной предпосылкой является относительная близость к тектоническим разломам, по которым возможно поступление рудного вещества эндогенного и гальмиролитического происхождения.

Батиметрические предпосылки: батиметрический интервал залегания промышленно значимых скоплений ЖМК обычно располагается ниже уровня критической глубины карбонатонакопления (КГК). Известны отдельные уникальные скопления (типа поля Диамантина) на глубинах, близких к лизоклину.

Геоморфологические предпосылки: скопления ЖМК формируются на выположенных поверхностях рельефа с уклоном не более 10°.

Литофациальные предпосылки:

– удаленность от источников терригенного материала;

– приуроченность к зонам низкой биологической продуктивности водной толщи;

– развитие в изучаемом регионе пелагических глинистых и кремнисто-глинистых осадков.

Литодинамические предпосылки: благоприятной является обстановка минимального осадконакопления в условиях спокойного литодинамического режима и отсутствия повышенной седиментации, связанной со склоновыми процессами, областями разгрузки придонных течений и т.д.

Гидродинамические предпосылки: благоприятная обстановка для формирования скоплений руд может быть обеспечена за счет деятельности придонных течений, препятствующих накоплению осадков.

Поисковые признаки. Комплекс поисковых признаков наиболее полно разработан для хорошо изученных конкреционных месторождений провинции Кларион-Клиппертон по результатам многолетних исследований этой провинции. К их числу относятся:

– наличие субгоризонтальных участков рельефа дна независимо от типа локального геоморфологического элемента (вершинные поверхности поднятий, днищевые поверхности впадин, поверхности террасовидных ступеней рельефа);

– развитие в верхней части осадочного разреза этих участков глинистых и кремнисто-глинистых монтмориллонит-иллитовых осадков плиоцен-голоценового возраста;

– отсутствие проявлений донной эрозии руслового и площадного характера.

Комплекс методов, применяемый на поисковой стадии. На поисковой стадии основной комплекс работ осуществляется дистанционными методами с использованием приповерхностных аппаратов по сети профилей. Как правило, наблюдения проводятся по системе параллельных профилей через 12—24 км при скорости судна 6—8 узлов. Выбор азимута профилей выполняется с учетом предполагаемого простирания элементов рельефа дна (используются батиметрические карты масштабов 1:5 000 000—1:10 000 000), осуществляется система увязочных профилей. Комплекс работ, выполняемых на поисковой стадии, должен обеспечить составление графических материалов масштаба 1:2 000 000.

Комплекс дистанционных приповерхностных исследований включает:

- глубоководный промер многолучевыми эхолотами;
- гравимагнитометрическую съемку;
- многоканальную цифровую сейсмоакустическую съемку.

По отдельным профилям, пересекающим наиболее перспективные рудные зоны, целесообразно осуществлять придонную гидролокационную съемку и непрерывное фототелепрофилирование, предпочтительно в совмещенном варианте комплексом типа «Абиссаль». Объемы профилирования определяются сложностью строения рудных зон.

Опробование выполняется в пределах перспективных рудных зон, выделенных основным комплексом работ, в целях подтверждения их перспективности, оценки плотности залегания конкреций, определения содержаний основных компонентов в руде, типов и свойств осадков и т.д. Опробование проводится дночерпателем или коробчатым пробоотборником по регулярной или логической сети (от одной станции на 100 км^2 до одной станции на 625 км^2) с получением фотографий морского дна.

Кроме перечисленных на поисковой стадии целесообразно выполнение следующих видов работ:

- инженерно-геологическое опробование с использованием прямоточных (гравитационных) трубок различного диаметра и коробчатых пробоотборников. Каждая станция инженерно-геологического опробования должна иметь навигационную, геоморфологическую, геологическую привязку (координаты, характеристику морфологических элементов рельефа, тип донных осадков и т.д.);
- технологическое опробование в целях изучения технологических свойств руд на минералого-технологических и малых технологических пробах. Количество станций траления определяется количеством природных типов ЖМК, выделяемых по данным опробования. Разрабатывается предварительная геолого-технологическая типизация ЖМК и намечаются технологические (промышленные) типы и сорта ЖМК.

Регистрация и экспресс-обработка геолого-геофизической информации, получаемой в результате комплекса работ, осуществля-

ются на борту геолого-разведочного судна в автоматизированном режиме.

На поисковой стадии по результатам рейсов составляют отчеты о геологических исследованиях (с обоснованием их надежности) и оценке ресурсов по категории P_2 (на участках детализационных работ по категории P_1) с приложением информационной базы геолого-геофизических и геохимических данных и комплекта графических документов масштаба 1:2 000 000. Комплект графических документов состоит из следующих материалов: обзорная карта района работ масштаба 1:5 000 000; карта фактического материала; карта рельефа дна; структурно-геоморфологическая карта; геологическая карта района работ с сейсмостратиграфической колонкой и разрезом; карта мощности осадочного чехла; схема рельефа акустического фундамента; карта донных осадков и их физико-механических свойств; сейсмоакустические разрезы по профилям; карты графиков и изодинам аномального магнитного поля; карта конкрециеносности; карты распределения в железомарганцевых конкрециях меди, никеля, кобальта, марганца и железа; схемы оценки ресурсов железомарганцевых конкреций по категории P_2 и металлов в них масштаба 1:2 000 000, а на участках с детализацией по категории P_1 — масштаба 1:200 000; интерпретационные профили, составленные по данным фототелепрофилирования; альбомы материалов по сейсмоакустическим исследованиям на профилях.

Итоговыми документами для поисковой стадии являются:

– отчет о геологических исследованиях района работ с оценкой ресурсов ЖМК и рудных компонентов по категории P_2 по всему району и категории P_1 на детализационных участках;

– технико-экономические соображения (ТЭС) о возможном промышленном значении выделенного потенциального месторождения ЖМК с оценочными кондициями.

Итог поисковых работ — выявление потенциального месторождения ЖМК на изученной площади провинции, подача заявки в Международный орган по морскому дну при ООН и получение сертификата на право проведения работ на выделенном лицензионном участке.

В пределах потенциального месторождения ЖМК, т.е. выделенного Международным органом участка дна, проводятся геолого-разведочные работы *поисково-разведочной* (*оценочной*) *стадии*, главнвми целями которых являются оконтуривание месторождения ЖМК с оценкой прогнозных ресурсов по категории P_1 по месторождению в целом и подсчетом запасов по категориям C_1 и C_2 на участках детализации, выяснение среднего качества минерального сырья, общая оценка его технологических свойств и горно-геологических условий эксплуатации для решения вопросов о целесообразности и очередности проведения разведочных работ на отдельных участках месторождения.

На поисково-разведочной (оценочной) стадии решаются следующие задачи:

– уточнение сведений по климатическим, океанографическим, гидрологическим и другим природным условиям исследуемой акватории;

– уточнение батиметрических и геолого-структурных особенностей строения месторождения, определяющих основные закономерности пространственного размещения конкреционных залежей;

– оконтуривание в плане и изучение изменчивости геолого-промышленных параметров наиболее крупных по площади рудных залежей по их простиранию и ширине;

– статистическая оценка участков непрерывного распространения конкреций и безконкрециеносных площадей;

– оценка среднего качества конкреций, их вещественного и минерального состава по месторождению в целом и отдельным залежам;

– выявление возможных технологических типов или сортов конкреций, их примерных количественных соотношений и главных особенностей технологической переработки с составлением баланса распределения попутных полезных компонентов и вредных примесей по продуктам основного производства;

– изучение в общих чертах физико-механических свойств конкреций и вмещающих их донных осадков по месторождению в целом и на площади, намеченной к первоочередной разведке;

– выборочная оценка условий залегания конкреций и изменчивости геолого-промышленных параметров в пределах полигонов, предназначенных для опытной добычи;

– оценка общих горно-геологических условий эксплуатации месторождения с их детализацией на полигонах опытной добычи;

– сопоставление данных поисково-разведочных (оценочных) работ и результатов опытной добычи;

– разработка мероприятий по охране окружающей среды;

– составление технико-экономического доклада (ТЭД) о возможном промышленном значении месторождения и целесообразности проведения разведочных работ;

– составление отчета по результатам работ с оценкой прогнозных ресурсов по категории P_1 по месторождению в целом и подсчетом запасов по категориям C_1 и C_2 на участках детализации.

Комплекс работ, проводимых на поисково-разведочной (оценочной) стадии, должен обеспечить составление графических материалов масштаба 1:200 000. Среднеквадратическая погрешность (СКП) определения плановых географических координат объектов геолого-разведочного наблюдения не должна превышать ±150—200 м (на участках детализации ±50 м). Основной комплекс работ на этой стадии осуществляется с использованием буксируемых глубоководных аппаратов по системе профилей через 6—12 км при скорости судна 1—2 узла.

Рациональный комплекс исследований включает:

– батиметрическую съемку с использованием многолучевых эхолотов;

– придонную гидролокационную (сонарную) съемку с использованием гидролокаторов бокового обзора;

– придонную акустическую съемку с использованием акустических профилографов;

– фототелевизионное профилирование с использованием фотокомплексов с дискретностью съемки 15—30 с.

Целесообразно использовать геолого-разведочные комплексы, позволяющие вести совместную фототелевизионную, гидролокационную и другие виды съемки.

Донное опробование осуществляется в пределах контура месторождения, выделенного дистанционными методами, по регулярной или логической сети (средняя плотность от одной станции на 36 км^2 до одной станции на 72 км^2 площади) с получением фотографий морского дна. Заложение геологических станций проводится с учетом данных дистанционных методов (геоакустической съемки и непрерывного фототелепрофилирования). Донное опробование выполняется дночерпателем или коробчатым пробоотборником при удержании судна в заданной точке. Кроме того, на поисково-разведочной (оценочной) стадии осуществляется инженерно-геологическое опробование на всех типах осадков (30—40 станций на площади исследования) и технологическое опробование путем отбора малых технологических и лабораторных проб.

Аналитические работы в целях определения вещественного состава железомарганцевых конкреций и донных осадков целесообразно проводить в набортном варианте.

Итоговыми документами на стадии поисково-разведочных (оценочных) работ являются:

– отчет о геологических исследованиях района работ с оценкой прогнозных ресурсов по категории P_1 по месторождению в целом и подсчетом запасов по категориям C_1 и C_2 на участках детализации;

– технико-экономический доклад (ТЭД) о целесообразности постановки разведочных работ с расчетом временных кондиций.

9.3. Разведка месторождений железомарганцевых конкреций

Цель и задачи разведочных работ. Разведочные работы на месторождении ЖМК проводятся в целях выяснения его промышленного значения, т.е. определения количества и качества заключенных в нем руд, а также для выяснения природных и экономических условий, в которых находится месторождение. Главной целью разведочных работ является получение сведений о запасах, качестве кон-

креций, их технологических свойствах и горно-геологических условиях эксплуатации месторождения с полнотой и достоверностью, достаточной для проектирования добычного предприятия и передачи месторождения в промышленное освоение.

На разведочной стадии решаются следующие задачи:

– определение климатических, океанографических, гидрологических и других природных условий в пределах месторождения ЖМК с полнотой, обеспечивающей проектирование добычного предприятия и ведение эксплуатационных работ;

– определение глубин океана и рельефа океанического дна отдельных конкреционных залежей с полнотой, достаточной для проектирования добычных систем;

– полное изучение особенностей геологического строения месторождения ЖМК;

– установление структурных, геоморфологических, литологических и других факторов, определяющих пространственное размещение и условия локализации отдельных конкреционных залежей;

– выявление контуров, условий залегания, особенностей внутреннего строения, характеристик изменчивости геолого-промышленных параметров и качества конкреций отдельных конкреционных залежей по их простиранию, ширине и мощности;

– детальное изучение качества конкреций, их вещественного и минерального состава в пределах отдельных конкреционных залежей;

– обоснование схемы металлургической переработки ЖМК, обеспечивающей комплексное извлечение полезных компонентов по каждому технологическому типу или сорту конкреций с проведением технологических испытаний в полупромышленном, а при необходимости и в промышленном масштабах;

– детальное изучение горно-геологических и инженерно-геологических условий эксплуатации месторождения ЖМК;

– совершенствование добычной техники и уточнение оценки горно-технических особенностей разработки месторождения в процессе опытной добычи;

– натурное изучение параметров загрязнения океанической среды при проведении опытной добычи и обоснование мероприятий по ее охране при эксплуатации месторождения ЖМК.

По результатам разведки составляется технико-экономическое обоснование (ТЭО) разведочных постоянных кондиций. Согласно утвержденным кондициям выполняются подсчет запасов ЖМК по категориям C_1 и C_2 и оценка прогнозных ресурсов по категории P_1 в соотношениях, предусмотренных нормативными документами, с представлением результатов в Государственную комиссию по запасам (ГКЗ) России.

Методика проведения разведочных работ на ЖМК и комплекс применяемых на этой стадии методов определяются особенностями структуры конкреционных месторождений.

Комплекс методов, применяемый на разведочной стадии. Состав и параметры комплекса технических средств, применяемого на разведочной стадии ГРР, должны обеспечивать решение задач, стоящих на данной стадии. В первую очередь это получение однозначной информации о морфологии и размерах рудных залежей ЖМК, а также элементов их внутренней структуры, опробование залежей, выяснение особенностей горно-геологических условий месторождения ЖМК, изучение строения разреза осадочного чехла с оценкой инженерно-геологических характеристик грунтов, при соответствующем навигационном обеспечении работ. Комплекс работ на разведочной стадии должен обеспечить составление графических материалов масштаба 1:50 000; СКП определения относительных плановых координат объектов геолого-разведочного наблюдения не должна превышать ±50 м.

В настоящее время собственно разведочные работы на площади российского месторождения ЖМК еще не проводились. Подготовка к выполнению этих работ осуществляется в рамках опытно-методических работ масштаба 1:50 000 на отдельных полигонах детальных исследований, локализованных на площадях развития рудных залежей разного типа. Комплекс этих работ включает промер дна приповерхностным многолучевым эхолотом, геоакустическую съемку с использованием глубоководного придонного акустического комплекса МАК-1М, непрерывное фототелевизионное профилирование и донное опробование. По итогам этих работ разработаны рекомендации по методике разведочных работ на ЖМК, которые сводятся к следующему.

Опыт многолетних исследований ГНЦ ФГУГП «Южморгеология» показал, что наиболее эффективным типом геолого-разведочной системы, применяемой при изучении месторождений ЖМК, является ее комбинированный вариант, в основе которого лежит комплексное использование профильных дистанционных (картирование поверхности дна, оконтуривание рудных залежей и т. п.) и точечных контактных (геологическое опробование) методов исследований. Проведение дистанционных методов исследования должно опережать донное опробование. На разведочной стадии основной комплекс работ осуществляется буксируемыми или автономными глубоководными аппаратурно-техническими средствами по системе параллельных взаимоувязанных профилей. Выбор азимутов профилей планируется с учетом генерального простирания рудных залежей (вкрест их простирания), особенностей строения рельефа дна и гидрометеорологической обстановки.

Выяснено, что комплекс методов и технических средств, апробированный на детальных опытно-методических работах масштаба 1:50 000, не полностью удовлетворяет требованиям разведочной стадии работ. В первую очередь это касается изучения рельефа дна месторождения. В связи с тем что существующие технические про-

екты агрегатов — сборщиков ЖМК ограничивают их эксплуатацию определенными условиями микрорельефа дна, главной целью картирования дна на разведочной стадии является создание детальной батиметрической основы для планирования будущих добычных операций (трасс движения агрегата-сборщика). В соответствии с этими требованиями на разведываемых площадях должны быть выявлены все элементы рельефа, представляющие собой препятствия для агрегата сбора. К таким элементам относятся, в частности, участки, в пределах которых величина уклонов дна превышает 6° при относительном перепаде глубин 20—30 см и более. Использование приповерхностных многолучевых эхолотов не может обеспечить создания батиметрической основы такой степени детальности. Решение этой проблемы связывается с применением придонных батиметрических систем. Для получения кондиционной батиметрической (топографической) основы масштаба 1:50 000 необходимо использовать придонный многолучевой эхолот, ширина полосы обзора которого должна составлять не менее 250 м. Расстояние между профилями следует определять с учетом 20%-го перекрытия соседних полос, что обеспечит гарантии надежности и достоверности результатов съемки. Таким образом, съемка должна осуществляться с межпрофильным расстоянием 200 м.

В целях рационализации разведочных работ и сокращения затрат на их производство целесообразно комплексировать батиметрическую съемку с технологически совместимыми видами исследований, связанными с дополнительной оценкой возможности осуществления добычных операций. Рекомендуется комплексировать придонный многолучевой эхолот с широкополосным акустическим профилографом, обеспечивающим возможность предварительной оценки инженерно-геологических характеристик отложений верхней части разреза осадочной толщи, особенно в интервале до 3 м под дном.

Для наиболее эффективного решения задач оконтуривания и оценки условий локализации рудных залежей на разведочной стадии ГРР следует использовать комплексный вариант работ, совмещающий сплошную гидроакустическую съемку разведываемых площадей с одновременным изучением разреза осадочного чехла по данным акустического профилирования, с одной стороны, и фототелесъемку — с другой. С этой целью целесообразно применение двухзвенного комплекса, включающего фототелекомплекс и высокоразрешающий гидролокатор бокового обзора с полосой дистанционирования 1 000 м. Съемка должна осуществляться с 50%-м перекрытием соседних полос, т. е. с межпрофильным расстоянием 1 000 м. В настоящее время разрабатываются подобные комплексы, предназначенные для выполнения работ разведочной стадии.

В связи с тем что основными целями опробования рудных залежей являются определение значений геолого-промышленных параметров, необходимых для подсчета запасов руды и металлов (весовые кон-

центрации руды, содержания полезных компонентов), оценка инженерно-геологических условий эксплуатации месторождения ЖМК, а также технологических свойств конкреционных руд, следует в процессе разведки месторождений ЖМК выполнять три вида опробования: рядовое геологическое, техническое (инженерно-геологическое) и технологическое.

Данные *рядового опробования* служат исходным материалом для подсчета запасов предварительно оконтуренных рудных залежей. Отбор проб следует осуществлять равномерно по всей площади конкретной рудной залежи, желательно с постоянным шагом сети опробования. Сети рядового геологического опробования планируются индивидуально для конкретных рудных залежей с учетом предварительно полученных результатов дистанционных исследований (фототелепрофилирования и сонарной съемки). В соответствии с характером структуры месторождения и наличием выявленной зональной анизотропии распределения количественных характеристик рудоносности внутри индивидуальных рудных залежей опробование рекомендуется осуществлять вдоль линий профилей, ориентированных вкрест простирания рудных залежей. Расстояние между профилями опробования (в продольном по отношению к простиранию залежи направлении) допускается в интервале от 2 до 4 км. Шаг опробования в поперечном к простиранию рудной залежи направлении (в пределах профиля) определяется для каждой залежи индивидуально исходя из требований статистической представительности, предъявляемых к объему выборки (от 20 до 30 станций на площади залежи), но в любом случае он должен превышать 250 м (для разных типов залежей от 0,5 до 4,0 км). Станции отрабатываются пробоотборником коробчатого или грейферного типов в комплексе с фотоустановкой.

Изучение инженерно-геологических условий разработки месторождений ЖМК (состава и физико-механических свойств грунтов, рудной массы ЖМК, коррозионной агрессивности природной среды и др.) является одной из важных задач разведочной стадии ГРР. Решение этой задачи осуществляется на основе соответствующих исследований материала рядовых геологических проб, специально отбираемых проб, а также прямых измерений физико-механических свойств донных грунтов in situ.

Цель *технологического опробования* при проведении разведочных работ на месторождении ЖМК заключается в уточнении сведений о качестве и технологии переработки руд по отдельным участкам или залежам с полнотой, достаточной для проектирования перерабатывающего предприятия. Опробование проводится в пределах рудных залежей по всем технологическим типам и сортам руд. Объем технологических исследований определяется проектом разведочных работ.

Регистрация и экспресс-обработка геолого-геофизической информации, получаемой в результате комплекса работ, осуществляется на борту геолого-разведочного судна в автоматизированном ре-

жиме. Набортные аналитические работы в целях определения основных рудных компонентов железомарганцевых конкреций выполняются с точностью, соответствующей III категории.

На разведочной стадии должны быть разработаны мероприятия по соблюдению действующих международно-правовых документов в области охраны окружающей среды.

На стадии разведочных работ составляются отчеты о геологических результатах с подсчетом запасов по категории C_1 и частично по C_2, выявленных в результате разведки месторождения, с приложением информационной базы геолого-геофизических и геохимических данных и составлением комплекта графических материалов масштаба 1:50 000. В итоговый комплект материалов входят карта фактического материала, батиметрическая карта, геоморфологическая карта, геологическая карта месторождения с рельефом дна и геологические разрезы к ней, карта донных осадков и их физико-механических свойств, карта изопахит верхних горизонтов осадочного чехла, карта конкрециеносности (с указанием промышленных типов и сортов железомарганцевых конкреций), карта горно-геологических и инженерно-геологических условий с указанием препятствий, представляющих опасность для работы агрегата по сбору конкреций, планы подсчета запасов конкреций и содержащихся в них металлов по категориям C_1 и C_2, схема оценки ресурсов железомарганцевых конкреций и металлов в них по категории P_1.

Подсчет запасов руды и основных компонентов, а также попутных компонентов, имеющих промышленное значение, по категориям C_1 и C_2 проводится на разведанных площадях, а также в пределах оцененных площадей на участках детализации по результатам разведочных и поисково-разведочных (оценочных) работ в соотношениях, предусмотренных методическими документами. Подсчет запасов железомарганцевых конкреций и их основных рудных компонентов выполняется в пределах контура, установленного в соответствии с требованиями кондиций. Контуры запасов категории C_1 определяются согласно утвержденным кондициям или (при оперативном подсчете) принятым оценочным параметрам на основе данных дистанционных исследований и отбора проб без использования экстраполяции. Для определения контуров запасов категории C_2 в соответствии с принятыми оценочными параметрами (при оперативном подсчете) на основе данных дистанционных исследований и отбора проб допускается использование геологически и геоморфологически обоснованной экстраполяции.

Подсчет запасов руды выполняется методом геологических блоков. В качестве подсчетного блока могут выступать целая рудная залежь, несколько залежей либо часть рудной залежи. Расчет среднего значения плотности залегания (весовой концентрации) конкреций во влажной и сухой массе в пределах подсчетного контура производится по станциям опробования, входящим в контур подсчетного блока,

методом среднего арифметического. Расчет средних содержаний металлов в ЖМК в подсчетном блоке осуществляется методом средневзвешенного на значение плотности залегания (весовой концентрации) сухих конкреций. При подсчете запасов промышленных категорий не применяются поправочные коэффициенты (коэффициент рудоносности), что обусловлено плотностью разведочной сети, позволяющей достаточно детально оконтурить рудные участки и выделить безрудные площади.

Итоговыми документами разведочных работ являются:

– отчет с подсчетом запасов по категориям C_1 и C_2 и оценкой прогнозных ресурсов по категории P_1 в соотношениях, предусмотренных нормативными документами для железомарганцевых конкреций;

– технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных кондиций на железомарганцевые конкреции, позволяющее обеспечить комплексную геолого-экономическую оценку месторождения ЖМК, создаваемое по специальному проекту.

Разведочные работы считаются завершенными при условии подготовленности участка работ для промышленного освоения. При этом должны быть решены следующие задачи:

– подготовлен участок добычи, на котором параметры оруденения отвечают кондиционным требованиям, а запасов конкреций категорий C_1 и C_2 достаточно для ведения промышленной добычи в течение 20 лет;

– собраны все геотехнические данные in situ о параметрах морского дна, осадков, водной толщи и конкреций, необходимые для разработки добычной системы экспериментального масштаба;

– проведена опытная разработка в объемах, достаточных для уточнения технологии добычных работ и получения данных для разработке мер по охране природной среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авдонин В.В.* Металлогения Мирового океана / В. В. Авдонин, В. В. Кругляков. — М.: Изд-во МГУ, 2005.

2. *Андреев С.И.* Металлогения железомарганцевых образований Тихого океана. — СПб.: Недра, 1994.

3. Геология и минеральные ресурсы Мирового океана. — Варшава: INTERMORGEO, 1990.

4. Железомарганцевые конкреции Мирового океана / под ред. Ю. Б. Казмина // Тр. ВНИИокеангеология ПГО «Севморгеология». — Л.: Недра, 1984. — Т. 192.

5. Железомарганцевые конкреции центральной части Тихого океана / под ред. И. О. Мурдмаа, Н. С. Скорняковой // Тр. ИОАН СССР. — М.: Наука, 1986. — Т. 122.

6. Международно-правовые и экономические проблемы поиска, разведки и освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана / [Ю. Б. Казмин и др.]. — Геленджик, 1989.

7. Условия образования и закономерности размещения железомарганцевых конкреций Мирового океана / под ред. О. Д. Корсакова. — Л.: Недра, 1987.

Глава 10
Геологические строение, поиски и разведка месторождений кобальтоносных корок

10.1. Геологическое строение месторождений корок

Железомарганцевые корки — сплошные покровы гидроксидов железа и марганца, облекающие выходы коренных пород, слагающих поверхность морского дна. Мощность корок может составлять от нескольких миллиметров до 15—20 см. Наибольший промышленный интерес в них представляют высокие содержания кобальта — от 0,5 до 0,8 %. Основными полезными компонентами также считают марганец (20—23 %) и никель (0,4—0,6 %). Возможные попутные компоненты — платина, молибден, редкие земли, а также талий, теллур, титан и некоторые другие.

Распространение. Железомарганцевые корки развиты в пределах подводных поднятий и обнаружены во всех океанах, включая Северный Ледовитый. Как проявление железомарганцевой минерализации они известны в самых различных обстановках — от прибрежных до глубоководных, в том числе в желобах. Однако как потенциальное полезное ископаемое корки развиты не столь широко. Многолетними исследованиями установлено, что наиболее перспективными объектами в океане на предмет обнаружения богатых рудных полей кобальтоносных железомарганцевых корок (КМК) являются подводные горы мелового возраста, вершины которых расположены в интервале 1 400—1 600 м. Несмотря на то что в океанах насчитывается более 7 000 подводных гор, районов, удовлетворяющих этому требованию не так уж много. К ним в первую очередь относятся поднятия западной части Тихого океана — Маркус-Уэйк, Уэйк-Неккер, Маршалловых островов, Огасавара, а также Магеллановы горы, горы Композиторов и некоторые другие (рис. 10.1). Значительная часть этих объектов находится в эксклюзивных экономических зонах островных государств, поэтому площадь перспективных районов еще более сокращается. Таким образом, район проведения поисков изначально может быть выявлен на основании литературных источников.

Рельеф и геологические структуры. Рудные поля корок приурочены как к отдельно стоящим подводным горам, так и к сгруппированным в вулканотектонические массивы (рис. 10.2). Среди подводных гор выделяются гайоты — горы с плоской платообразной вершиной предположительно абразионного происхождения. Профиль склонов обычно выпукло-вогнутый. Склоны осложнены отрогами,

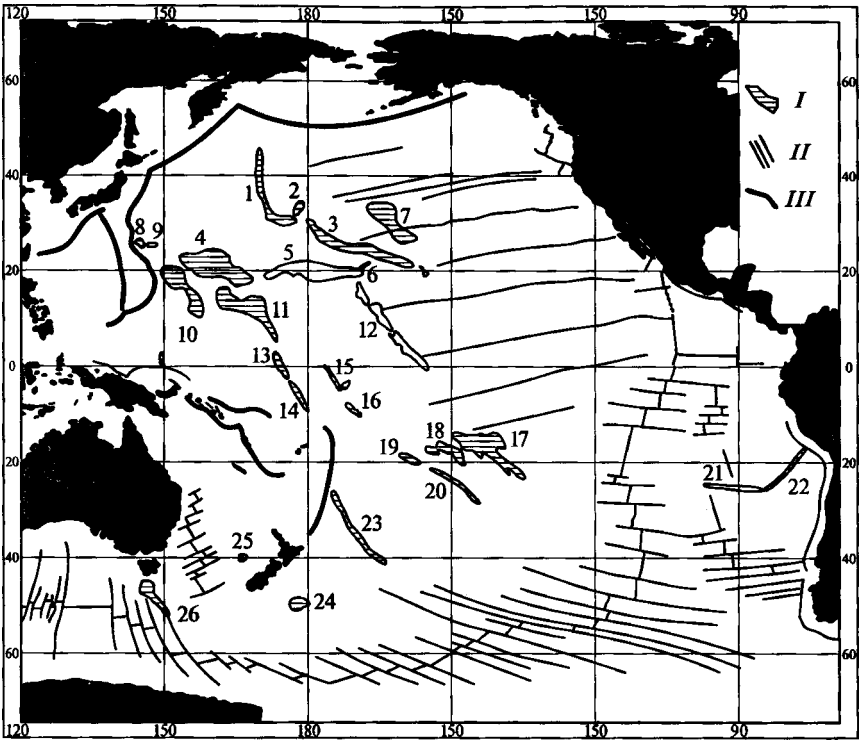


Рис. 10.1. Схема расположения рудных полей кобальтоносных марганцевых корок (КМК) в Тихом океане:

I — поля КМК и их номера: 1 — Императорского (Северо-Западного) хребта, 2 — возвышенности Хесса, 3 — Гавайского хребта, 4 — Маркус-Уэйк, 5 — Мидпасифик (Уэйк-Неккер), 6 — хребта Неккер, 7 — гор Музыкантов (Композиторов), 8 — Огасавара, 9 — Михельсона, 10 — Магеллановых гор, 11 — Маршалловых островов, 12 — островов Лайн, 13 — Гилберта, 14 — Тувалу, 15 — Хауленд-Бейкер-Феникс, 16 — Токелау, 17 — Туамоту, 18 — Общества, 19 — Южного Кука, 20 — Тубуаи, 21 — Сала-и-Гомес, 22 — Наска, 23 — Луисвилл, 24 — Ново-Зеландского плато, 25 — плато Челленджер, 26 — Южно-Тасманийское (Милл); *II* — трансформные разломы; *III* — глубоководные желоба

сателлитными горами и холмами, уступами, грядами, ложбинами и другими мезоформами.

В строении подводных гор выделяется несколько структурных ярусов. Основания гайотов (пьедесталы) сложены вулканическими породами преимущественно базальтового состава нормальной щелочности. Вулканические породы базальтовой ассоциации слагают основной объем верхней части горных сооружений. В отличие от подстилающих они более дифференцированы и характеризуются повышенной щелочностью. Венчает разрез толща осадочных и вул-

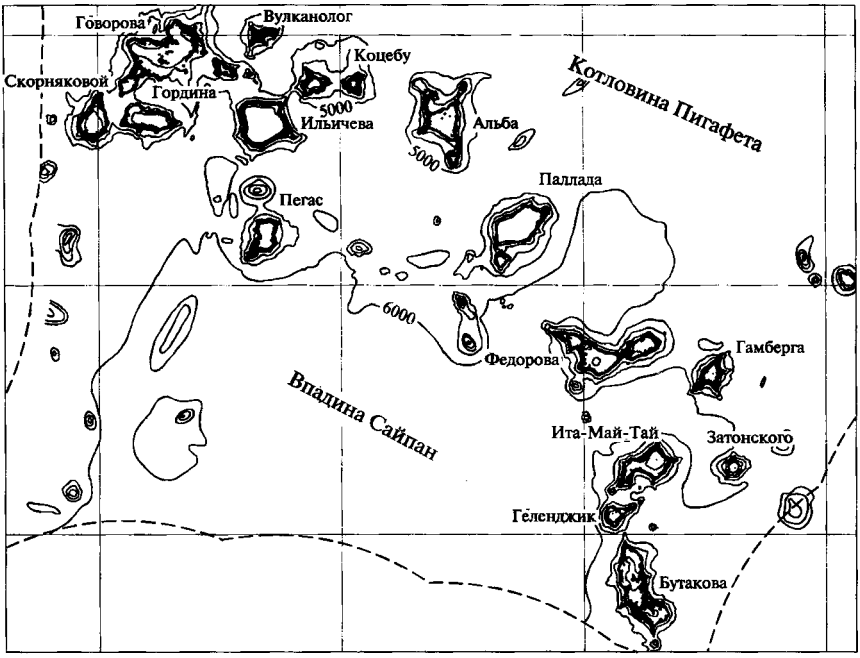


Рис. 10.2. Схема расположения рудных полей кобальтоносных марганцевых корок в пределах Магеллановых гор (Тихий океан)

каногенно-осадочных пород позднего мезозоя — кайнозоя. Толща состоит из нескольких разновозрастных комплексов близкого литологического состава, в которых выделяются рифогенные и нанофораминиферовые (существенно планктоногенные) известняки, эдафогенные брекчии и вулканокластические породы, образовавшиеся в фазы позднейших вулканотектонических активизаций. Обычно такие комплексы датируются концом раннего — началом позднего мела (апт — турон), второй половиной позднего мела (сантон — маастрихт), серединой палеогена (поздний палеоцен — эоцен). Нелитифицированные и слаболитифицированные планктоногенные карбонатные осадки датируются миоценом и плиоцен-четвертичным возрастом. Они покрывают плоские вершины гайотов, поверхности ступеней на склоне.

Закономерности распределения руд. Железомарганцевые корки развиты на обнаженных поверхностях коренных пород, конкреции же приурочены к зонам развития нелитифицированных осадков. В целом распределение железомарганцевых образований характеризуется концентрической зональностью (рис. 10.3). Центр зональности — вершинное плато гайота, обычно покрытое нелитифицированными карбонатными осадками и являющееся безруд-

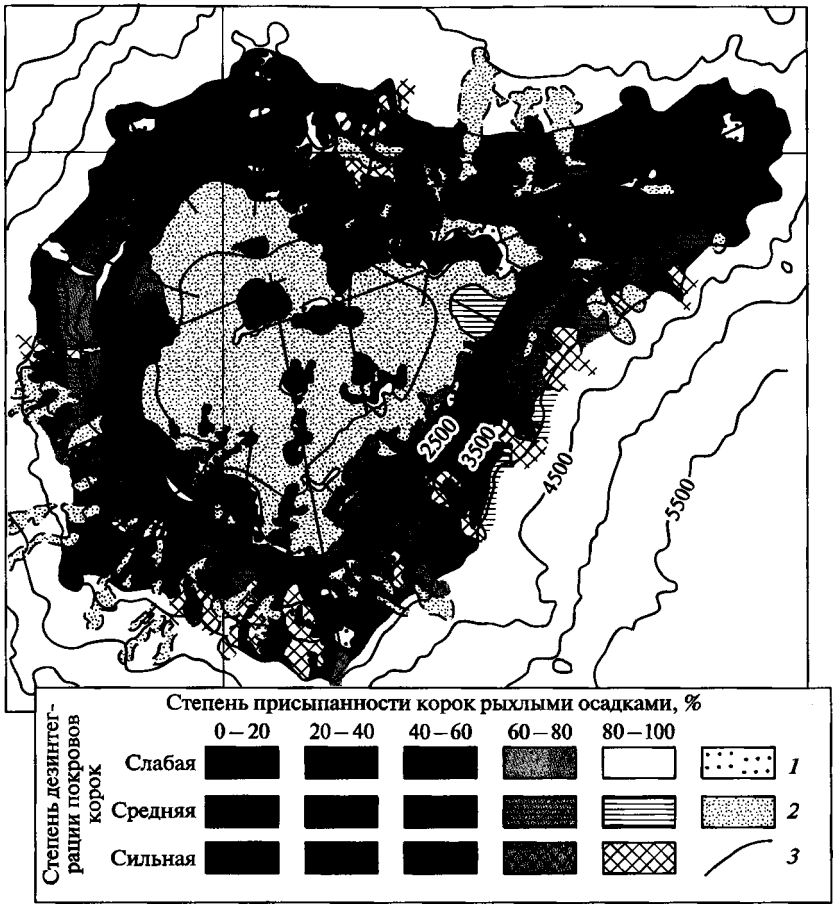


Рис. 10.3. Схема оруденения гайота Геленджик:

1 — поля развития конкреций; *2* — безрудные зоны (поля плиоцен-четвертичных нелитифицированных осадков); *3* — положение фотопрофилей. Штриховкой и тоном показаны различные градации степеней присыпанности и дезинтеграции (нарушенности) покровов корок

ной зоной. По направлению от центра зональности, совпадающему с погружением склонов, имеет место чередование концентрических лентообразных зон, характеризующихся различными условиями локализации корок — степенью присыпанности осадками, расчлененностью мезорельефа поверхностей корковых покровов, степенью сплошности этих покровов, наличием или отсутствием ассоциирующих конкреционных образований (рис. 10.4). Также концентрической зональности подчиняется и распределение мощности корок (рис. 10.5).

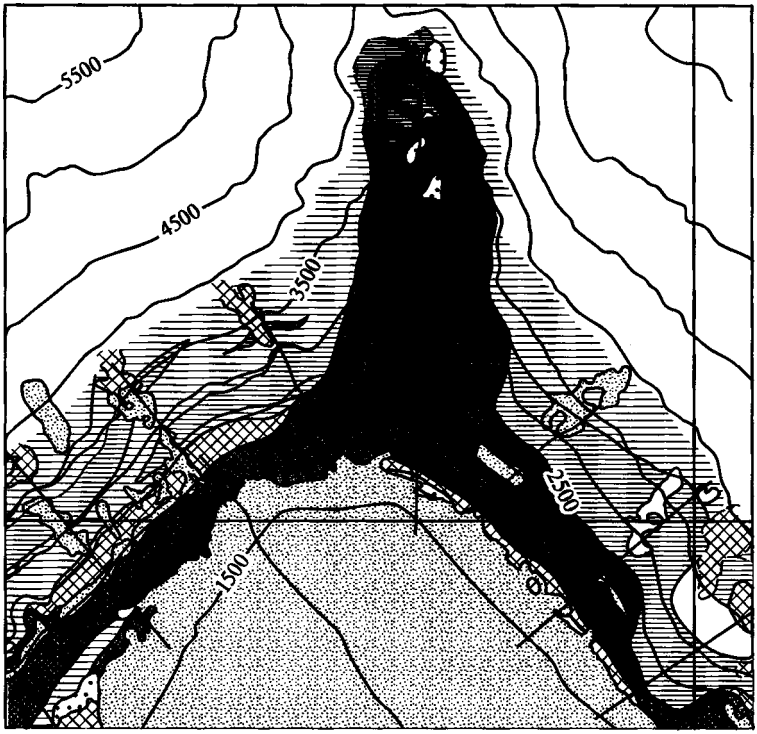


Рис. 10.4. Фрагмент карты структуры рудного поля гайота Ита-Май-Тай.
Условные обозначения см. рис. 10.3

Внешний облик корок зависит от строения их поверхностей. Поверхности характеризуются сложной иерархической организацией, в которой можно выделить несколько уровней от макрорельефа, определяемого рельефом поверхности коренного обнажения (подушечные лавы, крупные промоины, мелкие уступы) с размерами форм несколько десятков сантиметров — несколько метров, до микрорельефа, представленного всевозможными почковидными и бугорковидными наростами, известными в литературе как ботроиды, с размерами от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров (рис. 10.6). Корки обладают слоистым строением: в разрезе выделяют три-четыре рудных слоя мощностью по 2—3 см, отличающихся обликом, строением, физическими свойствами (плотность, влажность, пористость, прочность и др.), нерудными примесями (рис. 10.7). Вещество нижних слоев обычно диагенетически преобразовано, плотное, прочное, существенно фосфатизированное. Верхние слои более пористые, влажные, хрупкие.

Биостратиграфическое датирование показало, что формирование корок началось в конце позднего палеоцена и продолжается в на-

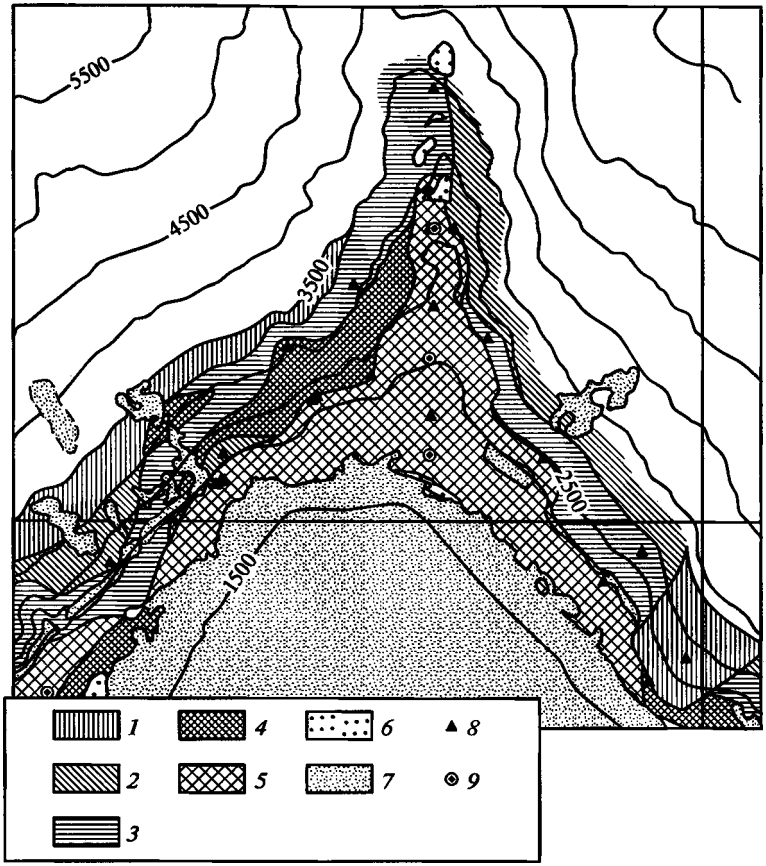


Рис. 10.5. Распределение мощности корок на участке рудного поля гайота Грамберга:

1—5 — различные мощности покровов корок, см: *1* — менее 1, *2* — от 1 до 4, *3* — от 4 до 7, *4* — от 7 до 10, *5* — свыше 10; *6* — зоны распространения конкреций; *7* — безрудные зоны; *8, 9* — станции геологического опробования: *8* — драгирования, *9* — бурения неглубоких скважин

стоящее время. Например, в корках Магеллановых гор выделены слои позднепалеоценового — раннеэоценового, среднепозднеэоценового, миоценового и плиоцен-четвертичного возрастов. Очевидно наличие существенных перерывов в накоплении рудного материала продолжительностью по несколько миллионов лет, что говорит о многогенерационном характере роста корок.

В минеральном составе корок резко преобладают железистый вернадит (δ-MnO_2) и марганецсодержащий ферроксигит (γ-FeOOH). Кроме того, встречаются различные гидроксиды марганца и железа, из нерудных примесей — фосфаты (обычно франколит), кварц, по-

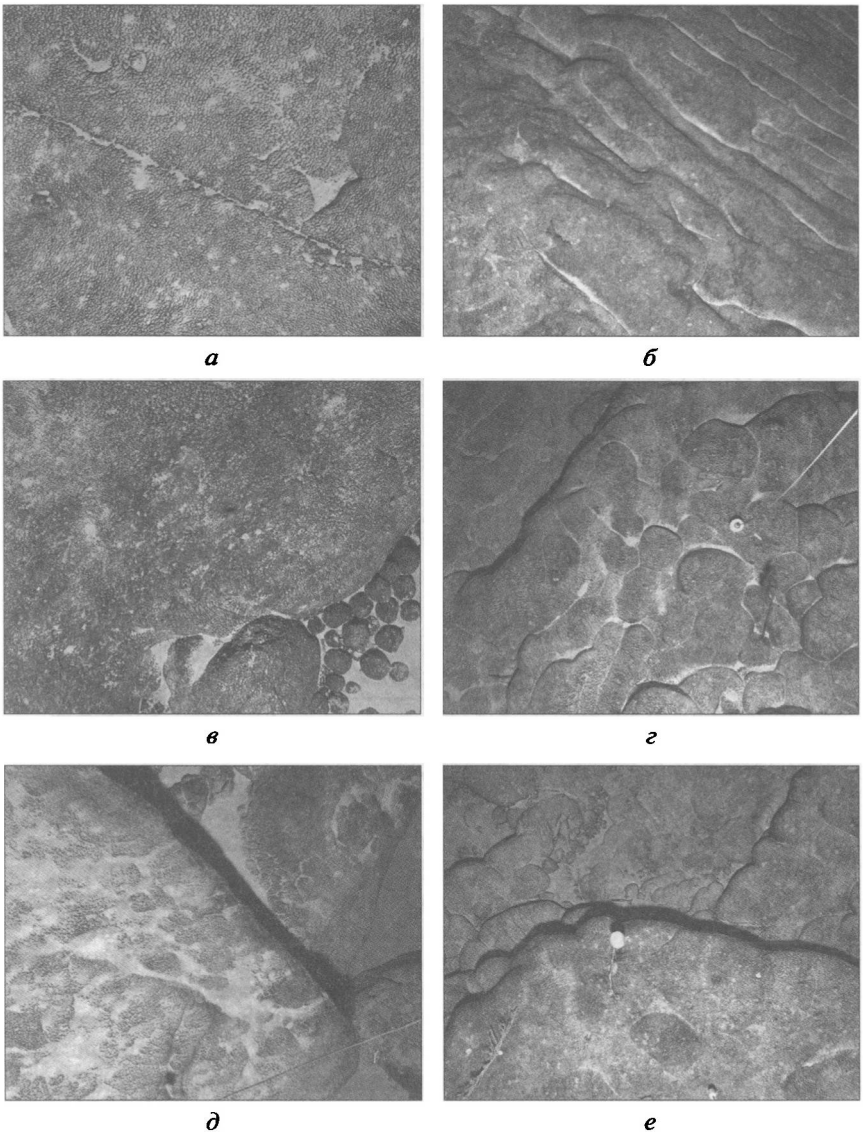
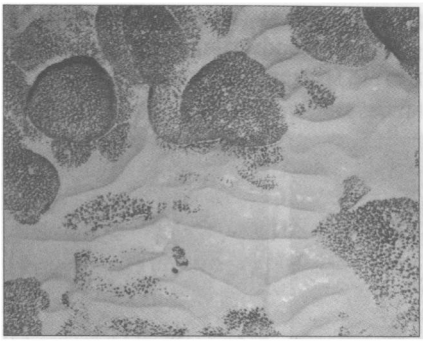


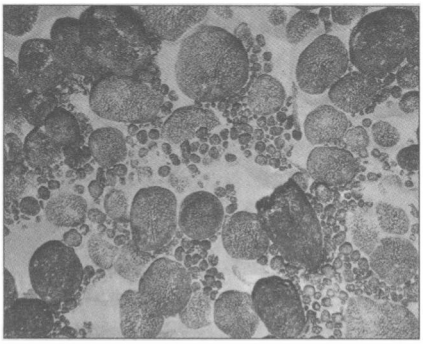
Рис. 10.6. Донные фотографии кобальтоносных железомарганцевых образований:

а — поверхность ровного, ненарушенного покрова корок; *б* — то же, со средней степенью расчлененности мезорельефа; *в* — ровный, ненарушенный покров корок, свободный от осадков (в правой нижней части снимка — конкреции, залегающие на осадке); *г* — покровы корок малой степени дезинтеграции; *д* — покровы корок средней степени дезинтеграции с образованием корковых плит; *е* — нагромождение

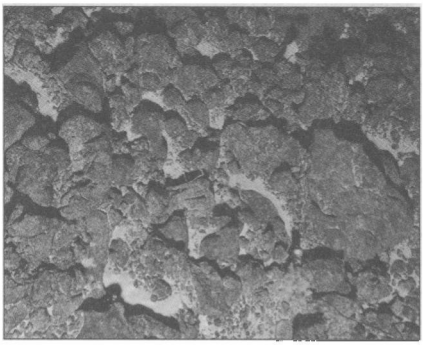


ж

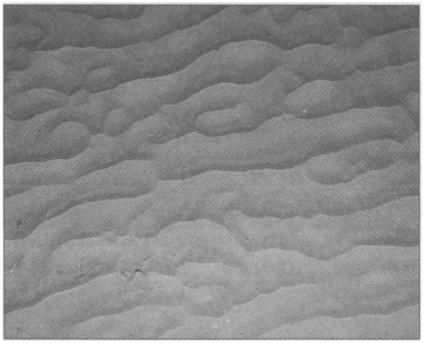
з



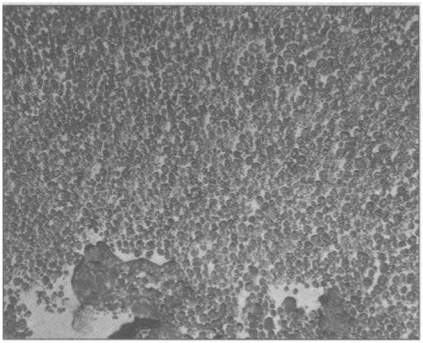
и



к



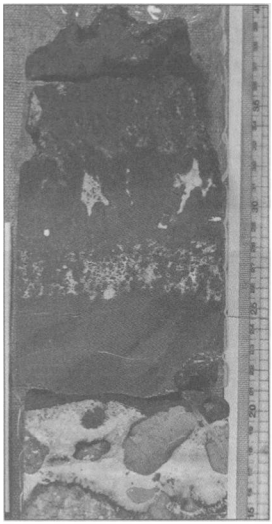
л



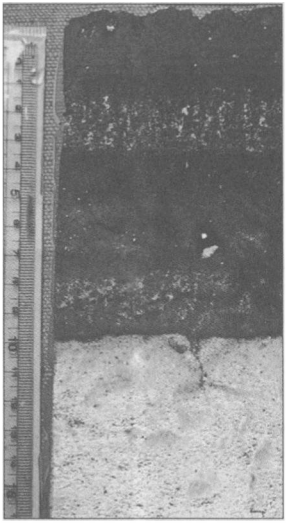
м

крупных смещенных корковых плит; *ж* — слабодезинтегрированные покровы корок; *з* — слаборасчлененные корковые покровы «донным хворостом» — скелетами стеклянных губок; *и* — конкреции мелких и валунных фракций; *к* — корковые осыпи; *л* — песчаные волны (рифели) на поверхности карбонатных осадков — безрудная зона; *м* — поле мелких конкреций, залегающих на карбонатном осадке

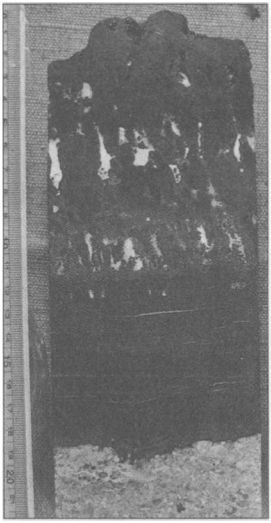
левые шпаты, глинистые минералы, цеолиты (преимущественно филлипсит). Нижняя часть разреза обычно фосфатизирована, в верхней из нерудных преобладают глинистые минералы, цеолиты, кварц.



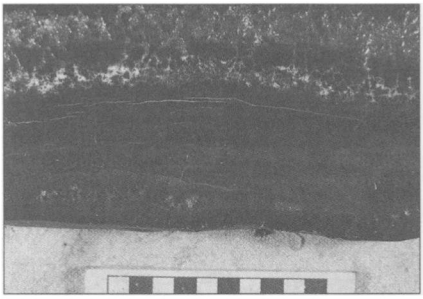
а



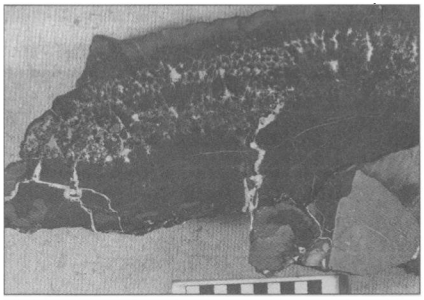
б



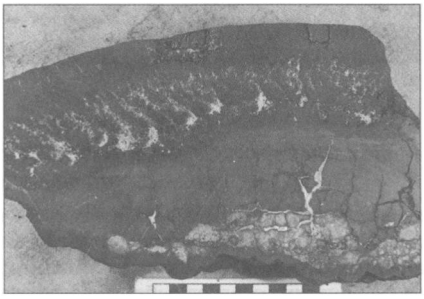
в



г



д



е

ж

В нижних слоях понижены содержания рудных компонентов — марганца, железа, кобальта, никеля и др. В верхних картина противоположная.

В пределах рудного поля возможно выделение от одного до трех потенциальных месторождений, в каждом из которых ресурсы сухой руды могут достигать 30—40 млн т, кобальта — 150—200 тыс. т, марганца — 7—8 млн т. Очевидно, что по ресурсам кобальта месторождения можно относить к уникальным. Площадь, на которой сосредоточены эти ресурсы, составляет 300—400 км^2.

В целом объекты поисков и разведки кобальтоносных марганцевых руд развиты в пределах подводных гор и локализованы на глубинах от 1 000 до 3 500 м, на поверхностях с уклонами — от 0—5° до 20—25° и более. Поверхности могут быть относительно ровными или в значительной степени расчлененными. Прежде чем перейти к характеристике поисковых и разведочных работ, осложненных уступами, грядами, ложбинами, необходимо привести принятые в настоящее время определения некоторых таксономических единиц, используемых при геолого-разведочных работах на КМК. Тем более что эти понятия существенно отличаются от традиционных, используемых для объектов на суше.

Рудным районом называют площадь океанского дна с прямо доказанными перспективами рудоносности, приуроченную к вулканотектоническим и сводово-глыбовым поднятиям (см. рис. 10.2). ***Рудный узел*** — часть рудного района кобальтоносных железомарганцевых корок (группа сближенных гайотов), для которого характерна однородная геолого-геоморфологическая обстановка (геологические комплексы, формы и генезис рельефа, глубины океана).

Рудное поле кобальтоносных железомарганцевых корок приурочено к одной подводной горе (см. рис. 10.3). Оно обычно обладает концентрически-зональной структурой с центром, приуроченным к вершине. На гайотах вершина, как правило, занята обширной безрудной зоной, приуроченной к области развития неконсолидированных карбонатных осадков. По периферии вершинного плато пологие поверхности свободны от осадков и на обнаженных коренных породах развиты относительно мощные железомарганцевые корки. Обычно это сплошные ненарушенные покровы, частично присыпанные карбонатными осадками. Степень присыпанности осадками падает от безрудной зоны к бровке склона. Зона ненарушенных покровов

Рис. 10.7. Строение железомарганцевых корок (срезы образцов):

а—в — образцы кернов скважин: *а* — четырехслойная корка на эдафогенной брекчии (мощность 17 см), *б* — трехслойная корка на оолитовом известняке, образец из керна скважины (мощность 10,5 см), *в* — четырехслойная корка на туфобрекчии (мощность 18,5 см); *г* — четырехслойная корковая плита без субстрата; *д* — четырехслойная корка на базальтовой брекчии; *е* — трехслойная корка на эдафогенной брекчии; *ж* — трехслойная корка на ракушняково-детритовом известняке

продолжается и на самой бровке склона, и частично на верхних участках склонов. Именно с этими корками и связывают основные перспективы промышленно значимого оруденения.

Ниже по склону происходит чередование узких лентовидных зон, отличающихся характером оруденения, что выражено в различной степени нарушенности корковых покровов, их присыпанности неконсолидированными осадками, наличием или отсутствием ассоциирующих конкреций (см. рис. 10.4, 10.6).

Концентрической зональности в целом подчинено и распределение мощности корок. В верхних частях склона, в его выпуклой части, мощность корок выше, в вогнутых частях склона она снижается. Однако эта картина обычно осложнена чертами более высоких порядков, также в основном контролируемых рельефом дна (см. рис. 10.5). В частности, высокие мощности отмечаются на отрогах, крупных сателлитных постройках и других выступах рельефа.

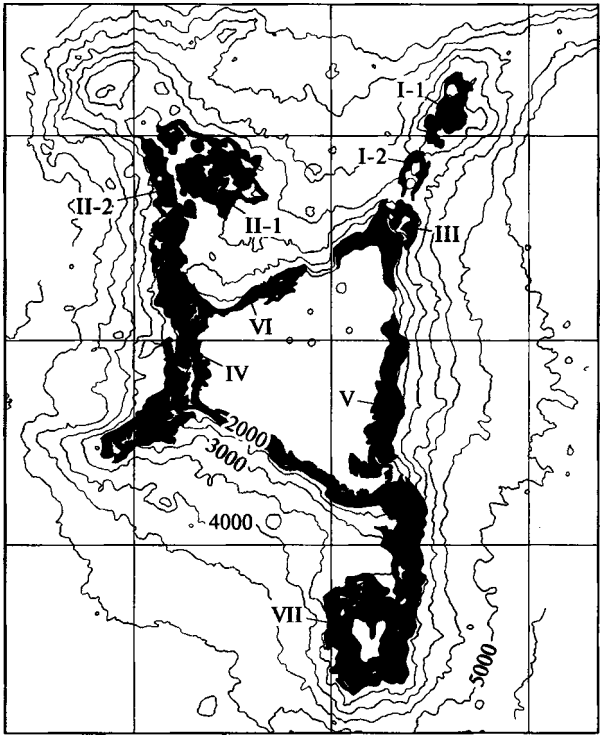


Рис. 10.8. Схема расположения рудных залежей кобальтоносных марганцевых корок на гайоте Альба.

Римскими цифрами обозначены номера залежей, арабскими — изобаты (м)

В пределах рудного поля может выделяться несколько ***рудных залежей***. Последняя ситуация имеет место в случаях очевидного разрыва оруденения (рис. 10.8). Такие разрывы могут быть связаны с особенностями рельефа (например, на отдельных участках склоны резко выполаживаются и накапливающиеся осадки обусловливают здесь существование безрудных участков) или резким сокращением мощности корок. В этом случае рудные залежи приурочены к определенным формам и элементам рельефа — отрогам, седловинам, сателлитным постройкам, участкам склона или вершинного плато. На крупных гайотах может выделяться от 3—4 до 8—10 рудных залежей, площади которых изменяются от нескольких десятков до нескольких сотен квадратных километров. Число залежей с площадями 200—300 км^2 не превышает 2—3.

На других гайотах, на которых не выявлены разрывы оруденения, в рудном поле фактически выделяется единая залежь, кольцом охватывающая периферические участки вершинного плато и верхних склонов (см. рис. 10.3). В этом случае размеры залежи определяются размерами гайота и могут изменяться от 200 до 700 км^2.

Месторождение кобальтоносных железомарганцевых корок — скопление корок, эксплуатация которого на условиях, определяемых МОД ООН (разработка в течение не более 20 лет), удовлетворяет требованиям рентабельности по запасам и качеству руды. Оно может быть приурочено к одной или нескольким рудным залежам, развитым в пределах рудного поля. В конечном счете рентабельность будет определяться уровнем развития технических средств, технологий разработки и переработки руд, состоянием рынка металлов.

Особенности, определяющие методику ведения поисковых и разведочных работ. При мощности рудного слоя в несколько сантиметров — несколько десятков сантиметров площадь оруденения занимает сотни квадратных километров, т. е. оруденение в первом приближении является двухмерным. Соответственно необходимы методы, позволяющие эффективно исследовать поверхность морского дна, и необязательно существенное проникновение в глубь осадков или пород. Изменчивость химического состава в корках в пределах выделяемых рудных площадей относительно невелика, поэтому главный параметр, определяющий удельные ресурсы руды и металлов, — мощность корок. В свою очередь, невысокая изменчивость мощности корок относительно протяженности оруденения позволяет использовать существенно более редкие сети наблюдений, чем на гипергенных месторождениях суши.

Важная особенность рассматриваемых месторождений — определяющее значение рельефа в распределении параметров оруденения на различных иерархических уровнях, что придает особую важность детальным исследованиям рельефа дна.

В то же время нельзя забывать, что основными рельефообразующими силами в регионе являются вулканотектонические, а субстра-

том корок могут быть все породы, представленные в геологическом разрезе. Это заставляет при ведении геолого-разведочных работ по исследованию корок уделять достаточно большое внимание собственно геологическому строению подводных гор.

10.2. Методы и инструменты исследований

При геолого-разведочных работах по исследованию железомарганцевых корок в основном используют те же методы, что и при работах по исследованию конкреций абиссальных котловин, которые подробно были рассмотрены ранее. Выделяют косвенные, опосредованные и прямые методы исследования. Первые и вторые нередко объединяют в дистанционные (рис. 10.9).

Из косвенных, геофизических, методов применяют многолучевое эхолотирование, гидромагнитометрию, геоакустические методы, включающие сонарную съемку и высокочастотное профилирование. На региональной стадии исследований, когда объектом изучения

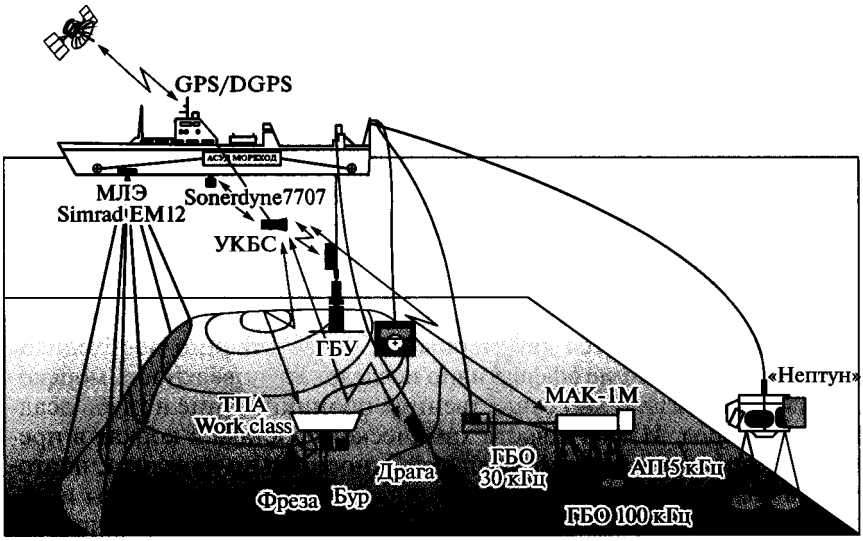


Рис. 10.9. Оборудование научно-исследовательского судна для проведения поисковых и разведочных работ по исследованию руд:

МЛЭ Simrad EM12 — многолучевой эхолот; GPS/DGPS — спутниковая навигационная система; Sonardyne 7707 и УКБС — ультракороткобазисная система подводной навигации; ГБУ — глубоководная буровая установка; ТПА Work class — телеуправляемый многоцелевой подводный аппарат (ORV); МАК-1М — геоакустический комплекс, оснащенный локаторами бокового обзора и высокочастотным профилографом; «Нептун» — фототелевизионный комплекс; ГБО — гидролокатор бокового обзора; АП — акустический профилограф

являются рудные районы, используется и непрерывное сейсмоакустическое профилирование. Однако в пределах рудных полей значительная доля площадей приходится на расчлененные поверхности склонов, отражения сейсмических волн от которых дают сложную дифракционную картину, практически не поддающуюся интерпретации.

Фототелевизионное профилирование является опосредованным методом, дающим возможность наблюдать реальное изображение поверхности дна, но не позволяющее получать информацию о строении и составе изучаемых объектов.

Геологическое опробование (прямые исследования) проводится скальными драгами, дночерпателями грейферного типа, а также погружными буровыми установками.

Многолучевое эхолотирование. Принципиальная особенность многолучевых эхолотов — получение отраженного сигнала не от одной точки непосредственно под судном, как у однолучевых приборов, а в непрерывной полосе шириной несколько километров, перпендикулярной профилю судна. Такую возможность дает излучение большого числа лучей в обе стороны от курса судна. Так, в приборе EM-12 S 120 норвежской фирмы Simrad их число составляет 81 — один центральный и по 40 в каждую сторону. Эти конструктивные особенности позволяют полностью покрывать изучаемую площадь, а для надежности и с определенным перекрытием. Все получаемые с помощью прибора карты отвечают кондициям вплоть до масштаба 1:200 000. На глубинах менее 3 000 м возможно кондиционное картирование масштаба 1:50 000. С помощью прибора производится построение батиметрической основы (карты рельефа дна), карты амплитуд обратно рассеянного сигнала (сонарное изображение) и карты уклонов дна. Таким образом, этим методом создается основа для проведения дальнейших геолого-геофизических работ. По сонарным изображениям выделяются участки развития нелитифицированных осадков и зоны обнажения коренных пород. Карты уклонов дна дают большой объем информации для построения геоморфологических и инженерно-геологических карт.

Гидромагнитная съемка. По результатам гидромагнитной съемки производится построение карт аномального магнитного поля в графиках и изолиниях. Интерпретация этих карт при работах на подводных горах позволяет получить данные о тектоническом строении участков. Как правило, здесь широко развиты линейные высокоамплитудные аномалии, обычно интерпретируемые как признаки существования глубинных разломов.

Геоакустические исследования. Эти исследования включают комплексную съемку гидролокатором бокового обзора (ГЛБО) и высокочастотным профилографом. Могут использоваться различные комплексы, например МАК-1М разработки НИПИокеангеофизики. Интерпретация материалов высокочастотного профилографирования

позволяет изучить разрез нелитифицированных осадков и горных пород низкой и средней степени литификации в зонах их распространения. Теоретически с увеличением частоты излучаемого сигнала возможно и определение мощностей корок, поскольку во многих случаях свойства корок и субстратов различны. К настоящему времени эта возможность не реализована. Сонарные изображения, получаемые ГЛБО, в сравнении с многолучевым эхолотом дают более детальные границы зон распространения донных осадков и выходов коренных обнажений, позволяют оконтурить мезоформы рельефа дна более высоких порядков и решить некоторые другие задачи.

Фототелевизионное профилирование. Данное исследование выполняется различными комплексами российского и зарубежного производства, в том числе фотокомплексом «Нептун» в различных модификациях, оснащенным цифровыми камерами, осветительными приборами, эхолотами «вверх» и «вниз», а также маяком-ответчиком. В цифровом режиме ведется как фото-, так и видеосъемка. При работах на КМК главная задача метода — установление точных границ распространения выходов коренных пород, на которых могут быть развиты железомарганцевые корки. Получаемые изображения позволяют изучать и условия локализации руд — степень присыпанности осадками, расчлененность мезорельефа корок, нарушенность корковых покровов, наличие конкреционных образований. По характерной морфологии можно судить о типе обнаженных пород, получать различную дополнительную информацию.

Геологическое опробование. Это исследование, решающее задачу получения проб КМК, проводится путем драгирования и бурения неглубоких скважин. Драгирование выполняется по профилю стальными коробчатыми или цилиндрическими драгами, оснащенными мешками-накопителями. Инструментом собирают главным образом эдафогенный материал, залегающий на поверхности дна, обломки корок и конкреционные образования. Иногда отрывают и фрагменты корок, залегающих in situ. Главная проблема драгирования — неопределенность места отбора пробы и то, в какой степени проба отражает реальное соотношение корок, конкреций и пород на поверхности дна на опробованном профиле. Драгой не могут быть отобраны пробы со сплошных покровов корок, залегающих на пологих поверхностях.

Отбор пробы in situ в строго координированной точке решается бурением неглубоких скважин. При достижении буровым инструментом субстрата удается определить истинную мощность корок в конкретной точке. Бурение выполняется с помощью глубоководных погружных установок, оснащенных системами телеметрического контроля, позволяющего произвести погружение на выбранный участок и управлять процессом бурения. Различные установки могут быть оснащены одной или несколькими колонковыми трубами. В первом случае за один цикл производится бурение одной скважи-

ны, во втором — куст скважин, которые можно проходить с перестановкой станка или в одной точке, при этом расстояния между центрами устьев скважин составляют несколько десятков сантиметров. Глубоководные буровые установки в России в основном конструируются в ГНПП «Севморгео».

К недостаткам метода следует отнести ограничения по условиям бурения (уклоны поверхности не более 15°), небольшой объем пробы, позволяющий произвести только самые необходимые исследования (как правило, вещественного состава). Зарубежные установки обычно обладают более широкими возможностями за счет гидравлических систем горизонтирования; они могут проходить либо несколько мелких скважин, либо одну глубиной до 20 м. Однако эти установки обладают большими габаритными размерами и весом, что резко сужает перечень судов, с которых могут выполняться работы.

Для специальных исследований используют и другие пробоотборники. Дночерпатели грейферного типа или коробчатые пробоотборники, оснащенные дискретной фотоустановкой, применяют для изучения нижних частей склонов в зонах, где развитие полей донных осадков преобладает над участками выхода коренных пород. Задачей является изучение сопутствующего конкреционного оруденения, а также свойств донных осадков. Аналогичные задачи могут решаться и на вершинном плато.

Для изучения верхних метров разреза донных осадков в целях определения их состава, возраста, физико-механических и других свойств используют прямоточные грунтовые трубки. Возможно использование вибрационных и гидравлических трубок.

Существуют и другие технические приспособления — гидравлические крупнообъемные (до 1,5 $м^3$) ковшевые и грейферные пробоотборники, оснащенные системами телеметрического контроля. Все чаще в последние годы применяют телеуправляемые подводные аппараты (ТПА, в английском варианте ROV).

Следует заметить, что остается необходимость разработки инструмента, способного отбирать координированную крупнообъемную пробу с участка известной площади.

10.3. Поиски месторождений КМК

Цель поисковых работ — выявление в международном районе морского дна площадей и участков, перспективных в отношении нахождения месторождений КМК. Для реализации этой цели необходимо решить ряд задач, а именно выявить геолого-тектоническую позицию рудного поля, изучить геологическое строение рудных полей, включая особенности рельефа, строение разреза горных сооружений, магматизм и другие аспекты, выявить масштабы и характер распространения скоплений корок, установить закономерности их

пространственного размещения. Также необходимо всесторонне изучить строение, состав и свойства рудных образований, технологические свойства руд, физико-механические свойства и состав пород субстрата и горно-геологические условия их возможной эксплуатации.

Еще к одному кругу задач следует отнести изучение гидрологического режима над рудными полями, фоновых параметров окружающей среды, уточнение сведений о климатических, океанографических, гидрологических и других природных условиях акватории рудного поля. Необходимо провести экологические исследования и разработать рекомендации по охране природной среды.

Поисковые предпосылки обнаружения промышленно значимых скоплений КМК. В океанах находится несколько тысяч подводных гор, и поисковые работы должны вестись в районах, наиболее благоприятных для развития коркового оруденения, в связи с чем их обнаружение особенно важно.

В самой приуроченности оруденения к вулканическим или вулканотектоническим подводным горам можно видеть проявление ***вулканотектонического контроля*** и сформулировать соответствующую предпосылку.

Стратиграфические предпосылки выделяются опосредованно, через установленный возраст корок. Поскольку базальный слой разреза корок датирован поздним палеоценом — эоценом, корки максимальной мощности не могут быть обнаружены на более молодых породах. В общем же случае наиболее благоприятными на предмет обнаружения месторождений КМК являются подводные горы мелового возраста. В то же время зависимость мощности корок от возраста субстрата не является прямой. Это связано с тем, что периоды формирования рудных слоев чередуются с периодами неотложения, а нередко и с частичной деструкцией ранее накопленного материала.

Геоморфологические предпосылки заключаются в существовании отчетливой зависимости мощности корок от форм и элементов рельефа, на которых они развиты. Согласно современным представлениям, для выявления богатых залежей корок наиболее перспективны выступы рельефа дна (это в первую очередь отроги, сателлитные вулканические постройки) и субгоризонтальные поверхности, если они свободны от осадков (это вершинные плато, ступени в верхних частях склонов, базисные поверхности седловин). Верхние, выпуклые, части склонов в целом более перспективны, чем нижние, вогнутые.

Однако следует иметь в виду, что формы рельефа дна влияют на мощность корок не сами по себе, а в тесной взаимосвязи с гидро- и литодинамическими условиями, а возможно и вкупе с тектономагматическим контролем, поскольку крупные мезоформы имеют соответствующее происхождение. Выступы рельефа вызывают увеличение скоростей придонных течений при встрече с ними, что по существующим представлениям приводит к увеличению окислитель-

ной способности среды и, соответственно, к ускоренному переходу полезных компонентов в окисленные нерастворимые формы.

Субгоризонтальные и пологонаклонные поверхности могут быть свободны от осадков только в том случае, если осадки удаляются придонными течениями и если на этих поверхностях существует режим транзита.

О чисто ***гидродинамических предпосылках*** можно говорить только в условиях равномерного рельефа. Сформулировать их можно так: участки с повышенной гидродинамической активностью в пределах спокойного профиля склонов наиболее перспективны для развития коркового оруденения.

К ***литодинамическим предпосылкам*** нередко относят стабильность склонов или в более общем виде стабильность любых поверхностей, на которых образуются корковые покровы. Однако мы не можем судить о стабильном режиме в течение продолжительного периода развития корок. Скорее нахождение мощных корок с полным разрезом заставляет нас предполагать, что поверхности были стабильны длительное время.

Система проведения поисковых работ. Поисковые работы на КМК неоднократно проводились организациями морской геологоразведочной службы России в Тихом океане на Магеллановых горах и поднятии Маркус-Уэйк, поэтому здесь описаны реально применяющиеся методики ведения геолого-разведочных работ. Поисковые работы выполняются в пределах рудных полей, приуроченных к индивидуальным подводным горам.

Работы проводят в три этапа — подготовительный, основной и детализационный. Во время ***подготовительного этапа***, как правило, выполняются опережающие геофизические работы. В настоящее время основным методом является многолучевое эхолотирование. На поисковой стадии в задачу метода входит получение цифровой батиметрической основы, т. е. карты рельефа подводной горы масштаба 1:200 000. Съемка является площадной, густота сети непостоянна — в наиболее глубоководных местах захват луча имеет большую ширину и расстояние между галсами может быть большим. На мелководных участках захватывается узкая полоса, соответственно межпрофильное расстояние должно быть меньше. Полученные батиметрические и сонарные карты — основа для планирования сети и последовательности выполнения работ основного этапа.

Гидромагнитные наблюдения выполняют для получения карты аномального магнитного поля. Они производятся по системе параллельных профилей через 5—10 км с обязательной увязкой их ортогонально ориентированными секущими. Поскольку основные магнитные аномалии в регионе имеют широтную ориентацию, основная сеть профилей ориентирована меридионально.

На ***основном этапе*** поисков главными методами являются фототелевизионное профилирование и геологическое опробование.

Нередко выполняют и геоакустические работы. Задача фототелевизионного профилирования — выявление закономерностей площадного распределения рудных образований, а также выделение участков морского дна для проведения геологического опробования. Поэтому сети фототелевизионного профилирования и опробования увязаны между собой.

Сеть фотопрофилей разбивается через 5 км вкрест направления склонов. Поэтому при планировании сетей необходима точная батиметрическая основа. Профили не параллельны, а ориентированы радиально. Фотонаблюдениями должны быть охарактеризованы все основные морфоструктурные элементы гайотов — плато, склоны, отроги, седловины, крупные сателлитные постройки. Имели место прецеденты, когда регулярная систематическая сеть через 5 км не охватывала основных структур, в результате чего требуемая плотность сети была достигнута, а геологические задачи решены не были, что потребовало проведения дополнительных исследований.

Сонарное изображение многолучевого эхолота также помогает в проектировании сети — может быть сокращена протяженность фотопрофилей в безрудных зонах вершинных плато, которые проявлены наиболее светлыми областями, при пересечении крупных безрудных окон можно увеличить расстояния между фотоснимками.

Геоакустическое профилирование может проводиться на основном и детализационном этапах. На основном этапе обычно используют гидролокаторы бокового обзора дальнего действия (ГЛБО-ДД), которые буксируются за судном с небольшим заглублением близко к поверхности моря. Они позволяют покрыть сонарной съемкой всю площадь поисковых работ. Расстояние между профилями выбирают так, чтобы получить сплошное покрытие площади встык или с перекрытием. Для уменьшения искажений профили должны ориентироваться вкрест склона. Получаемое сонарное изображение в целом сходно с картой амплитуд обратно рассеянного сигнала многолучевого эхолота, однако характеризуется более высокой разрешающей способностью, поскольку осреднение производится в точке меньшего диаметра.

По фотоматериалам выбирают участки для проведения геологического опробования. На склонах при определенной степени дезинтеграции корковых покровов используют скальные драги, на пологих поверхностях, на сплошных ненарушенных покровах опробование проводится бурением скважин. При формировании сети опробования исходят из ее ориентировочной плотности: одна станция на 10 км^2. Соблюдение плотности сети основного этапа поисковых работ позволяет оценить ресурсы руды (железомарганцевых корок и конкреций) категории P_2.

Задача опробования драгами состоит в получении образцов корок с субстратом, что позволяет определить мощность корок и отобрать достаточное количество материала для проведения всех необходимых

видов исследований. Поскольку драгирование проводится на профиле определенной длины, в пробе может оказаться неоднородный материал: корки на нескольких типах субстрата, нередко с различным строением разреза, конкреции, различные коренные породы. Для уменьшения неопределенности стараются максимально сократить длину драгирования, а также предусматривают определенные операции обработки пробы, имеющие целью снизить субъективизм интерпретации. Нужно отобрать представительные образцы для изучения строения и свойств корок, включая пробы для характеристики химического и минерального состава рудных образований, выполнить исследования их физических свойств. Из пород также отбирают образцы для изучения их строения, состава и свойств. Несмотря на указанные недостатки драгирования, при проведении поисковых работ именно оно является основным методом геологического опробования. Это обусловлено его надежностью и невысокой стоимостью.

Задача бурения неглубоких скважин на поисковой стадии — в первую очередь опробование пологих поверхностей, на которых развиты ненарушенные покровы, т. е. там, где драгой отобрать пробу невозможно. Прохождение отдельных буровых профилей позволяет получить данные об изменчивости состава разреза и мощности корок, дает дополнительные сведения о геологическом строении участков.

При документации материала, полученного драгами, и керна скважин дают исчерпывающую информацию о месте отбора пробы, полную характеристику рудных образований и коренных пород. Обязательно указывают общую мощность корок, мощности и строение отдельных слоев, слагающих разрез, а также производят фотодокументацию всех описываемых объектов, делают схематические зарисовки. Из полученного материала отбирают рядовые пробы, характеризующие состав отдельных типов руды, и частные, служащие для решения конкретных задач — выявления состава отдельных слоев, состава корок на различных типах субстрата, конкреционных образований по фракциям и морфотипам и др. Параллельно документации выполняют различные виды исследований, в первую очередь физических свойств, которые необходимо измерить сразу же после подъема материала на борт для получения характеристики объектов в естественном состоянии.

Коренные породы сортируют по различным типам, документируют, изучают их физические свойства, отбирают пробы для различных видов исследования. Химический состав обычно определяют по высушенным образцам, полученным при определении влажности. Формируют коллекции магматических, фосфатизированных пород, образцов для определения физико-механических свойств, коллекции для биостратиграфического датирования осадочных пород.

На ***детализационном этапе*** исследования проводят не на всей площади поисков, а на выбранных участках, являющихся либо наи-

более перспективными, либо наиболее характерными в плане геологических и геоморфологических условий. Как правило, на этом этапе происходит выработка методических подходов к работам следующих стадий, опробуются новые системы исследований с большей густотой сети, новые методы и техника исследований, проводятся специализированные работы.

При проведении фотопрофилирования не только сгущается сеть профилей, но и уменьшается расстояние между кадрами. Бурение осуществляется по буровым профилям с тем, чтобы охарактеризовать изменчивость параметров вдоль и вкрест склонов. Геоакустическое профилирование выполняется придонными комплексами, что позволяет увеличить разрешение сонарного изображения дна и получить геоакустические разрезы перекрывающих осадков. Есть возможность оценить мощность осадков безрудных окон в пределах рудных залежей. Сгущение сети опробования на участках детализационных работ позволяет оценить ресурсы руды категории P_1.

Из специализированных работ на детализационном этапе выполняют инженерно-геологические исследования в целях накопления данных о горно-геологических условиях локализации руд и условиях их дальнейшей эксплуатации. Отбирают технологические крупнообъемные пробы руды, на которых в специализированных лабораториях разрабатывают технологии передела руды, включая этапы металлургической переработки и предварительного обогащения.

Состояние атмосферы и поверхности океана в районе работ фиксируют на всех этапах проводящихся работ. Обязательным является проведение гидрологических исследований для изучения вертикального распределения физико-химических параметров водной толщи (температура, соленость, плотность, скорость звука, прозрачность, цвет, содержание растворенных газов и взвесей, pH, Eh). Определяют скорости и направления течений на стандартных горизонтах. Особое значение имеет изучение силы и направления придонных течений, состава придонного слоя воды.

Экологические исследования выполняют для выявления возможных последствий эксплуатации месторождений. На поисковой стадии работ проводят преимущественно фоновые наблюдения, определяющие естественные параметры окружающей среды и изучающие экосистемы рабочих площадей. Фоновые исследования включают изучение уже перечисленных метеорологических и гидрологических параметров, но помимо этого определяют биогенную составляющую взвесей в морской воде, основные классы органических веществ во взвешенном и растворенном состоянии, бактериальное сообщество, фитопланктон, зоопланктон, ихтиофауну морских млекопитающих. В таком же направлении изучают донные осадки и поровые воды в зонах развития осадков, бентосные сообщества, в том числе и в зонах выхода на поверхность дна коренных пород. На поисковой стадии гидрологические и экологические исследования про-

водят на станциях. По их результатам выбирают положение эталонного (заповедного) полигона, наиболее адекватно характеризующего рудное поле, для проведения дальнейших экологических наблюдений.

Обработка материалов. Данную работу выполняют так же, как при проведении поисковых работ на месторождениях суши. В первую очередь выполняют комплекс лабораторных исследований отобранных коллекций проб и образцов, направленный на изучение свойств, строения и состава рудных образований (железомарганцевых корок и конкреций), горных пород, являющихся их субстратами, и при необходимости — на изучение нелитифицированных осадков, морской воды.

Все полученные при проведении полевых и лабораторных работ материалы систематизируют и обобщают. Создают цифровые, в том числе графические, базы данных. Результаты излагают в *отчете о геологическом строении рудного поля*, который состоит из текста, комплекта графических и текстовых приложений. Текст содержит сведения о физико-географических условиях проведения работ, изученности района, применявшихся методиках полевых и лабораторных исследований, основную геологическую часть. В основной части характеризуются стратиграфическое строение разреза гайота, развитые магматические комплексы, тектоническая структура, история геологического развития, распространение полезных ископаемых. Кроме железомарганцевого на гайотах развиты фосфатное оруденение и нередко цеолитовая минерализация. В специальных главах отчета подробно характеризуются свойства, строение и состав кобальтоносных марганцевых образований, даны сведения о горно-геологических условиях локализации, специализированных и опытно-методических работах.

Наиболее важная глава отчета посвящена оценке ресурсов. В ней излагаются принципы, методика и результаты оценки. Оценка прогнозных ресурсов проводится в соответствии с действующими нормативными документами. Плотность сети наблюдений для категории P_1 — одна станция на 5 км^2, P_2 — одна станция на 10 км^2, P_3 — одна станция на 100 км^2. Требуемая среднеквадратическая погрешность навигационного обеспечения для категории P_1 — 50 м, P_2 — 200 м, P_3 — 300 м. Выделение подсчетных блоков и количественная оценка ресурсов осуществляются на горизонтальных проекциях — схемах оценки. Для ресурсов категорий P_3 и P_2 используют схемы масштаба 1:200 000, для категории P_1 — масштаба 1:50 000. Для масштабов 1:200 000 и более мелких допустимо использование проекции Меркатора, для более крупных необходимо использование равноплощадных проекций.

При оконтуривании рудных площадей используют различные синтетические показатели, однако все они рассчитываются исходя из реальных величин — средней мощности корок, содержаний по-

лезных компонентов, плотности и влажности вещества корок. Из синтетических показателей используют в первую очередь *условный кобальт* и *продуктивность по условному кобальту*. Условный кобальт служит для приведения к единому показателю всех полезных компонентов по стоимости, а продуктивность по условному кобальту — для оценки стоимости единицы руды.

Комплект графических приложений состоит из карт фактического материала, изученности, рельефа дна, геологической и геоморфологической карт, карт результатов геофизических исследований. В комплект входит и ряд карт, отражающих особенности железомарганцевого оруденения, — карты распространения рудных образований, распределения оценочных параметров, в первую очередь мощностей корок и содержаний полезных компонентов, схемы оценки прогнозных ресурсов. В текстовые приложения помещают результаты полевых, лабораторных и камеральных работ, включая ведомости оценки прогнозных ресурсов.

По завершении этапа поисковых работ в пределах всех намеченных объектов составляют технико-экономические соображения (ТЭС) о целесообразности постановки дальнейших работ с проектом оценочных кондиций.

Поскольку все работы в пределах международного района морского дна проводят под строгим контролем Международного органа по морскому дну Организации объединенных наций (МОД ООН, или ISBA UN), важной задачей по завершении поисковых работ является подготовка заявки на выделение площадей для проведения разведочных работ в этот орган. МОД ООН разрабатывает правила проведения заявочной кампании в соответствии с требованиями Конвенции ООН по морскому праву. К настоящему моменту существует несколько вариантов подачи заявки применительно к кобальтоносным железомарганцевым коркам. Основной из них заключается в том, что заявка подается на две площади равной коммерческой ценности. Одна из площадей, по выбору органа, резервируются за МОД ООН для развивающихся стран. Оговаривается, что выделяемая заявителю площадь должна обеспечить эксплуатацию месторождения с заданной производительностью в течение 20 лет.

10.4. Разведка месторождений КМК

Цель разведочных работ — полная геолого-экономическая оценка месторождения и его подготовка для промышленного освоения. Для этого должны быть решены многие задачи.

Рельеф дна необходимо изучить с полнотой, достаточной для проектирования и ведения добычных работ. Должны быть уточнены геолого-структурные, литологические, геоморфологические и другие факторы, определяющие пространственное размещение залежей ко-

рок. Необходимо уточнение контуров рудных залежей, условий залегания, особенностей строения, изменчивости геолого-промышленных параметров и качества железомарганцевых корок в их пределах.

Должно быть проведено детальное изучение вещественного состава корок и их технологических свойств по каждому технологическому типу или сорту руд с проведением технологических испытаний в полупромышленном, а при необходимости и в промышленном масштабе.

Среди основных задач надо отметить детальное изучение горно-геологических и горно-технических условий эксплуатации отдельных залежей корок, оценку природных условий акватории месторождения с полнотой, обеспечивающую проектирование добычного предприятия и ведение эксплуатационных работ. В рамках разведки обязательно проведение опытных добычных работ с изучением процессов загрязнения водной среды.

По результатам разведочных робот на каждом объекте составляют отчет с подсчетом запасов руды категорий C_1 и C_2 и оценкой прогнозных ресурсов категории P_1. А по окончании разведки составляют технико-экономическое обоснование (ТЭО) целесообразности освоения месторождения и разработки постоянных кондиций. Запасы месторождения корок и металлов, содержащихся в них и имеющих промышленное значение, утверждают в ГКЗ РФ.

Следует оговориться, что представления о ведении разведочных работ месторождений КМК в полной мере гипотетичны. Если разведочные работы по исследованию железомарганцевых конкреций (ЖМК) еще не ведутся, то активно идет подготовка к их проведению. Завершены поисково-разведочные работы, разрабатываются методические и технические основы разведки, выполняются опытно-методические морские работы по их применению. Развитие же геолого-разведочных работ по исследованию корок несколько отстает. В настоящий момент завершены поисковые работы на ряде рудных полей, проводится подготовка заявки в МОД ООН. Сам международный орган готовит нормативные документы для проведения заявочной кампании. После закрепления площадей за организациями-заявителями предстоит период детализационных работ, сопоставимых с поисково-разведочными, в рамках которых заявителям предстоит окончательно определиться, какие именно площади необходимо разведывать и эксплуатировать, а от каких следует отказаться. И только после этого должны начаться полномасштабные разведочные работы.

С другой стороны, имеются опыт проведения значительных объемов поисковых работ, а также представление, какие проблемы следует решить на стадии проведения разведочных работ, что соответственно предварительно может определить, как решать имеющиеся методические и технические вопросы.

Принципы разведки. Рассмотрим принципы разведки применительно к месторождениями железомарганцевых корок. Возможность соблюдения ***принципа полноты исследования*** в целом опасения не вызывает. Месторождения корок могут быть приурочены к рудному полю целиком, если речь идет о полях относительно небольших гайотов (Грамберга, Геленджик, Пегас), либо к крупным залежам рудных полей, развитых на крупных гайотах типа Федорова, Говорова, Альба. На крупных гайотах возможно оконтуривание двух-трех и более месторождений. Поэтому в силу компактной локализации требование полного оконтуривания месторождения вполне выполнимо. Требование полного пересечения месторождения разведочными выработками также не представляется сложным. Месторождения, по сути, являются двумерными и полностью расположенными на поверхности дна, поэтому при наличии соответствующей техники отбора проб пересечение всего месторождения как вкрест, так и вдоль направления изобат не может быть сложной задачей. Требование комплексности изучения, на наш взгляд, в данном случае не имеет специфической особенности по отношению к другим типам месторождений. Выполнение этого требования достигается полнотой и всесторонностью изучения отобранного материала. К настоящему времени выявлен возможный комплекс полезных попутных компонентов, которые могли бы извлекаться на различных стадиях эксплуатационного процесса, поэтому главное — не упустить в процессе разведки их дальнейшее изучение.

Принцип последовательных приближений реализуется так же, как и при разведке других типов месторождений, — разбивкой геолого-разведочных работ на этапы. Поскольку сложность строения месторождений можно относить максимум к второй категории, не исключено, что все работы могут быть проведены в один этап.

Принцип равномерности (равной достоверности) выполняется путем равномерного покрытия разведочными сетями участков месторождения, находящихся на одинаковом этапе исследований. Кроме того, на участках месторождений с различным строением необходимо использовать технические средства, дающие соизмеримые результаты. В нашем случае это положение применимо к корковым залежам, локализованным на относительно пологих и относительно крутых поверхностях дна, для которых наиболее эффективными являются различные технические средства отбора проб. Нельзя исключать, что на каких-либо участках сложного строения для получения равнодостоверных результатов потребуются дополнительные детализационные работы.

Принципы наименьших материальных и трудовых затрат и наименьших затрат времени на данном этапе обсуждать преждевременно.

Требования к техническим средствам. В целом технические средства геолого-разведочных работ на КМК были рассмотрены ра-

нее. Здесь акцентируется внимание на требованиях к ним применительно именно к разведочным работам, и в ряде случаев речь идет о средствах, которые еще широко не используются или которые только предстоит разработать.

В первую очередь ужесточаются требования к ***навигационному оборудованию***. Для обеспечения разведочных работ потребуются батиметрические основы масштаба не мельче чем 1:10 000. Точность привязки должна соответствовать 1 мм в масштабе карты, или 1 м в реальном измерении. На сегодняшний день точность привязки судна по спутниковым навигационным системам составляет около 5 м, а забортных аппаратов относительно судна на требуемых глубинах — около 50 м. Однако системы с заявленной точностью существуют, хотя и применяются пока ограниченно.

Поскольку большинство задач разведки решается прямыми методами, т.е. геологическим опробованием, косвенные (геофизические) и опосредованные (фототелевизионные) методы будут иметь ограниченное значение. Вместе с тем для решения ряда специфических задач они вполне применимы. Метод, без которого невозможно обойтись при разведке, — все то же ***многолучевое эхолотирование***. Именно оно решает задачу получения точной батиметрической основы, адекватно отражающей рельеф дна в масштабе 1:10 000 и крупнее. Однако такая задача не может быть решена с помощью судового эхолота. Для решения поставленных задач используют погружные придонные комплексы, функционирующие в режиме буксируемого аппарата. Принципиально они работают так же, как судовой прибор. Следует учитывать, что более высокое разрешение потребует более частых галсов, а работа в режиме буксируемого аппарата существенно снизит производительность.

С применением ***геоакустических методов*** существует некоторая неопределенность. Применение их в существующей модификации, вероятно, не является целесообразным. Детальность исследований разреза осадочного чехла, достигнутая на предыдущих стадиях, достаточна, а информативность сонарной съемки даже с двукратным перекрытием не вполне очевидна в сравнении с необходимыми затратами. С другой стороны, определенные надежды связывают с прибором типа георадара. Этот аппарат должен работать на сверхвысоких частотах, что позволит акустическими методами различать корки мощностью не менее 4 см. Действие прибора сопряжено с потреблением очень большой энергии, поэтому не исключено, что конструкция не сможет быть плавучей, а будет буксироваться непосредственно по дну, и что потребуется решение ряда дополнительных проблем. Однако необходимость разработки такого прибора очевидна. С его помощью возможно было бы проводить оконтуривание залежей в пределах месторождений, выделять безрудные окна с пониженной мощностью корок, проводить другие исследования с последующим подтверждением полученных данных

опробованием, но уже с значительным сокращением числа станций наблюдений.

Фототелевизионным профилированием решают те же задачи, что и на других этапах геолого-разведочных работ. К моменту проведения разведочных работ задачи выделения перспективных площадей уже должны быть решены. Поэтому метод может выступать как вспомогательный. Главными требованиями должны быть увеличение частоты кадров и повышение разрешающей способности съемки. Необходимо разработать систему автоматической интерпретации телевизионной информации, поступающей в непрерывном режиме.

Проведение ***геологического опробования*** также требует применения новых технических средств или более широкого применения тех, что уже использовались ограниченно. Вероятно, придется полностью отказаться от драгирования. Неопределенность места отбора пробы, достаточно протяженный интервал драгирования (до 2 см в масштабе карты) делают этот метод малоинформативным. По-видимому, основным методом опробования должно стать ***бурение***. В настоящий момент метод имеет ряд ограничений по диаметру бурения, крутизне опробуемой поверхности, характеру поверхности и др. Эти ограничения вполне могут быть сняты путем не самых сложных конструкторских доработок, например использованием стабилизационной платформы.

Но требуется и разработка принципиально новой техники. В частности, необходимо приспособление, позволяющее проводить полную выемку железомарганцевых корок на их полную мощность с фиксированной площади. Эта площадь, по сегодняшним представлениям, должна быть размером не менее 1,0—1,5 м^2, что даст возможность получить пробу массой до 200—300 кг с точки, имеющей строгую привязку. Такая установка позволит выявить наиболее высокую составляющую изменчивости мощности корок и ее реальное влияние на подсчет запасов руды. Не так давно был установлен ранг изменчивости, фиксируемый на расстоянии нескольких десятков сантиметров.

Очевидна и необходимость использования систем ROV (Remote Operated Vehicles) — телеуправляемой роботизированной техники. Такие системы могут быть смонтированы как на плавучей, так и на буксируемой платформе, оснащенной телеуправляемым движителем. На платформе монтируются фототелевизионные системы наблюдений и широкий набор других исследовательских средств. Могут использоваться многолучевые эхолоты, гидроакустические системы, системы океанографических наблюдений, различные манипуляторы, позволяющие выполнять как простой сбор объектов с поверхности дна, так и отбор проб с помощью различных фрез, минибуровых установок. На ROV могут быть смонтированы и буровые станки, способные обеспечить бурение на несколько десятков метров.

Подобная техника в настоящее время успешно используется, однако она позволяет решать преимущественно задачи наблюдения и профилактических работ на подводных трубопроводах, трансокеанских кабелях, подводном строительстве и др. В то же время все шире такие системы применяют для исследований океанических полезных ископаемых.

Наконец, при проведении разведочных работ наверняка будут востребованы подводные обитаемые аппараты (ПОА). Их использование уже имело место при работе по исследованию корок, однако ПОА «Север-2» (Тихоокеанский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии) и «Пайсис» (Институт океанологии РАН) применялись на стадии рекогносцировочных работ при проходе одиночных подводных маршрутов. Помимо функций детальных наблюдений и фототелевизионной съемки ПОА обычно имеют возможность отбора проб с помощью манипуляторов, минибурового оборудования, навесных фрез. Возможно использование контактных методов исследования физических свойств руд и субстратов in situ. При разведке представляется нецелесообразным систематическое покрытие площадей маршрутами подводных аппаратов, важнее использовать их на наиболее проблемных участках, для решения каких-либо специфических задач, при проведении специализированных исследований. ПОА обычно также используют для мониторинга проведения сложных технических исследований, опытной добычи.

На сегодняшний день помимо упомянутых аппаратов существуют два ПОА «Мир», базирующиеся на научно-исследовательском судне «Академик Мстислав Келдыш». Ведется разработка ПОА «Консул», предназначенного для производства детальных геолого-разведочных работ по исследованию глубоководных полиметаллических сульфидов и кобальтоносных марганцевых корок.

Система разведки. Поскольку строение месторождений корок является относительно простым, разведочные работы можно проводить в одну стадию, исключая предварительную разведку, а подсчет запасов проводить по категории C_1.

Представляется, что разведочные работы можно осуществлять по следующей схеме.

На ***подготовительном этапе*** выполняется съемка рельефа дна придонным многолучевым эхолотом, что обеспечивает дальнейшие работы батиметрической основой. Проводится геоакустическое профилирование, включая профилирование георадаром, позволяющее уточнить контуры залежей и безрудных окон.

На ***основном этапе*** выполняется фототелевизионное профилирование и геологическое опробование. Главным инструментом опробования, очевидно, будет бурение неглубоких скважин. Ориентировка сетей остается унаследованной с поисковой стадии, но с необходимой корректировкой, обусловленной детализацией представлений о рельефе дна и строении рудных тел. Основная сеть профи-

лей также разбивается вкрест склона, но на разведочной стадии необходимы и связующие профили, ориентированные вдоль изобат.

Плотность сети, по сегодняшним представлениям, должна определяться индивидуально для каждой рудной залежи или группы однотипных залежей. Плотность может быть определена экспериментально путем переразведки характерного участка залежи и последующих расчетов по вариантам разрежения сетей. Возможно определение параметров сети и методами математической статистики. Для этого необходимо пройти профили вкрест и вдоль основных структур залежи с достаточно плотным расположением скважин, после чего по полученным данным построить вариограммы и определить зоны влияния проб, исходя из которых и выбирают шаг сети. Уже проведенные расчеты показывают, что изменчивость мощности корок — основного параметра, определяющего изменчивость количества руды на единицу площади, — вкрест склона в несколько раз выше, чем вдоль него. Зона влияния может достигать нескольких километров, но, скорее всего, не превышает нескольких сотен метров.

В любом случае плотность сети должна обеспечить решение задач по полноте изучения строения и состава рудных залежей, качества и свойств руд, подсчету запасов категории C_1.

Пробоотборники, обеспечивающие отбор площадных проб, могут быть использованы по более редкой сети в целях детализации строения и состава корок и изменчивости их оценочных параметров.

На ***детализационном этапе*** осуществляется доизучение наиболее сложных участков месторождения, для чего могут быть сгущены сети опробования или применены площадные пробоотборники, ROV, подводные обитаемые аппараты.

На этом этапе также должна быть проведена опытная добыча руды с тем, чтобы испытать глубоководный добычной комплекс. Проходит испытание технических средств добычи и определение технологических показателей всех систем комплекса на участках с различными горно-геологическими условиями и параметрами оруденения. Определяется уровень эксплуатационных потерь и разубоживания руд. Также разрабатываются мероприятия по предотвращению загрязнения окружающей среды.

В 2005—2006 гг. опытная добыча проведена японскими исследователями. При всей отрывочности сведений о конструкции испытанной системы и методике проведения испытаний известно, что для различных режимов работы установки коэффициенты разубоживания руд породами субстрата составляют 17 и 41 %. Японские коллеги могут теперь располагать реальными представлениями о коэффициенте рудоносности, коэффициентах подбора и сквозном коэффициенте потерь для конкретного участка испытаний и конкретной использованной установки.

Специализированные работы выполняются на всем протяжении разведочных работ. Задачи инженерно-геологических исследований существенно расширяются. На поисковых работах о горно-геологических условиях были получены наиболее общие принципиальные представления. На стадии разведки эти условия должны быть изучены применительно к каждому рудному телу, с детальностью, обеспечивающей проектирование эксплуатационных работ. О методике таких работ пока судить рано. Есть представления, что будет достаточно детально изучить материал, получаемый при рядовом опробовании месторождения, проводя на нем дополнительные лабораторные испытания, а также изучить материалы косвенных и опосредованных методов. Но, возможно, придется разрабатывать стенды, позволяющие определять некоторые инженерно-геологические параметры непосредственно на морском дне. Не следует забывать, что горно-геологические условия необходимо изучить не только в пределах рудных тел, но и на крупных безрудных участках, приуроченных к зонам развития карбонатных осадков на вершинных поверхностях, крупных ступенях и других формах рельефа. Они могут быть использованы для проведения вспомогательных технологических операций при эксплуатации месторождения, например для развертывания систем добычного агрегата, промежуточного складирования руд и др.

Проведение экологических исследований — одно из обязательных требований МОД ООН к работам разведочной стадии. Их целью является изучение гидрохимических, гидробиологических и гидрофизических параметров вод и морского дна до начала эксплуатационных (включая опытную добычу) работ. По результатам исследований составляется паспорт океанической толщи над месторождением.

Экологические работы на стадии разведки проводятся в соответствии с руководящими рекомендациями МОД. В настоящий момент они разработаны только для разведочных работ по исследованию конкреций, однако можно полагать, что обязательным методом работ по исследованию корок будет фототелевизионное профилирование, позволяющее фиксировать временные биологические и седиментационные явления в донной экосистеме, изучать распределение представителей различных таксонов бентоса и придонного нектона. Гидрозондирование с отбором проб морской воды дает возможность изучить структуру водной толщи, удельную электропроводность, температуру, давление, прозрачность. Измерение течений проводится по всей водной толще. Требуется постановка седиментационных ловушек для характеристики седиментационного материала в потоке промежуточных вод и в потоке на дно. Обязательно изучение планктона, бактериальной массы, макро-, мега- и мейобентоса. Выполняется химический анализ морской воды, используются результаты химических анализов рудных образований и субстрата. В конечном счете создаются базы экологических данных.

Экологические исследования проводят в различные сезоны и различное время суток.

Обработка материалов. Не будем подробно останавливаться на этом вопросе. При ведении геологической документации и опробовании всегда соблюдаются общие принципы. Аспекты, которые могут возникнуть в связи с применением новых технических средств, пока не ясны. В любом случае все полученные материалы должны быть подвергнуты всем необходимым видам лабораторных исследований, а в период проведения камеральных работ должны быть построены все необходимые карты, обобщены и проанализированы все имеющиеся материалы.

Один из наиболее важных компонентов камеральной обработки — подсчет запасов. Мы уже упоминали, что в связи с не очень сложным строением месторождений достаточно будет произвести подсчет по категории C_1. Это, однако, не означает, что по такой категории будут подсчитаны запасы всего месторождения. На отдельных участках запасы будут соответствовать категории C_2, а на некоторых и вовсе будут оценены ресурсы категории P_1. Допустимые соотношения объемов запасов разных категорий и ресурсов регулируются нормативными документами.

Скорее всего, подсчет запасов будет производиться методом геологических блоков. Для этого подсчетные блоки должны характеризоваться сходством оценочных характеристик и горно-геологических условий. Имеет смысл выделять блоки, приуроченные к субгоризонтальным и слабонаклонным поверхностям и склоновым поверхностям. С другой стороны, если нельзя избежать включения в блок площадей с различными характеристиками, придется при подсчете запасов применять метод ближайшего района или другие методы, учитывающие зоны влияния проб.

По завершении разведочных работ составляется отчет о геологическом строении месторождения с подсчетом запасов кобальтоносных марганцевых корок по категориям C_1 и C_2 и оценкой прогнозных ресурсов по категории P_1. Наиболее важным документом, подводящим итог разведочных работ, является технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных кондиций.

Поскольку разведочные работы проводятся в международном районе морского дна, в первую очередь соблюдаются все правила и требования, вытекающие из Конвенции ООН по морскому праву и предъявляемые МОД ООН. Однако перед этим готовятся поэтапные и окончательный отчеты о результатах проведенных работ. Помимо требований МОД необходимо выполнять требования Государственной комиссии по запасам (ГКЗ) РФ, поскольку разведанные месторождения пополняют сырьевую базу России. В настоящее время продолжаются преобразования этого органа и окончательно не определены его новые функции, но постановку запасов на учет, по-видимому, придется производить именно в ГКЗ.

* * *

Потребность в минеральных ресурсах в мире неуклонно возрастает. Потребление минерального сырья удваивается каждые 15 лет. Традиционные источники ресурсов, в частности месторождения твердых полезных ископаемых на суше, заметно истощаются. Поэтому изучение и освоение минеральных ресурсов дна Мирового океана стало первоочередной проблемой, требующей практического решения. Последние десятилетия XX в. и начало XXI в. ознаменовались интенсификацией морских работ, направленных на изучение всех видов полезных ископаемых. Достигнутые в этом направлении успехи позволяют дать весьма высокую оценку минерально-сырьевому потенциалу океанского дна. В настоящее время уже сформировались представления о перспективных геолого-промышленных типах океанских месторождений. К ним в первую очередь можно отнести следующие: 1) месторождения железомарганцевых конкреций (ЖМК); 2) залежи кобальтоносных железомарганцевых корок; 3) металлоносные осадки красноморского типа; 4) глубоководные полиметаллические сульфиды (ГПС); 5) залежи газогидратов. Планируемое в обозримом будущем освоение минеральных ресурсов Мирового океана имеет огромное значение для России, которая испытывает резкий дефицит марганца, недостаток меди, кобальта, в ближайшей перспективе столкнется с нехваткой никеля и других металлов, содержащихся в рудах океанских месторождений. Не случайно одно из основных положений Морской доктрины РФ, принятой в 2001 г., гласит, что «освоение ресурсов Мирового океана является обязательным и необходимым условием сохранения и расширения сырьевой базы РФ, обеспечения ее экономической независимости».

В настоящее время по степени изученности и подготовленности к промышленному освоению первое место занимают оксидные руды океана: железомарганцевые конкреции и кобальтоносные железомарганцевые корки.

ЖМК являются сырьем комплексного типа. Основные элементы конкреций — Mn, Ni, Co, Cu. Попутно могут извлекаться благородные металлы, редкие и рассеянные элементы, некоторые редкоземельные.

В отличие от конкреций, в которых преобладает марганец, корки содержат почти равные количества железа и марганца, зато кобальта в них примерно в три раза больше, чем в конкрециях. Попутно из них также могут извлекаться Ni, Cu, Pt, Mo, V, TR.

Оксидные руды океана характеризуются высоким содержанием основных компонентов по сравнению с рудами континентальных месторождений (в особенности российских). Содержания металлов в добываемых рудах в настоящее время обнаруживают устойчивую тенденцию к снижению. Россия не располагает месторождениями высококачественных марганцевых руд.

ЖМК и КМК представляют собой оксидные руды марганца металлургического сорта, по качеству значительно превосходящие руды российских месторождений, среди которых преобладают технологически трудно перерабатываемые карбонатные, оксидно-карбонатные и марганцевые известняки.

Железомарганцевые конкреционные руды являются уникальным минеральным сырьем, они представляют собой природнолегированные руды, использование которых для выплавки чугуна и стали придает получаемому продукту повышенную сортность.

По извлекаемой ценности содержащихся в них компонентов оксидные руды рассматриваются как богатые. К тому же они обладают превосходными технологическими свойствами. Если к этому добавить, что оксидные руды являются высокоэффективным природным сорбентом, ценность их существенно возрастает. Дело в том, что оксидные руды океана обладают высокой способностью поглощать тяжелые металлы, играть роль сорбентов — фильтров-очистителей техногенных вод и газов и накопителей металлов в ходе предварительного обогащения исходного сырья в начале технологических схем его металлургического передела.

Общие мировые ресурсы ЖМК и КМК в пределах известных полей оцениваются в 75,3 млрд т сухой рудной массы. По экспертным оценкам, полномасштабная рентабельная отработка конкреций может продлиться 40—60 лет, после чего конкреционный потенциал океана в основном истощится. Ресурсы корок могут быть освоены за 80—100 лет.

Технико-экономические расчеты подтверждают техническую возможность и экономическую целесообразность отработки месторождений ЖМК.

Сбор конкреций со дна не сопровождается разрушением донной поверхности, поскольку они залегают на мягких глинах. Опыты по подъему конкреций на поверхность проводились в США и Японии. Рассматриваются два способа. Это эрлифт, разрабатываемый в США, и многоковшовая система на канатах нейтральной плавучести, разрабатываемая в Японии.

Глубоководные полиметаллические сульфиды являются третьим из числа главных видов полезных ископаемых Мирового океана.

Общий ресурсный фонд глубоководных сульфидов составляет более 80 млн т рудной массы (32 млн т в Атлантике и 48 млн т в Тихом океане).

Все виды полезных ископаемых океана являются комплексным минеральным сырьем, в котором присутствует широкий перечень стратегических металлов: Mn, Ni, Cu, Co, Zn, Mo, Au, Ag и др. Их суммарная стоимость в недрах составляет 78 трлн долл. США, в том числе ЖМК — 45,6 трлн; КМК — 32,4 трлн; глубоководные полиметаллические сульфиды — 79 млрд. По ценности эти потенциальные ресурсы в 1,3 раза превосходят стоимость всех твердых полезных

ископаемых суши. По содержанию главных и попутных элементов океанические руды не уступают наземным либо существенно превосходят их.

Ценность марганца в комплексной руде ЖМК составляет более 60 %, в КМК — 49 %. Вторым по ценности металлом в ЖМК является никель (23 % суммарной стоимости металлов в 1 т руды), который вместе с медью и кобальтом образует комплекс, адекватный извлекаемому из медно-никелевых руд норильского типа. При этом океанические конкреции как комплексная руда в 1,28 раза превосходят богатые норильские руды по стоимостной ценности содержащихся в них полезных компонентов. Кобальт также рассматривается как ключевой металл в Мировом океане. Производство кобальта в случае освоения месторождений ЖМК и КМК может превзойти наземные объемы. Медь содержится в ЖМК и ГПС.

Экспертные оценки ресурсного потенциала массивных сульфидов не дают столь грандиозных величин, как для оксидных железомарганцевых руд. Наиболее крупные проявления глубоководных сульфидов в Тихом океане (Восточно-Тихоокеанское поднятие 13° с. ш.; Галапагосский хребет; хребет Эксплорер; впадина Гуаймас; хребет Хуан-де-Фука) в сумме обладают рудной массой 25—30 млн т. Для Северо-Атлантического хребта эта величина оценивается в 17—20 млн т (Андреев и др.).

Возможность промышленной разработки месторождений глубоководных массивных сульфидов в настоящее время является проблематичной. Значительно более простым объектом для освоения являются залежи металлоносных осадков на дне Красного моря.

Работы по освоению газогидратов носят научно-исследовательский характер.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Батурин Г.Н.* Руды океана. — М., 1993.

2. Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность / [Ю. Г. Волохин и др.]. — М.: Наука, 1995.

3. Геология и минеральные ресурсы Мирового океана. — Варшава: INTERMORGEO, 1990.

4. Международно-правовые и экономические проблемы поиска, разведки и освоения минеральных ресурсов глубоководных районов Мирового океана / [Ю. Б. Казмин и др.]. — Геленджик, 1989.

5. *Мельников М.Е.* Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. — Геленджик: ФГУГП ГНЦ «Южморгеология», 2005.

6. Полезные ископаемые Мирового океана (Основные типы твердых полезных ископаемых) / [В. В. Авдонин и др.]. — М.: Изд-во МГУ, 2000.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

Часть I
ГЕОЛОГИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 7

Глава 1. **Геологические условия формирования месторождений полезных ископаемых** 7

1.1. Генетическая классификация 7
1.2. Рудоносность геологических формаций 9
1.3. Основные особенности выделения геолого-промышленных типов рудных месторождений на формационной основе 22

Глава 2. **Основные геолого-промышленные типы месторождений** 26

2.1. Месторождения руд черных металлов 26
2.2. Месторождения руд цветных металлов 31
2.3. Геолого-промышленные типы месторождений благородных металлов 45
2.4. Геолого-промышленные типы месторождений радиоактивных элементов 47

Часть II
ПОИСКИ, РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ 51

Глава 3. **Поиски полезных ископаемых** 51

3.1. Геологическое обоснование постановки поисков и стадии поисковых работ 51
3.2. Геологические предпосылки поисков 55
3.3. Поисковые признаки 60
3.4. Прогнозно-поисковые модели месторождений 69
3.5. Методы поисков 74
3.6. Комплексирование методов. Прогнозно-поисковые комплексы 97
3.7. Условия и обстановки ведения поисков 102
3.8. Оценка результатов поисковых работ 107

Глава 4. **Разведка месторождений полезных ископаемых** 112

4.1. Задачи и методы разведки 112
4.2. Опробование 153
4.3. Основы классификации запасов 177
4.4. Требования промышленности к минеральному сырью (кондиции) 188
4.5. Подсчет запасов 195
4.6. Геолого-экономическая оценка месторождения 196

Глава 5. **Компьютерное моделирование месторождений** 202

5.1. Обзор традиционных методов моделирования месторождений 202
5.2. Трехмерное компьютерное моделирование месторождений 209
5.3. Координаты в трехмерном пространстве 210
5.4. Точка наблюдения и перспективное изображение 213
5.5. Графические примитивы (простейшие элементы) 216
5.6. Поверхности и тела 218
5.7. Горные выработки 220
5.8. Графические документы 221
5.9. Некоторые математические задачи трехмерного моделирования месторождений 221
5.10. Порядок создания трехмерной модели 226

Глава 6. **Геостатистические методы подсчета запасов** 239

6.1. Оконтуривание рудных тел 239
6.2. Определение параметров для подсчета запасов 245
6.3. Обзор традиционных способов подсчета запасов 249
6.4. Точность подсчета запасов 262
6.5. Геостатистические методы подсчета запасов 263
6.6. Непригодность традиционных методов подсчета запасов в микроблоках 267
6.7. Вариограммы 270
6.8. Анизотропия 280
6.9. Модельные функции вариограмм 284
6.10. Структурный анализ 290
6.11. Задачи интерполяции, гридинг 292
6.12. Методы интерполяции 293

Глава 7. **Разработка месторождений полезных ископаемых** 304

7.1. Правовые аспекты разработки 304
7.2. Способы разработки месторождений 304
7.3. Факторы, определяющие выбор способа разработки 307
7.4. Разработка месторождений открытым способом 310
7.5. Специальные способы открытой разработки 317
7.6. Разработка месторождений подземным способом 321
7.7. Комбинированный способ разработки 333
7.8. Специальные способы разработки 335

Глава 8. **Экологические проблемы разведки и разработки месторождений** 343

8.1. Геолого-разведочные работы и окружающая природная среда 343
8.2. Экологические проблемы разработки месторождений 345
8.3. Правовые аспекты охраны окружающей среды при разработке месторождений 349

Часть III
ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОКЕАНИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗОМАРГАНЦЕВЫХ РУД 352

Глава 9. **Геологические строение, методика поисков и разведки месторождений железомарганцевых конкреций** 352

9.1. Методы и инструменты исследований 352
9.2. Поиски месторождений железомарганцевых конкреций 359
9.3. Разведка месторождений железомарганцевых конкреций 364

Глава 10. **Геологические строение, поиски и разведка месторождений кобальтоносных корок** 372

10.1. Геологическое строение месторождений корок 372
10.2. Методы и инструменты исследований 384
10.3. Поиски месторождений КМК 387
10.4. Разведка месторождений КМК 394

Учебное издание

Авдонин Виктор Васильевич,
Мосейкин Владимир Васильевич,
Ручкин Георгий Владимирович и др.

Геология и разведка месторождений полезных ископаемых

Учебник

Редактор *Е. В. Кораблёва*
Технический редактор *Н. И. Горбачёва*
Компьютерная верстка: *Г. Ю. Никитина*
Корректор *Г. Н. Петрова*

Изд. № 101114604. Подписано в печать 26.07.2011. Формат 60 × 90/16.
Гарнитура «Ньютон». Бумага офс. № 1. Печать офсетная. Усл. печ. л. 26,0.
Тираж 1 000 экз. Заказ № Р-1187.

Издательский центр «Академия». www.academia-moscow.ru
125252, Москва, ул. Зорге, д. 15, корп. 1, пом. 26б. Адрес для корреспонденции: 129085, Москва, пр-т Мира, 101В, стр. 1, а/я 48. Тел./факс: (495)648-0507, 616-0029.
Санитарно-эпидемиологическое заключение № РОСС RU. АЕ51. Н 14964 от 21.12.2010.

Отпечатано в полном соответствии с качеством
предоставленного электронного оригинал-макета
в типографии филиала ОАО «ТАТМЕДИА» «ПИК «Идел-Пресс».
420066, г. Казань, ул. Декабристов, 2.
E-mail: idelpress@mail.ru

ГЕОЛОГИЯ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

ISBN 978-5-7695-6667-7

Издательский центр «Академия»
www.academia-moscow.ru