

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего профессионального образования  
«ПЕРМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**А. С. Долгаль**

## **КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

*Допущено методическим советом  
Пермского государственного национального  
исследовательского университета  
в качестве учебного пособия  
для студентов специальности «Геофизика»  
и направлению подготовки «Геология»*

Пермь 2012

УДК 550.83  
ББК 26.2  
Д 64

**Долгаль А.С.**  
Д 64 **Комплексирование геофизических методов: учеб.  
пособие /А.С. Долгаль; Перм. гос. нац. исслед.  
ун-т. – Пермь, 2012. – 167 с.**

ISBN 978-5-7944-2025-8

Рассмотрены методологические и прикладные основы комплексирования геофизических методов.

В первой части учебного пособия охарактеризованы основные задачи, принципы комплексирования различных методов прикладной геофизики, изложены сведения, связанные с физико-геологическим моделированием и неоднозначностью решения обратных задач геофизики, а также с комплексной интерпретацией геоданных и оптимизацией комплексных геофизических исследований.

Во второй части учебного пособия рассмотрены вопросы практического применения геофизических комплексов при решении задач в области глубинной, региональной, картировочно-поисковой, нефтяной, рудной и инженерной геофизики. Приведены результаты геофизических исследований, иллюстрирующие возможности как отдельных методов, так и их комплексов при решении геологических задач.

Предназначено для студентов дневного и заочного отделений специальности «Геофизика» и направления «Геология», а также для аспирантов научной специальности 25.00.10 «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Табл. 13. Ил. 50. Библиограф. 35 назв.

**УДК 550.83  
ББК 26.2**

Издается по решению редакционно-издательского совета Пермского государственного национального исследовательского университета

*Рецензенты:* **С. Г. Бычков**, д-р геол.-минерал. наук, зав. лабораторией геопотенциальных полей (ФГБУН Горный институт Уральского отделения Российской академии наук); **В. Б. Виноградов**, канд. геол.-минерал. наук, доц. (Уральский государственный горный университет)

ISBN 978-5-7944-2025-8

© Долгаль А.С., 2012  
© Пермский государственный национальный  
исследовательский университет, 2012

## ВВЕДЕНИЕ

Современная прикладная (разведочная) геофизика в своем арсенале имеет большое число разнообразных методов, рациональное комплексирование которых в условиях рыночной экономики приобретает особое значение при решении любой геологической задачи.

Следует подчеркнуть, что геофизические исследования в России (СССР) с самого начала носили комплексный характер. В 1918 г. Ленинский декрет об изучении Курской Магнитной Аномалии (КМА) предусматривал использование всех имевшихся на то время геологических исследований и в первую очередь геофизических методов. Успешным развитием комплексные геофизические исследования обязаны планомерному геологическому изучению всей территории бывшего Советского Союза, что является несомненным крупным достижением отечественной прикладной геофизики.

Выдающуюся роль в разработке вопросов комплексирования геофизических методов сыграли работы О.Ю. Шмидта, Г.А. Гамбурцева, А.И. Заборовского, В.В. Федынского, А.Г. Тархова, А.А. Логачева, Л.Я. Нестерова, И.Г. Клушина, О.Л. Кузнецова, Н.Я. Кунина, Г.С. Вахромеева, В.Н. Страхова, В.В. Бродового, А.А. Никитина, В.К. Хмелевского и др.

По области применения прикладная геофизика подразделяется на глубинную; региональную; поисково-разведочную (в том числе нефтегазовую, угольную, рудную, нерудную); инженерную (которая включает в себя инженерно-геологическую, гидрогеологическую, мерзлотно-гляциологическую, почвенно-мелиоративную, археологическую, техногенную) и экологическую.

По месту измерения физического поля, специфике технологии наблюдений и решаемых геологических задач выделяют спутниковую, воздушную (аэрогеофизика), полевую (наземную), аквальную (морскую), подземную (горную или шахтно-рудничную) геофизику и геофизические исследования и работы в скважинах (ГИС или каротаж).

Основные преимущества геофизических методов при производстве геологоразведочных работ состоят:

- в объективности и высокой пространственной плотности информации о физических полях, создаваемых геобъектами, геопроцессами и явлениями;
- в возможности изучения объектов, не выходящих на земную поверхность, а также геопроцессов и явлений, не проявляемых визуально;
- в относительно низкой стоимости и высокой производительности по сравнению с прямыми методами исследований (скважинами и горными выработками).

Недостатки методов прикладной геофизики определяются следующими факторами:

- многозначностью (неоднозначностью) решения обратных задач по определению геологической природы, формы и геометрии изучаемых объектов;
- отсутствием, как правило, прямых сигналов от геобъектов и геопроцессов, т.е. изучение объектов, процессов и явлений проводится путем измерения косвенных признаков;
- искажением регистрируемых сигналов (аномалий) от изучаемых объектов помехами различной природы геологического (неоднородности верхней части разреза, экраны, влияние рельефа и подстилающих пород и т.д.) и негеологического (временные вариации полей, промышленные токи, технические сооружения, ошибки в методике и технологии наблюдений и т.п.) характера.

Именно неоднозначность истолкования результатов геофизических исследований приводит к необходимости комплексного использования различных геофизических методов. Кроме того, необходимость комплексирования определяется тем, что разные элементы геологического строения по-разному отражаются в результатах, полученных разными геофизическими методами. Горизонтально-слоистые среды находят хорошее отражение в данных сейсморазведки и методах электротондирования, а вертикально-блочное строение более надежно картирует-

ся методами электропрофилирования, гравиразведки и магнито-разведки.

Таким образом, основная идея и цель комплексирования геофизических методов – достижение достоверного решения поставленных задач. В связи с разнообразием геофизических методов возникает проблема выбора наиболее информативных из них, определения последовательности их применения, распределения средств между методами для достижения максимального эффекта при решении поставленной практической задачи. Такая эффективность достигается за счет рационального или оптимального комплексирования методов.

Роль комплексирования геофизических методов и оптимизация комплекса приобретают все большую значимость в связи со следующими факторами:

- увеличением глубинности и разрешающей способности геологических исследований, поскольку к настоящему времени фонд залегающих на небольших глубинах (т.е. сравнительно легко открываемых) месторождений, практически исчерпан, а в добывающих регионах экономически оправдан поиск средних и мелких месторождений, являющихся слабоконтрастными объектами;

- решением все более сложных геологических задач, например поисков месторождений под покровами траппов, представляющих помеху для всех геофизических методов, но имеющих распространение на 70% территории Восточной Сибири;

- появлением новых проблем инженерно-геологического и экологического характера.

В табл. 1 приведена одна из возможных классификаций методов прикладной и скважинной геофизики [3]. По горизонтали приведены 5 разделов геофизических методов, объединенных сходной технологией и местом проведения работ: аэрокосмические, полевые, аквальные, горные (шахтно-рудничные), геофизические исследования и работы в скважинах (ГИС). Каждый из этих разделов состоит из 2 – 3 направлений геофизических исследований, предназначенных для решения крупных проблем и состоящих, в свою очередь, из ряда научно-

прикладных групп геофизических методов, которые служат для решения родственного круга задач:

- региональные (глубинные, структурные, картировочно-поисковые), проводимые как по отдельным геотраверсам, так и в виде площадных съемок на суше и акваториях;
- разведочные, которые принято делить на нефтегазовые, рудные, нерудные и угольные, предназначенные для поисков и разведки соответствующих полезных ископаемых;
- инженерные (иногда их называют инженерно-гидрогеологическими и экологическими), понимая под ними такие научно-прикладные разделы геофизики, как инженерно-геологическая, гидрогеологическая, почвенно-мелиоративная, мерзлотная, гляциологическая, археологическая и техногенная, а также экологическая. В последние годы экологическая геофизика приобретает все большую практическую и особенно медико-санитарную значимость.

Слева в табл. 1 дана классификация методов геофизики по используемым физическим полям: *естественным* (поле силы тяжести; геомагнитное поле; электромагнитные поля космического, грозового, электрохимического и электромеханического происхождения; волновые поля землетрясений; тепловые поля, обусловленные внутренними источниками тепла Земли; радиационные поля) и *искусственным*, неуправляемым техногенным и управляемым, специально создаваемым для геофизических исследований разведки (различные электрические, электромагнитные, упругие и ядерно-физические поля).

В табл. 1 представлены лишь основные методы, состоящие из ряда модификаций и вариантов, отличающихся использованием разных установок, например в электроразведке, определением разных составляющих поля или изменением числа измерительных каналов.

Комплекс геофизических методов прежде всего определяется постановкой конкретной геологической, инженерно-геологической и другой подобной задачи. Выбору комплекса способствует создание (построение) физико-геологической модели объекта, процесса, явления. Выбор рационального и оптимального комплекса может быть осуществлен лишь тогда, ко-

гда, во-первых, исследователь понял необходимость комплексирования и четко сформулировал задачи как отдельных методов, так и их комплексов; во-вторых, создана физико-геологическая модель объекта; в-третьих, обеспечена оценка геолого-экономической эффективности отдельных методов и их сочетаний.

Комплексирование геофизических методов является важнейшей составляющей прикладной (разведочной) геофизики. Основной задачей комплексирования является создание схем эффективного совместного использования различных геофизических методов на всех этапах геологоразведочных работ.

Хронологически последним изданием по данной дисциплине является учебник А.А. Никитина, В.К. Хмелевского «Комплексирование геофизических методов» [2], который служил основой при написании данного учебного пособия.

Первая часть учебного пособия посвящена методологическим основам комплексирования, к которым отнесены основные задачи и этапы геофизических работ, физико-геологическое моделирование, изучение качественной и количественной неоднозначности интерпретации геофизических данных, комплексная интерпретация результатов геофизических исследований, оптимизация комплекса геофизических методов. Во второй части рассматриваются вопросы комплексирования геофизических исследований при решении различных геологических, инженерно-геологических и экологических задач на различных стадиях геологоразведочных работ.

Автор выражает глубокую благодарность за помощь в оформлении рисунков и таблиц П.Н. Новиковой и Л.А. Христенко.

Таблица 1

### Классификация методов прикладной геофизики

Геофизические методы	Спутниковые воздушные (аэрокосмические)			Полевые (наземные)			Аквальные (океанические, морские, речные)			Горные (шахто-рудничные и межскважинные)		Геофизические исследования в скважинах (ГИС) или каротаж		
	Региональные	Разведочные	Инженерные	Региональные	Разведочные	Инженерные	Региональные	Разведочные	Инженерные	Разведочные	Инженерные	Нефтегазовые	Рудные	Инженерные
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Гравиразведка	Спутниковая гравиразведка; аэрогравиразведка; альтиметрия			Гравиметровые съемки			Морская гравиразведка			Подземная гравиразведка		Гравитационный каротаж		
Магнито-разведка	Спутниковая магнито-разведка; аэромагнито-разведка			Магнитные съемки			Гидромагнитные съемки			Подземная магнито-разведка		Ядерно-магнитный;		
				Изучение вариаций	Искус. подмагничивание							Магнитной восприимчивости		
Электро-разведка	Пассивной и активной радиолокации			Магнитотеллурические; естественного переменного электромагнитного поля грозовой природы			Магнитотеллурические			Подземная электроразведка		Электрокаротаж (КС, ПС, БКЗ, ИК)		
	Аэроразведка с помощью длинного кабеля, незаземленной петли на летательном аппарате в низкочастотном гармоническом или переходном режиме													
							Индукционные профилирования в низкочастотном гармоническом или переходном режимах; радиоволновые методы, георадар			Индукционные низкочастотные в гармоническом и переходном режимах		Геоэлектрохимические радиоволновые просвечивания; георадар		Диэлектрический каротаж

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сейсмо-разведка				Изучение упругих полей землетрясений; отраженных, преломленных и рефрагированных, продольных, поперечных и обменных волн, создаваемых взрывным и невзрывными источниками:										
				глубинные сейсмические зондирования и профилирования	общей глубинной точки; сейсмической томографии, сейсмоэлектрические (пьезоэлектрические)	глубинные сейсмические зондирования и профилирования	площадные томографические съемки;	малоглубинная сейсмоакустика	акустической (шумовой) эмиссии горных пород; вертикальное сейсмическое профилирование; акустические просвечивания; сейсмоэлектрические	сейсмоакустические измерения скоростей и затуханий упругих волн	непрерывное сейсмическое профилирование			
Инфракрасные съемки														
Терморазведка	Измерения температур и тепловых потоков:													
				в поисково-разведочных скважинах, шпурах			в донных осадках			в шпурах		в скважинах		
Радиометрия и ядерная геофизика	Аэрогамма - спектрометрические съемки			Гамма- и гамма-спектрометрические:										
				маршрутные или площадные полевые и автомобильные; эманационная съемка; гамма-гамма; нейтронные	донные съемки	измерения в выработках и скважинах								
			мюонный			естественных нейтронов; гамма-гамма; нейтронные								

# 1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ

## 1.1. ЗАДАЧИ, ЭТАПЫ И КОМПЛЕКСЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Геофизические исследования направлены на решение конкретных задач геологии, инженерной геологии, гидрогеологии, горного дела и экологии. Основные объемы геофизических работ проводятся с целью поисков месторождений полезных ископаемых. При этом весь геологоразведочный процесс представляет определенную систему исследований, выработанную несколькими поколениями геологов и геофизиков и включающую конкретные стадии (этапы) от мелкомасштабных (региональных) исследований до крупномасштабных (поисково-разведочных) работ. Ниже приводится схема стадийности геологоразведочного процесса, введенная на территории Российской Федерации распоряжением МПР РФ от 5 июля 1999 г. № 83-р. В зависимости от целей процесс геологического изучения недр подразделяется на 3 этапа и 5 стадий (табл. 2):

Таблица 2

**Схема стадийности геологоразведочного процесса**

Этап I	Работы общегеологического и минерагенического назначения
Стадия 1	<i>Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых</i>
Этап II	Поиски и оценка месторождений
Стадия 2	<i>Поисковые работы</i>
Стадия 3	<i>Оценочные работы</i>
Этап III	Разведка и освоение месторождения
Стадия 4	<i>Разведка месторождения</i>
Стадия 5	<i>Эксплуатационная разведка</i>

Стадийность геологоразведочных работ предусматривает возможность: оптимизации содержания и технологического режима геологоразведочных работ; унификации работ и постадийно создаваемых конечных результатов; оперативного учета и анализа геологической изученности для выбора обоснованных направлений поисковых, оценочных и разведочных работ.

Границы между стадиями условны и определяются масштабами ведущихся работ, рангами изучаемых площадей и требованиями к конечным результатам, завершающим работы каждой стадии. Информация, получаемая на каждой стадии, по полноте и достоверности должна быть достаточна для геологического и технико-экономического обоснования геологоразведочных работ последующих стадий, либо освоения и проектирования разработки месторождения.

Региональное геологическое изучение недр Российской Федерации включает функционально связанный комплекс площадных и профильных работ общегеологического и специального назначения на суше и континентальном шельфе России. Площадные работы проводятся в масштабах: 1:1 500 000 и мельче – сводное и обзорное геологическое картографирование; 1:1 000 000 (1:500 000) – мелкомасштабное геологическое картографирование; 1:200 000 (1:100 000) – среднемасштабное геологическое картографирование; 1:50 000 (1:25 000) – крупномасштабное геологическое картографирование.

Основными видами работ являются ранжированные по масштабам площадные геологические, гидрогеологические, инженерно-геологические съемки (полистные, групповые, комплексные, доизучение ранее заснятых площадей, глубинное геологическое картирование), наземные и аэрогеофизические работы (гравиразведочные, магниторазведочные, электроразведочные, аэрогаммаспектрометрические), а также широкий комплекс специализированных работ: объемное, космофотогеологическое, аэрофотогеологическое, космоструктурное, геолого-минералогическое, геохимическое картирование, тепловые, радиолокационные, многозональные и другие съемки, геолого-экономические, геоэкологические исследования и картографирование, мониторинг геологической среды, прогноз землетрясений, создание государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин, геологическая съемка шельфа, работы в Мировом океане и Антарктике, картосоставительские, картоиздательские и другие работы, их научно-методическое и информационное обеспечение.

Конечный результат этих исследований – сводные и обзорные карты геологического содержания, включая прогнозно-

минерагенические, геологические атласы, геолого-геофизические и другие профили, их цифровые и электронные модели. Среди Государственных карт геологического содержания масштаба 1:1 000 000 важнейшая роль принадлежит комплектам полистной Государственной геологической карты Российской Федерации, включающей в качестве обязательных карту дочетвертичных образований, карту четвертичных образований и карту полезных ископаемых с качественной характеристикой ресурсов.

В состав региональных исследований масштаба 1:200 000 (1:100 000) входят картографические работы, геологическая (ГС), гидрогеологическая, инженерно-геологическая съемки, прогнозно-минерагенические, геолого-экономические и эколого-геологические исследования, геологическое (ГДП), гидрогеологическое (ГГД) доизучение ранее заснятых площадей, объемное (ОГК), глубинное (ГТК) геологическое картирование и другие виды работ. Гидрогеологическая и инженерно-геологическая съемки и гидрогеологическое доизучение ранее заснятых площадей могут комплексироваться с геолого-экологическими и соответствующими видами геологических съемок. Работы этого масштаба проводятся в комплексе с опережающими и сопровождающими аэрокосмическими, геофизическими, геохимическими съемками, геоморфологическими и другими специальными исследованиями, которые в зависимости от степени изученности территории и решаемых задач могут выполняться самостоятельно или в различных сочетаниях.

При этом, полистные и групповые геологические, гидрогеологические съемки, геологические съемки шельфа и другие работы масштаба 1:200 000 проводятся на площадях, ранее не изучавшихся в данном масштабе. В районах, где такие работы проводились, однако имеющиеся карты геологического содержания не отвечают современным требованиям, выполняются геологическое, прогнозно-минерагеническое, гидрогеологическое и другие виды доизучения.

В районах двух- и трехъярусного строения, где объекты изучения, в первую очередь перспективные на обнаружение полезных ископаемых, залегают на значительных, но доступных

для освоения глубинах, проводится объемное, или глубинное, геологическое картирование.

Для хорошо изученных районов, обеспеченных геологическими и другими специализированными картами масштаба 1:50 000, Государственные карты геологического содержания масштаба 1:200 000 составляются преимущественно камеральным путем с минимальным объемом полевых рекогносцировочных и других работ, нацеленных на решение конкретных геологических задач, в том числе задач локального прогноза месторождений полезных ископаемых. В состав комплекта Госгеолкарты-200 в качестве обязательных включаются геологическая карта дочетвертичных образований, карта четвертичных отложений, карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения; в районах двух- и трехъярусного строения – геологическая карта погребенной поверхности.

В результате этих работ выявляются и оконтуриваются прогнозные площади (минерагенические зоны, бассейны, рудные районы и узлы, угленосные площади), дается комплексная оценка или переоценка изученной территории с определением перспектив обнаружения месторождений прогнозируемых геолого-промышленных типов и оценкой прогнозных ресурсов объектов ранга бассейна, рудного района, узла, потенциального месторождения по категориям  $P_3$  и  $P_2$ .

Основной задачей крупномасштабного геологического картографирования является геологическое изучение недр в масштабе 1:50 000 (1:25 000) с целью прогноза и выявления локальных площадей и структур, перспективных для обнаружения месторождений полезных ископаемых, обоснования эколого-геологических и других мероприятий по охране окружающей среды.

В состав работ масштаба 1:50 000 входят геологические (ГС-50, ГДП-50, ГГК-50), гидрогеологические и эколого-геологические съемки, опережающие и сопровождающие их дистанционные и наземные геофизические, геохимические, геоморфологические, прогнозно-минерагенические и другие исследования, которые могут выполняться самостоятельно в порядке специализированного изучения или доизучения ранее заснятых площадей.

При геологосъемочных работах этого масштаба производится изучение участков распространения полезных ископаемых, установление геологической природы выявленных геофизических и геохимических аномалий, выделение новых или уточнение параметров известных рудных полей и других прогнозных площадей и перспективных участков с оценкой прогнозных ресурсов.

Конечным результатом регионального геологического изучения недр масштаба 1:50 000 являются комплект обязательных и специальных геологических карт, комплексная оценка перспектив изученной территории с уточнением прогнозных ресурсов категории  $P_3$ , выделением рудных полей и угленосных площадей, оценкой по ним прогнозных ресурсов категорий  $P_2$ . Даются рекомендации для постановки поисковых работ, а также оценка состояния и прогноз изменений геологической среды.

Поиски и оценка проводятся с целью прогноза, выявления и предварительной оценки месторождений полезных ископаемых, которые по своим геологическим, экологическим условиям и технико-экономическим показателям пригодны для рентабельного освоения.

На стадии поисковых работ объектами исследований являются бассейны, рудные районы, узлы и поля или их части, выявленные в процессе предшествующей стадии регионального геологического изучения недр и прогнозирования полезных ископаемых и по которым имеется оценка прогнозных ресурсов категорий  $P_3$  и  $P_2$ . Поисковые работы могут производиться также на ранее опоскованных площадях, если это обусловлено изменением представлений о геологическом строении и рудоносности перспективных площадей, изменением конъюнктуры минерального сырья, увеличением глубинности исследований или внедрением современных более эффективных технологий поисковых работ и обработки их результатов, а также на площадях распространения техногенных образований, как возможного источника минерального сырья.

В зависимости от сложности геологического строения территории, формационного типа прогнозируемого оруденения и глубинности исследований поиски могут проводиться в масштабах 1:200 000 – 1:10 000. Они включают комплекс геолого-

минералогических, 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 с скважинными геофизическими и геохимическими исследованиями.

По совокупности полученной геологической, геофизической и геохимической информации и ее комплексной интерпретации выделяются перспективные аномалии, участки. Проверка природы геофизических и геохимических аномалий, вскрытие, опробование и изучение проявлений тел полезных ископаемых осуществляется поверхностными горными выработками и поисковыми скважинами.

Основным результатом поисковых работ является геологически обоснованная оценка перспектив исследованных площадей. На выявленных проявлениях полезных ископаемых оцениваются прогнозные ресурсы категорий  $P_2$  и  $P_1$ . По материалам поисковых работ составляются геологические карты опосредованных участков в соответствующем масштабе и разрезы к ним, карты результатов геофизических и геохимических исследований, отражающие геологическое строение и закономерности размещения продуктивных структурно-вещественных комплексов. Выявленные и положительно оцененные проявления включаются в фонд объектов, подготовленных для постановки оценочных работ и выдачи соответствующих лицензий.

Оценочные работы проводятся 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 масштаба 1:25 000–1:10 000 для крупных и масштаба 1:5 000–1:1 000 для сложных и небольших месторождений. Геологическая съемка сопровождается детальными минералогическими, петрографическими, геофизическими и геохимическими исследованиями. Изучение рудовмещающих структурно-вещественных комплексов, вскрытие и прослеживание тел полезных ископаемых осуществляется с поверхности канавами, шурфами, поисково-картировочными скважинами.

Изучение на глубину осуществляется 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.

В скважинах и горных выработках осуществляется комплекс геофизических, 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.

В результате оценочных работ степень геологической изученности месторождения, качества, вещественного состава и технологических свойств полезных ископаемых, а также горно-геологических условий эксплуатации, должна обеспечить оценку промышленного значения месторождения с подсчетом всех или большей части запасов по категории  $C_2$ . По менее детально изученной части месторождения оцениваются количественно и качественно прогнозные ресурсы категории  $P_1$  с указанием границ, в которых проведена их оценка. Геолого-экономическая оценка объектов является обязательной частью комплекса работ и осуществляется систематически в процессе проведения работ и по их завершении.

После завершения стадии оценочных работ разрабатываются кондиции и составляется технико-экономический доклад (ТЭД), в котором дается экономически обоснованная предварительная оценка промышленной ценности месторождения, определяется целесообразность передачи объекта в разведку и освоение. По результатам оценочных работ производится подготовка пакета геологической информации для проведения конкурса или аукциона на предоставление лицензии на разведку и добычу полезных ископаемых.

Объектом геологического изучения при *разведке месторождения* является закрепленная лицензией в виде горного отвода часть недр, включающая полностью или частично место-

рождение полезных ископаемых. При разведочных работах завершается изучение геологического строения месторождения с поверхности с составлением на инструментальной основе геологической карты. В зависимости от промышленного типа месторождения, его размеров, сложности строения, характера распределения и степени изменчивости тел полезных ископаемых геологическая съемка проводится в масштабе 1:10 000–1:1 000 с применением комплекса геофизических и геохимических методов исследований. Приповерхностные части месторождения вскрываются горными выработками (канавы, траншей, шурфы) и мелкими скважинами. Разведка месторождений на глубину проводится скважинами до горизонтов, разработка которых экономически целесообразна.

На данной стадии выполняются работы по изучению и оценке запасов полезных ископаемых, залегающих совместно с основными, дается оценка возможных источников хозяйственно-питьевого и технического водоснабжения, производятся работы по выявлению местных строительных материалов. Разрабатываются схемы размещения объектов промышленного и гражданского назначения и природоохранные мероприятия.

По результатам разведочных работ разрабатывается технико-экономическое обоснование (ТЭО) постоянных разведочных кондиций, производится подсчет запасов основных и попутных полезных ископаемых и компонентов по категориям в соответствии с группировкой месторождений по сложности строения, дается детальная экономическая оценка промышленной ценности месторождения.

Технико-экономическое обоснование освоения месторождения, материалы подсчета запасов и результаты геолого-экономической оценки, включая обоснование постоянных разведочных кондиций, подлежат государственной геологической, экономической и экологической экспертизе.

Эксплуатационная разведка проводится в течение всего периода освоения месторождения с целью получения достоверных исходных данных для безопасного ведения работ, оперативного планирования горно-подготовительных, нарезных и очистных работ, и обеспечения наиболее полного извлечения из недр запасов основных и совместно с ними залегающих полез-

ных ископаемых и попутных компонентов. Объектами изучения и оценки являются эксплуатационные этажи, блоки, уступы и другие участки месторождения в зависимости от принятой системы вскрытия, подготовки и отработки месторождений.

Основными задачами эксплуатационной разведки являются уточнение контуров, вещественного состава и внутреннего строения тел полезного ископаемого, количества и качества запасов по технологическим типам и сортам руд с их геометризацией, уточнение гидрогеологических, горнотехнических и инженерно-геологических условий отработки по отдельным участкам, горизонтам, блокам.

По результатам эксплуатационной разведки производится уточнение схем подготовки и отработки тел полезного ископаемого, подсчитываются запасы подготовленных к отработке блоков и запасы, готовые к выемке. В состав работ стадии входят проходка специальных разведочных выработок, бурение скважин, шпуров, опробование различными методами, геофизические исследования. Продолжается изучение геологического строения месторождения с целью выявления и оконтуривания новых залежей и тел полезных ископаемых на флангах, глубоких горизонтах с переводом запасов категории  $C_2$  в  $C_1$ , В, А.

На протяжении всего этапа разведки и освоения месторождения ведется учет движения разведанных запасов по рудным телам, блокам и месторождению в целом с оценкой изменений запасов в результате их прироста, погашения, пересчета, переоценки или списания с баланса горного предприятия. Информация по движению запасов, добыче, потерях и обеспеченности предприятия разведанными запасами передаются в установленном порядке в федеральный и территориальный фонды геологической информации.

В сжатом виде современные представления об объектах, целях и конечных результатах для всех стадий геологоразведочных работ приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Этапы и стадии геологоразведочных работ  
на твердые полезные ископаемые**

Этап, стадия	Объект изучения	Цель работ	Основной конечный результат
1	2	3	4
<p>Этап 1. Работы общегеологического и минерагенического назначения.</p> <p><i>Стадия 1. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых</i></p>	<p>Территория РФ, ее крупные геологоструктурные, административные, экономические, горнорудные и нефтегазоносные регионы, шельф и исключительная экономическая зона, глубинные части земной коры, районы с напряженной экологической обстановкой, районы интенсивного промышленного и гражданского строительства, мелиоративных и природоохранных работ и др.</p>	<p>Создание фундаментальной многоцелевой геологической основы прогнозирования полезных ископаемых, обеспечение различных отраслей промышленности и сельского хозяйства систематизированной геологической информацией для решения вопросов в области геологоразведочных работ, горного дела, мелиорации, строительства, обороны, экологии и т.п.</p>	<p>Комплекты обязательных и специальных геологических карт различного назначения масштабов 1:1000000, 1:200000 и 1:50000; сводные и обзорные карты геологического содержания масштабов 1:1500000 и мельче, комплект карт, схем и разрезов глубинного строения недр Российской Федерации и ее регионов; комплексная оценка минерагенического потенциала изученных территорий с выделением перспективных рудных районов и узлов, зон, угленосных бассейнов; определение прогнозных ресурсов категорий <math>P_3</math> и <math>P_2</math>; оценка состояния геологической среды и прогноз ее изменения</p>

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
<p>Этап II. Поиски и оценка месторождений.</p> <p><i>Стадия 2. Поисковые работы</i></p>	<p>Бассейны, рудные районы, узлы и поля с оцененными прогнозными ресурсами категорий P<sub>3</sub> и P<sub>2</sub></p>	<p>Геологическое изучение территории поисков; выявление проявлений и месторождений полезных ископаемых: определение целесообразности их дальнейшего изучения</p>	<p>Комплексная оценка геологического строения и перспектив исследованных площадей, выявленные проявления и месторождения полезных ископаемых с оценкой их прогнозных ресурсов по категориям P<sub>2</sub> и P<sub>1</sub>; оценка возможности их освоения на основе укрупненных показателей; обоснование целесообразности и очередности дальнейших работ</p>
<p><i>Стадия 3. Оценочные работы</i></p>	<p>Проявления и месторождения полезных ископаемых с оцененными прогнозными ресурсами категорий P<sub>2</sub> и P<sub>1</sub></p>	<p>Геологическое изучение и геолого-экономическая оценка проявлений и месторождений; отбраковка проявлений, не представляющих промышленной ценности</p>	<p>Месторождения полезных ископаемых с оценкой их запасов по категориям C<sub>2</sub> и C<sub>1</sub>, а по менее изученным участкам – прогнозных ресурсов категории P<sub>1</sub>; технико-экономическое обоснование временных кондиций и промышленной ценности месторождения</p>

Продолжение таблицы 3

1	2	3	4
<p>Этап III. Разведка и освоение месторождений. <i>Стадия 4. Разведка месторождения</i></p>	<p>Месторождения полезного ископаемого с оцененными запасами по категориям C<sub>2</sub> и C<sub>1</sub> и прогнозными ресурсами категории P<sub>1</sub></p>	<p>Изучение геологического строения, технологических свойств полезного ископаемого, гидрогеологических, инженерно-геологических условий отработки месторождения; технико-экономическое обоснование промышленной ценности и освоения месторождения; уточнение геологического строения месторождения в процессе освоения на недостаточно изученных участках (фланги, глубокие горизонты) с переводом запасов из низших в более высокие категории</p>	<p>Геологические, гидрогеологические, горногеологические, технологические и другие данные, необходимые для составления технико-экономического обоснования постоянных кондиций и освоения месторождения; подсчитанные запасы по категориям A, B, C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub></p>
<p><i>Стадия 5. Эксплуатационная разведка</i></p>	<p>Эксплуатационные этажи, горизонты, блоки, уступы, подготавливаемые для очистных работ</p>	<p>Уточнение полученных при разведке данных для оперативного планирования добычи, контроль за полнотой и качеством отработки запасов</p>	<p>Запасы подготовленных и готовых к выемке блоков; исходные материалы для оценки полноты отработки месторождения, уточнение потерь и разубоживания полезного ископаемого</p>

Отличие стадийности геологоразведочного процесса на нефть и газ от приведенной схемы обусловлено большими глубинами залегания залежей углеводородов (до 7 км), наличием, как правило, мощного осадочного чехла и более крупными размерами месторождений. При этом стадийность включает три этапа: региональный, поисково-оценочный и разведочный (табл. 4).

Региональный этап изучения недр предшествует поисково-оценочному этапу и проводится до тех пор, пока существуют благоприятные предпосылки для обнаружения новых перспективных комплексов на неосвоенных глубинах и зон нефтегазонакопления в слабоизученных районах. В пределах нефтегазоносных районов региональные работы могут проводиться одновременно с поисково-оценочными и разведочными работами. В соответствии с задачами региональный этап разделяют на две стадии: прогноза нефтегазоносности и оценки зон нефтегазонакопления.

Поисково-оценочный этап обеспечивает выявление и подготовку нефтегазоперспективных объектов к поисковому бурению и непосредственно поиски залежей. Комплексные геофизические работы сосредоточены на выявлении нефтегазоперспективных объектов, представленных антиклинальными структурами 3-го и 4-го порядков, а также литолого-стратиграфическими, тектоническими и другими ловушками. Поисково-оценочный этап разделяется на следующие стадии: выявления объектов поискового бурения, подготовки объектов к поисковому бурению, поиска и оценки месторождений (залежей).

Разведочный этап в нефтегазоносных регионах не имеет подразделений в отличие от разведки твердых полезных ископаемых. Основной задачей этого этапа является установление продуктивной части разреза с выделением отдельных нефтегазоносных пластов, их опробованием и оценкой запасов по категориям.

На различных стадиях геологоразведочных работ используются следующие виды геофизических комплексов:

- Типовой комплекс, создаваемый для достаточно обобщенных и в то же время наиболее типичных геологических и геоморфо-

логических условий проведения работ. Типовой комплекс может содержать избыточное число геофизических методов, поскольку в него включают все методы, в той или иной мере способствующие решению поставленной задачи.

- Рациональный комплекс, представляющий геологически и экономически обоснованное сочетание геофизических методов и сопровождающих их геологических и геохимических видов исследований с целью эффективного решения поставленной задачи. Особенностью рационального комплекса является его привязка к определенным, а не к типовым, геологическим, геоморфологическим и геолого-экономическим условиям конкретного объекта. Рациональный комплекс создается на основе типового комплекса при наличии достаточного объема априорной информации, позволяющей оценить информативность отдельных методов и их различных сочетаний;
- Оптимальный комплекс, создаваемый на основе использования того или иного критерия оптимальности. Выбор оптимального комплекса может быть реализован лишь в хорошо изученных регионах и при наличии достаточного статистического материала по выявлению ложных аномалий и связанных с ними экономических затрат.

Кроме указанных видов геофизического комплекса употребляются следующие понятия:

- внутриметодное комплексирование, при котором для решения задачи используются различные модификации одного геофизического метода, например электропрофилирование и электромагнитное зондирование; комплекс методов отраженных и преломленных волн в сейсморазведке и т.д.;
- внешнее комплексирование, представляющее сочетание геофизических методов с геохимическими и горно-геологическими исследованиями [1];
- технологический комплекс, которым является сочетание геофизических методов, объединенных единой технологией проведения работ по месту и по уровню наблюдений; в качестве технологических комплексов выступают: *спутниковая геофизика, аэрогеофизика, геофизические исследования скважин (каротаж); морская геофизика и т.п.*

Следует отметить возможность *изменения геофизических комплексов в пространстве*, что отражает факт изменения физических полей на площадях с неодинаковым геологическим строением, хотя при этом может решаться одна и та же задача на одной и той же стадии работ.

*Изменение геофизических комплексов во времени* связано со стадийностью геологоразведочного процесса, т.е. с последовательным повышением детальности исследований в пределах одних и тех же площадей. Смена геологических задач на одних и тех же площадях вызывает необходимость изменения комплекса методов.

Изменение геофизического комплекса может быть также обусловлено научно-техническим прогрессом, т.е. разработкой принципиально новых методов и модификаций исследований, основанных на регистрации объективно существующих в природе, но ранее не использованных физических полей, а также с созданием новых технологий. Примерами являются *комбинированная сейсморазведка*, сочетающая метод отраженных волн в модификации общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) и корреляционный метод преломленных волн с глубинным сейсмическим зондированием (КМПВ-ГСЗ) при изучении глубинного строения земной коры; *сейсмостратиграфия* для детального изучения осадочных толщ по комплексу данных сейсморазведки и геофизических исследований скважин; *экологическая геофизика* для изучения состояния и динамики взаимоотношений человека и биоты ("живого вещества") с верхней частью литосферы.

Таблица 4

**Схема стадийности геологоразведочных работ на нефть и газ**

Этап	Стадия	Объекты изучения	Основные задачи	Итоговая оценка ресурсов
1	2	3	4	5
Региональный	Прогноза нефтегазоносности	Осадочные бассейны и их части	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выявление литолого-стратиграфических комплексов, структурных этажей, ярусов и структурно-фациальных зон, определение характера основных этапов геотектонического развития, тектоническое районирование.</li> <li>2. Выделение нефтегазоперспективных комплексов (резервуаров) и зон возможного нефтегазоаккумуляции, нефтегазогеологического районирование.</li> <li>3. Качественная и количественная оценка перспектив нефтегазоносности.</li> <li>4. Выбор основных направлений и первоочередных объектов дальнейших исследований.</li> </ol>	Прогнозные ресурсы $D_2$ и частично $D_1$
	Оценки нефтегазоаккумуляции	Нефтегазоперспективные зоны и зоны нефтегазоаккумуляции	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выявление субрегиональных и зональных структурных соотношений между различными нефтегазоперспективными и литолого-стратиграфическими комплексами, основных закономерностей распространения свойств пород коллекторов и флюидоупоров и изменения их свойств.</li> <li>2. Уточнение нефтегазогеологического районирования.</li> <li>3. Количественная оценка перспектив нефтегазоносности.</li> <li>4. Выбор районов и установление очередности проведения на них поисковых работ.</li> </ol>	Прогнозные ресурсы $D_1$ и частично $D_2$

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
Поисково - оценочный	Выявления объектов поискового бурения	Районы с установленной или возможной нефтегазоносностью	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выявление условий залегания и других геолого-геофизических свойств нефтегазоносных и нефтегазоперспективных комплексов.</li> <li>2. Выявление перспективных ловушек.</li> <li>3. Количественная оценка прогнозных локализованных ресурсов.</li> <li>4. Выбор объектов для детализационных работ.</li> </ol>	Прогнозные локализованные ресурсы Д <sub>1</sub>
	Подготовки объектов к поисковому бурению	Выявленные ловушки	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Детализация выявленных перспективных ловушек, позволяющая прогнозировать пространственное положение залежей.</li> <li>2. Количественная оценка перспективных ресурсов на объектах, подготовленных к поисковому бурению.</li> <li>3. Выбор объектов и определение очередности их ввода в поисковое бурение.</li> </ol>	Перспективные ресурсы С <sub>3</sub>

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4	5
	Поиска и оценки месторождений (залежей)	Подготовленные ловушки, открытые месторождения (залежи)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Выявление в разрезе нефтегазоносных и перспективных горизонтов коллекторов и покрышек и определение их геолого-геофизических свойств (параметров).</li> <li>2. Выделение, опробование и испытание нефтегазоперспективных пластов и горизонтов, получение промышленных притоков нефти и газа и установление свойств флюидов и фильтрационно-емкостных характеристик.</li> <li>3. Открытие месторождения и постановка запасов на государственный баланс.</li> <li>4. Выбор объектов для проведения оценочных работ.</li> <li>5. Установление основных характеристик месторождений (залежей).</li> <li>6. Оценка запасов месторождений (залежей).</li> <li>7. Выбор объектов разведки.</li> </ol>	Предварительно оцененные запасы $C_2$ и частично разведанные запасы $C_1$
Разведочный	Разведки и пробной эксплуатации	Промышленные месторождения (залежи)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Уточнение геологического строения и запасов залежей.</li> <li>2. Пробная эксплуатация для получения данных и параметров для составления технологической схемы разработки месторождений.</li> <li>3. Перевод запасов категории <math>C_2</math> в категорию <math>C_1</math>.</li> </ol>	Разведанные запасы $C_1$ и частично предварительно оцененные запасы $C_2$

## 1.2. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### *1.2.1. Построение петрофизических моделей*

Петрофизическая модель (ПФМ) – модель, характеризующая распределение физических свойств геологических объектов в плане, разрезе, пространстве. Выделяют петромагнитные, петроплотностные, петроэлектрические, радиоактивные, тепловые, сейсмические модели. Информация о ПФМ используется на всех стадиях геологоразведочного процесса, вплоть до подсчета запасов минерального сырья при разведке и эксплуатации месторождений.

Оценка физических свойств горных пород и установление связей между ними необходимы для определения возможностей применимости любого геофизического метода. Понятие о заметной дифференциации физических свойств применительно к различным методам и геологическим задачам существенно меняется. Так, для применения гравиразведки при поисках большинства рудных месторождений достаточно различия плотностей вмещающих пород и руд на  $0,3-0,4 \text{ г/см}^3$ , а при решении структурно-картировочных задач всего на  $0,1 \text{ г/см}^3$ . Для применимости магниторазведки и электроразведки необходимо, чтобы магнитная восприимчивость и сопротивление вмещающих пород и руд различались в несколько раз, в частности, для индуктивной электроразведки отношение сопротивлений пород и руд должно составлять около 100.

На значения физических свойств значительное влияние оказывают эндогенные и экзогенные процессы. При поисках рудных месторождений особое значение приобретает изучение влияния гидротермально-метасоматических процессов на изменение физических свойств. Гипергенные процессы (в первую очередь – механическое и химическое выветривание), главным образом в результате действия поверхностных вод, вызывают существенное изменение состава пород и их физических свойств. Воздействие этих процессов приводит к понижению намагниченности, плотности, удельного электрического сопротивления и скорости упругих волн, к изменению естественной радиоактивности.

С точки зрения петрофизики, каждая горная порода – это сложное вещество трехфазового состава, т.е. состоящее из твердой (один или несколько минералов), жидкой (вода, нефть, нефтепродукты) и газообразной (воздух, горючие газы) фаз. Физические свойства горных пород определяются прежде всего свойствами самих фаз, их количественным соотношением в породе и взаимодействием [35]. Одна из возможных петрофизических классификаций дана в табл. 5.

Таблица 5

**Наиболее часто встречающиеся значения физических свойств горных пород**

Породы	Плотность $\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	Пористость $n$ , %	Скорости упругих волн			Магнитная восприимчивость $\chi$ , 10 <sup>-5</sup> ед. СИ	Удельное электрич. сопротивление $\rho$ , Ом·м
			$V_p$ , км/с		$V_s$ , км/с		
			газо-нас.	водо-нас.			
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>МАГМАТИЧЕСКИЕ</b>							
<i>пироксенит, перидотит, дунит</i>	3,2-3,3	0,1-0,5	7,5	8,5	4,5	1000-25000	10 <sup>5</sup> -10 <sup>8</sup>
<i>габбро</i>	2,9-	0,01-1	6,0	6,6	3,8	300-15000	10 <sup>4</sup> -10 <sup>7</sup>
<i>диорит</i>	2,7-	0,01-1	5,6	6,3	3,5	1000-70000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>7</sup>
<i>гранодиорит</i>	2,7	0,2-5	4,6	6,0	3,3	100-45000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>
<i>гранит</i>	2,6	0,1-3	3,0	5,5	2,8	50-40000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>
<i>диабаз</i>	2,9	0,1-5	3,5	6,5	3,5	500-150000	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>
<i>базальт</i>	2,5	3-6	3,0	5,5	3,0	100-150000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>7</sup>
<b>МЕТАМОРФИЧЕСКИЕ</b>							
<i>гнейсы</i>	2,7	0,01-1	3,8	5,6	3,2	100-20000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>
<i>сланцы</i>	2,6	0,01-1	3,5	4,8	3,0	50-3000	10 <sup>3</sup> -10 <sup>5</sup>
<b>ОСАДОЧНЫЕ</b>							
<i>известняк</i>	2,6	2-25	2	6	3	50-2500	10 <sup>2</sup> -10 <sup>5</sup>
<i>доломит</i>	2,7	2-17	1	5,5	2,5	50-800	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>
<i>мергель</i>	2,4	5-35	1,5	4,5	2	10-1000	10-10 <sup>3</sup>
<i>песчаники</i>	2,5	2-35	1	4,5	1	50-5000	100-10 <sup>4</sup>
<i>гравийно-галечные смеси</i>	3	2-20	0,8	2,5	0,5	50-5000	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>
<i>пески</i>	1,3-2	2-40	0,5	2	0,2	50-2500	10-10 <sup>4</sup>
<i>глина, аргиллит</i>	1,2-2,4	2-40	1,5	2,5	0,4	10-3000	1-100

В табл. 5 приведены часто встречающиеся (типичные) значения некоторых физических свойств горных пород: плотностных (плотности и пористости), упругих (скорости продольных и поперечных сейсмических волн), магнитных (магнитная восприимчивость), электрических (удельное электрическое сопротивление), изучаемых как в петрофизике, так и в теории соответствующих геофизических методов.

У магматических и метаморфических горных пород плотность определяется в основном их минеральным составом и увеличивается при переходе от пород кислых к основным и ультраосновным в соответствии с увеличением количества железосодержащих минералов (рис. 1.1).

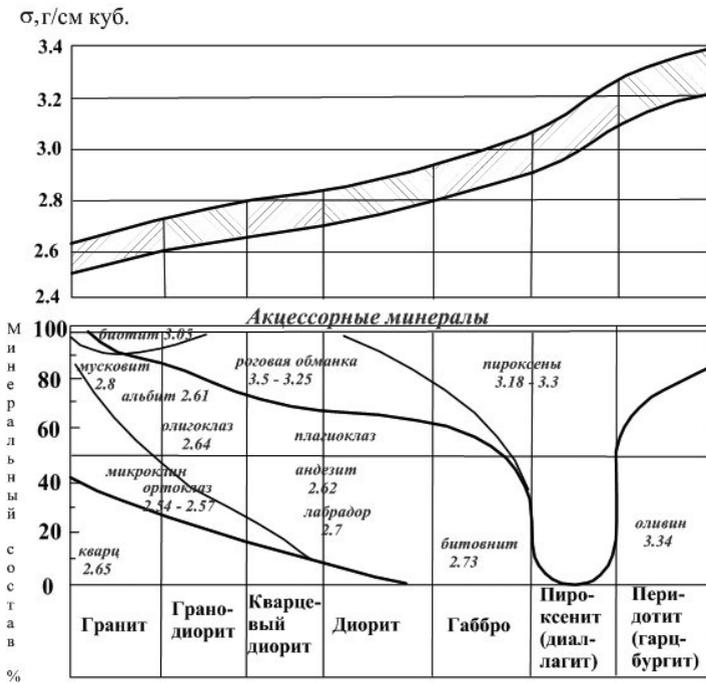


Рис. 1.1. Пределы изменения плотности и схема минерального состава интрузивных пород (по книге "Физические свойства горных пород и полезных ископаемых", 1984 г.).

Примечание: цифрами указаны плотности минералов в г/см<sup>3</sup>

Для осадочных пород плотность зависит в основном от пористости и водонасыщенности (рис. 1.2).

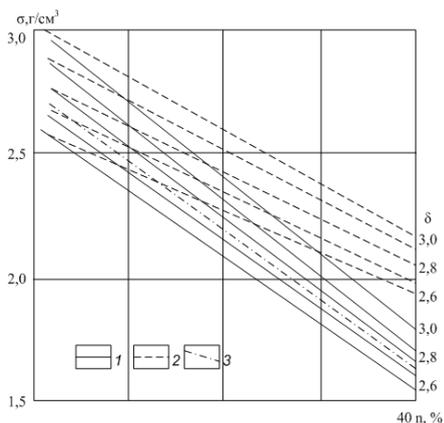


Рис. 1.2. Графики зависимости плотности  $\sigma$  от пористости  $n$  газонасыщенных (1) и водонасыщенных (2 и 3) осадочных горных пород при разной минеральной плотности скелета ( $\delta$ ): 1 и 2 — расчетные данные Озерской М.Л., 3 — экспериментальные данные Юдборовского М.Х. для песчано-глинистых пород

Основным магнитным параметром горных пород является магнитная восприимчивость  $\chi$  (каппа), представляющая собой коэффициент пропорциональности между интенсивностью намагничивания  $J_i$  и напряженностью намагничивающего геомагнитного поля  $T_0$ , т. е.  $J_i = \chi T_0$ . За единицу  $\chi$  принимается  $10^{-5}$  ед. СИ. Большинство горных пород относятся к парамагнетикам: намагниченность этих пород направлена по вектору напряженности геомагнитного поля в месте, где порода залегает, а  $\chi$  меняется от единицы до 100 000 единиц  $10^{-5}$  СИ. У ферромагнитных пород и руд намагниченность зависит от наличия и количества железосодержащих и некоторых других минералов-ферромагнетиков при значениях  $\chi$  до единицы СИ. В целом интервал изменения  $\chi$  у горных пород достаточно широк и зависит от их минерального состава, глубин залегания и множества других факторов [35]. Среди магматических пород наиболее высокие и устойчивые значения  $\chi$  отмечаются у ультраосновных и основных пород, несколько меньшие — у кислых, эффузивных и метаморфических (рис. 1.3). Осадочные породы, за исключением некоторых разновидностей песчаников и глин, практически не магнитные.

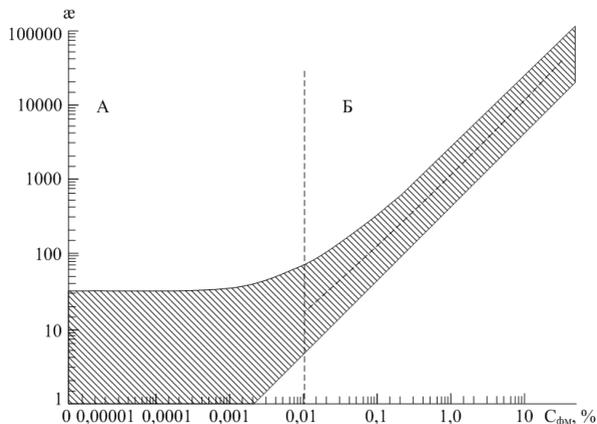


Рис. 1.3. Диаграмма зависимости магнитной восприимчивости от содержания ферромагнитной фракции в интрузивных породах по экспериментальным данным (Н. Б. Дортман, В. В. Ляхович) и теоретическим расчетам (А. К. Вейнберг):  
*A* – класс ферро-парамагнитных пород;  
*B* – класс ферромагнитных пород

В процессе серпентинизации горных пород основного состава происходят заметные изменения их плотности и намагниченности (рис. 1.4).

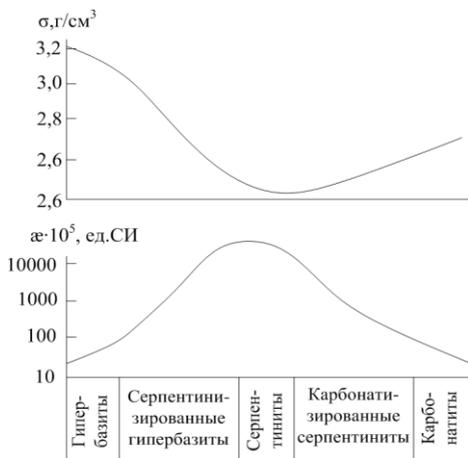


Рис. 1.4. Изменения плотности  $\sigma$  и магнитной восприимчивости  $\chi$  гипербазитов в процессе их серпентинизации и карбонатизации

Большинство методов электроразведки основаны на определении удельного электрического сопротивления (УЭС или  $\rho$ ), измеряемого в Омм, или обратного ему параметра ( $\gamma = 1/\rho$ ) – электропроводности, измеряемой в сименсах (См). В практике электроразведки  $\rho$  часто оценивают по кажущемуся сопротивлению (КС или  $\rho_k$ ), являющемуся сложной функцией параметров геологического разреза. По электрическому сопротивлению все горные породы и руды делятся на породы – проводники I рода с высокой электронной проводимостью за счет электропроводящих минералов (самородные металлы, многие окислы, сульфиды, графит) и породы – проводники II рода с ионной проводимостью, в которых порообразующие минералы (полевые шпаты, алюмосиликаты, слюды и многие другие) практически являются изоляторами, а ток проводится ионами заполняющего поры флюида. Проводниками II рода являются все породы (табл. 4): магматические, метаморфические (УЭС  $10^3 - 10^7$  Омм), скальные, осадочные ( $10 - 10^5$  Омм), песчано-обломочные ( $10 - 10^4$  Омм), глинистые ( $1 - 100$  Омм). Большие интервалы изменения УЭС горных пород обусловлены литологией, разными величинами пористости, водонасыщенности, минерализации подземных вод, температуры и других факторов [35].

Физическим свойством, на котором основываются сейсмоакустические методы, является упругость горных пород, выражающаяся через скорости распространения продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) волн, аналитически связанные с модулем Юнга ( $E$ ), коэффициентом Пуассона ( $\nu$ ) и плотностью горных пород ( $\sigma$ ):

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\sigma(1+\nu)}},$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\sigma(1+\nu)}}.$$

Для осадочных пород определяющими факторами, изменяющими скорости упругих волн в широких пределах, являются соотношения твердой, жидкой и газообразной фаз, что зависит от их пустотности и водонасыщенности. Связь скоростей упру-

гих волн с литологией более сложная и часто неоднозначная. В целом для осадочных пород  $V_p$  меняется от 0,5 до 6 км/с, а  $V_s$  – от 0,2 до 3 км/с. Отношение  $V_s/V_p$  меняется от 0,1 у песков до 0,6 у глин и известняков.

Связи родственных геолого-гидрогеологических свойств горных пород (физико-механических, деформационно-прочностных, фильтрационно-емкостных) иногда можно выразить в аналитическом виде. Однако чаще они являются корреляционно-статистическими. Иногда они обобщены в виде достаточно стабильных эмпирических формул. Самый надежный способ установления межпараметрических связей – это постановка геолого-геофизических работ на ключевых участках изучаемого района. В этом случае в результате статистической обработки материалов можно получить уравнения регрессии для парной или множественной корреляции между разными геолого-гидрогеологическими и геофизическими параметрами.

Особый практический интерес представляют определения геолого-гидрогеологических свойств полевыми геофизическими методами. Задачи оценки свойств пород-коллекторов по результатам геофизических исследований к настоящему времени вполне удовлетворительно решены по отношению к так называемым статическим свойствам – пористости и начальной нефтенасыщенности. По промыслово-геофизической информации достаточно уверенно оцениваются также глинистость коллектора и его относительное удельное электрическое сопротивление (отношение удельного сопротивления породы  $\rho_n$  к удельному сопротивлению пластовой воды  $\rho_v$ , по В.Н. Дахнову – параметр влажности), т.е. показатели, к которым нередко обращаются различные методики использования данных ГИС для оценки динамических свойств – проницаемости пород-коллекторов и коэффициентов вытеснения, характеризующих эти породы.

Для определения проницаемости  $K_{np}$  по данным ГИС чаще всего используют парные связи проницаемости с пористостью ( $K_n$ ), параметром насыщения ( $P_n$ ), глинистостью, параметром самопроизвольной поляризации ( $\alpha_{nc}$ ), относительным удельным сопротивлением ( $\rho_n/\rho_v$ ). Б.Ю. Вендельштейн, Л.В. Сиротенко и другие исследователи показали, что для повышения точности

получаемых оценок проницаемости нужно пользоваться многомерными зависимостями. В идеале каждая из таких зависимостей должна относиться к конкретному пласту конкретного месторождения или даже к отдельному участку такого пласта.

Задача оценки проницаемости по данным ГИС решалась Г.П. Хижняком для терригенных отложений визейского яруса Пермского Прикамья с применением уравнений множественной регрессии, учитывающих информацию о пористости  $K_n$ , относительной глинистости ( $\eta_{zл}$ ), относительном удельном сопротивлении  $\rho_n/\rho_6$ , т.е. о тех параметрах, которые определяются не только при лабораторном исследовании керна, но и по общепринятым отраслевым методикам обработки материалов ГИС. Установлено, что уравнения приемлемой точности действительно можно найти, если с многомерными уравнениями регрессии оценивать параметры определенных пластов конкретных месторождений. Например, получены следующие зависимости: для Уньвинского месторождения  $Lg K_{np} = 3,0650 Lg K_n - 1,9514 Lg \eta_{zл} + 0,5448 Lg (\rho_n/\rho_6) - 4,8725$ ; для Кокуйского месторождения  $Lg K_{np} = 0,0061 K_n - 2,2390 Lg \eta_{zл} + 0,7562 Lg (\rho_n/\rho_6) - 2,1399$ ; для Ножовского месторождения  $Lg K_{np} = 0,0684 K_n - 0,7901 \eta_{zл} + 0,7992 Lg (\rho_n/\rho_6) - 1,2060$ .

Петрофизические карты или карты физических свойств пород (петроплотностная, петромагнитная, петроэлектрическая, петроскоростная и др.), полученные по данным лабораторных измерений на образцах, являются фактической основой для петрографического (литологического) картирования изучаемой площади. Масштабы карт определяются густотой точек наблюдения (средние расстояния между точками должны быть не больше 1 см в масштабе карты).

Рекомендуется группировать физические свойства по интервалам их изменения. Один или несколько интервалов группирования физических свойств, соответствующие определенным литологическим или стратиграфическим образованиям на геологической карте, заштриховываются или закрашиваются в соответствии с правилами оформления геологических карт. При достаточном количестве и качестве геологических данных, в том числе петрографических определений образцов, ведется

петрографическое (литологическое) группирование пород по физическим свойствам. Основную информацию о физических свойствах горных пород и руд дает опробование, которое проводится как в лабораторных условиях на предварительно отобранных образцах, так и в естественном залегании пород на обнажениях, в горных выработках и в скважинах.

Лабораторные измерения физических свойств проводятся в больших объемах, хотя не всегда обеспечивают полноценную информацию, поскольку свойства отобранных образцов могут отличаться от свойств пород в естественном залегании (*in situ*). Образец может быть недостаточно представительным, отражая лишь частную вариацию свойств породы и не оценивая истинные значения физического параметра для массива пород в целом.

Изменчивость физических свойств пород и руд влечет за собой широкое использование статистических приемов обработки с целью:

- компактного представления данных о физических свойствах;
- выявления в общей совокупности самостоятельных групп, в частности структурно-вещественных комплексов;
- установления корреляционных зависимостей между различными физическими свойствами.

Структурно-вещественный комплекс (СВК) – это совокупность квазиоднородных на данном уровне исследований геологических образований, которые в физическом поле выделяются как единый возмущающий объект, т.е. объединенные по одному и нескольким физическим свойствам геологические образования. В рудной геофизике СВК подразделяют на рудоконтролирующие, рудовмещающие и рудные.

Для компактного представления данных измерений физических свойств строятся *гистограммы и графики накопленных частностей (частот)*. Для этого желательно иметь не менее 40 – 50 определений по каждому типу пород. Группирование пород по физическим свойствам производится с учетом геологических факторов, петрографической характеристики и возраста. Группы петрофизически однородных пород в одних случаях могут сов-

падать с петрографическими типами, а в других объединять несколько типов.

Распределение физических параметров часто подчиняется либо *нормальному* закону (для плотности и скорости упругих волн), либо *логнормальному* (для магнитной восприимчивости и удельного электрического сопротивления) закону. Если вариационные кривые (или гистограммы) для пород разных типов перекрываются между собой, возникает задача оценки надежности их разделения по физическим свойствам и аномалиям соответствующих геофизических полей. По площади перекрытия вариационных кривых (или гистограмм)  $S_{пер}$  находится вероятность ошибки разделения пород  $q = S_{пер} / (S_1 + S_2)$ , где  $S_1$  и  $S_2$  – площади под вариационными кривыми сравниваемых типов пород. Надежность разделения пород двух типов  $\lambda_0 = 1 - q$  (рис. 1.5).

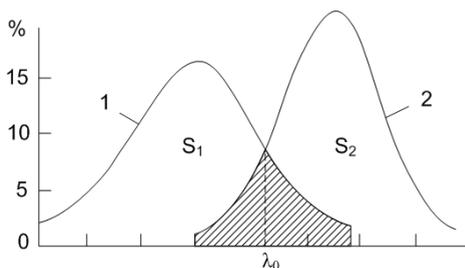


Рис. 1.5. Иллюстрация графического способа определения надежности  $\lambda_0$  разделения горных пород двух типов 1 и 2 с использованием вариационных кривых ( $S_{пер}$  – заштрихована)

Параметрические измерения физических свойств в естественном залегании обладают рядом преимуществ, в частности большей (по сравнению с лабораторными) представительностью получаемых результатов. Рассмотрим основные виды параметрических измерений.

Намагниченность может быть найдена по результатам измерений аномального поля  $Z_a$ , когда размеры тела по трем координатным осям существенно больше расстояния от верхней поверхности намагниченного тела до плоскости измерений. В этом случае вертикальная составляющая вектора намагниченности  $J = Z_a / 2\pi$ , что используется для приближенной оценки намагниченности отдельных геологических объектов, выходящих на земную поверхность. При скважинных измерениях приращение

величины намагниченности в случае пересечения контактов магнитных пород может быть вычислено по формуле  $\Delta = \frac{1}{4\pi} \sin \alpha$ , где  $\Delta T$  – разность модуля полного вектора напряженности магнитного поля на контакте магнитных пород,  $\alpha$  – угол между границей раздела пород и осью скважины. Для изучения  $\chi$  в скважинах, горных выработках и на обнажениях применяются измерители магнитной восприимчивости.

**Плотность.** Этот параметр может быть определен разными способами. Так, для оценки плотности  $\sigma$  промежуточного слоя по гравиметрическим данным используется *графический способ Неттлетона*. На рис. 1.6 приведен пример использования способа Неттлетона: над возвышенной формой рельефа высотой около 200 м располагаются графики аномальных значений силы тяжести, вычисленные для различных значений плотности с интервалом  $0,1 \text{ г/см}^3$ .

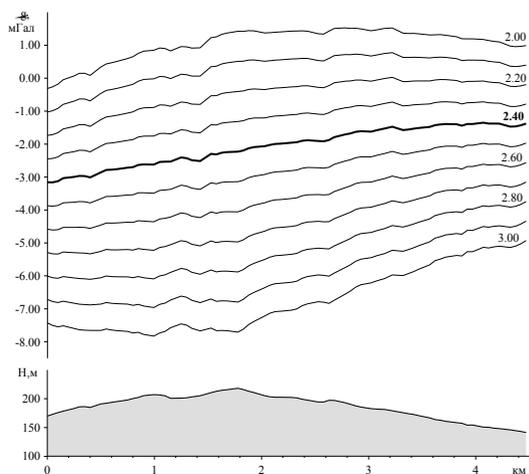


Рис. 1.6. Определение плотности горных пород промежуточного слоя  $\sigma$  методом Неттлетона

Очевидно, что наименьшую корреляцию с рельефом обеспечивает величина плотности  $2,40 \text{ г/см}^3$ , которую и следует принять за величину плотности промежуточного слоя для участка съемки.

С помощью скважинных гравиметров плотность 100-метровой пачки пород определяется с точностью  $0,01 \text{ г/см}^3$ .

Ядерными методами каротажа можно получить среднюю плотность горных пород в естественном залегании без нарушения их структуры и при сохранении естественной влажности, пористости и трещиноватости. В настоящее время имеется богатый опыт по применению гамма-методов для определения плотности пород на обнажениях, в горных выработках и скважинах.

Электрические свойства. Для определения *удельного электрического сопротивления горных пород* используются каротажные диаграммы кажущегося сопротивления (КС), полученные градиент-зондами и потенциал-зондами, бокового каротажного зондирования (БКЗ) и микрозондами. При БКЗ регистрируют серию кривых КС зондами разных размеров. Определение удельного сопротивления пластов  $\rho_{пл}$  в каротаже делится на следующие этапы: 1) выделение пластов и отбивка их границ; 2) нахождение существенных значений кажущегося удельного сопротивления  $\rho_k$ ; 3) оценка удельных сопротивлений пласта и зоны проникновения глинистого раствора путем сопоставления кажущихся удельных сопротивлений с их теоретически рассчитанными значениями (палеточными кривыми). Весь процесс определения  $\rho$  автоматизирован в рамках автоматизированных систем оперативной интерпретации результатов исследований скважин.

Скорости распространения упругих колебаний. *Средняя и пластовая скорости* определяются по данным сейсмического и акустического каротажа. Значения *эффективных скоростей*, найденные по годографам отраженных и преломленных волн, обычно мало отличаются от средних скоростей и могут быть использованы вместо последних для построения сейсмических границ.

Для более полного изучения типов волн и скоростей их распространения применяют *вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП)*, с помощью которого определяют кроме скоростей такие важные параметры сейсмического разреза, как коэффициент отражения и прохождения для различных границ, а иногда и эффективные декременты поглощения. В сочетании с материалами акустического каротажа результаты ВСП дают весьма полное представление о сейсмическом разрезе.

### ***1.2.2. Построение физико-геологических моделей***

Физико-геологическая модель (ФГМ) – это система абстрактных возмущающих тел и вызываемых ими аномальных эффектов, характеризующих геологический объект, отражающих его размеры, форму, петрофизические свойства и соответствующее им пространственное распределение физических полей (с детальностью, необходимой для решения поставленных задач). Основными составляющими ФГМ являются геологическая модель, петрофизическая модель и модели физических полей. Физико-геологическое моделирование является основой при выборе типовых, рациональных и оптимальных комплексов геофизических методов.

Формирование физико-геологической модели геологического объекта, процесса или явления предусматривает несколько последовательных операций, к которым относятся:

- постановка геологической задачи;
- выбор объекта моделирования (земная кора, конкретный блок земной коры, рудная или нефтегазовая провинция, перспективные структуры на рудные, нерудные, нефтегазовые месторождения, отдельные рудные тела, нефтегазовые залежи и т.д.) с построением априорной геологической модели;
- расчет аномальных петрофизических параметров моделируемого объекта и его вмещающей среды;
- построение петрофизической модели и выделение на ее основе структурно-вещественных комплексов;
- решение прямых задач геофизики для каждого метода, т.е. построение модели физических полей;
- оценка адекватности сформированной ФГМ реальному объекту на эталонах, т.е. на объектах, аналогичных исследуемому, но с известным геологическим строением.

В выборе комплекса геофизических методов на основе ФГМ выделяются три фазы:

Первая фаза характерна для геофизических исследований в новом регионе при отсутствии опыта работ. При этом необходимо использовать принцип аналогии, при котором опираются на результаты работ в регионах со сходным геологическим

строением, используя литературные источники, справочники, отчеты. На этой фазе формируется априорная ФГМ.

На второй фазе формирования ФГМ используются результаты опытно-методических исследований, которые играют роль натурального моделирования и при которых реализуется заведомо избыточный комплекс геофизических методов, что в дальнейшем дает возможность исключить методы, дублирующие результаты, и оценить информативность оставшихся.

Третья фаза формирования ФГМ связана с наличием существенного объема информации, накопленного при проведении производственных работ для решения поставленной геологической задачи. Оценка информативности геофизических методов и их различных сочетаний при этом осуществляется на основе количественных оценок. Появляется возможность получения оценок по экономической эффективности отдельных методов и их сочетаний, что способствует выбору рационального комплекса.

Существует несколько вариантов классификации ФГМ. Во-первых, выделяют *априорные* ФГМ, используемые для выбора типового комплекса геофизических методов на стадии проектирования, и *апостериорные* ФГМ, являющиеся результатом комплексной интерпретации геофизических данных после проведения производственных работ. Простой пример априорной ФГМ, используемой при поисках кварц-вольфрамовых жил, приводится на рис 1.7.

В зависимости от характера геологических задач различают

- *двуальтернативные* ФГМ, предназначенные для решения задач типа «руда» – «вмещающая порода», «нефтегазоперспективная» – «пустая» структуры;
- *многоальтернативные* ФГМ, используемые при решении задач геокартирования, структурно-тектонического районирования территории, поисков различных видов минерального сырья.

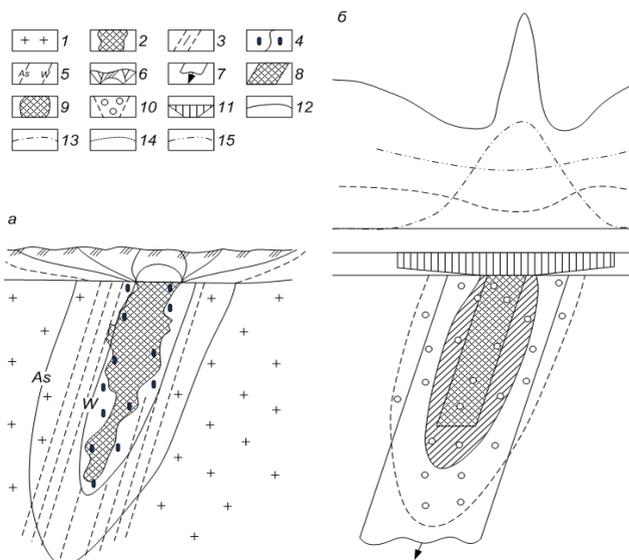


Рис 1.7. Схематический геологический разрез (а) и ФГМ (б) кварц-вольфрамитовой жилы (по Г.С. Вахромееву):  
 1 – граниты; 2 – кварц-вольфрамитовая жила; 3 – зона дробления;  
 4 – ореол грейзенизации с сульфидной вкрапленностью;  
 5 – первичные ореолы рассеяния W и As; 6 – вторичный ореол рассеяния W, As, Zn, Си, Pb; 7 – пласт повышенной электропроводности; 8 – наклонный пласт-диамагнетик, изолятор, пьезоэлектрик; 9 – эллиптический цилиндр аномальной поляризуемости; 10 – зональный полиэлементный первичный ореол; 11 – горизонтальный пласт, отвечающий вторичному ореолу рассеяния; графики: 12 – кажущегося электрического сопротивления  $\rho_k$ ; 13 – кажущейся поляризуемости  $\eta_k$ ; 14 – напряженности магнитного поля  $\Delta Z$ ; 15 – пьезоэлектрический годограф

В зависимости от способов описания физических полей можно выделить *детерминированные* ФГМ, построенные на основе расчета аномальных эффектов с помощью уравнений математической физики при жестко заданных значениях петрофизических и морфологических параметров модели (размеры,

форма, глубина, элементы залегания); и *вероятностно-статистические* ФГМ, основанные на использовании случайных величин в качестве параметров модели.

Среди вероятностно-статистических ФГМ реализуются либо *статистические* ФГМ, основой формирования которых служат методы корреляционно-регрессионного и факторного анализов, распознавания образов, проверки статистических гипотез, либо *стохастические* ФГМ, формируемые на базе вероятностных распределений самих параметров изучаемых моделей, т.е. когда при решении прямых задач аномальные эффекты задаются путем расчета математических ожиданий, дисперсий и корреляционных функций, описывающих возможный диапазон изменения состояний модели объекта.

С учетом развития геологических процессов во времени различают *статические* ФГМ, фиксирующие состояние геологического объекта в определенный (исторический) момент времени и *динамические* ФГМ, отражающие изменение физических полей на разных стадиях развития геологических процессов в зависимости, например, от глубины проявления рудогенеза, зон окисления, тектогенеза и т.д. Динамические ФГМ также отражают изменение физических полей при мониторинге окружающей среды, при режимных наблюдениях над нефтегазохранищами и крупными месторождениями углеводородов, находящихся в длительной эксплуатации, естественных фильтрационно-диффузионных процессов при решении инженерных, гидрогеологических и геоэкологических задач.

Пример двухальтернативной детерминированной ФГМ колчеданного месторождения при поисково-разведочных работах приведен на рис. 1.8.

Многоальтернативная детерминированная ФГМ при картировании основных типов горных пород Северного Криворожья иллюстрирована табл. 6, составленной по материалам А.В. Копанева.

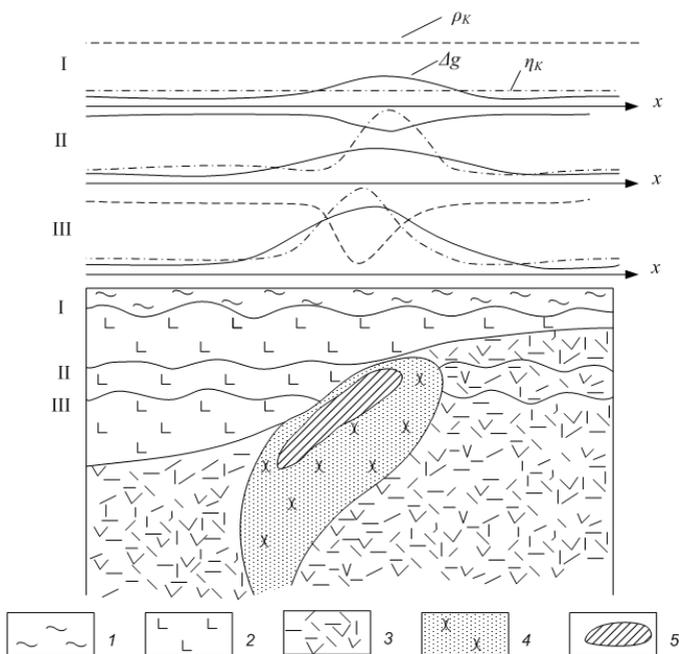


Рис 1.8. Двухальтернативная физико-геологическая модель колчеданного месторождения с ожидаемыми физическими полями при разном положении эрозионного среза (по М.Н. Столпнеру и др.):

- 1 – покровные мезо–кайнозойские отложения ( $\rho_k = 1-100$  Омм,  $\sigma = 1.0-2.4$  г/см<sup>3</sup>,  $\chi = (0-40) \times 10^{-5}$  ед. СИ); 2 – надрудная толща андезито–базальтового состава ( $\rho_k = 3000-7000$  Омм,  $\sigma = 2.75-2.90$  г/см<sup>3</sup>,  $\chi = (12-125) \times 10^{-5}$  ед. СИ,  $\eta_k = 1-3\%$ ); 3 – кислые рудовмещающие вулканиды ( $\rho_k = 1000-3000$  Омм,  $\sigma = 2.55-2.75$  г/см<sup>3</sup>,  $\chi = (0-25) \times 10^{-5}$  ед. СИ,  $\eta_k = 2-10\%$ ); 4 – гидротермально–измененные серицито–хлоритовые породы с сульфидной минерализацией ( $\rho_k = 25-1000$  Омм,  $\sigma = 2.8-3.3$  г/см<sup>3</sup>,  $\chi = (0-6) \times 10^{-5}$  ед. СИ,  $\eta_k = 5-40\%$ ); 5 – массивные колчеданные руды ( $\rho_k = 1-100$  Омм,  $\sigma = 3.5-4.6$  г/см<sup>3</sup>,  $\chi = 0$ ;  $\eta_k < 3\%$ );

I – III – уровни эрозионного среза

Примечание: альтернатива 1 «безрудная среда» – условные обозначения 1,2,3; альтернатива 2 «руда» – условные обозначения 4,5

Таблица 6

**Многоальтернативная физико-геологическая модель  
наиболее распространенных типов горных пород Северного Криворожья**

Породы	Морфология структур (размеры)	Разновидности пород по составу	Физические свойства				Значения физических полей и их характер			
			$\sigma$ , г/см <sup>3</sup>	$\alpha \cdot 10^5$ , ед. СИ	$\rho_k$ Ом·м	$\eta_k$ , %	$\Delta q_{ост}$ , МГал	Z, нТл	$\rho_{ЭД}$ Ом·м	$\eta_{ВБР}$ %
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Гранитоиды	Купольные Антиклинальные ( $d=4\div 8$ ; $l=10\div 15$ )	Плагиоклазы магматитовые	2,58-2,67	0-125	400-500	0,5-0,7	1,5-2,0; минимумы	300-400 (фон-1200); минимумы	60-100; ровное	0,8-1,0; ровное
		Плагиоклазы с останцами метаморфических пород	2,58-2,67	125-1000	400-600	0,6-0,8	2,0-2,5; минимумы	800-1000; локальные максимумы	60-80; изрезанное	0,8-1,0; ровное
		Плагиоклазы и полимиктиты	2,58-2,68	125-375	400-700	0,5-0,7	1,0-1,5; минимумы	700-800; мозаичное	50-60; ровное	0,8-1,0; ровное
Гнейсы	Синклиналильные мобильных зон ( $d=2\div 5$ ; $l=2\div 15$ )	Биотиты	2,65-2,70	0-60	620-1300	0,9-1,1	2,0-2,5; максимумы	800-900; ровное	40-50; ровное	1,0-1,1,1; ровное
		Амфибол-биотитовые	2,68-2,72	0-75	800-1000	0,9-1,1	2,5-3,0; максимумы	900-1000; повышенное	30-50; ровное	1,1 -1,2; ровное
		Пироксен-биотитовые	2,70-2,75	12-60	900-1200	0,8-1,0	3,0-5,0; максимумы	1200-1600; повышенное	30-50; ровное	1,1-1,2; ровное

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Кварциты сланцевые	Синклиналь- ные мобиль- ных зон ( $d=1\div 2$ ; $l=2\div 8$ )	Без вкрапленно- сти магнетита	2,63-2,65	0-60	800- 2500	0,5-0,6	1,5-2,0; максимумы	700-1000; ровное	150-200; максимумы	0,8-1,0; ровное
		С вкрапленно- стью магнетита	2,65-2,67	600- 1260	700- 2000	0,8-1,5	1,5-2,0; максимумы	2000-10500; максимумы над прикон- тактными зонами	150-180; максимумы	1,0-1,4; ровное
Амфиболы	Контакт мо- бильных зон с антиклина- лями ( $d=0,2\div 2,0$ ; $l=4\div 10$ )		2,87-2,93	37-100	700- 1000	0,8-1,0	3,0-10,0; максимумы	1000-1500; ровное	40-60; ров- ное	1,0- 4,1; ровное
Диабазы	Дайки ( $d=0,05\div 0,1$ ; $l=0,15\div 2,0$ )		2,89-2,92	125- 500	1200- 2500	0,9-1,0	0,5-1,0; локальные максимумы	300-700; локальные максимумы	80-100; мак- симумы	1,1-1,2; ровное
Кварциты железистые	Мобильные зоны и пласты ( $d=0,05\div 0,5$ ; $l=0,5\div 1,0$ )		2,93-4,0	6250- 12600	4,0- 250	1,5-3,5	4,0-25,0; максимумы	10000- 50000; мак- симумы	10-30; ми- нимумы	1,5-2,8; макси- мумы

Примечание:  $d, l$  – мощность и протяженность зон в километрах.

Первые три столбца табл. 6 характеризуют геологическую модель, четыре последующих столбца – петрофизическую модель, и, наконец, последние четыре столбца – модель физических полей в виде диапазона их измерений. Анализ показывает, что все шесть типов горных пород и их разновидностей по комплексу четырех геофизических полей могут уверенно фиксироваться различными сочетаниями аномальных эффектов.

*Статистическая ФГМ* формируется при моделировании объектов сложного геологического строения, когда аномальные эффекты от изучаемых объектов соизмеримы с уровнем помех и даже ниже такого уровня и, следовательно, решение прямых задач по моделированию физических полей неэффективно. При этом необходимо использовать различные приемы фильтрации полей по обнаружению слабых аномалий (сигналов) и комплексного анализа геополей.

Рассмотрим статистическую ФГМ скопления редкометалльных пегматитов, расположенных в грабене, выполненном конгломератами, кварц-биотитовыми и биотит-амфиболовыми сланцами, слабо различающимися в физических полях (табл. 7).

Таблица 7

**Статистическая ФГМ редкометалльных пегматитовых жил**

Моделируемые геологические объекты (геометрическая аппроксимация)	Физические поля	Статистики				
		Средние	Стандарты	Корреляционные матрицы		
				$\rho_K$	$\Delta Z$	$U_{\text{ЕП}}$
Жильные серии редкометалльных пегматитов (система параллельных тонких крутопадающих пластов)	$\rho_K$	4200	1,70	1,00	0,06	0,14
	$\Delta Z$	94	70	0,06	1,00	-0,02
	$U_{\text{ЕП}}$	-144	72	0,14	-0,02	1,0
Рудонесущие ортоамфиболиты (мощный пласт крутого падения)	$\rho_K$	3500	2,24	1,00	-0,10	-0,18
	$\Delta Z$	61	61	-0,10	1,00	-0,38
	$U_{\text{ЕП}}$	-214	145	-0,18	-0,38	1,00
Вмещающие кварц-биотитовые породы (полупространство)	$\rho_K$	4900	2,63	1,00	0,19	0,08
	$\Delta Z$	36	21	0,19	1,00	0,34
	$U_{\text{ЕП}}$	- 154	63	0,08	0,34	1,00

В приведенной в табл. 7 модели, несмотря на существенные перекрытия диапазонов изменений физических полей над тремя типами выделенных объектов, существуют статистически значимые различия средних значений, дисперсии (стандарта) и корреляционных матриц. Так, по F-критерию Фишера устанавливается значимое различие дисперсий для редкометальных пегматитов и вмещающих пород.

Проведенный анализ параметров ФГМ свидетельствует о наличии благоприятных предпосылок для комплексного анализа данных с целью локализации редкометальных пегматитов с помощью математических методов интерпретации геофизических данных (например, с использованием метода главных компонент).

Построение *стохастических* ФГМ базируется на представлении о множестве случайных состояний модели объекта, т.е. состояний параметров модели объекта. В качестве одной из таких моделей приведем описание среды в виде модели ячеистого беспорядка, предложенную Изингом и рассмотренную А.Ю. Давыденко [13]. Геосреда при этом аппроксимируется совокупностью ячеек, каждая из которых принимает два состояния, например, "рудное" и "безрудное".

Индикатором «рудного» или «безрудного» состояний является переменная  $K_i$ , равная 1 для "рудного" состояния и -1 для "безрудного" состояния. Амплитуда поля в  $i$ -ой ячейке модели задается формулой Изинга

$$X_i = [(1 + K_i)X_1 + 0.5(1 - K_i)X_0]/2,$$

где  $X_1$  и  $X_0$  – значения моделируемой характеристики, соответствующие "рудному" и "безрудному" состояниям,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Амплитуды  $X_1$  и  $X_0$  являются случайными величинами, для которых известны математические ожидания  $M_{X_1}$  и  $M_{X_0}$ , а также дисперсии  $D_{X_1}$  и  $D_{X_0}$ . Если через  $p_i$  обозначить вероятность появления "рудного" состояния ячейки ( $K_i = 1$ ) и через  $q_i = 1 - p_i$  – вероятность "безрудного" состояния ( $K_i = -1$ ), то задавая закон изменения  $p_i$ , можно моделировать разнообразные ситуации.

Так, если через  $X_0$  и  $Y_0$  обозначить физические характеристики "безрудных", а через  $X_1$  и  $Y_1$  "рудных" ячеек, то модель будет представлена в виде системы уравнений

$$\begin{cases} X_i = [(1 + K_i)X_1 + (1 - K_i)X_0]/2 \\ Y_i = [(1 + K_i)Y_1 + (1 - K_i)Y_0]/2. \end{cases}$$

Математическое ожидание и дисперсия такой двухкомпонентной модели определяются формулами:

$$\begin{aligned} M_{X_i} &= p_i M_{X_1} + q_i M_{X_0}, \\ M_{Y_i} &= p_i M_{Y_1} + q_i M_{Y_0}, \\ D_{X_i} &= p_i D_{X_1} + q_i D_{X_0} + p_i q_i (M_{X_1} - M_{X_0})^2, \\ D_{Y_i} &= p_i D_{Y_1} + q_i D_{Y_0} + p_i q_i (M_{Y_1} - M_{Y_0})^2. \end{aligned}$$

В случае, приведенном на рис 1.9, в модели Изинга приняты следующие параметры:  $M_{X_1} = 1, D_{X_1} = 0; M_{X_0} = 0, D_{X_0} = 0$  – при ступенчатом характере распределения вероятностей  $p_i$  на ячейках модели.

В качестве примера *динамической ФГМ* приведем модель медно-порфиривого месторождения, отражающую характер магнитного поля, полей электрического сопротивления и вызванной поляризации в зависимости от стадии рудообразования и масштаба проявления медно-молибденового оруденения [13].

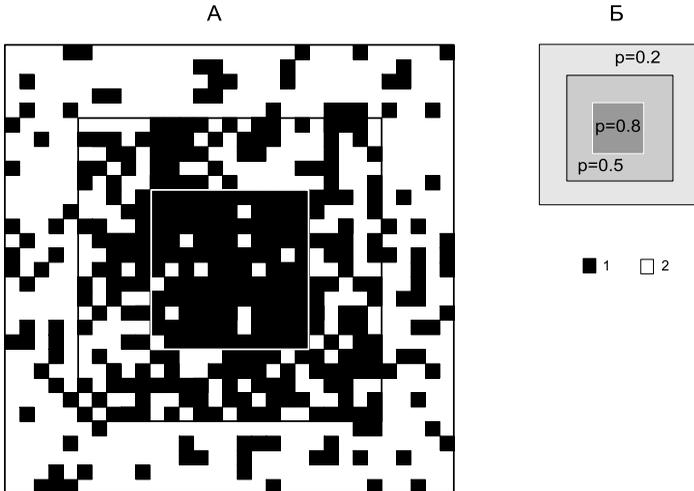


Рис. 1.9. Случайная реализация сечения рудного тела (А), полученная при заданном распределении вероятностей модели (Б): 1 и 2 – соответственно «рудное» и «безрудное» состояния ячейки модели

Представления о петрофизической модели медно-порфирового месторождения базируются на следующем геометризованном скелете. Рудоносные штокверки облекают материнские штоки гранит-порфиров и геометрически могут быть представлены конформными по отношению к ним телами, внутренние и внешние поверхности которых аппроксимируются в верхней части геологического разреза разновысокими параболами вращения, в средней – соосными цилиндрами различного диаметра, а в нижней – опрокинутыми конусами с разными углами схождения образующих (рис. 1.10). В зависимости от конкретной тектонической обстановки и глубины эрозионного среза в каждом отдельном месторождении может быть проявлен неполный набор перечисленных структурных форм.

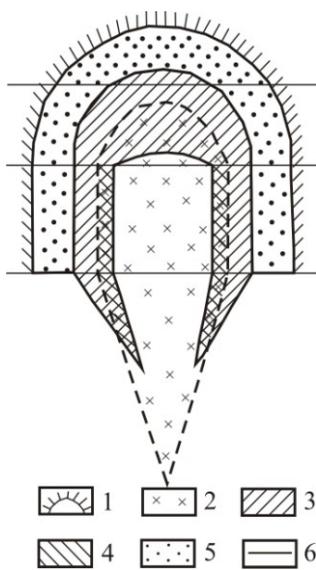


Рис. 1.10. Обобщенный геометрический образ физико-геологической модели медно-порфирового месторождения (по Г.С. Вахромееву, А.Ю. Давыденко):  
 1 – вмещающие породы рамы;  
 2 – продуктивные малые порфировидные интрузии конечных стадий вулканоплутонических ассоциаций;  
 3 – рудная пирит-халькопиритовая зона (пирит 10%, Cu – 0,1 – 3,0%, Mo – знаки);  
 4 – зона медно-молибденовой минерализации (пирит 1%, Cu – 1,0 – 3,0 %, Mo – 0,03%);  
 5 – зона непродуктивной сульфидной вкрапленности с содержанием пирита до 2 %;  
 6 – возможные уровни эрозионного среза

В динамической ФГМ предрудная стадия отражает незначительные масштабы процессов гидротермального изменения приконтактных частей материнских интрузивов, при которых появляются небольшие содержания ферромагнитных минералов, что вызывает соответственно повышение магнитного поля.

*Рудная стадия*, подразделяемая на три подстадии, характеризуется в *начальной подстадии* выделением ферромагнитных минералов при образовании магнетитовых метасоматитов и появлением первой генерации сульфидов (рис 1.11).

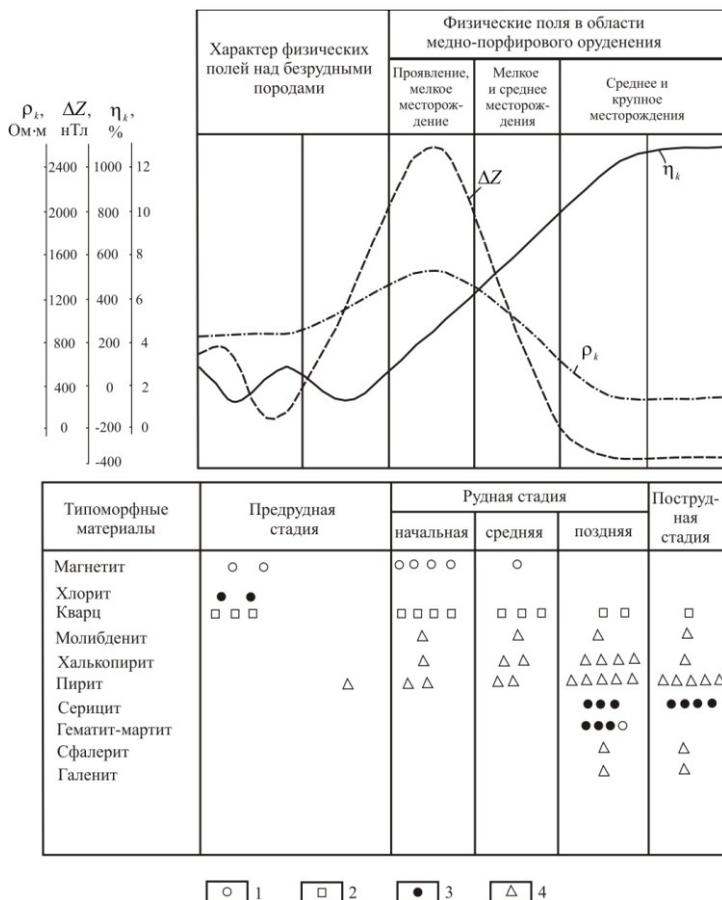


Рис. 1.11. Динамическая физико-геологическая модель медно-порфирового месторождения, отражающая характер физических полей в зависимости от стадии рудообразования и масштаба проявления медно-молибденового оруденения

(по Г.С. Вахромееву, А.Ю. Давыденко):

минералы: 1 – ферромагнитные, 2 – изоляторы,

3 – сульфидные электронно-проводящие, 4 – прочие

Магнитные поля над такими участками достигают максимума в 1000 нТл. Аномалии поляризуемости составляют 4–6% на фоне в 2–3%. Процесс окварцевания приводит к росту  $\rho_k$  до 1500 Ом. Начальная подстадия приводит к образованию рудопроявлений или месторождений меди. Гидротермальные изменения вмещающих пород при этом развиты слабо.

В *среднюю подстадию* гидротермально-метасоматические процессы активизируются, при этом происходит замещение магнетита с образованием новых генераций пирита и халькопирита, поэтому магнитная восприимчивость рудных зон снижается, а поляризуемость возрастает до 10%. Накопление электронно-проводящих минералов приводит к уменьшению  $\rho_k$ .

*Последняя рудная подстадия* характеризуется замещением полевых шпатов серицитом и кварцем, исчезновением магнитных минералов, формированием сфалерита, галенита, гематита. Эти изменения отражаются аномалиями поляризуемости в 12–14%, отрицательными значениями магнитного поля и снижением кажущегося сопротивления до первых сотен Ом. В последнюю рудную подстадию формируются средние и крупные медно-порфировые месторождения.

*Послерудная стадия* в физических полях практически не отображается.

В настоящее время в практике геологоразведочных работ находит применение большое число геофизических методов, и их количество продолжает увеличиваться. Тем не менее, несмотря на все это разнообразие, можно сформулировать не зависящие от исследователя условия, необходимые и достаточные для эффективного применения методов прикладной геофизики.

К этим условиям относятся

- заметная дифференциация (контрастность) физических свойств пород и руд района работ;
- благоприятные геометрические параметры (размеры, форма, глубина и элементы залегания) аномалиеобразующих источников, в частности, геологических объектов;
- относительно низкий уровень помех.

Перечисленные условия влияют на создание физико-геологических моделей изучаемых объектов, а выбор конкретного типа моделей непосредственно зависит от анализа условий применимости геофизического метода.

### ***1.2.3. Геометрические параметры источников геофизических аномалий и влияние помех***

Геологические объекты создают геофизические аномалии различной амплитуды, зависящие не только от физических свойств, но и от их *геометрических параметров: размеров, формы и взаимного пространственного расположения*. Поэтому при комплексировании методов следует учитывать их различные возможности для оценки морфологии изучаемых объектов с одинаковой контрастностью физических свойств. Для сейсморазведки и электроразведки методом ВЭЗ благоприятны субгоризонтальные границы с углами падения, не превышающими  $10\text{--}15^\circ$ ; для электроразведки методами профилирования, наоборот, необходимо достаточно крутое падение границ ( $>30^\circ$ ). Магниторазведка и гравиразведка менее эффективны при пологом падении границ раздела горных пород с различной намагниченностью (плотностью).

*Аномалии потенциальных полей от сферы* характеризуют аналитические выражения, представленные в табл. 8, которые устанавливают связь между максимальной амплитудой аномалии от сферического объекта радиуса  $R$  при глубине залегания его центра  $H$ .

Как очевидно, величина электрического потенциала в методе заряда вообще не зависит от размеров сферы. При постоянном радиусе сферы магнитное поле и поле вызванной поляризации обладают максимальным относительным градиентом, зависящим от глубины залегания сферы. В меньшей степени эта зависимость проявляется для поля силы тяжести, она минимальна для электрического поля постоянного тока и теплового поля.

Таблица 8

**Аналитические выражения, определяющие аномальный эффект сферы в различных геофизических полях**

Физическое поле	Максимальная величина поля
Ускорение свободного падения, создаваемое однородной по плотности сферой	$\Delta = \frac{4\pi \mathfrak{R}^3 \sigma_{\text{эф}}}{3H^2}$
Вертикальная составляющая геомагнитного поля однородно-намагниченной сферы	$\Delta_{\text{max}} = \frac{3\pi R^3 \sin \theta}{3H^3}$
Внешний потенциал равномерно поляризованной сферы	$\Delta U_{\text{max}} = \frac{\rho}{2\rho_1 + \rho} \Delta U_0 \frac{R^2}{H^2}$
Деформация однородного поля постоянного тока проводящим шаром	$\Delta U'_{\text{max}} = j \rho \left[ 1 - \frac{\rho}{\rho - 2\rho} 2 \frac{R^3}{H^3} \right] MN$
Внешний потенциал проводящей сферы, заряженной постоянным током	$\Delta U'_{\text{max}} = \frac{j}{2\pi} \frac{1}{H}$
Деформация однородного теплового поля шаром повышенной теплопроводности	$\Delta T_{\text{max}} = \Gamma \left[ 1 + \frac{1-m}{2+m} \frac{R^3}{H^3} \right]$
Коэффициент вызванной поляризации	$\eta_{\text{ax}} \approx \frac{3}{4\pi} \frac{\beta V_{\text{эл}}}{H^3}$

*Примечание:*  $G$  – гравитационная постоянная;  $\sigma_{\text{эф}}$  – эффективная плотность сферы;  $\vartheta$  – угол вектора намагничивания  $\mathbf{J}$  с горизонтом;  $\rho, \rho_1$  – значения удельного электрического сопротивления окружающей и заполняющей сферу сред соответственно;  $\Delta U_0$  – максимальная разность электрического потенциала на границе сферы;  $j$  – плотность электрического тока, текущего в среде с сопротивлением  $\rho$ ;  $MN$  – расстояние между электродами, измеряющими разность потенциалов;  $I$  – сила тока в цепи, питающего сферу;  $\Gamma$  – геотермический градиент;  $m$  – коэффициент поглощения тепла;  $V_{\text{эл}}$  – общее содержание электронно-проводящих минералов;  $\beta$  – коэффициент, зависящий от удельного сопротивления, размеров, минерального состава электронно-проводящих включений, а также от времени зарядки и разрядки

Интенсивность и характер аномальных физических полей в значительной степени зависят от взаимного пространственного расположения аномалиеобразующих объектов. В частности,

для картирования неглубоко залегающих возмущающих масс используются измерения вертикальных градиентов силы тяжести  $V_{zz}$ , что обеспечивает большую разрешающую способность для выделения крутопадающих объектов (по сравнению с наблюдаемым гравитационным полем).

Расчеты потенциала естественного электрического поля вдоль профиля, проходящего через эпицентры двух сфер при расстоянии между ними  $I = 3R$  ( $R$  – радиус сферы) для случаев, когда обе сферы залегают на глубинах  $H = 2R$  и  $H = 5R$ , показывают, что поляризованные сферы создают общий минимум потенциала, который для малых глубин осложнен дополнительными экстремумами, обусловленными влиянием каждой отдельной сферы. При  $I = 5R$  и глубине залегания  $H = 3R$  по графику изменения потенциала  $U$  можно установить наличие двух отдельных объектов (рис. 1.12).

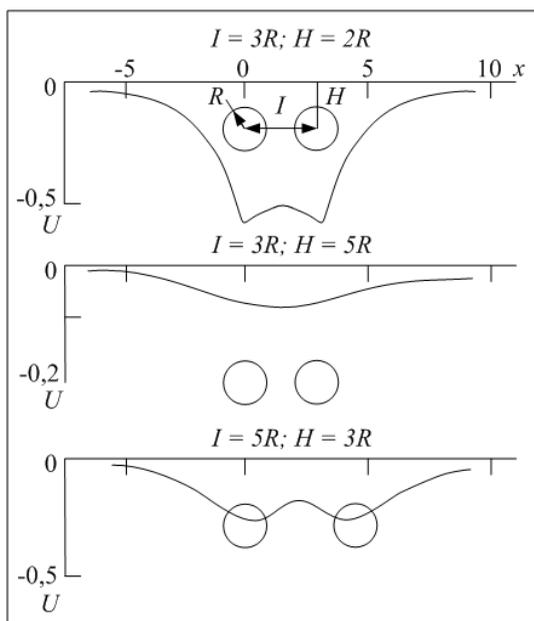


Рис. 1.12. Кривые потенциала ЕЭП над двумя однородно поляризованными сферами

Существует термин – моногеничная аномалия, который означает, что данная аномалия обусловлена одним возмущающим объектом. Моногеничной аномалией, например, является гравитационный максимум, обусловленный сферой с повышенной, относительно вмещающих пород, избыточной плотностью. Однако, как показывает предыдущий пример, в качестве моногеничной аномалии для геопотенциальных полей интерпретатор ошибочно может принять эффект от нескольких сближенных возмущающих тел, если глубины залегания этих тел превышают расстояния между ними.

Влияние помех. Различают помехи *геологического и негеологического происхождения*. К последним относят также погрешности измерений, вызванные несовершенством аппаратуры и методики наблюдений (инструментальные погрешности, сползание нуля-пункта прибора, неточности плановой и высотной привязки точек геофизических измерений и др.). Изучение помех и их влияния на результаты геофизических измерений так же важно при формировании физико-геологической модели, как и оценка характера аномальных эффектов от искомым объектов.

Наиболее сильные искажения полезных аномалий (сигналов) от искомым объектов, как правило, связаны с помехами геологического происхождения, среди которых в первую очередь следует выделить влияние *перекрывающихся и подстилающих пород, рельефа местности, а также многолетнемерзлых пород*.

Получение достоверной информации о геологическом строении изучаемого объема среды по наблюдаемым геофизическим полям возможно лишь в случае, когда эти поля обусловлены преимущественно совокупностями интересующих нас объектов, то есть при сравнительно слабом вкладе сигналов иной природы в зафиксированные при полевых измерениях аномальные эффекты.

Влияние рельефа. В результатах аэромагнитных съемок (АМС), выполненных в условиях горной местности над интенсивно намагниченными породами (например – платобазальтами), присутствуют специфические искажения поля  $\Delta T$ , обусловленные влиянием рельефа (рис. 1.13, 1.14). Отмечается, что в некоторых районах аномалии «рельефной» природы «так ин-

тенсивны, что исключают возможность интерпретации аномалий, связанных с более крупными и глубинными объектами; они затрудняют межмаршрутную интерполяцию и построение изолиний» [26].

Искажающее влияние рельефа земной поверхности является следствием влияния двух факторов:

- *аномального эффекта магнитных масс*, выходящих на дневную поверхность или расположенных в непосредственной близости от нее;
- *«эффекта разницы высотности»*, создающегося за счет различного удаления точек измерения поля от изучаемых возмущающих объектов за счет изменения высот (координат  $z$ ) поверхности наблюдений.

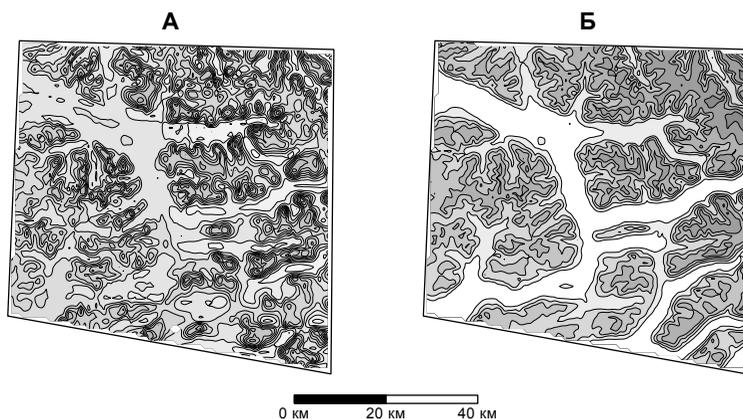


Рис 1.13. Влияние резкорасчлененного рельефа, сложенного породами базальтовой формации, на магнитное поле ( $\Delta T$ )<sub>a</sub>, плато Путораны (по материалам Центрально-Арктической ГРЭ):

А – карта изодинам аномального магнитного поля;

Б – карта изогипс рельефа местности.

Примечание: более темные тона раскраски карт отвечают повышенным значениям магнитного поля и наиболее возвышенным участкам местности

Поясним искажающее воздействие «эффекта разницы высотности» на модельном примере. Представим, что значения магнитного поля  $\Delta T$  вертикально намагниченного куба  $J=10$  А/м

размером  $400 \times 400 \times 400$  м зафиксированы в узлах квадратной сети с шагом около 50 м на хребтообразной форме рельефа с перепадами высот 100–1077 м (рис. 1.15). Верхняя грань куба находится на уровне моря ( $z = 0$ ), при расчетах использованы наклонение  $I = 82^\circ$  и склонение  $D = 20^\circ$  нормального магнитного поля  $T_0$ .

Как очевидно, картина "наблюденного" магнитного поля от этой весьма простой модели, существенно искажается за счет влияния рельефа поверхности измерений. При этом появляются ложные экстремумы  $\Delta T$ , расположенные за пределами проекции источника поля на дневную поверхность. Искаженное пространственное распределение поля на расчленённом рельефе местности может привести к пропуску искомым объектов при проведении горно-буровых работ в эпицентрах выявленных аномалий и, как следствие – к ошибочным заключениям о перспективности изучаемых территорий [20].

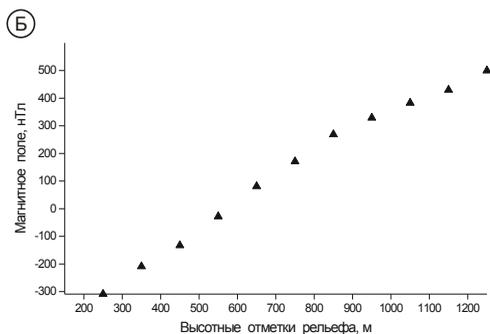
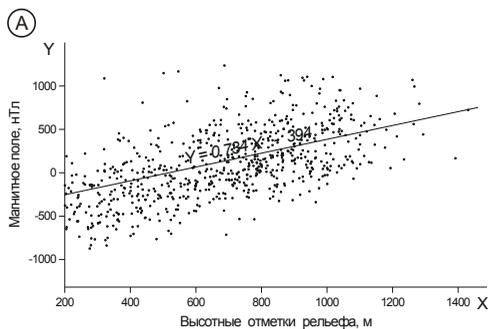


Рис. 1.14. Статистическая взаимосвязь аномального магнитного поля ( $\Delta T$ )<sub>a</sub> и высотных отметок рельефа местности, Плато Путораны (по материалам Центрально-Арктической ГРЭ):

А – линейная регрессионная зависимость между высотными отметками и амплитудой магнитного поля; Б – средние значения амплитуды магнитных аномалий при перепаде высот 200–1300 м (интервал группирования – 100 м)

Для приведения поля  $\Delta T_{наб}$  к горизонтальной плоскости использовался предложенный В.И. Ароновым способ приведения аномалий к заданной поверхности относимости, основанный на решении внешней задачи Дирихле [4]. Суть данного способа состоит в представлении потенциального поля  $U$  полем  $U^*$  набора элементарных источников, распределенных ниже поверхности наблюдений. Пересчет поля  $\Delta T$  на горизонтальную плоскость  $z = -1200$  м позволяет провести восстановление значений магнитного поля, практически тождественное результату решения прямой задачи от исходного возмущающего объекта.

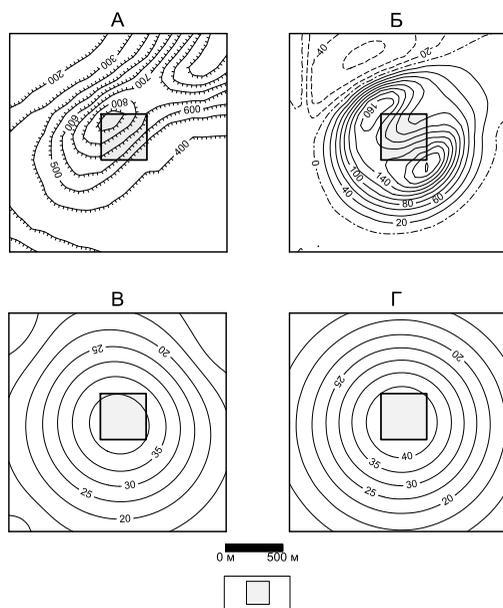


Рис. 1.15. Пересчет магнитного поля, созданного кубом, с криволинейной поверхности на горизонтальную плоскость: А – изогипсы рельефа, м; Б – аномалия на дневной поверхности, нТл; В – аномалия на плоскости  $z = -1200$  м, полученная в результате пересчета поля Б, нТл; Г – аномалия на плоскости  $z = -1200$  м, полученная путем решения прямой задачи, нТл. Условные обозначения: проекция верхней грани куба на горизонтальную плоскость

*Гравитационный эффект рельефа* земной поверхности в пересеченной местности составляет 1–3 мГал, а в горных районах (например, на Кавказе) может достигать 40–50 мГал и более. Важное значение при оценке влияния рельефа имеет точность плановой и высотной привязки пунктов измерений [18]. На результатах вычисления гравитационных аномалий сказывается также неточное знание плотности горных пород, слагающих рельеф местности. Пример вычисления топографических поправок при гравиразведке приведен на рис. 1.16.

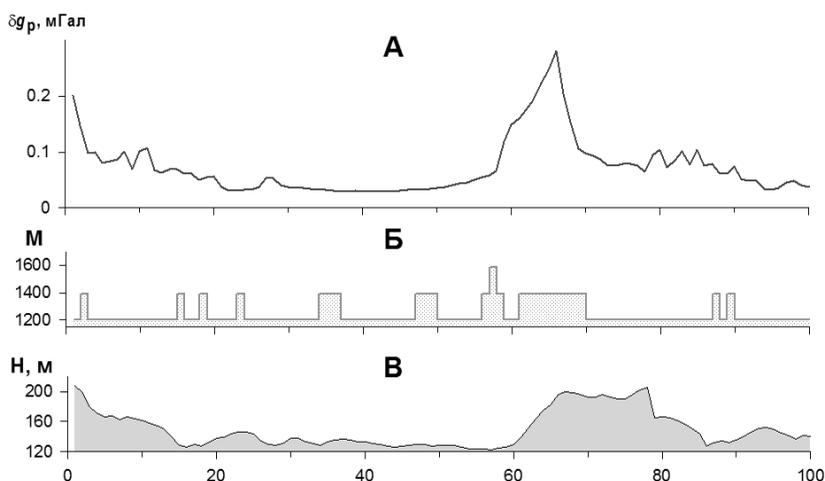


Рис. 1.16. Вычисление поправок за рельеф местности с заданной точностью 0.01 мГал (Пермский край):

А – поправки за влияние рельефа; Б – график числа аппроксимирующих параллелепипедов, использующихся при расчете одного значения поправки; В – график высот земной поверхности

*Аномалии естественного поля (ЕЭП)*, вызванные рельефом, возникают обычно при фильтрации грунтовых вод в рыхлых отложениях вдоль склонов. Эти аномалии характеризуются приуроченностью к положительным формам рельефа и сравнительно широким пределом изменения амплитуд (от 20 до 400 мВ). Кривые потенциалов ЕЭП являются как бы зеркальным отражением рельефа местности [34].

*Появление аномалий от рельефа в методе сопротивлений* обусловлено в основном уменьшением разносов применяющихся установок по сравнению с расчетными. При профилировании вкрест простирания горизонталей рельефа (часто совпадающего с простиранием структур) поднятия (хребты) отражаются на графиках пониженными значениями кажущихся сопротивлений  $\rho_k$ , а впадины (долины) – повышенными значениями  $\rho_k$  [34].

*Влияние рельефа местности в методе ВП* можно оценить по результатам физического моделирования (рис. 1.17). Поверхность рельефа представлялась трехгранной призмой, поляризующимся объектом являлся графитовый стержень, измерения проводились по схеме срединного градиента. Влияние рельефа местности выражается в изменении интенсивности, формы и пространственного положения аномалий кажущейся поляризуемости.

*В сейсморазведке локальные формы рельефа* приводят к искажению годографов на величину времени  $\Delta t_n$ , которое определяется по формуле  $\Delta t_n = h/V$ , где  $h$  – расстояние по вертикали от действительной точки стояния сейсмоприемника до линии приведения (средней линии рельефа);  $V$  – скорость распространения упругих колебаний в породах. Если сейсмоприемник расположен выше линии приведения, то  $\Delta t_n$  имеет отрицательный знак, если ниже нее, то положительный знак.

*Влияние многолетнемерзлых пород.* Наличие мерзлых пород в геологическом разрезе и большая изменчивость их свойств создают трудности при выполнении и интерпретации материалов геофизических работ. Например, при обработке сейсморазведочных данных МОВ в районах распространения *многолетнемерзлых пород* возникают погрешности учета горизонтального и вертикального градиентов скоростей распространения упругих волн, обусловленные изменчивостью свойств этих пород. К тому же вертикальный градиент скоростей в пределах мерзлой толщи носит сложный, нередко инверсионный характер. Нижняя граница мерзлых пород из-за непостоянства их мощности характеризуется сложной конфигурацией.

Вследствие сезонной изменчивости строения верхнего слоя возникают специфические трудности интерпретации дан-

ных, особенно в электроразведке. Необходимо иметь в виду отсутствие резкой нижней границы мерзлой толщи, которая лишь постепенно переходит в талое состояние, что может вносить существенные ошибки при интерпретации данных ВЭЗ.

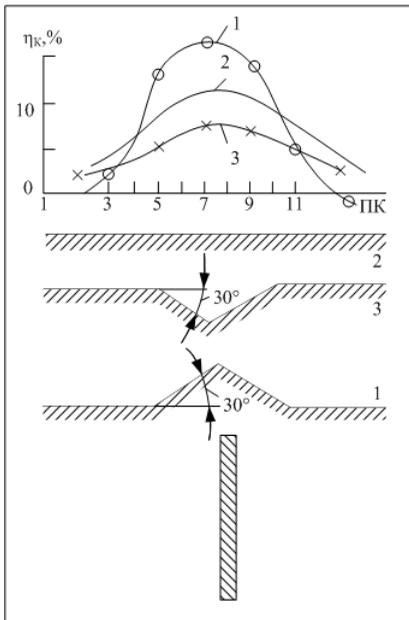


Рис. 1.17. Влияние рельефа местности на результаты измерений ВП вертикального пласта, расположенного под хребтом (1), горизонтальной плоскостью (2), долиной (3)

Среди помех *негеологического происхождения* наибольшее искажающее влияние на полезные аномалии оказывают *временные вариации геофизических полей*. Интенсивность *суточных магнитных вариаций и магнитных бурь* значительно возрастает по мере приближения к магнитным полюсам. Среднесуточные значения вариаций  $Z$  и  $H$ , осредненные по многолетним наблюдениям, приведены на рис. 1.18.а. Вариации наиболее значительны в летние месяцы и в дневные часы. Амплитуда суточных магнитных вариаций летом достигает первых десятков нТл. Амплитуда годовых вариаций около 10 нТл, а лунно-солнечных – до 1 нТл. Вариации при магнитных съемках учитываются путем наблюдений на вариационных станциях.

При высокоточных магнитных съемках значительной помехой являются короткопериодные колебания магнитного поля [24].

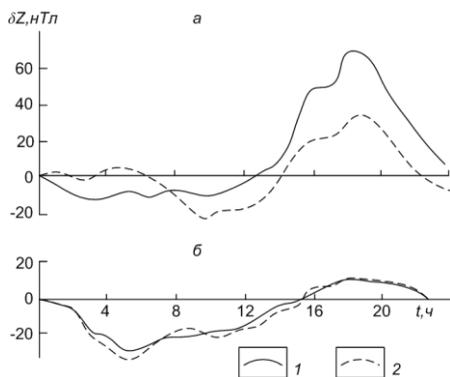


Рис. 1.18. Среднесуточные вариации магнитного поля Земли  $\delta Z$  (а) и  $\delta H$  (б) в летний период

В гравиразведке величина лунно-солнечного притяжения может достигать 0,15 мГал, что соизмеримо с гравитационными аномалиями от глубокозалегающих рудных залежей.

Электромагнитные поля в Земле характеризуются вариациями теллурических и блуждающих токов. Теллурические токи (ТТ) – естественные электрические токи нестационарного режима – изменяются во времени как по величине (от 0,1 мВ/км до 1 В/км и более в периоды магнитных бурь), так и по направлению поляризации вектора ТТ. Эти вариации имеют широкий диапазон: вековые вариации – вариации с периодом в доли секунды и представляют собой серьезную помеху для проведения измерений методами сопротивлений и ВП.

Блуждающие токи индустриального происхождения (электрофицированные железные дороги, сварочные агрегаты, промышленные установки) также изменяются во времени, их наименьшая амплитуда в общем случае наблюдается в ночное время. Особенно интенсивны промышленные помехи на действующих рудниках, где они обусловлены работой электровозов и стационарных электрических установок.

В сейсморазведке среди помех негеологического происхождения выделяются микросейсмы, возникающие от ряда неконтролируемых факторов (ветер, движение транспорта, производственная деятельность человека и т. п.).

Среди помех негеологического происхождения следует отметить *влияние искусственных объектов*. В ходе изучения гравитационного поля с помехами от искусственных объектов чаще всего приходится встречаться при проведении подземных исследований в горных выработках, скважинах, а иногда и при наземных съемках, если они, например, проводятся в пределах рудных полей разрабатываемых месторождений. К искусственным объектам, создающим своеобразный фон помех, можно отнести находящиеся в непосредственной близости от пунктов наблюдений пустые камеры, горные выработки и зоны обрушения пород. Большие помехи создают железные предметы, расположенные в горных выработках. В электроразведке искусственными проводниками, создающими помехи, являются тросопроводы и кабели, силовые и телефонные линии и т. д.

При анализе влияния помех в общем случае необходимо иметь в виду два обстоятельства. Во-первых, помеха одного и того же типа неодинаково влияет на результаты измерений различными геофизическими методами. Во-вторых, влияние помех может быть существенно ослаблено:

- путем применения оптимальных для данных условий методик измерения физических полей;
- с помощью технических средств в аппаратуре (фильтры, накопление полезного сигнала и т.п.);
- благодаря использованию специальных приемов обработки полевых данных (введение разного рода поправок, фильтрация сигналов).

#### ***1.2.4. Точность наблюдений и сеть геофизических съемок***

Планирование точности наблюдений и расчет сетей тесно связаны с понятиями аномалий и помех, т. е. с физико-геологическим моделированием изучаемых объектов.

При планировании точности наблюдений следует руководствоваться следующими общими положениями:

- наблюдения с неоправданно высокой точностью ведут к непроизводительному увеличению затрат средств и времени, а недостаточно высокая точность может привести к пропуску искомых объектов;

- точность съемок определяется уровнем помех, т.к. в случае интенсивных помех повышение точности, вызывая увеличение затрат средств и времени, не дает ожидаемых результатов (т.е. увеличения разрешающей способности используемого метода).

Планирование оптимальной точности должно быть основано на знании и учете следующих данных:

- минимальной интенсивности аномалий, подлежащих обнаружению  $A_{min}$ ;
- аппаратурно-методической точности съемки, оцениваемой по результатам повторных наблюдений величиной среднеквадратической погрешности  $\sigma_c$  съемки;
- изменчивости измеряемой величины в пределах нормальных или фоновых значений поля  $\sigma_0$ , обусловленной влиянием разного рода помех, т. е. уровнем тех помех, которые не могут быть исключены методическим или вычислительным путем (в первую очередь – помех геологической природы).

*Минимальная интенсивность* аномалий  $A_{min}$  определяется путем решения прямой задачи геофизики для выбранной ФГМ при наиболее неблагоприятных условиях (максимальная глубина залегания искомого объекта, сильное влияние экранирования, расчлененный рельеф и др.) либо из опыта предшествующих геофизических работ.

*Средняя квадратическая погрешность съемки*  $\sigma_c$  оценивается по результатам независимых контрольных наблюдений, объем которых составляет обычно не менее 3–5% от общего числа измерений:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{2n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - f_{ki})^2},$$

где  $f_i$  и  $f_{ki}$  – соответственно рядовое (первичное) и контрольное (повторное) измерения поля;  $n$  – число независимых контрольных наблюдений. Величина  $\sigma_c$  определяет аппаратурно-методическую точность съемки.

Изменчивость значений в пределах нормального поля или фона зависит от *дисперсии геологических помех*  $\sigma_0^2$ . Для опреде-

ления ее величины необходимо оценить *общую дисперсию нормального поля (фона)*:

$$\sigma_{\text{общ}}^2 = \sigma_c^2 + \sigma_f^2.$$

Величину  $\sigma_{\text{общ}}$  можно найти по разности  $N$  наблюдаемых значений физического поля  $f_i$  от его нормальных (фоновых) значений  $f_\phi$  в пределах нормального поля (фона):

$$\sigma_{\text{общ}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (f_i - f_\phi)^2},$$

где  $f_\phi = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N f_i$ , если отсутствует закономерное изменение (тренд) нормального поля (фона). В противном случае  $f_\phi$  описывается полиномом (линейным или квадратичным, реже – более высокой степени).

Если анализируются не сами наблюдаемые значения, а их логарифмы (в геохимии и электроразведке, где изучаемые параметры характеризуются логнормальным законом распределения), то в формулах для  $\sigma_c$  и  $\sigma_{\text{общ}}$  вместо  $f_i$  и  $f_\phi$  соответственно используются их логарифмы.

Чаще всего точность проектируемых наблюдений выбирается с учетом лишь двух величин –  $A_{\text{min}}$  и  $\sigma_c$ . При этом на основе "правила трех сигм", вытекающего из свойств закона нормального распределения случайных погрешностей, подбирают такую аппаратуру и методику работ, при использовании которых выполнялось бы условие  $A_{\text{min}} \geq 3\sigma_c$ . Более обоснованно планирование точности следует проводить с учетом уровня помех, т.е. "правило трех сигм" применять в виде  $A_{\text{min}} \geq 3\sigma_{\text{общ}}$ .

Следовательно, *планирование точности геофизической съемки можно свести к реализации одной из следующих стратегий*:

1.  $\sigma_c^2 > \sigma_0^2$ : изменчивость измеряемой величины в пределах нормального поля мала, т.е. уровень помех геологического происхождения невелик, поэтому разрешающая способность метода полностью определяется аппаратурными возможностями и методикой проведения работ. В подобных случаях можно использовать высокоточные приборы и совершенные приемы из-

мерения поля, чтобы уверенно выделять слабые геофизические аномалии.

2.  $\sigma_c^2 < \sigma_0^2$ : дисперсия геологических помех существенно больше аппаратурно-методической погрешности съемки и объективные возможности выделения слабых аномалий резко падают. В этих условиях чаще всего не имеет смысла применять прецизионную аппаратуру и специальную технологию высокоточных наблюдений. Анализ, проведенный Г. С. Вахромеевым по результатам геофизических и геохимических съемок на месторождениях разного типа и в различной геологической обстановке, показывает, что дисперсия геологических помех обычно в несколько раз превышает дисперсию съемки.

Как велико может быть изменение дисперсии геологических помех в нормальном поле, обусловленном различными вмещающими породами Ангарской железорудной провинции, видно из табл. 9. Как очевидно, месторождения и отдельные тела магнетитовых руд ангаро-илимского типа, физические свойства которых мало отличаются от свойств траппов, контрастно выделяются при залегании среди туфогенно-осадочных пород. Однако при их залегании среди траппов поиски и расшифровка структур рудных полей существенно усложняются.

Таблица 9

**Значения дисперсии  $\delta_0$  нормальных геофизических полей  
в пределах Ангарской железорудной провинции  
(по Г.С. Вахромееву)**

Породы, вмещающие магнетитовое оруденение	Физические поля			
	$Z_a$ , нТл	$\Delta g$ , мГал	$\rho_k$ , Омм	$\eta_k$ , %
Туфогенно-осадочные	$\pm(200-500)$	$\pm 0.3$	$\pm 50$	до 2
Траппы	$\pm 2000$	$\pm 1.0$	$\pm 3000$	до 12

Таким образом, *современные геофизические методы в подавляющем большинстве весьма совершенны, и увеличение точности измерений в условиях, когда их разрешающая способность определяется главным образом величиной дисперсии гео-*

*логических помех, не оправдано.* Все сказанное выше справедливо лишь тогда, когда величина дисперсии геологических помех не может быть уменьшена путем соответствующей математической обработки исходных данных. В большинстве случаев такая возможность существует, поэтому все полевые измерения следует выполнять с максимально возможной точностью (если это не влечет за собой дополнительных экономических затрат).

После обоснования рациональной точности и методики геофизических наблюдений решается вопрос о форме и размерах съемочной сети. *Масштаб съемочной сети* определяется расстоянием между профилями наблюдений. *Шаг по профилю* зависит от способа регистрации поля (дискретного или непрерывного), масштаба съемки и размера объекта исследований. При непрерывной автоматической записи поля со спутника, самолета (вертолета), автомобиля или судна принципиальное значение имеет лишь расстояние между профилями (маршрутами).

*При рекогносцировочных съемках (региональных исследованиях) расстояние между маршрутами  $D_y$*  выбирается с таким расчетом, чтобы аномальная зона, созданная каждой крупной геолого-структурной единицей (интрузия, складка, тектонический блок, поле развития образований определенного литологического состава и т. п.), *была пересечена не менее чем двумя маршрутными ходами.* *Шаг наблюдений по маршруту  $D_x$*  обычно значительно меньше межмаршрутных расстояний, поскольку уменьшение шага обходится дешевле, чем сгущение маршрутов, поэтому даже для изометрических объектов используется прямоугольная сеть с отношением  $D_y/D_x = 1,5:1; 2:1$  или даже  $2,5:1$ . Понятно, что для объектов вытянутой формы это отношение еще больше.

Мелкие и средние масштабы геофизических исследований согласуются в основном с соответствующими масштабами геологической съемки. Такие съемки охватывают большие территории, на которых так или иначе удастся определить господствующие простирания пород. Так, для масштаба  $1 : 200\ 000$  ( $1 : 100\ 000$ ) профили геофизических наблюдений располагаются на расстоянии 2 км (1 км) друг от друга, а шаг наблюдений в магнито- и электроразведке выбирается таким, чтобы не были пропущены аномальные зоны шириной больше 200 м, шаг в грави-

разведке – 1 км (0,5 км). Масштаб (топографический) отчетной карты геофизического поля не должен быть крупнее масштаба съемки.

При геологической съемке крупных масштабов большое значение имеют стратиграфическое и литологическое расчленение разреза, картирование рудоконтролирующих признаков, поиски новых месторождений полезных ископаемых. При геофизических съемках масштабов 1 : 50 000 и 1 : 25 000 (общие поиски) шаг по профилю должен быть таким, чтобы не менее двух-трех точек наблюдений попали в аномальную зону, а расстояние между профилями выбирают исходя из протяженности аномалий так, чтобы их пересекали по крайней мере 1–2 профиля.

При детальном съемках (масштабы 1:10 000 и 1:5 000) густота сети геофизических наблюдений определяется степенью изменчивости физико-геологических параметров. При детализации перспективной аномалии сеть выбирается значительно более густой, чем при ее выделении на стадии поисков. Это связано с необходимостью уточнения размеров и формы изучаемой аномалии и исследованием в ее пределах структуры физического поля: его амплитуды, градиента, положения локальных экстремумов и т. п.

Существуют методы выбора оптимальных сетей наблюдений для выявления объектов (аномалий) с известными параметрами. Сеть геофизических наблюдений считается оптимальной, если она обеспечивает с определенной заданной вероятностью решение поставленной задачи при относительно малых затратах.

Для расчета оптимальных сетей используется несколько подходов. Первый из них – *достоверное выделение аномалии как объекта с заданной геометрией*. При этом поисковая сеть выбирается таким образом, чтобы с заданной вероятностью выявить все аномалии с минимальными размерами по длине ( $a$ ) и по ширине ( $b$ ) определенным числом точек. Значения  $a$  и  $b$  снижаются с графиков физического поля на уровне нижнего аномального предела, который оценивается по результатам решения прямых задач для выбранной ФГМ. Оптимальной обычно является поисковая сеть размером  $0,9a \times 0,5b$ , гарантирующая с

вероятностью, близкой к единице, попадание в контур аномалии минимум двух точек наблюдений (рис. 1.19).

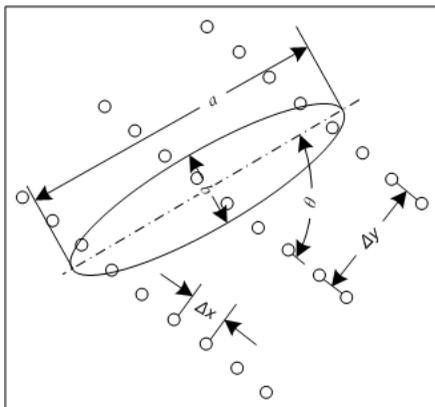


Рис. 1.19. Аномалия, которую требуется выявить поисковой сетью с шагом между точками наблюдений  $\Delta x$  и расстоянием между профилями  $\Delta y$

При заданных геометрических размерах аномалий следует использовать таблицы и номограммы, с помощью которых оцениваются вероятности пересечения искомых объектов. В основе их расчета лежит решение задачи Бюффона, согласно которой определяется вероятность  $P$  пересечения наугад бросаемой иглой длиной  $2l$  одной из параллельных линий, отстоящих друг от друга на расстоянии  $2d$ :

$$P = \begin{cases} \frac{2l}{\pi} & \text{при } d > l \\ \frac{2l}{\pi} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{d^2}{l^2}} \right) + \arccos \frac{d}{l} & \text{при } d \leq l. \end{cases}$$

Из этой формулы следует, например, что обнаружение произвольно расположенных на площади объектов при условии  $2l = 2d$  происходит с вероятностью 0,636, а вероятность выявления объектов длиной  $2l = 100$  м при  $2d = 20$  м равна 0,974.

Весьма удобны для практического использования *номограммы Г.С. Вахромеева* для расчета вероятности подсечения объекта не менее чем двумя точками  $P > 2$ . Эти номограммы приведены на рис. 1.20, осями координат здесь являются соответственно длина  $a$  и ширина  $b$  аномалий, нормированных по

параметрам поисковой сети:  $L_a = a/D_y$  и  $m_b = b/D_x$ . В качестве примера использования номограммы приведем расчет сети для картирования линейных зон метасоматоза, контролирующих размещение пегматитовых жил и гидротермального изменения пород, которым отвечают аномалии магнитного поля. Вероятность выявления таких объектов не ниже 0,95 ( $P = 0,95$ ) при преимущественно ортогональном расположении объектов к линии профилей ( $\vartheta = 61-90^\circ$ ). Приняв ширину аномалий  $b = 20$  м, а их длину  $a = 100$  м, получим, согласно номограмме, сеть  $100 \times 10$  м, отвечающую точке с координатами  $L_a = 1$ ;  $m_b = 2$ . При заданной поисковой сети эти номограммы позволяют оценить вероятность выявления тех или иных объектов.

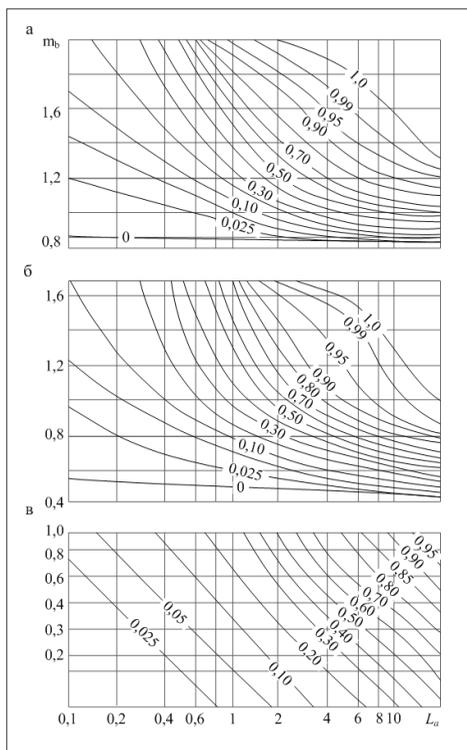


Рис. 1.20. Номограммы для определения подсечения объектов не менее чем двумя точками ( $P \geq 2$ ) при углах  $\vartheta$ :  $61-90^\circ$  (а);  $31-60^\circ$  (б);  $0-30^\circ$  (в); шифр кривых – вероятность  $P$  подсечения объекта

Произведем расчет сетей наблюдений на основе надежности обнаружения аномалии. Во всех рассмотренных выше случаях исходными данными при расчете сетей являлись геометрические параметры объекта. Однако при выборе сети следует учитывать также, что наблюдаемое поле является суммой аномалий и помех. Действительно, при поисках глубокозалегающих объектов, при незначительной контрастности физических свойств объекта и вмещающих пород аномалии становятся слабыми, соизмеримыми с уровнем помех.

В этом случае более важным для обнаружения объекта становится различие спектрального состава аномалии и помех. При уменьшении шага съемки спектр помех обогащается высокочастотными составляющими за счет эффектов, создаваемых поверхностными неоднородностями, и резко отличается от спектра аномалии (полезного сигнала), обусловленной залегающим на глубине объектом. Чем больше это различие, тем легче выделить даже весьма слабую аномалию путем применения соответствующих приемов фильтрации полей. При выделении слабых аномалий на фоне соизмеримых по интенсивности помех, целесообразно уменьшать расстояния между пунктами наблюдений, а для выбора сети следует использовать энергетическое отношение аномалия/помеха  $p$ . Для некоррелированной помехи это отношение равно

$$\sigma = \sigma_{\text{общ}}; \quad p = \sum_{i=1}^m a_i^2 / \sigma^2 \quad \text{или} \quad p = \epsilon \cdot m / \sigma^2,$$

где  $\alpha$  – среднее квадратическое значение аномалии;  $m$  – число аномальных значений (точек измерений). Величина энергии аномалии  $\sum a_i^2$  рассчитывается по эффекту, полученному путем решения прямой задачи, с учетом тех точек, для которых значения поля составляют не менее 5–10 % от максимальной амплитуды аномалии. На рис. 1.21 приведены зависимости отношения  $\alpha/\sigma$  от  $\sqrt{m}$  при различных значениях надежности обнаружения аномалии  $\gamma$ .

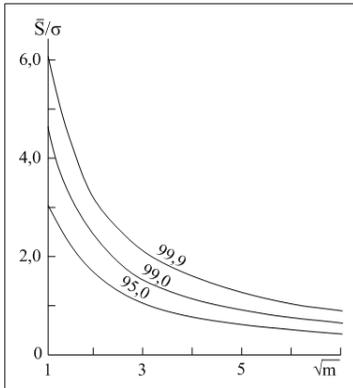


Рис. 1.21. Зависимость отношения аномалия/помеха  $\bar{p}$  от числа аномальных значений  $m$  при заданной надежности обнаружения аномалий  $\gamma$  (шифр кривых в %)

### 1.3. НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ

Обратная задача геофизики заключается в определении параметров аномалиеобразующего объекта по наблюдаемым значениям физического поля при наличии некоторой априорной информации об этом объекте. Например, в качестве источника гравитационной аномалии изометричной формы в первом приближении можно рассматривать шар, залегающий в интервале глубин от  $h1$  до  $h2$  с дефектом плотности  $\sigma$  относительно вмещающих его пород. Располагая набором значений наблюдаемого поля  $\Delta g$  и представленной выше априорной информацией, в процессе решения обратной задачи определяются радиус  $R$  шара и глубина залегания его центра  $H$ . Гравитационное поле построенной модели (шара) должно незначительно отличаться от наблюдаемого, что является необходимым условием достоверного решения обратной задачи.

Известно, что обратная задача в разведочной геофизике (в отличие от прямой задачи) не может быть решена однозначно каким-либо одним методом. Эта неоднозначность или неопределенность решения имеет две стороны. Одна из них касается качественного определения геологической природы выявленных геофизических аномалий, вторая – получения количественных характеристик геометрии и свойств объектов исследова-

ний: формы, размеров, глубины залегания, петрофизических характеристик.

Применительно к решению конкретной геологической задачи преобладающее значение может иметь либо качественная, либо количественная сторона неоднозначности, хотя в общем случае они проявляются одновременно.

### ***1.3.1. Качественная неоднозначность: определение природы геофизических аномалий***

Установление геологической природы аномалий того или иного геофизического поля является первоочередной задачей в рудных районах, для которых проблема классификации геофизических аномалий на рудные и нерудные стоит особенно остро. Действительно, аномалии гравитационных, магнитных, электрических и других полей, обусловленные объектами исследования, очень часто не отличаются по форме, интенсивности и размерам от аномалий, создаваемых геологическими неоднородностями верхней части разреза, рельефом местности и другими факторами. В частности, аномалии от вертикально залегающих рудоносных объектов часто сходны с аномалиями от тектонических нарушений, по которым внедрялись гидротермальные растворы.

Необходимость комплексирования при определении природы аномалий в общем случае можно проиллюстрировать на следующем весьма схематичном, но довольно убедительном примере. Предположим, что физические свойства наиболее распространенных геологических образований изучаемого района могут быть представлены в виде графиков средних значений, показанных на рис. 1.22. Наибольший интерес с поисковой точки зрения представляет рудовмещающий комплекс пород В. В результате магниторазведочных работ удалось установить, что магнитная восприимчивость пород, ряд аномалий наблюдаемого поля, составляет  $\chi'$ . Как видно из рис. 1.22, этому значению  $\chi$  отвечают породы трех типов А, В и Е, следовательно, однозначно решить задачу с привлечением данных одной магниторазведки нельзя. Если по результатам гравиразведки определена плотность пород  $\sigma'_n$ , то наш выбор будет сужен и ограничен уже

только двумя типами пород – А и В, так как породы типов Д и Е одновременно обоим условиям не удовлетворяют. Наконец, если получена и величина электрического сопротивления породы, задача может считаться решенной: совместное использование трех методов – магниторазведки, гравиразведки и электроразведки – позволяет однозначно выделить участки развития горных рудовмещающих пород типа В, характеризующихся параметрами  $\chi'$ ,  $\sigma'_п$  и  $p'_к$ .

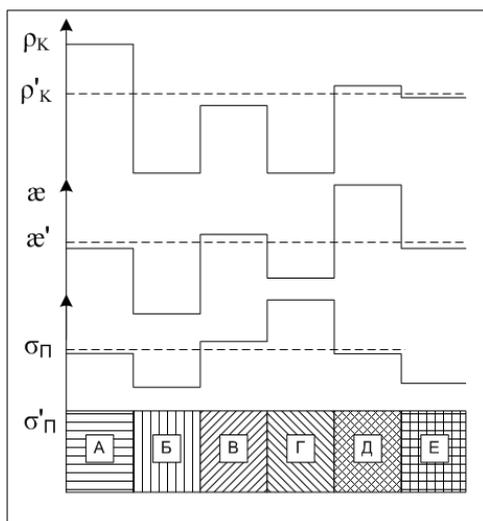


Рис. 1.22. Определение природы геофизических аномалий

Приведем еще один пример из практики геофизических исследований. На первом этапе поисков алмазонасных кимберлитовых трубок в Якутии из геофизических методов широко применялась только магниторазведка (в воздушном и наземном вариантах). Но вскоре было установлено, что аналогичные по характеру и интенсивности магнитные аномалии наблюдаются как над алмазонасными кимберлитами, так и над трапповыми силлами (рис 1.23). Для оценки геологической природы таких аномалий были использованы гравиразведка, электропрофилирование и метод индукции. Оказалось, что в отличие от траппов кимберлиты характеризуются отрицательными (а не положи-

тельными) аномалиями силы тяжести, пониженными (а не повышенными) значениями кажущегося электросопротивления (при фиксированных разносах АВ) и наличием на контактах с вмещающими породами перехода через нуль т.н. электрической оси в методе индукции. Конечно, нет необходимости одновременно использовать все эти признаки для классификации аномалий, нужно выбрать из них наиболее значимый и экономически выгодный. В данных условиях наилучшим проверочным методом является гравиразведка, принцип применения которой для разбраковки аномалий иллюстрирует табл. 10.

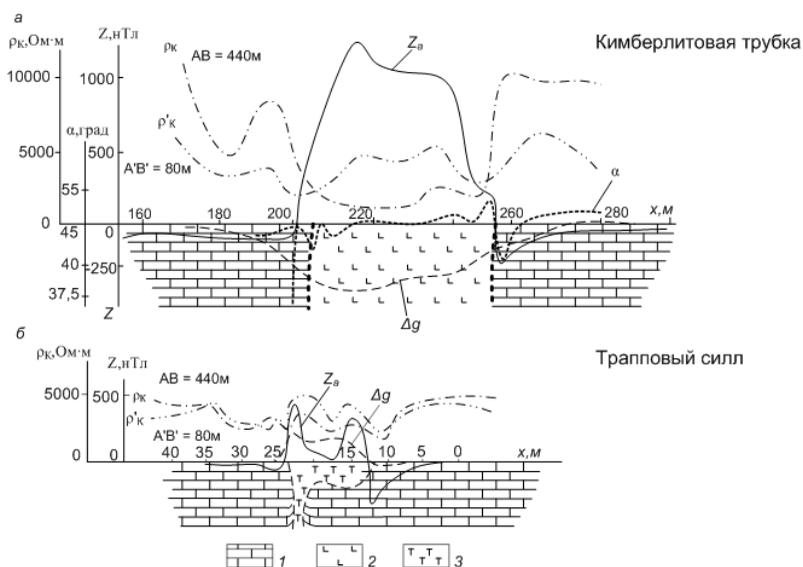


Рис. 1.23. Результаты комплексных геофизических исследований при поисках алмазов (Якутия): аномалии над кимберлитовой трубкой (а) и трапповым сиплом (б): 1 – вмещающие карбонатные породы; 2 – кимберлит; 3 – породы трапповой формации

Таблица 10

**Признаки выделения аномальных участков, перспективных  
на обнаружение кимберлитов в положительно  
намагниченных траппах**

		Магнитный потенциал (псевдогравитационное поле). Аэромагнитные аномалии. Осредненное магнитное поле			
		Локальная положительная аномалия 	Локальная отрицательная аномалия		Отсутствие аномалии на локальном участке 
			интенсивная 	слабая 	
Гравитационное поле	Локальная положительная аномалия 	н.тр.	н.тр.	н.тр.	н.тр.
	Локальная отрицательная аномалия 	тр.	н.тр.	тр.	тр.
	Отсутствие аномалии на локальном участке 	тр.	н.тр.	н.тр.	н.тр.

Примечание: (тр. – трубка (перспективный объект); н.тр. – не трубка)

***1.3.2. Количественная неоднозначность  
при решении обратных задач геофизики***

С целью оценки возможностей геофизического метода для решения поставленной геологической задачи необходимо (кроме качественной оценки неоднозначности определения природы его аномалий) изучить вопросы количественной неоднозначности решения обратной задачи. Неоднозначность количественного решения обратной задачи проявляется в теоретической и практической эквивалентности [15].

Теоретическая эквивалентность состоит в том, что различные по размерам и глубинам залегания геологические объекты могут создавать одинаковые по форме, размерам и интенсив-

ности аномалии. Практическая эквивалентность определяется совпадением аномальных эффектов от различных по параметрам объектов в пределах погрешностей наблюдений. Рассмотрим вопросы неоднозначности количественного решения обратных задач применительно к каждому методу.

Гравиразведка. Общий случай обратной задачи этого метода можно изложить следующим образом. Пусть известна величина потенциала  $U(x, y, z)$  на некоторой уровенной поверхности  $S$ ; требуется найти расположение масс, создающих это поле. Массы располагаются внутри этой поверхности. Известно, что в этом случае по теореме Гаусса может быть определена только суммарная масса  $M$ :

$$\int_S \frac{dU}{dn} dS = 4\pi \gamma M,$$

где  $\frac{dU}{dn}$  производная  $U$  по нормали к поверхности  $S$ .

Если, не меняя общей массы  $M$ , перераспределить ее так, чтобы поверхность  $S$  оставалась уровенной, то потенциал  $U$  на поверхности  $S$  и вне ее не изменится (теорема Стокса). В общем случае для произвольной формы  $S$  задача Стокса не решена, но в частных случаях поверхностей шара или эллипсоида ее решение найдено, и оно показывает, что распределение силы тяжести не зависит от перемещения масс внутри этих поверхностей. В частности, из теории гравиразведки известно, что поле объекта сферической формы при достаточно большой глубине его залегания тождественно полю его эффективной массы, сосредоточенной в центре тела. Следовательно, можно представить себе бесчисленное множество сфер различных радиусов, создающих одну и ту же гравитационную аномалию. Для этого только нужно, чтобы эффективная масса  $M_{\text{эф}}$ , т.е. произведение эффективной плотности объекта на его объем, сохранялась постоянной (рис. 1.24).

Следовательно, в случае объекта шаровой формы по результатам измерения силы тяжести при отсутствии априорных сведений можно найти только положение центра и общий дефект его массы по отношению к вмещающим породам (эффективная масса); радиус шара и его плотность отдельно опре-

делить нельзя. Это относится также к бесконечному горизонтальному круговому цилиндру.

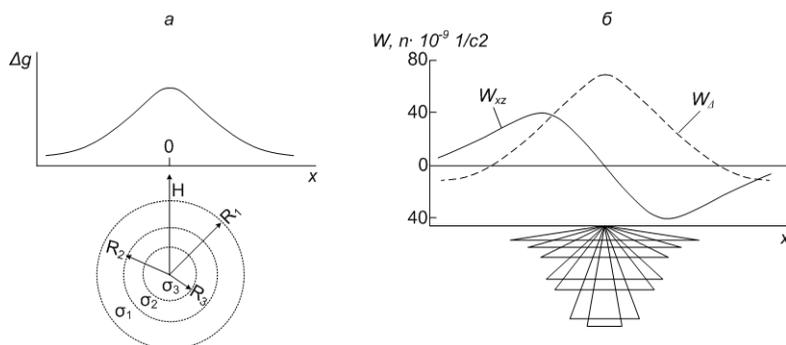


Рис. 1.24. Теоретическая эквивалентность в гравиразведке:  
 а – гравитационное поле сферы  
 (условие эквивалентности  $R^3 \sigma = const, \sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3, R_1 > R_2 > R_3$ );  
 б – кривые вторых производных гравитационного потенциала  
 над треугольными призмами с одинаковой плотностью  $\sigma$

Важнейшим моментом при количественной интерпретации является *практическая эквивалентность*. Действительно, данные полевых наблюдений обычно всегда отягощены влиянием помех различного происхождения. Кроме того, в них обязательно вводятся поправки (за высоту точки наблюдений, за влияние рельефа местности и др.), вносящие какие-то дополнительные погрешности. В связи с этим можно говорить и о практической эквивалентности как основном факторе, влияющем на качество решения обратных задач гравиразведки.

Например [22], в случае решения обратной задачи гравиразведки по осложненному помехой полю, созданному правильным шестиугольником с плотностью  $0,1 \text{ г/см}^3$ , невязку между исходным и расчетным полями, не превышающую  $0,15 \text{ мГал}$ , обеспечивают различные призмы, обладающие плотностями от  $0,05$  до  $0,2 \text{ г/см}^3$  (рис. 1.25).

**Магниторазведка.** При сравнении аномалий вертикальной составляющей магнитного поля  $Z_a$  от трех цилиндрических тел нетрудно убедиться, что даже при малых ошибках в выборе нормального поля и на фоне слабых помех они практически не-

различимы (рис. 1.26). Неоднозначность решения обратной задачи существенно возрастает в том случае, когда одновременно определяют несколько параметров искомого объекта.

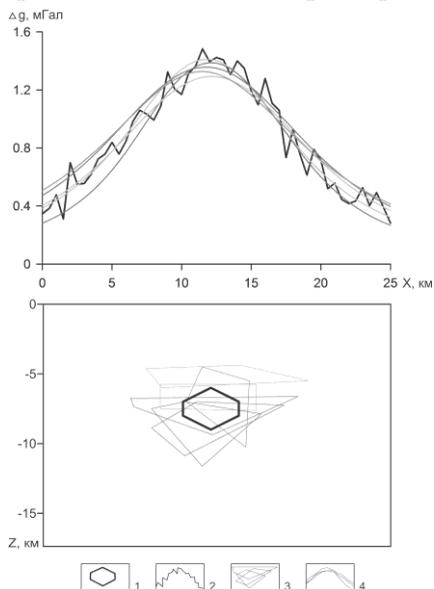


Рис. 1.25. Пример проявления практической эквивалентности при решении обратной задачи гравиразведки: 1 – аномалиеобразующий объект; 3 – подобранные возмущающие объекты; графики: 2 – исходного поля, 4 – полей от подобранных объектов

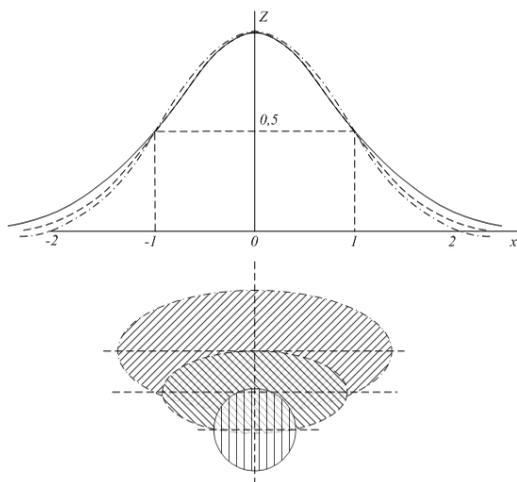


Рис. 1.26. Практическая эквивалентность цилиндрических тел по магнитному полю

Сейсморазведка. Этот метод характеризуется многообразием источников полезной информации: амплитуды и времена прихода, фазы продольных и поперечных волн, которые могут быть измерены в любом пункте, как на земной поверхности, так и под землей, для любого положения взрыв-пункта, на разных частотах и в различные моменты времени после взрыва. Благодаря этому достигается принципиальная возможность получения *однозначного решения*. Однако практически реализовать эту возможность можно лишь с помощью некоторых упрощающих предположений: отражающие границы, как правило, принимаются за плоские, скорость волн – постоянной (в пределах одного горизонта) и др. Обычно эти условия в той или иной степени соблюдаются, поэтому данные сейсморазведки о глубинах залегания и мощности слоев служат опорными для других геофизических методов.

Тем не менее надо иметь в виду, что и этому методу свойственна практическая эквивалентность, с которой связаны погрешности построения отражающих и преломляющих границ. Эти погрешности обусловлены *неточностью определения скоростей распространения упругих волн в исследуемом районе*. Существенное влияние оказывают различные геологические, технические и прочие помехи. Введение поправок за зону малых скоростей, за момент взрыва, за рельеф приводит к дополнительным погрешностям и т. д. Возможности сейсморазведки могут быть ограничены погрешностью определения эффективных скоростей  $V$ . Если, например, относительную погрешность определения скорости обозначить  $\Delta V/V$ , а глубины залегания интересующего горизонта –  $\Delta H/H$ , то получим следующую формулу:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta V}{V} \approx \frac{\Delta V}{V}.$$

Таким образом, даже в благоприятных условиях при относительно малой погрешности оценки скорости ( $\Delta V/V = 1\%$  и  $H = 3000$  м)  $\Delta H = 30$  м. Следовательно, структуры или неровности рельефа отражающей границы меньшей амплитуды не могут быть обнаружены.

Электроразведка. В электроразведке методом ВЭЗ очень большое значение имеет практическая эквивалентность, которая определяется реальной погрешностью полевых измерений  $\rho_k$  (около  $\pm 5\%$ ) и отклонениями используемой интерпретационной модели от реального геоэлектрического разреза. Как показывает опыт, по кривым вертикального электрического зондирования обычно можно найти лишь отношение мощности  $i$ -го слоя ( $h_i$ ), входящего в геоэлектрический разрез, к его сопротивлению  $\rho_i$  (продольная проводимость  $S_i$ ) либо их произведение (поперечное сопротивление  $T_i$ ), а не сами величины  $h_i$  и  $\rho_i$  раздельно.

Таким образом, для изменяющихся в некоторых пределах значений  $h$  и  $\rho$  кривые ВЭЗ практически неразличимы, если в зависимости от типа кривой соблюдается одно из условий:  $S = \text{const}$  или  $T = \text{const}$ . Так, например, кривые типа  $K$  для разрезов с  $\rho_2/\rho_1 > 9$  при постоянном  $T_2/T_1 = 12$ ,  $\rho_3 = 0$  и переменных  $\rho_2/\rho_1$ ,  $h_2/h_1$  эквивалентны друг другу в пределах точности полевых измерений (рис. 1.27, кривые для отношений  $\rho_2/\rho_1 = 9, 19, 39$ ).

Физически (чисто качественно) эта эквивалентность может быть объяснена следующим образом. При переходе из вышележащего пласта с сопротивлением  $\rho_1$  в нижележащий с сопротивлением  $\rho_2$  ток стремится течь в последнем либо вдоль этого пласта (когда  $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ ), либо вкрест ему (когда  $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3$ ). Следовательно, в первом случае на распространение тока в промежуточном пласте основное влияние оказывает продольная проводимость  $S_2 = h_2/\rho_2$ , а во втором – поперечное сопротивление  $T_2 = h_2\rho_2$ . Это позволяет утверждать, что допустимо некоторое пропорциональное изменение параметров пласта  $h_2$  и  $\rho_2$ , при котором величины  $S_2$  (для разрезов типов Н и А) или  $T_2$  (для разрезов типов К и Q) остаются неизменными, т.е. не нарушают электрическое поле на земной поверхности, а значит, не изменяют формы кривых  $\rho_k$ .

Возможности достижения однозначного решения обратной задачи в методах электроразведки переменным током значительно выше, чем у методов сопротивления вообще и у ВЭЗ в частности. Действительно, помимо изменения размеров установки (взаимного расположения заземлений и расстояний между ними), производимого при электрическом зондировании, в

методах переменного тока имеется возможность варьировать частотой генерируемого поля, вместе с измерением интенсивности поля исследовать фазовые сдвиги, измерять не только электрическую, но и магнитную составляющую, импеданс поля и т. д.

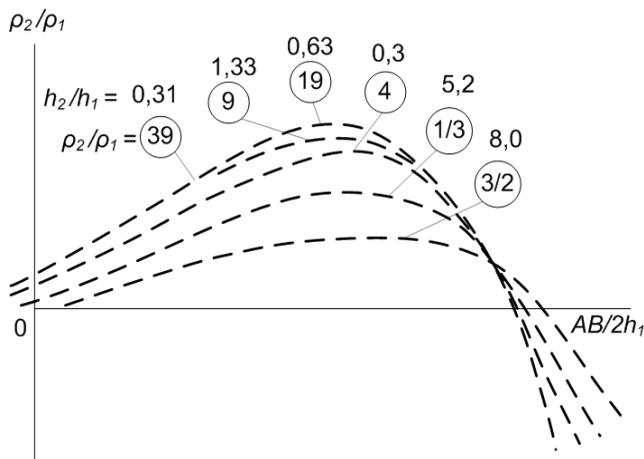


Рис. 1.27. Практическая эквивалентность кривых ВЭЗ типа К для  $T_2/T_1 = 12$

### 1.3.3. Сужение пределов неоднозначности

Качественная и количественная неоднозначности при решении обратной задачи геофизики проявляются обычно одновременно. Поэтому в общем случае достижение однозначности как для определения природы геофизических аномалий, так и для количественного описания возмущающих объектов возможно лишь путем комплексирования разных методов. Рассмотрим схематический пример одновременного проявления неоднозначности, в котором продемонстрирована принципиальная возможность ошибочного задания заверочной буровой скважины в эпицентре гравитационной аномалии, не являющейся моногеничной (рис. 1.28).

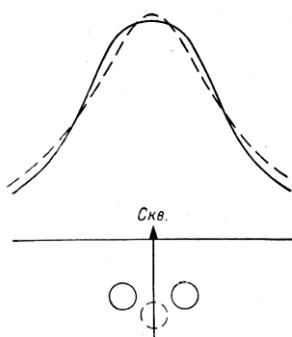


Рис. 1.28. Пример ошибочного предположения о том, что гравитационная аномалия от двух горизонтальных круговых цилиндров обусловлена одним телом (по Н.Н. Боровко)

Сужение пределов неоднозначности, когда одновременно проявляется качественная и количественная эквивалентность, проиллюстрируем на примере интерпретации геофизических полей при исследовании докембрийского основания Среднерусской платформы. Как известно, наблюдаемые здесь магнитные аномалии, нередко большой интенсивности, могут быть вызваны рельефом докембрийского основания: поднятиям будут отвечать положительные поля, а понижениям – отрицательные. Но таким же образом их можно объяснять сменой состава пород фундамента: над кислыми породами наблюдается уменьшение интенсивности магнитного поля, а над основными – повышение. Применение гравиразведки в комплексе с магниторазведкой не позволяет устранить эту неопределенность: как правило, магнитные аномалии сопровождаются гравитационными аномалиями того же знака; т.е. опять не удастся разделить между собой влияние рельефа поверхности фундамента и смены типов пород.

Причина заключается в том, что породы докембрийского основания обладают повышенной по сравнению с вышележащей осадочной толщей магнитной восприимчивостью и плотностью, что обуславливает появление аномалий, отражающих его рельеф. При переходе от кислых пород к основным повышаются магнитные свойства и плотность, поэтому смена состава пород фундамента также вызывает аналогичные аномалии.

В этом случае требуется применить еще какой-то третий геофизический метод (электроразведку или сейсморазведку), с целью изучения рельефа докембрия, что обеспечит возможность разделения гравитационных и магнитных аномалий двух указанных типов, а следовательно – получить достоверную информацию о структурно-тектоническом строении и петрографическом составе кристаллического фундамента.

Возможности внутриметодного комплексирования. Примером использования внутриметодного комплексирования для повышения геологической информативности исследований могут служить результаты пространственных измерений магнитного поля, выполненных на земной поверхности и в скважинах в пределах Кингашского месторождения [5]. Сульфидное медно-никелевое оруденение Кингашского массива пространственно и генетически связано с породами перидотитового состава раннепротерозойского возраста. Для месторождения характерна прямая зависимость интенсивности намагниченности от степени серпентинизации горных пород, что обусловлено изменениями концентрации в них магнетита. Установлено, что замещение первичных сульфидов магнетитом при серпентинизации происходит вдоль границ вкрапленников и по трещинам внутри сульфидов. Таким образом, наиболее обогащенные сульфидными минералами блоки Кингашского массива характеризуются повышенными магнитными свойствами.

Материалы каротажа магнитной восприимчивости и скважинной магниторазведки, в комплексе с результатами детальной наземной магнитной съемки, использовались при построении геомагнитных моделей. Теоретически доказано, что совместное использование результатов наземно-скважинных (пространственных) измерений геопотенциальных полей при определении параметров аномалиеобразующих объектов существенно снижает степень неоднозначности решения обратной задачи и тем самым повышает достоверность интерпретации. Интерпретация наземно-скважинной магниторазведки позволила с достаточно высокой степенью достоверности охарактеризовать блоковое внутреннее строение Кингашского базит-гипербазитового массива, выявить области наиболее интенсивного проявления процессов серпентинизации, локализовать ру-

доперспективные зоны магнетитовой минерализации в около-скважинном и подзбойном пространстве, а также рекомендовать бурение нескольких поисковых скважин (рис. 1.29).

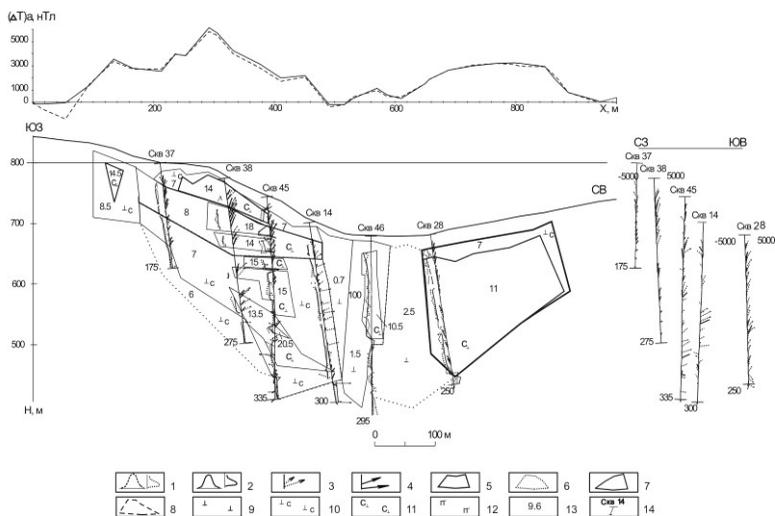


Рис. 1.29. Результаты моделирования геологического разреза по наземно-скважинным измерениям геомагнитного поля по профилю 2 в пределах месторождения Кингаш:  
 графики магнитного поля: 1 – измеренного в скважинах и на земной поверхности, 2 – вычисленного от модели разреза; векторы составляющих магнитного поля: 3 – измеренного в скважинах, 4 – вычисленного от модели разреза; 5 – крупные блоки магнитоактивных пород ультраосновного состава; магнитовозмущающие объекты, выделяемые по геофизическим данным: 6 – за плоскостью разреза, 7 – в плоскости разреза, 8 – перед плоскостью разреза; намагниченные интрузивные породы: 9 – перидотиты, 10 – перидотиты серпентинизированные, 11 – серпентиниты по перидотитам, 12 – габбро–пироксениты; 13 – значения намагниченности объектов в А/м; 14 – скважины и их номера

Еще один пример внутриметодного комплексирования – способ разделения аномалий, выделенных электропрофилirованием, на приповерхностные, связанные с неоднородностями в

рыхлых отложениях, и глубинные, обусловленные коренными породами. Способ заключается в проведении работ на двух разносах питающих заземлений  $AB$  – меньшем и большем. Если при большем разносе аномалия  $\rho_k$  проявляется резче, чем при меньшем, значит, она глубинного происхождения, и наоборот. Лучше для этих целей использовать графики отношения величин  $\rho_k$ , полученных для двух разносов. Этим же способом в электропрофилеировании можно разрешить неопределенность типа синклиналь – антиклиналь. Например, понижение  $\rho_k$  может наблюдаться как при поднятии нижнего слоя высокого сопротивления, так и в случае погружения пласта низкого сопротивления (рис. 1.30). В обоих случаях можно провести классификацию за счет того, что при электропрофилеировании используются элементы зондирования, т.к. глубина исследований увеличивается при увеличении разносов линии  $AB$ .

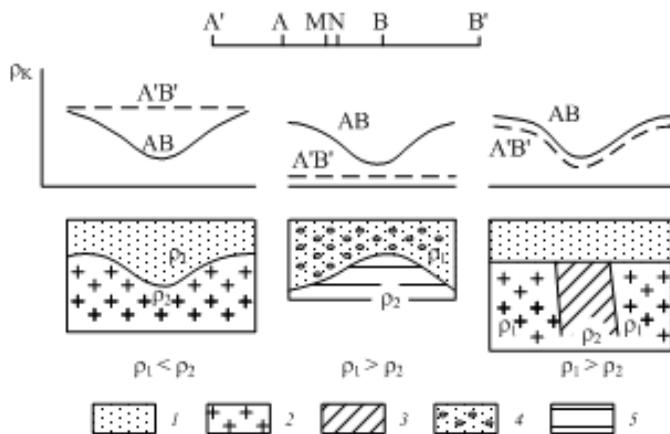


Рис. 1.30. Результаты двухразносного СЭП над различными типами геологических разрезов:  
 1 – увлажненные рыхлые отложения; 2 – граниты;  
 3 – зона трещиноватости; 4 – глыбовые песчаники; 5 – глины

Примеры межметодного комплексирования. В большинстве случаев для эффективного решения геологических задач необходимо использовать несколько геофизических, геологиче-

ских, геохимических методов и бурение. При классификации аномалий большую роль могут сыграть такие методы, как пьезоэлектрический (на кварц-содержащих объектах), контактный метод поляризационных кривых и частичного извлечения металлов (на рудах) и др.

В то же время иногда полагают, что в применении к конкретным геологическим задачам достаточно использовать один какой-то метод, и, следовательно, необходимость комплексирования как бы отпадает. Например, универсальным и единственно применимым методом для поисков месторождений нефти и газа считают сейсморазведку. Выше уже было показано, что это далеко не так. В частности, прямые поиски таких месторождений, а также выявление малоамплитудных поднятий и стратиграфических ловушек возможно лишь на основе широкого комплексирования всех средств геологической разведки, в том числе геофизических методов. Следует еще учитывать экономические соображения: на первых этапах геологоразведочных работ проведение сейсморазведки на всей площади исследований нецелесообразно, а иногда и просто невозможно. Совершенно необходимым оказывается предварительное изучение обширных территорий для выделения наиболее перспективных участков. А для этого как раз и следует применять более дешевые и мобильные методы: магниторазведку, гравиразведку, электроразведку.

До недавнего времени основным методом поисков железорудных месторождений считалась магниторазведка. В действительности оказалось, что электроразведка с большей точностью, чем магниторазведка, позволяет определить мощность рыхлых отложений и глубину залегания объекта, а гравиразведка – размеры, форму, элементы залегания рудных тел. Высокая точность интерпретации данных гравиразведки определяется тем, что эффективная плотность руд является более устойчивым параметром, чем их магнитные свойства. Из-за резкой изменчивости последних, даже в пределах одного и того же месторождения, количественные расчеты по данным магниторазведки могут быть весьма затруднены. К тому же далеко не во всех случаях железные руды сильномагнитны. На месторождениях осадочного, инфильтрационного происхождения, а также в случае коренных руд существенно гематитового состава роль маг-

ниторазведки довольно скромна и, наоборот, резко возрастает поисковое значение электроразведки и гравиразведки.

На сужение пределов количественной неоднозначности направлены исследования по изучению связей между аномальными полями разных методов и пересчету одного поля в другое. В настоящее время практическое применение имеет лишь пере-

счет магнитного поля в псевдогравитационное:  $U = \frac{J}{G\sigma} \frac{dV}{dl}$ , где  $l$

– направление намагничения. Современные алгоритмы позволяют с высокой точностью получать поля, обусловленные гравитационным эффектом от пространственного распределения масс, значения которых строго пропорциональны намагниченности реальных геологических объектов (псевдогравитационное поле) и магнитным эффектам от пространственного распределения объектов с намагниченностью, пропорциональной их плотности (псевдомагнитное поле). Коэффициент пропорциональности  $J/G\sigma$  не является постоянным в реальных физико-геологических условиях, т.е. результаты вычисления псевдополей несут в себе определенные искажения, но в целом оказывают существенную помощь в процессе визуальной качественной интерпретации данных гравиразведки и магниторазведки.

Карты псевдогравитационного поля  $\Delta g_{ps}$  позволяют более четко и ясно, чем карты магнитного поля, увидеть общую картину геологического строения изучаемой территории, т.к. при их построении устраняется эффект наложения положительных и отрицательных областей соседних аномалий. В качестве примера приводится рис. 1.31, где на карте изоаномал  $\Delta g_{ps}$  отчетливо выделяется золоторудное месторождение, расположенное в центре площади, оруденение которого связано с линзовидными телами магнетитсодержащих скарнов [20]. Для интерпретации аномалий  $\Delta g_{ps}$  применимы все методы, разработанные для интерпретации аномалий поля силы тяжести.

Псевдомагнитное преобразование гравитационного поля также базируется на соотношении Пуассона, характеризующем взаимосвязь между магнитным и гравитационным потенциалами. При сопоставлении магнитного и гравитационного полей с

целью районирования площади полезным является совмещение карт магнитного и псевдомагнитного полей.

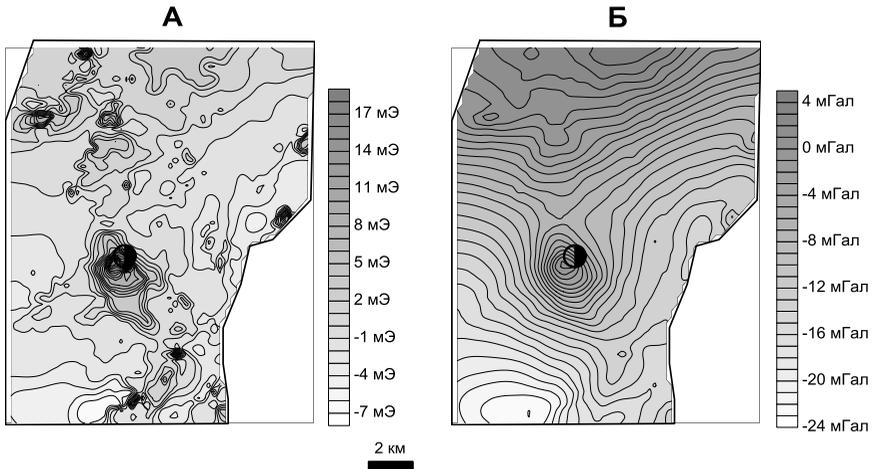


Рис. 1.31. Псевдогравитационное преобразование аномального магнитного поля золоторудного месторождения. Кузнецкий Алатау:  
 А – магнитное поле, Б – псевдогравитационное поле;  
 условное обозначение: Коммунарское золоторудное месторождение

#### 1.4. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Геологическая информативность геофизических исследований, наряду с оптимальным выбором методики и техники полевых работ, определяется качеством интерпретации полученных данных. Существует множество различных методологических подходов к интерпретационному процессу, что обусловлено, с одной стороны, сложностью и многообразием геологических задач, решаемых с помощью геофизических методов, а также наличием множества приемов, способов и методик их решения. Единая теория комплексной интерпретации геофизических данных до сих пор не разработана.

Подавляющее большинство геофизиков разделяют концепцию интерпретационных моделей, суть которой состоит в

том, что любая интерпретация находится по экспериментальным данным в рамках принятых модельных представлений о геологической среде и поле, т.е. полностью определяется этими представлениями. Следовательно, всякая интерпретация геофизических данных модельна.

При этом «моделью (среды, поля, явления, процесса) называем совокупность представлений и допущений (о среде, поле, явлении, процессе), которые возникли как результат предыдущих исследований (среды, поля, явления, процесса), либо как результат теоретического обобщения, либо по аналогии; чаще всего все указанные факторы определяют существо модели (модельных представлений) совместно» [32, 33].

В общей схеме интерпретационного процесса по В. Н. Страхову, приведенной на рис. 1.32, сводящегося к построению интерпретационных моделей и решению задач в рамках этих моделей, предусматриваются обратная связь и итерационность построений. Обычно этот процесс включает в себя следующие стадии:

- подготовительную, или стадию построения интерпретационной модели (этапы I – V);
- собственно стадию интерпретации имеющихся данных в рамках принятой интерпретационной модели (этап VI);
- стадию анализа полученных результатов, на которой, в случае необходимости, осуществляется возврат на начальную стадию процесса с корректировкой первоначальной интерпретационной модели (этап VII–VIII).

Схематическое описание процесса качественной и количественной интерпретации данных одного метода – гравиразведки, приводится ниже по Е.Г. Булаху с соавторами [9]. Под интерпретацией гравитационных аномалий понимают определение формы, пространственного положения и геологической природы масс, которые вызвали эти аномалии.

На начальном этапе проводится визуальная качественная интерпретация гравитационного поля, представленного в виде карт или графиков. Наблюдаемое гравитационное поле анализируется без выполнения расчетов, уточняется общий характер поля, выясняется наличие региональной составляющей; затем

выделяют локальные участки, в пределах которых приближенно оценивают количество и форму возмущающих тел.

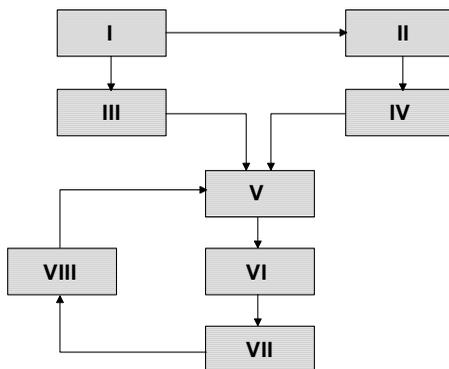


Рис. 1.32. Общая схема интерпретационного процесса в прикладной геофизике (по В.Н. Страхову):

- I – сбор имеющейся экспериментальной информации о геофизических полях и изучаемом объеме природной среды;
- II – процедуры вспомогательной обработки экспериментальных данных, имеющие целью уточнение модельных представлений о полях и среде; III – формирование модельных представлений о полях и изучаемой среде по априорным данным;
- IV – формирование модельных представлений о полях и изучаемой среде по результатам решения вспомогательных задач;
- V – формирование интерпретационной модели; VI – нахождение интерпретации в рамках принятой интерпретационной модели;
- VII – определение оценок надежности и точности найденной интерпретации; VIII – анализ результатов и выход на коррекцию интерпретационной модели

В процессе качественной интерпретации широко используют различные трансформации поля (разделение, продолжение, вычисление характеристик). Трансформации осуществляются с целью подавления мешающей информации и наиболее четкого выявления части полезной информации, связанной с определенными геологическими объектами [19].

В частности, для выделения локальных аномалий целесообразно использовать пересчет поля на горизонтальную плос-

кость в сочетании с его преобразованием в другие функции, например – вычисление 2-ой вертикальной производной на плоскости, расположенной выше поверхности измерений. При этом за счет увеличения высоты резульативной карты сглаживаются мелкие неоднородности поля, не несущие полезной информации при данном масштабе исследований, а за счет дифференциального преобразования происходит подавление низкочастотной (фоновой) компоненты. Трансформация гравитационного поля золоторудного узла, приведенного на рис. 1.33, позволяет уточнить контуры рудоконтролирующих интрузий габбро-диоритов и предположить принадлежность их к единому массиву на глубине [20].

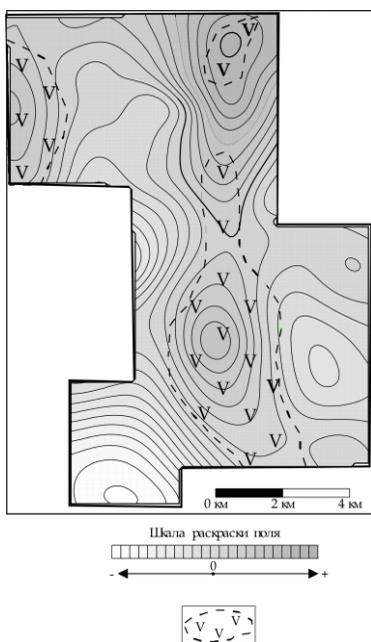


Рис. 1.33. Вторая вертикальная производная  $V_{zzz}$  поля силы тяжести на уровне  $z = 1.8$  км. Балахчинский золоторудный узел. Условное обозначение: контуры интрузий габбро-диоритов, выходящих на дневную поверхность

В последнее десятилетие в качестве инструмента интерпретации геопотенциальных полей широко применяются близкие к трансформациям методы: спектральный пространственный анализ (СПАН), интерпретационная томография, частотная селекция, корреляционное зондирование, гравиметрическое

зондирование, компенсирующая фильтрация, методы, основанные на аналитическом продолжении полей, способ послойного определения плотности, векторное сканирование, метод обратного оператора, метод вертикального градиента поверхностной плотности  $\mu_z(x,y,z)$  и другие методы, предназначенные для послойного изучения пространственного распределения геоплотностных (геомагнитных) неоднородностей [11, 21].

Отмечается, что в настоящее время можно считать сформировавшимся новое «направление в теории интерпретации потенциальных полей, связанное с попытками изучения в некоторых частных случаях вертикального распределения намагниченности и плотности по данным магниторазведки и гравиразведки» [6]. Это направление получило название «интерпретационной томографии», внутри которой выделяются два подхода – фильтрационный и аппроксимационный [6]. В первом случае тем или иным способом выделяются «разноглубинные» составляющие из наблюдаемого гравитационного (магнитного) поля, во втором – строятся пространственные распределения плотности  $\sigma = \sigma(x,y,z)$  или намагниченности  $J=J(x,y,z)$ , в той или иной степени отражающие основные особенности структурно-тектонического строения изучаемого объема геологической среды. К методам фильтрационной томографии относится векторное сканирование, реализованное в компьютерной технологии VECTOR, созданной в Горном институте УрО РАН под руководством В.М. Новоселицкого [11].

Перечислим основные особенности, присущие большинству этих методов, которые делают их привлекательными для геофизиков-интерпретаторов:

- 1) использование минимума априорной информации об источниках гравитационного поля;
- 2) отсутствие трудоемких процедур построения начального приближения, используемых в классических методах автоматизированного подбора;
- 3) разделение интерпретируемого гравитационного поля на составляющие, предположительно обусловленные влиянием разноглубинных (не обязательно горизонтальных) слоев горных пород;

- 4) применение сравнительно быстрых вычислительных алгоритмов, допускающих обработку больших объемов исходной информации;
- 5) возможность построения различных вариантов пространственных распределений геоплотностных неоднородностей в исследуемом объеме среды;
- 6) широкий спектр способов визуализации результатов интерпретационных построений.

Однако с теоретических позиций все методы гравитационной томографии выглядят весьма уязвимо. Эквивалентность и неустойчивость решения обратной задачи гравиметрии в сеточном классе источников при отсутствии априорных ограничений на их параметры неизбежно оказывают негативное влияние на результаты аппроксимационной томографии.

С каждым годом появляется все больше примеров успешного решения разнообразных геологических задач на основе гравитационной томографии. В первую очередь стоит упомянуть о результатах, полученных ГНПП «Аэрогеофизика» при использовании пакета программ СИГМА-3D. В частности, в работе [6] говорится о том, что «применение интерпретационной томографии показало ее достаточно высокую эффективность в самых разнообразных геологических условиях: Московская синеклиза, Прикаспий, Полярный Урал, Западная Сибирь и т.д.»

Развитие «томографического» подхода к интерпретации гравитационного и магнитного полей во многом обусловлено возросшими потребностями геофизической отрасли в оперативной интерпретации больших объемов цифровых данных и тесно связано с возросшими вычислительными возможностями компьютеров и новыми возможностями визуализации геоизображений. Этот подход в последние годы начал широко и успешно применяться при изучении глубинного строения Земли, геокартинге, поисках и разведке полезных ископаемых.

Приведем пример использования томографической интерпретации при изучении геологического строения Верхнекамского месторождения калийных солей. Поверхность соляной толщи, залегающей под более плотными осадочными отложениями, является гравиактивной границей, с перепадом плотности порядка  $0,2-0,4 \text{ г/см}^3$ , т.е. поднятия кровли солей будут соответ-

ствовать отрицательные локальные аномалии гравитационного поля. Плотность позднедевонских рифогенных массивов ( $2,70\text{--}2,72 \text{ г/см}^3$ ) намного больше плотности межрифовых осадков ( $2,50\text{--}2,65 \text{ г/см}^3$ ) [21], поэтому рифогенные массивы будут выделяться в гравитационном поле на соответствующих трансформантах положительными аномалиями. На 3D-диаграмме гравитационного поля уверенно разделяются гравитационные эффекты, обусловленные солями и рифами (рис. 1.34).

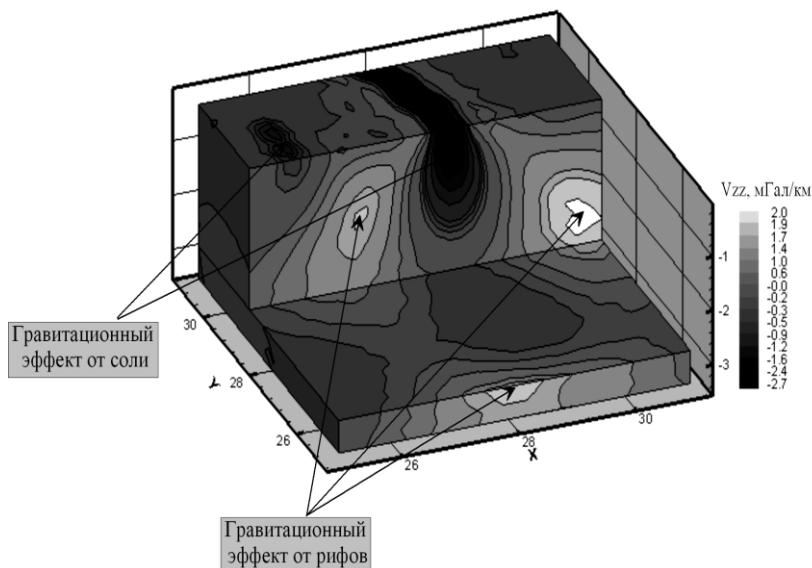


Рис. 1.34. 3D-диаграмма гравитационного поля  $\Delta g$

Рассмотрим вопросы, связанные с количественной интерпретацией, на примере гравirazведки (по Е.Г. Булаху). На стадии количественной интерпретации не только устанавливаются неоднородное строение, но и вычисляются параметры, которые характеризуют местоположение, размеры и элементы залегания геологических тел. Численные расчеты параметров возмущающих объектов выполняются при решении обратной задачи гравirazведки. Определение элементов геологического строения

исследуемого объема среды по гравиметрическим данным можно свести к описанной ниже задаче [9].

Зафиксируем в аномальном поле силы тяжести (или его трансформанте)  $n$  наиболее характерных точек, представив их как некоторый  $n$ -мерный вектор  $V = (v_1, v_2, v_3, \dots)$ . Исследователь может различными способами строить такие векторы; можно говорить об определенном пространстве  $W$ , которое объединяет различные совокупности  $V: V \in W$ .

На основании всех имеющихся сведений о геологической среде и об аномальном поле интерпретатор составляет схему-гипотезу о распределении плотностных неоднородностей в исследуемом объеме геологической среды. Местоположение, форма, размеры, физические свойства аномалиеобразующих тел также можно представить в виде  $m$ -мерного вектора  $P = (p_1, p_2, p_3, \dots)$ . В геологической схеме параметры также могут быть различными, а таких схем может быть несколько. Будем говорить о пространстве  $Q$ , где каждой конкретной схеме соответствует своя точка  $P: P \in Q$ . Функциональные пространства  $W$  и  $Q$  связаны между собой.

По совокупности значений параметров среды однозначно определяются значения аномального поля с помощью алгоритма решения прямой задачи. В общем виде прямую задачу можно описать оператором (т.е. некоторым правилом), который каждой точке пространства  $Q$  ставит в соответствие определенную точку пространства  $W$ :

$$V = \mathcal{F}(P), \quad V \in W, \quad P \in Q.$$

Обратная задача гравиразведки состоит в том, чтобы по заданным значениям компонент  $V$  определить вектор  $P$ , и в операторной форме записывается следующим образом:

$$P = \mathcal{F}^{-1}(V).$$

В общем случае это уравнение не обладает свойством единственности решения и является неустойчивым (малым изменениям гравитационного поля могут отвечать большие изменения в модели геологического строения и наоборот). Для его решения, в частности, привлекаются дополнительные сведения

о возмущающих объектах, полученные на стадии качественной интерпретации.

Следует отметить также, что не существует эффективных критериев принадлежности совокупности значений наблюдаемого поля  $V_{наб}$  множеству результатов решения прямой задачи  $V = \gamma(P)$ ,  $V \in \gamma$ ,  $P \in \rho$  от набора моделируемых параметров среды  $L(Q)$ , т.е. вполне возможно не получить требуемого совпадения наблюдаемого  $V_{наб}$  и модельного  $V_{мод}$  полей при использованном способе построения модели источников аномалий.

В этом случае используется понятие квазирешения обратной задачи, представляющего собой некий вектор параметров  $P$ , при заданном  $V_{наб}$ , для которого невязка наблюдаемого и модельного полей  $\|V_{наб} - \gamma_{мод}\|$  достигает минимума на множестве  $Q$ . На практике обычно любое решение обратной задачи является квазирешением.

Приведем пример интерпретации положительной локальной аномалии гравитационного поля амплитудой более 2 мГал, предположительно связанной с интрузивным массивом ультраосновного состава каледонского возраста, перспективным на хромитовое оруденение (рис. 1.35.а). Квазирешение обратной задачи построено из кубических элементов со стороной 0,25 км, достигнутая невязка полей  $\|V_{наб} - \gamma_{мод}\|$  составляет 0,16 мГал, т.е. сопоставима с точностью выполненной гравиметрической съемки 1:25000 масштаба. В результате количественной интерпретации была построена 3D-модель аномалиеобразующего объекта с избыточной плотностью 0,25 г/см<sup>3</sup>, морфология массива охарактеризована серией меридиональных и широтных разрезов, а также горизонтальными срезами при шаге глубин 250 м (рис. 1.35.б, в, г). Массив имеет крутое падение, его кровля залегает на глубинах 0,1–0,4 км, подошва – 1,2–1,5 км; блоковое строение массива обусловлено развитием постинтрузивных субширотных дизъюнктивных нарушений.

М.Б. Рыбаков, А.И. Бурдэ, М.Н. Столпнер под комплексной геологической интерпретацией подразумевают построение геологической модели изучаемого блока земной коры, с задан-

ной детальностью, точностью и достоверностью по комплексу разнородных геолого-геофизических и других данных, с целью получения нового геологического знания, оценки перспектив этого блока на различные типы полезных ископаемых и подсчета их прогнозных ресурсов.

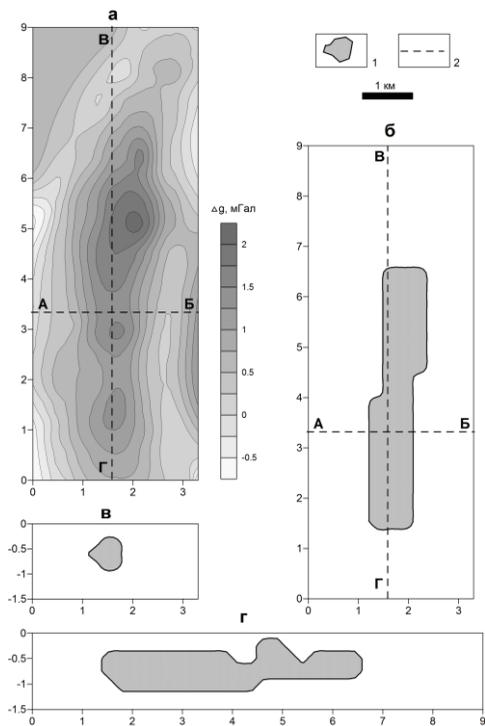


Рис. 1.35. Интерпретация гравитационного поля интрузивного массива, перспективного на хромитовое оруденение: а – карта локальной составляющей гравитационного поля; б – горизонтальный срез геологической среды на глубине 875 м; в – разрез по линии АБ; г – разрез по линии ВГ: 1 – контур массива перидотитов; 2 – интерпретационные профили

Известно, что «основой всех видов комплексной интерпретации является специализированная интерпретация данных отдельных методов. Комплексная интерпретация осуществляется сопоставлением (в картографическом смысле – наложением, в математических методах – корреляцией в широком смысле) различных множеств признаков изучаемых объектов, выделенных в процессе обработки материалов и при анализе получаемых результатов» [29]. Традиционно принято использовать для этого несколько типов операций (рис 1.36):

- Фильтрация – выделение полезного сигнала на фоне помех: усиление признаков с определенными частотными и (или) амплитудными характеристиками при подавлении других составляющих поля.

- Районирование (классификация) – разделение интерпретируемого множества признаков на однородные (по какому-либо критерию) подмножества.

- Совмещение (суперпозиция) выделенных по разным методам подмножеств признаков и составление обобщенного подмножества. При визуальном анализе совмещению подвергаются исходные карты, карты трансформант, результаты районирования полей и схемы методной интерпретации.

- Оpozнание подмножеств, выделенных по комплексу признаков, выполняется на основе априорных моделей геологических объектов. Учитывается, что связи между геологическими объектами и их признаками (результаты опознания) имеют вероятностный характер.

- Моделирование – завершающая операция комплексной геологической интерпретации, заключающаяся в построении моделей изученных геологических тел и структур.

Согласно Г.С. Вахромееву «процесс интерпретации результатов геофизических съемок представляет собой сложную и самостоятельную методическую проблему, предусматривающую решение следующих вопросов:

- выделение всех геофизических аномалий, зафиксированных на площади съемки, в том числе и соизмеримых с уровнем помех;

- разделение (классификацию) выделенных аномалий на перспективные и неперспективные;

- количественную интерпретацию рудоперспективных аномалий, главной задачей которой является оценка прогнозных ресурсов искомого полезного ископаемого» [12].

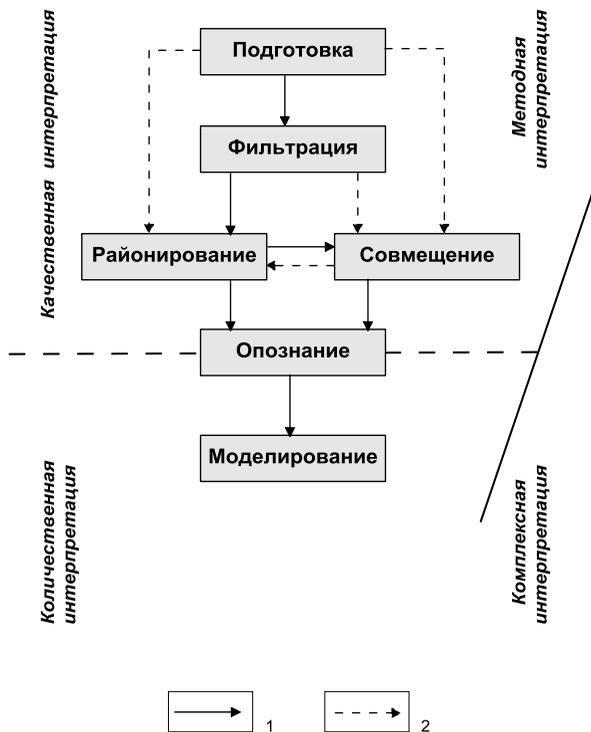


Рис. 1.36. Схема процесса комплексной геологической интерпретации геофизических данных (по М.Б. Рыбакову, А.И. Бурдэ, М.Н. Столпнеру); последовательности операций: 1 – типичные; 2 – возможные

Одна из схем формирования комплексной ФГМ путем анализа и синтеза имеющейся геолого-геофизической информации о реально существующих геологических объектах, заимствованная из работы [29], приводится на рис. 1.37. На основе геологических данных, информации о геометрических и петрофизических параметрах основных аномалиеобразующих объектов формируется набор однопараметрических ФГМ изучаемого объема геологической среды (геоплотностная, геомагнитная, геоэлектрическая и т.п.), а затем путем их синтеза создается комплексная ФГМ.

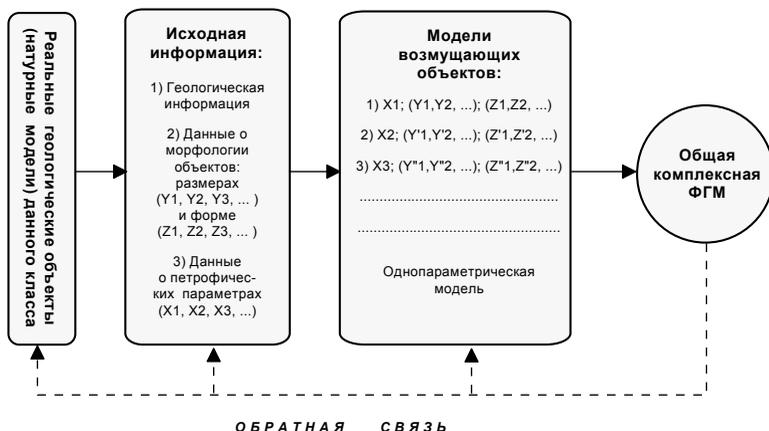


Рис. 1.37. Схема формирования комплексной физико-геологической модели

Весьма простым и эффективным приемом комплексной интерпретации является расчет комплексного показателя  $\Omega$ , т.е. суммы (или разности) нормированных и центрированных значений нескольких геофизических полей (или трансформант). Параметр  $\Omega$  аналогичен используемому при анализе материалов литогеохимических съемок мультипликативным показателем. Например, при комплексной интерпретации данных гравиметрической и аэромагнитной съемок в Норильском районе использовался комплексный показатель, включающий в себя остаточную составляющую гравитационного поля  $\Delta g^{ocm}$  и результат псевдогравитационного преобразования магнитного поля  $\Delta g_{ps}$ :

$$\Omega(x, y) = \frac{\Delta g^{ocm}(x, y) - M\Delta^{ocm}}{D\Delta^{ocm}} + \frac{\Delta g_{ps}(x, y) - M\Delta_{ps}}{D\Delta_{ps}},$$

где символы  $M$  и  $D$  означают математическое ожидание и дисперсию соответственно [12].

Исходя из предположения о независимости использованных признаков – полей  $\Delta g^{ocm}$  и  $\Delta g_{ps}$ , и равной их информативности, можно отождествлять аномалии повышенных значений  $\Omega$  с возмущающими объектами, обладающими высокой избыточной плотностью  $\sigma$  и намагниченностью  $J$  (в т.ч. и с рудоносными интрузиями базит-гипербазитового состава).

При формализованном подходе к процедурам качественной комплексной интерпретации математическим аналогом операции совмещения является классификация геологических объектов на принципах самообучения; аналогом операции опознавания – распознавание образов при наличии эталонных объектов. На стадии количественной комплексной интерпретации геопотенциальных полей в настоящее время также достаточно широко используются различные формализованные способы, базирующиеся на использовании аппарата *математического программирования, регрессионного анализа и теории статистических решений*.

Принцип работы методов *распознавания образов* с обучением на эталонах заключается в следующем. В пределах исследуемой площади выделяются участки с доказанной рудоносностью (иногда – участки с доказанным ее отсутствием), т. е. эталонные объекты. Совокупности признаков геофизических полей тех и других участков рассматриваются как описание *эталонных объектов (эталонов)*. При этом комплексная интерпретация заключается в сопоставлении совокупности признаков для участка неизвестной геологической природы с соответствующими совокупностями признаков эталонов. Если, согласно некоторому критерию, совокупность признаков для исследуемого участка ближе к признакам рудных эталонов, то принимается решение о его рудоносности. Процедура распознавания образов отвечает задаче поисков («обнаружения и локализации»).

В способах классификации на *принципах самообучения*, в отличие от способов комплексной интерпретации с обучением на эталонах, число классов и статистические характеристики признаков по каждому классу заранее неизвестны, а должны быть получены в процессе самой обработки. Разбиение признакового пространства на однородные, привязанные к пространственным координатам, области соответствует задаче «геокартирования».

Объединение различных методов в единую технологическую цепочку есть реализация идеи *системной оптимизации* В.Н. Страхова, согласно которой оптимальность (полноценность) итога в интерпретационной системе должна достигаться за счет использования многих неоптимальных (не дающих нуж-

ного конечного итога) технологий извлечения информации из данных наблюдений [31].

Большое значение имеет «эмпирический» («структурно-морфологический») подход к прогнозированию полезных ископаемых, который базируется на определении устойчивых связей между морфологией физических полей и (или) их трансформант с закономерностями размещения оруденения. Общая схема формирования ГФКП представлена на рис. 1.38.

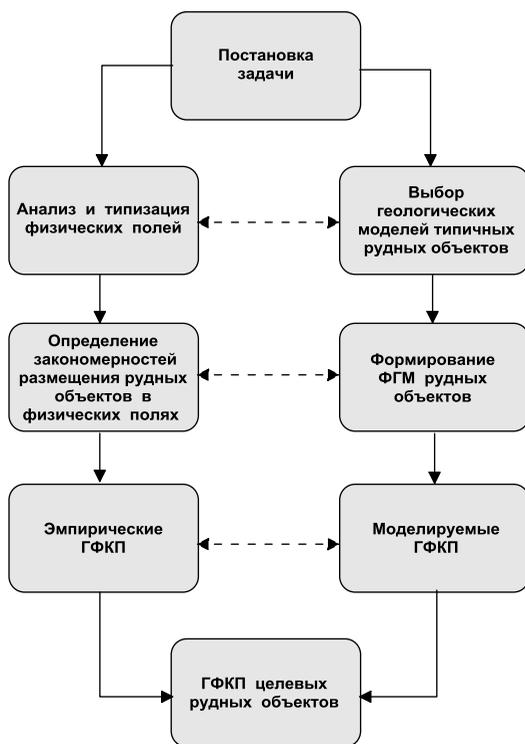


Рис. 1.38. Принципиальная схема формирования геофизических критериев прогнозирования (ГФКП): сплошные линии – основные связи; пунктирные – вспомогательные. Примечание: схема приводится по «Методическим рекомендациям по геофизическому обеспечению геологосъемочных работ масштаба 1 : 200 000», 2000 г.

Основные особенности ГФКП заключаются в следующем [28]:

- ГФКП разрабатываются на основе фактического геофизического материала (карты физических полей, числовые массивы измеренных значений полей и т. д.), имеющего объективный характер и содержащего информацию об изучаемом рудном объекте в целом – для площади, исследованной с необходимой детальностью и полнотой;

- ГФКП интегрально отражают характерную физическую обстановку, обусловленную сочетанием структурно-вещественных комплексов, наложенных метасоматических образований, связанных с формированием руд данного типа, и собственно наличием оруденения;

- ГФКП при относительной сложности их выражения во многих случаях достаточно специфичны для рудных объектов определенных типов;

- структурно-вещественные комплексы, благоприятные для локализации оруденения (включая околорудные метасоматиты), отчетливее выражаются в физических полях, устанавливаемых съемками масштаба 1:50 000 (1:25 000), поэтому ГФКП отвечают в первую очередь объектам ранга рудных полей, рудных узлов, рудных районов;

- ГФКП объектов данного класса могут формироваться эмпирически и при отсутствии фактических геологических и петрофизических данных, позволяющих раскрыть их геологическую сущность;

- ГФКП в отдельных случаях не находят объяснения с позиций принятых геологических концепций и могут стать основой для пересмотра взглядов на геологическое строение рудоносных площадей;

- использование ГФКП наиболее целесообразно на начальных этапах изучения территорий, при интерпретации (переинтерпретации) результатов опережающих и предшествующих площадных геофизических съемок, а также при минимальном объеме исходной геологической информации (например, при прогнозе новых типов рудных объектов и т. п.);

- использование ГФКП крайне важно в условиях районов, которые характеризуются наличием различных помех, осложняющих физические поля и затрудняющих выделение аномального эффекта от отдельных рудоконтролирующих факторов, а также при прогнозировании глубокозалегающих (скрытых и погребенных) рудных объектов в районах двух- и трехъярусного геологического строения и при прогнозировании физически слабоконтрастных рудных объектов.

*Геофизические критерии прогнозирования (ГФКП) рудных объектов разного ранга (рудных узлов, рудных полей, месторождений и т. п.) равноправно используются в комплексе с геологическими, геохимическими и другими критериями прогнозирования.*

Например, установлено, что все месторождения и большинство рудопоявлений золота в одном из районов Восточной Сибири приурочены к зонам повышенной дисперсии (изменчивости) магнитного поля  $(\Delta T)_a$ , превышающей  $500 \text{ нТл}^2$ . Одна из этих зон, расположенная в западной части площади, имеет северо-восточное простирание; другая, более крупная, характеризуется в целом субширотным простиранием и имеет форму дуги, выпуклой к югу (рис. 1.39).

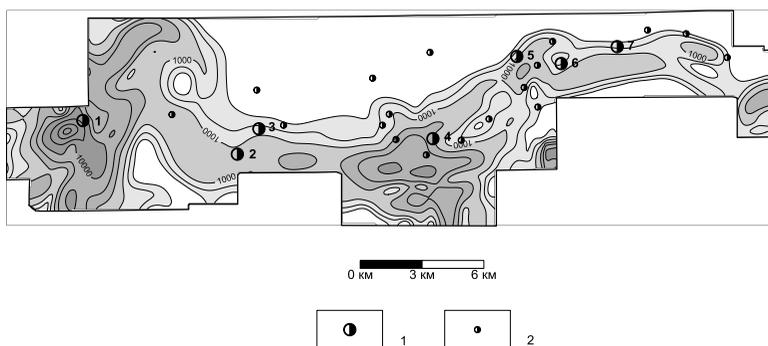


Рис. 1.39. Дисперсия аномального магнитного поля, приведенного на горизонтальную плоскость  $z = 1200 \text{ м}$  (скользящее окно  $400 \times 400 \text{ м}$ ):

1 – месторождения золота; 2 – рудопоявления золота

Повышенная дисперсия магнитного поля в данных физико-геологических условиях является ГФКП золотого оруденения. Предположительно, это связано с отражением в магнитном поле воздействия контактово-метаморфических процессов, обусловленных рудогенерирующим интрузивом, а также гидротермально-метасоматических преобразований пород, развитых вдоль тектонических нарушений.

В качестве другого примера ниже приведены некоторые глубинные ГФКП медно-никелево-платинового оруденения Сибирской платформы:

- наличие на больших глубинах (40 км и более) уплотненного слабомагнитного вещества, с которым связывается генерация рудоносных магм;

- существование структур, обеспечивающих повышенную проницаемость земной коры, отражающихся в распределении квазиплотностей и квазинамагниченностей в интервале эффективных глубин 20–50 км (Игарско-Норильская ПРС и ее субширотные ветви);

- приуроченность к «утяжеленным» блокам с преобладающим фемическим типом земной коры, связанным с высокой концентрацией пикритового расплава и продуктов его эволюции;

- близость к зонам разломов, выделяемых на уровне «гранитного» и «базальтового» слоев земной коры, не проявленных на дневной поверхности и в исследованном бурением интервале глубин;

- наличие локальных (не более 20–40 км в поперечнике) магнитных неоднородностей разреза, располагающихся внутри слоя с эффективными глубинами от 7,5–10 до 15 км (промежуточных магматических очагов), в ряде случаев пространственно совмещенных с плотностными неоднородностями [14].

## 1.5. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно, что применение рационального комплекса геофизических методов позволяет [8]:

- ограничить влияние такого отрицательного фактора, как неоднозначность решения обратной задачи разведочной геофизики;
- использовать различные физические характеристики исследуемого объекта, разнообразные его свойства и, познавая их, увеличить полноту и надежность нашего представления о его особенностях;
- исследовать геологические, физические и физико-химические поля в их общности и взаимообусловленности, тесно сочетать прямые и косвенные признаки проявления полезного ископаемого;
- выполнять наблюдения различными методами в одних и тех же точках пространства и более уверенно увязывать результаты различных методов;
- использовать комбинацию геофизических признаков для выделения локальных рудоперспективных аномальных зон, устанавливать комплексный признак аномалий рудной природы;
- получить представление не только о рудном объекте, но и о его геолого-структурной позиции, особенностях глубинного строения, горно-технических условиях и т.п.;
- извлекать большую полезную информацию, чем простая сумма информации отдельных методов при раздельном их применении, благодаря переводу части результатов, полученных основным методом, из пассивной информации в разряд активной, идущей на решение поставленной задачи;
- изучать геологический объект с разных расстояний, на разных горизонтах, определять его свойства, учитывая характер изменений физического поля в вертикальной плоскости;
- проводить оперативную интерпретацию данных всего комплекса методов и на ее основе управлять процессом работ –

сгущать или разрезать сеть наблюдений, детализировать и проверять аномалии и т. п.;

- снижать стоимость геофизических работ: при аэросъемках – за счет использования одного летательного аппарата и разовой привязки маршрутов к местности, при наземных работах – благодаря сокращению непроизводительных затрат, использованию единой топографической сети, при скважинных исследованиях – за счет сокращения числа спуско-подъемных операций и других факторов.

Оптимизацией комплекса методов является определение такого их сочетания, которое позволяет получить информацию, необходимую для решения поставленных геологических задач при минимальных затратах труда, времени и средств или возможно большее количество информации при заданных ограничениях указанных ресурсов [7]. Единого подхода к методологии оптимизации комплекса геофизических методов до сих пор не выработано, так же как и не существует исчерпывающего определения критериев оптимальности, на основе которых необходимо решать поставленные задачи. В частности, согласно работе [27] основными принципами, определяющими выбор наилучшего варианта комплексирования различных методов исследования, являются *принцип последовательных приближений; принцип полноты; принцип специализации; принцип аналогии; принцип наибольшей эффективности.*

Принцип последовательных приближений выражается: а) в поэтапном (стадийном) проведении работ с постепенным увеличением детальности при сокращении изучаемых площадей; б) изучении особенностей геологического строения от общего к частному; в) соблюдении наиболее рациональной в условиях изучаемого района последовательности проведения отдельных методов, видов работ; г) постепенном (по мере накопления материала) повышении достоверности геологической интерпретации геофизических данных и совершенствовании моделей изучаемых объектов, а также в последовательном совершенствовании (с учетом опыта работ) методики и комплекса методов, используемых при изучении районов определенного типа геологического строения и металлогенической специализации.

Принцип полноты заключается: а) в необходимости охвата работами всей изучаемой территории; б) всестороннем геолого-геофизическом изучении площади; в) использовании комплекса методов, повышающего достоверность геологических выводов; г) комплексировании геофизических исследований с методами, фиксирующими прямые поисковые признаки полезных ископаемых (геохимическими, минералогическими и другими); д) возможно более полном извлечении геологической информации из геофизических данных.

Принцип специализации определяет специализацию всех геологоразведочных работ в соответствии с геологическими особенностями района и месторождений полезных ископаемых и подразумевает более детальное геофизическое изучение участков ожидаемых месторождений и проявлений полезных ископаемых, в том числе и зон характерных для них физических полей (геофизических критериев), контролирующих размещение полезных ископаемых.

Принцип аналогии изучаемых объектов с известными имеет большое значение при районировании изучаемых территорий по условиям ведения геофизических работ и постановке задач исследований; формировании представлений о физико-геологических моделях изучаемых объектов и их геофизических критериях; выборе комплекса геофизических методов, оптимальных размеров сети наблюдений, точности измерений и определений и других элементов методики работ. Он лежит в основе геологической интерпретации комплексных геофизических данных.

Принцип наибольшей эффективности требует решения геологических задач минимальными средствами (или получения возможно большей геологической информации при фиксированных затратах в заданные сроки).

По мнению Н.Н. Боровко, «требует оптимизации не столько набор методов, включаемых в комплекс, сколько вся технология поисков» [7]. Речь идет об оптимизации решений, принимаемых на всех этапах выбора и обоснования комплекса исследований; эти этапы включают в себя постановку задачи; описание особенностей ситуации, влияющих на выбор комплекса исследований; выбор комплекса методов и методики исследова-

дований; выбор способов обработки и истолкования полученных данных; определение способов практического применения полученной информации.

С экономической точки зрения эффективными следует считать такие затраты на геологоразведочные работы, которые позволяют получать в наиболее короткие сроки на каждую единицу затрат труда максимально возможный прирост разведанных запасов минерального сырья в лучших природных условиях, обеспечивающих экономически эффективное получение товарной продукции.

Важным вопросом является экономическая оценка объемов детальных работ. Принцип последовательного увеличения детальности поисковых работ при одновременном сокращении площади исследуемых участков, как правило, наиболее экономичен.

Поясним это утверждение на примере трех вариантов технологии поисков глубокозалегающих рудных месторождений в закрытом районе. Предполагается, что поиски проводятся на площади, условно принятой за  $100 \text{ км}^2$ , комплексом геологических, геофизических, геохимических и буровых работ (рис. 1.40).

Практика показала, что сеть  $2,0 \times 0,5$  км картировочных скважин, предназначенных для глубинного отбора проб, гамма-опробования и прочих исследований, позволяет выделять рудоперспективные площади; сеть  $1,0 \times 0,5$  км – локализовать потенциально рудоносные участки, а сеть  $500 \times 100$  м обеспечивает достаточную надежность обнаружения рудных объектов. Расчеты показывают, что экономически наиболее целесообразен третий вариант поисков, заключающийся в последовательном увеличении детальности работ с одновременным уменьшением размеров площадей.

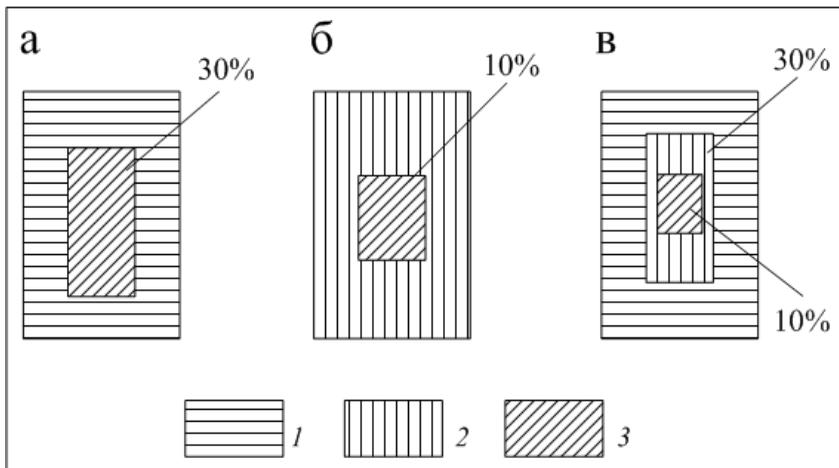


Рис. 1.40. Сравнение экономических показателей различных систем глубинных поисковых работ в закрытом районе:

*a* – первый вариант: первый этап – сеть  $2,0 \times 0,5$  км,  $S = 100$  км<sup>2</sup>;  
 второй этап – сеть  $500 \times 100$  м,  $S = 30$  км<sup>2</sup>,  $C = 920$ ;

*б* – второй вариант: первый этап – сеть  $1,0 \times 0,5$  км,  $S = 100$  км<sup>2</sup>;  
 второй этап – сеть  $500 \times 100$  м,  $S = 5$  км<sup>2</sup>,  $C = 265$  или  $S = 10$  км<sup>2</sup>,  $C = 410$ ;

*в* – третий вариант: первый этап – сеть  $2,0 \times 0,5$  км,  $S = 100$  км<sup>2</sup>;  
 второй этап – сеть  $1,0 \times 0,5$  км,  $S = 30$  км<sup>2</sup>;

третий этап – сеть  $500 \times 100$  м,  $S = 5$  км<sup>2</sup>,  $C = 231$  или  $S = 10$  км<sup>2</sup>,  $C = 376$ ;

$C$  – общая стоимость работ в усл. ед.;  $S$  – площадь работ;

*1* – *3* – площади работ, изучаемые различной сетью скважин в комплексе с радиометрическими и геохимическими наблюдениями

## Вопросы для самопроверки

1. Укажите определение физико-геологической модели и основные типы ФГМ.
2. Каковы необходимые и достаточные условия для эффективного применения геофизических методов?
3. Дайте определение петрофизической модели.
4. Основные факторы, определяющие плотность, магнитную восприимчивость, скорость и электропроводность горных пород.
5. Каким образом геометрические параметры объектов влияют на создаваемые аномальные эффекты?
6. Укажите основные типы помех при регистрации геофизических полей.
7. Приведите примеры искажения геофизических аномалий за счет влияния рельефа местности.
8. Что такое "природная" дисперсия и каким образом осуществляется планирование точности наблюдений?
9. Каковы основные приемы расчета сети наблюдений?
10. В чем проявляется качественная неоднозначность решения обратных задач геофизики?
11. Каким образом проявляется неоднозначность количественного решения обратных задач геофизики?
12. Чем отличаются теоретическая и практическая эквивалентность решения обратной задачи гравиразведки?
13. Приведите примеры количественной неоднозначности решения обратной задачи для разных методов прикладной геофизики.
14. Перечислите возможные пути сужения качественной и количественной неоднозначности решения обратных задач геофизики.
15. Что такое геофизические критерии прогнозирования оруденения (ГФКП) ?
16. Назовите основные принципы выбора геофизического комплекса, дайте определение типового, рационального и оптимального комплексов геофизических методов.
17. Расскажите о динамической ФГМ медно-порфирирового оруденения.

## 2. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Основные прикладные технологические комплексы геофизических методов, направленные на решение различных геологических и других практических задач, объединяются в региональную, разведочную, инженерную геофизику. Каждый комплекс может включать методы, основанные на использовании разных физических полей (гравитационного, геомагнитного, электромагнитного, сейсмического, акустического, теплового, ядерно-физического) и технологии, отличающиеся местом проведения работ (аэрокосмические, наземные, океанические, морские, речные, шахтно-рудничные, геофизические исследования в скважинах).

Наиболее востребованной в настоящее время является нефтегазовая геофизика, и основные средства идут на нее. Можно считать, что нефтегазовые корпорации мира в значительной степени финансируют разработку всей геофизики и особенно сейсморазведки, а также скважинных исследований. Поэтому большинство публикаций по геофизике посвящено работам в нефтегазовой области.

### 2.1. ГЛУБИННАЯ ГЕОФИЗИКА

Глубинная геофизика объединяет физические методы исследования Земли и ее геосфер, основанные на изучении различных физических полей на поверхности суши или океанов и морей и предназначенные для выявления в Земле физических неоднородностей. Вместе с физикой вещества при высоких давлениях и температурах она составляет физику Земли, т. е. науку, изучающую физические поля Земли, ее строение и свойства вещества недр.

Физика Земли как наука включает: *сейсмологию, глубинную сейсморазведку, гравиметрию, магнитометрию, глубинную геоэлектрику, термометрию, радиометрию*. Теоретической основой для изучения строения Земли служат механика и физика сплошных сред в приложении к горным породам и минераль-

ным ассоциациям в условиях больших давлений и высоких температур. По данным глубинной геофизики удалось расчленить Землю на сферические оболочки, определить скачки физических свойств на их границах; оценить изменения свойств по латерали; построить физические модели недр Земли, позволяющие судить о химическом составе. Глубинная геофизика как раздел физики Земли является источником информации для глубинной геологии и геодинамики, а также геоэкологии.

*Сейсмология, глубинная сейсморазведка и гравиметрия.* Важными источниками информации о строении Земли является сейсмология - наука о землетрясениях и глубинная сейсморазведка, основанная на изучении упругих волн от больших взрывов.

Землетрясения связывают с деформациями вещества мантии, проявляющимися в виде быстрых его смещений по разрывам. Выделяющаяся при этом энергия проявляется в виде деформации вблизи очага, а также передается по всем направлениям в виде упругих волн.

Сейсмическая активность на Земле различна и приурочена к зонам наиболее активных современных тектонических движений, областям альпийского орогенеза (расположенным вдоль средиземноморского и трансзиатского поясов), активным региональным разломам и т.п. Географическое положение районов возможных землетрясений достаточно хорошо известно, однако предсказание их времени остается не решенной проблемой.

В результате анализа времен прихода, амплитуд и затуханий различных упругих волн (продольных и поперечных, объемных и поверхностных, отраженных, преломленных и рефрагированных), а также характеристик собственных колебаний Земли, созданных землетрясениями или большими взрывами, было установлено слоисто-концентрическое строение Земли.

Первая существенная граница в Земле, выделяемая по скачкообразному изменению скоростей продольных волн ( $V_p$ ) от 7 км/с в кристаллическом фундаменте до 7,7–8,4 км/с в мантии, названа *поверхностью Мохоровичича*, или *границей Мохо*. Эта поверхность принята за подошву земной коры (кровлю верхней мантии) и залегает на глубинах в среднем 35 км, приближаясь к

поверхности до 5 км и менее в океанах и опускаясь до 70 км и более в высокогорных областях.

По изменению градиента скоростей  $V_p$  и  $V_s$  на глубинах порядка 700 км обычно выделяют границу между верхней и нижней мантией. Резкий скачок скорости  $V$  (от 13,6 км/с до 8,1 км/с),  $V_s$  (с 7,2–7,3 км/с почти до нуля) на глубине 2900 км соответствует границе между мантией и верхним "жидким" ядром Земли. Еще один скачок  $V_p$  (от 10 до 11 км/с),  $V_s$  (от нуля до 3,5 км/с) наблюдается на глубине 5100 км на поверхности внутреннего "твердого" ядра Земли (рис. 2.1).

Твердая хрупкая оболочка Земли, состоящая из земной коры и части верхней мантии, простирающаяся в основном до глубин 50–250 км называется *литосферой*. Ниже располагается более пластичная оболочка, называемая *астеносферой*, в которой отмечается небольшое плавное уменьшение скоростей сейсмических волн. Литосферу и астеносферу иногда объединяют в периферическую оболочку Земли, называемую *тектосферой*.

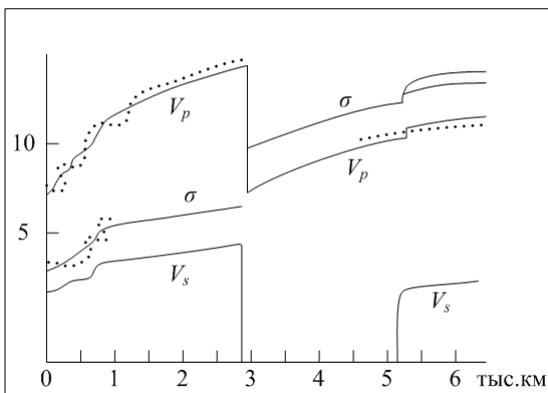


Рис. 2.1. Графики изменения скоростей продольных ( $V_p$ ) и поперечных ( $V_s$ ) упругих волн и плотности  $\sigma$  с глубиной (по В.А. Магницкому, М.С. Молоденскому)

Мощность земной коры и литосферы, а также скорости упругих волн в них изменяются по латерали, образуя зоны повышенных и пониженных скоростей. Мантия Земли (до 2900

км) также характеризуется латеральной неоднородностью, например повышенными скоростями упругих волн под океаническими областями и пониженными – под континентами.

*Плотностная неоднородность недр Земли по гравиметрическим и сейсмическим данным.* По данным спутниковой альтиметрии и полевой гравиметрии выявлена латеральная плотностная неоднородность литосферы до глубин около 100 км. Плотностная неоднородность Земли на больших глубинах определяется по сейсмическим данным. Для этого используются эмпирически установленные связи между  $V_p$ ,  $V_s$ , с одной стороны, и плотностью, упругими модулями – с другой. За основу берется очевидное предположение о возрастании плотности с глубиной под действием гидростатического давления.

На рис. 2.1 представлена наиболее вероятная модель распределения плотности по радиусу Земли:

1. Для нижней части коры принимается плотность 2,9–3,0 г/см<sup>3</sup>, а для верхней мантии порядка 3,1–3,3 г/см<sup>3</sup>. Так что границе Мохо приписывается минимальный скачок плотности 0,1–0,3 г/см<sup>3</sup>.

2. Значения плотности в самой верхней части модели земной коры выносятся на модель по прямым измерениям на образцах из скважин и обнажений.

3. Прогнозируется постепенное возрастание плотности от поверхности земной коры до границы Мохо.

При подборе плотностной модели по структурным сейсмическим данным основным критерием является близость измеренного и вычисленного полей силы тяжести.

Типичный пример подбора плотностной модели в описанных условиях приведен на рис. 2.2. Профиль расположен на Украинском щите и пересекает в субмеридиональном направлении обширный Волчанский максимум силы тяжести. Исходные сейсмические данные – положение границы Мохо, поверхности фундамента и некоторые другие границы. Измерена плотность образцов, отобранных из неглубоких скважин. В пределах подобных максимумов плотность на поверхности щита близка к 2,80 г/см<sup>3</sup>. Принято также градиентное изменение плотности с глубиной. Под максимумом, согласно изостазии, имеется прогиб границы Мохо [17].

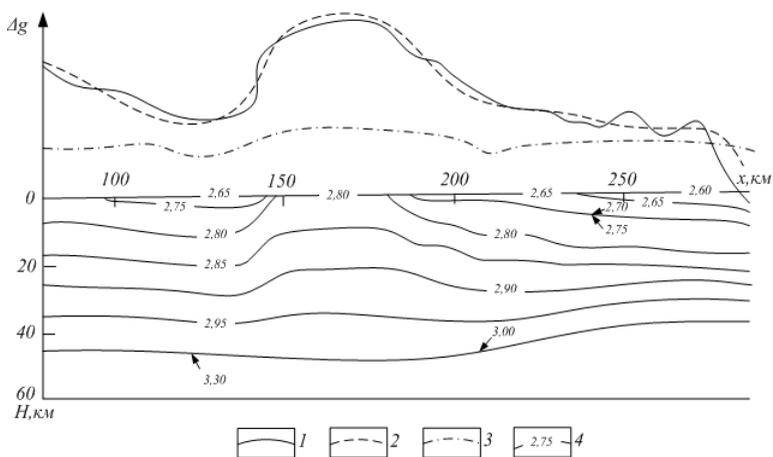


Рис. 2.2. Плотностная модель земной коры и верхней мантии по меридиональному профилю, пересекающему Украинский щит; графики поля: 1 – остаточного, 2 – вычисленного; 3 – график массы вертикальных колонок; 4 – изолинии плотности,  $\text{г/см}^3$

Основными методами *глубинной геоэлектрики* являются методы магнитотеллурического и магнитовариационного зондирования (МТЗ и МВЗ). В этих методах измеряются компоненты естественного переменного электромагнитного поля Земли (магнитотеллурического поля) – горизонтальные электрические и магнитные (в МТЗ) или горизонтальные и вертикальная магнитные (в МВЗ). Высоочастотная составляющая поля несет информацию об удельном электрическом сопротивлении (УЭС) верхней части разреза, по мере понижения частоты мы получаем информацию об УЭС на все больших глубинах. Для изучения мантии Земли необходимо зарегистрировать колебания поля с очень большими периодами (до суток и более – для изучения верхней и до нескольких лет – для изучения нижней мантии).

Важной особенностью верхней мантии является наличие в ней *области частичного плавления – астеносферы*. Она наиболее развита в тектонически активных зонах континентов и в океанах, где температура недр высока. В целом по мере увеличения глубины температура растет и для многих регионов дос-

тигает *температуры плавления (солидуса)* пород верхней мантии – здесь появляется некоторое количество расплава (рис. 2.3). Предполагается, что на еще больших глубинах рост температуры замедляется и соответствующая зависимость вновь пересекает линию солидуса – здесь расплав перестает образовываться. Таким образом, образуется астеносферный слой, содержащий небольшое количество (1–3%) расплава. Наличие расплава приводит к повышенной вязкости астеносферного слоя, благодаря чему вышележащие блоки хрупкой литосферы приобретают возможность перемещаться в горизонтальном направлении.

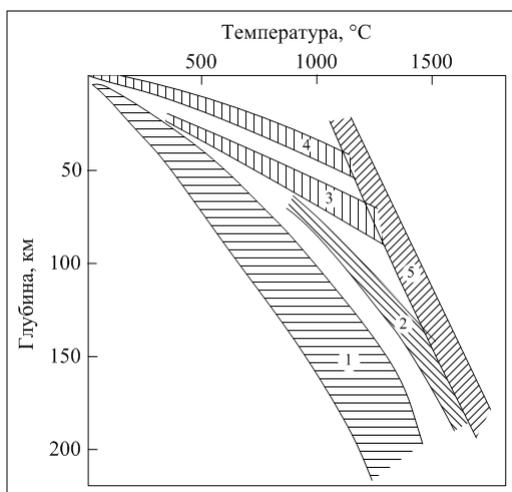


Рис. 2.3. Зависимости температуры от глубины для различных регионов:  
 1 – докембрийские платформы;  
 2 – герциниды;  
 3 – океанские плиты;  
 4 – альпиды;  
 5 – солидус пород верхней мантии

УЭС пород существенно зависит от присутствия жидкой фазы, в том числе расплава, поэтому глубинная геоэлектрика является основным геофизическим методом изучения астеносферы. На рис. 2.4 представлены зависимости УЭС от глубины для различных регионов.

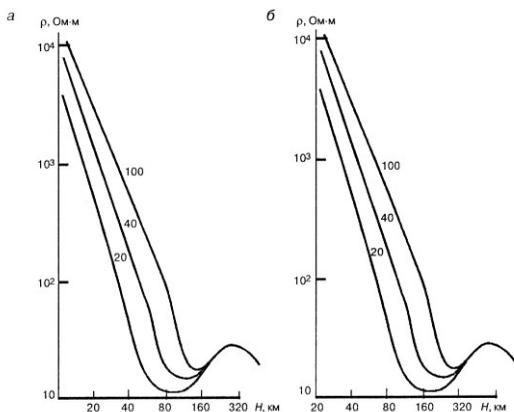


Рис. 2.4. Обобщенные зависимости УЭС от глубины для различных регионов:

- а – океанические, шифр кривых – возраст тектоносферы в млн. лет;  
 б – континентальные, шифр кривых – тепловой поток в мВт/м<sup>2</sup>:  
 1 – 40 (тектонически стабильные регионы); 2 – 60 (промежуточные области); 3 – 90 (тектонически активные регионы)

На фоне плавного уменьшения УЭС с глубиной, обусловленного ростом температуры, на ряде графиков выделяется минимум, связанный с появлением расплава (астеносфера). Астеносферный слой четко выделяется на графике, отвечающем регионам с молодой океанической тектоносферой и постепенно вырождается по мере ее остывания с течением времени. На континентах астеносфера отчетливо видна только в тектонически активных областях, в регионах со стабильным тектоническим режимом она выражена слабо.

Наибольшие изменения с глубиной скоростей сейсмических волн, упругих модулей, плотности и поля силы тяжести происходят вдоль радиуса Земли. Особенно они велики на границах мантии и внешнего ядра, внешнего и внутреннего ядра (рис. 2.5). Отклонения физических параметров по латерали, наблюдаемые в мантии, невелики (до 20%) по сравнению с их средними значениями, но они сложным образом распределены в объеме Земли. По сейсмологическим данным, внешнее ядро не пропускает поперечные волны, что говорит о его жидком фазо-

вом состоянии. Кроме того, существование у Земли геомагнитного поля и его вековых вариаций указывает на возможность движения электропроводящего вещества в ядре, что также связано с его жидким состоянием и металлическими свойствами. Высокая плотность в дополнение к указанным фактам позволяет предположить, что основная масса вещества ядра Земли представлена железом, а верхняя часть является силикатной. Подобным же образом на два класса разделяются метеориты. Это служит основой при выборе модели изменения химического состава Земли с глубиной в предположении, что она образована из метеоритного вещества.

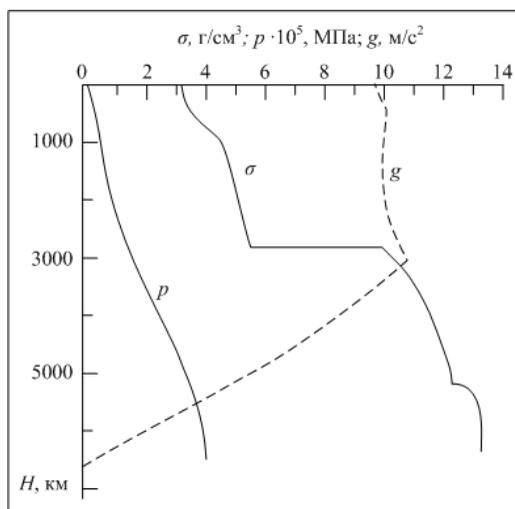


Рис. 2.5. Графики изменения давления  $p$ , плотности  $\sigma$  и ускорения  $g$  свободного падения в Земле с глубиной  $H$

Силикатная часть Земли, слагающая мантию, предположительно представлена минералами, образующими породы типа перидотитов, состав которых близок к составу хондритов. Наличие в мантии Земли "границ" с резким возрастанием скоростей упругих волн связывают с фазовыми переходами. Такие фазовые переходы с изменением плотности до 10% могут быть на глубинах 450 км (переход оливин–шпинель), 700 км (переход

шпинель - перовскит). Наблюдается и ряд других переходов. Указанные глубины соответствуют адиабатическому распределению температур. Однако латеральная неоднородность Земли, выявляемая по сейсмическим данным, позволяет сделать вывод о механической неустойчивости такого распределения, что приводит к глубинным движениям вещества, или конвекции. Из-за конвекции в Земле распределение температур имеет сложный характер, и поэтому границы фазовых переходов, или сейсмические границы, находятся на различных глубинах в разных регионах.

Разработка моделей конвекции в Земле и их согласование с наблюдаемыми геофизическими полями и тектоническими структурами находятся в самом начале. Сам эволюционный характер геологических процессов связан с деформациями периферической оболочки под воздействием движения вещества Земли на больших глубинах.

## 2.2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ И КАРТИРОВОЧНО-ПОИСКОВЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.2.1. *Региональные геофизические исследования*

Целью региональной геофизики является решение задач структурно-геологического картирования, которое выполняется в виде сплошных (попланшетных) немасштабных, мелко- (масштаб меньше 1 : 500 000), средне- (масштаб 1 : 100 000–1 : 200 000) и крупномасштабных (масштаб 1 : 50 000 и крупнее) съемок суши и акваторий. В результате определяются: литолого-петрографический состав и структурно-тектоническое строение осадочных горных пород, подстилающего их кристаллического фундамента и земной коры, т. е. осуществляется изучение объемного строения недр до глубин в несколько первых десятков километров с построением глубинных разрезов и карт-срезов по опорным геолого-геофизическим горизонтам. Как правило, такие работы выполняются совместно с геологическим картированием [30].

Данные геофизики используются для составления геологических, тектонических и других карт, которые необходимы

для прогнозирования месторождений нефти, газа, твердых полезных ископаемых, а также для выделения участков, благоприятных для промышленного, энергетического, сельскохозяйственного освоения и строительства. По мере накопления геолого-геофизической информации и уточнения геологического строения исследуемой территории масштабы съемок укрупняются, осуществляется переход от профильных работ к площадным, сгущение сети геофизических наблюдений, применение геофизических методов повышенной точности и стоимости.

Выполнение сплошного (попланшетного) мелко-среднемасштабного структурно-геологического объемного картирования суши и акваторий без геофизики не проводится из-за высокой стоимости глубокого бурения. Эти работы являются основой для эффективного комплексного изучения недр. Однако из-за высокой стоимости *сплошное крупномасштабное картирование* в настоящее время проводится лишь на высокоперспективных на полезные ископаемые территориях.

Методы региональной геофизики подразделяются на глубинные, региональные структурные (среднемасштабные) и картировочно-поисковые (крупномасштабные) исследования.

На стыке между глубинной и региональной геофизикой иногда выделяют внесмасштабные или мелкомасштабные региональные глубинные исследования, выполняемые по опорной сети профилей (геотраверсов) протяженностью в тысячи километров, пересекающих крупные геотектонические провинции. На геотраверсах выполняются комплексные геофизические исследования, включающие сейсморазведку, магнитотеллурические или электромагнитные зондирования, гравиразведку, магниторазведку, а также проводится опорное бурение глубоких скважин. В результате определяется рельеф поверхности Мохоровичича (кровля мантии), выявляются границы раздела петрофизических свойств в земной коре, изучается положение кристаллического складчатого фундамента, картируются крупные структуры в осадочном чехле, благоприятные для нефтегазоаккумуляции или локализации промышленных скоплений руд.

Последовательность этапов при составлении комплекта геологических карт 1:1 000 000 масштаба на основе геолого-геофизических данных представлена ниже:

- 1) создание базы исходных геологических, геофизических, геохимических и петрофизических данных;
- 2) районирование гравитационного и магнитного полей;
- 3) изучение закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых относительно региональных и локальных составляющих физических полей;
- 4) определение геологической природы гравитационных и магнитных аномалий;
- 5) создание сети интерпретационных (расчетных) профилей;
- 6) составление по профилям приповерхностных геологических разрезов;
- 7) количественное разделение исходного гравитационного поля на составляющие разных порядков;
- 8) построение по расчетным профилям плотностных разрезов до глубины 15–20 км;
- 9) составление глубинных геологических разрезов;
- 10) составление геологических карт срезом, карт стратоизогипс геологических поверхностей, карты закономерностей размещения и прогноза полезных ископаемых.

### ***2.2.2. Среднемасштабное картирование***

Региональные структурные среднемасштабные (1 : 200 000–1 : 100 000) съемки, включающие геологическое картирование, геофизические исследования и бурение, предназначены для тектонического районирования суши и акваторий, выявления основных структур земной коры, оценки мощности осадочного чехла и картирования фундамента, изучения особенностей их строения, поисков нефтегазоперспективных структур в осадочных породах.

Для изучения строения верхней десятикилометровой оболочки Земли обычно применяют комплекс геофизических методов: сначала сравнительно дешевых и высокопроизводительных, но менее информативных, а затем более трудоемких, но результативных. Методы, относящиеся к первой группе – аэрокосмические исследования, аэрогеофизическая и гравиметрическая съемки. Их выполняют по регулярной сети наблюдений с расстояниями между профилями исследований, не превышающими 1 см в масштабе карты, на которой будут представлены результаты съемки. Например, при масштабе съемки 1: 100 000 расстояния между профилями равны 1 км. Методы второй группы могут быть более сложными и дорогими (например, электромагнитные зондирования), они выполняются по более редкой сети (расстояния между центрами зондирований составляют несколько сантиметров в масштабе получаемых карт и разрезов). Высококачественную опорную, но дорогую информацию дает лишь сейсморазведка МОВ и МПВ.

В результате комплексной интерпретации для нефтегазоперспективных территорий устанавливают корреляционные или даже аналитические связи между наблюдаемыми или расчетными параметрами для разных геолого-геофизических методов, что позволяет разредить сеть дорогой сейсморазведки. Далее строят региональные карты поверхности фундамента и основных (опорных) горизонтов осадочного чехла (глубинное, объемное картирование). На них выявляют и оконтуривают такие перспективные на нефть и газ структуры, как антиклинальные поднятия, брахиантиклинальные складки, валы, протяженные флексуры, локальные поднятия, рифогенные массивы, соляные купола и др. Важным результирующим материалом комплексных региональных геолого-разведочных работ являются сводные (нормальные), опорные, проходящие через опорные и параметрические скважины и рядовые геолого-геофизические разрезы.

### ***2.2.3. Крупномасштабное картирование***

Особым разделом региональной геофизики являются крупномасштабные картировочно-поисковые геофизические исследования, направленные на поиски полезных ископаемых и изучение территорий, предназначенных под промышленное и

гражданское строительство. Комплексное крупномасштабное геологическое картирование (масштабы 1 : 50 000–1 : 25 000) предназначено для изучения геологического строения верхних частей земной коры до 2–3 км и выяснения перспектив в отношении минерально-сырьевых ресурсов с помощью геологических съемок, аэрокосмических, геофизических, геохимических исследований, проходки горных выработок, скважин и геофизических исследований в них.

Если в горных районах с хорошей обнаженностью коренных пород визуальную геологическую съемку можно проводить без геофизических методов, то в районах, закрытых четвертичными и покровными отложениями, роль геофизических методов становится ведущей [27]. Обычно в результате геологической съемки составляют карту поверхности коренных (дочетвертичных) отложений. Однако одной этой карты недостаточно для оценки перспективности района на определенные типы полезных ископаемых и тем более для их поисков. Поэтому геологические съемки являются лишь частью глубинного, или объемного, картирования, обеспечивающего глубинное изучение района и построение структурно-геологических карт по разным горизонтам. Данный вид работ выполнять без геофизики практически невозможно.

Набор и эффективность геофизических методов при картировочно-поисковых работах определяются природными геолого-геофизическими условиями: физическими свойствами пород, геологическим строением, характером и ценностью имеющихся полезных ископаемых и другими факторами. В. И. Красников выделил три типа региональных геологических структур.

Первый тип – открытые районы, поднятые и в разной степени эродированные древние щиты, древние и молодые складчатые области, характеризующиеся интенсивным проявлением магматизма и метаморфизма, крутым залеганием пород и рудных комплексов, отсутствием или малой мощностью четвертичных отложений. К ним можно отнести, например, Балтийский, Алданский, Анабарский и другие древние щиты, регионы палеозойской, мезозойской, кайнозойской складчатости (Урал, Казахстан, горные районы Средней Азии и Кавказа, Енисейская, Байкальская и другие складчатые области).

Второй тип – полузакрытые районы платформ, характеризующиеся отсутствием или слабым проявлением магматизма, наличием над складчатым основанием (фундаментом) полого залегающего чехла осадочных пород мощностью до 500 м. В районах этого типа породы залегают субгоризонтально, а месторождения твердых полезных ископаемых имеют пластовую или линзовидную форму. Примерами таких районов служат окраины Русской и Сибирской платформ, Западно-Сибирской и Туранской плит и др.

К третьему типу относят закрытые районы платформ и геосинклинальных областей с мощностью осадочного чехла более 500 м. В районах этого типа породы осадочного чехла залегают практически горизонтально, фундамент дислоцирован. Развита пластовые залежи полезных ископаемых, а также месторождения нефти и газа. Такими районами являются Русская платформа, Западно-Сибирская плита, предгорные котловины горных систем Кавказа, Средней Азии, Восточной Сибири и т. д.

Открытые районы изучают следующими методами: аэрокосмическими; аэрогеофизическими (одним методом, например, магниторазведкой; двумя – к магниторазведке добавляют гаммаспектрометрию; тремя – к указанным двум добавляют электроразведку с измерением низкочастотных естественных полей или высокочастотных полей; четырьмя – добавляют инфракрасную съемку); полевыми геофизическими (гамма-, эманиционной, гравиметрической, магнитной съемками, электрическим и электромагнитным профилированием); геохимическими (металлометрической, литохимической, гидрохимической и биохимической) съемками. Кроме того, на опорных профилях проводятся электрические (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), электромагнитные (МТЗ, ЧЗ, ЗС) и сейсмические (МПВ, МОВ) зондирования. Рациональный комплекс из 2–4 названных методов определяется конкретными физико-геологическими условиями.

В полузакрытых районах с мощностью четвертичных и покровных отложений до 500 м применяют аэрокосмические, аэрогеофизические и гравиметрические съемки, а также проводят электрические, электромагнитные и сейсмические зондирования.

В районах закрытого типа с мощным чехлом осадочных пород используют аэрогеофизические методы, гравиметрическую съемку, электромагнитные зондирования и сейсморазведку.

Крупномасштабные картировочно-поисковые геофизические исследования бывают, как правило, площадными с расстояниями между профилями 1 см в масштабе результативных карт. Например, в масштабах 1 : 50 000–1 : 25 000 в среднем они составляют 500–250 м. Как отмечалось выше, с точки зрения картировочных работ геофизические методы можно условно разделить на легкие (сравнительно дешевые) и громоздкие (более дорогостоящие). При переходе от первых ко вторым уменьшается производительность, увеличиваются габариты и масса аппаратуры, возрастает информативность и точность количественной интерпретации. Кроме того, легкие геофизические методы чаще бывают опережающими, а громоздкие – сопровождающими геологоразведочные работы.

Для легких методов (аэрогеофизические, полевые гравиметрические, радиометрические и электромагнитные профилирования) межпрофильные расстояния можно уменьшать, а для громоздких (электрические и электромагнитные зондирования, сейсморазведка) – увеличивать, а иногда проводить работы лишь на опорных (интерпретационных) профилях. Направления профилей выбирают вкрест простирания геологических структур и геофизических аномалий, выявленных предыдущими геолого-геофизическими работами. Шаг наблюдений на профилях обычно близок к межпрофильному расстоянию (при электрических и сейсмических зондированиях) или в 2–10 раз меньше.

В результате интерпретации карт графиков и карт тех или иных геофизических параметров строят разного рода геолого-геофизические разрезы, карты изогипс опорных геофизических горизонтов и фундамента, изоглубин перспективных или опорных толщ, петрофизических характеристик и др. При использовании данных геохимических и геологических съемок, картировочных скважин и каротажа в них строят геологические карты по кровле коренных пород и опорным литостратиграфическим горизонтам, уточненные геолого-геофизические разрезы с локальным прогнозом полезных ископаемых. Кроме того, дается

"командная" информация на прекращение или продолжение исследований с указанием, где и какими методами вести специальные поиски.

Следует подчеркнуть целесообразность опережающего проведения геофизических работ с тем, чтобы геофизические аномалии можно было проверить геохимической и геологической съемкой, горными выработками и скважинами.

Кратко рассмотрим особенности выделения и локализации интрузий и зон разрывных нарушений по геофизическим данным. Типичные признаки отражения интрузивных тел представлены в табл. 11.

Таблица 11

**Типичные признаки интрузий, выходящих к поверхности фундамента (по Н.Я. Кунину)**

Тип интрузии	Магнитные поля	Гравитационные поля	Граничные скорости, км/с
1	2	3	4
Гранитная	Слабоинтенсивные с приконтактовыми возмущениями	Изометрические отрицательные аномалии значительной интенсивности	4,9–5,6
Гранодиоритовая	Возмущенные поля, овальные аномалии	Слабые минимумы $\Delta g$ или отсутствие аномалий	5,3–6,0
Габброидная	Возмущенные и сильно возмущенные аномалии, вытянутые или массивные	Интенсивные максимумы, согласующиеся с максимумами $T$	5,5–6,2
Ультраосновная	Узкие интенсивные аномалии, обычно принадлежащие к единой цепочке с отдельными крупными аномалиями	Зона градиентов $\Delta g$ , иногда осложненная массивными максимумами над отдельными крупными телами	6,0–7,0
Щелочная	Интенсивные аномалии, нередко с приконтактовыми возмущениями	Невыразительные или положительные аномалии	На 0,2–0,5 выше, чем у нормальных аналогов

Особым объектом детальных картировочных геофизических исследований являются зоны разрывных нарушений. Они представляют собой сравнительно узкие и вытянутые участки с нарушенной сплошностью осадочных, изверженных и метаморфических пород. По зонам разрывных нарушений может происходить смещение контактирующих пород, а сами они характеризуются дроблением, разрушенностью, трещиноватостью.

Благодаря этому по ослабленным участкам могут происходить внедрения магматических расплавов и минерализованных растворов. В самой зоне дробления резко изменяются физические свойства горных пород: уменьшается плотность за счет повышения пористости; возрастает магнитная восприимчивость вследствие привноса ферромагнитных минералов (или наоборот – уменьшается за счет их разложения); уменьшается скорость, увеличиваются затухание и дифракция упругих волн из-за дробленности пород; уменьшается электрическое сопротивление за счет присутствия глинистого материала и повышенной водонасыщенности пород; повышается содержание радона и других радиоактивных газов, мигрирующих из недр и т. п.

Таким образом, зоны разрывных нарушений в большинстве случаев находят четкое отражение в физических полях (табл. 12).

Разрывные нарушения выделяются вытянутыми линейными элементами на аэрокосмических снимках или полосовыми, линейно вытянутыми, ступенчатообразными хорошо коррелирующимися по профилям аномалиями по данным ряда геофизических методов. Над ними наблюдаются слабые гравитационные и интенсивные магнитные аномалии или градиентные зоны для этих методов; зоны повышенной проводимости (при наличии раздробленных обводненных пород или рудной минерализации) и повышенного сопротивления (при окварцевании, ороговиковании пород) по данным электрического и электромагнитного профилирования; резкая смена геоэлектрических и геосейсмических условий. В блоках пород, контактирующих по сбросам, по данным электрических и электромагнитных зондирований, а также сейсморазведки наблюдаются смещения по вертикали опорных горизонтов.

**Критерии выделения разрывных нарушений  
по данным гравиразведки и магниторазведки**

Типы разломов	Геологические характеристики	Отображение в полях
Магмовыводящие разломы любого кинематического типа	Заполнение зоны разлома изверженными породами основного состава	Линейно-вытянутые положительные аномалии
	Локализация интрузий либо вулканических центров вдоль зоны разлома	Цепочка изометрических максимумов, иногда минимумов
Конседиментационные разломы	Резкое изменение литологического состава, фациального характера и мощности отложений по обе стороны разлома	Смена знака поля по разлому либо изменение характера поля
Разломы, фиксирующие вертикальные перемещения блоков, вертикальные и крутопадающие (более 30°) разрывы	Резкое изменение положения границ, расчленяющих разрез на отдельные структурно-фациальные комплексы	Зоны высоких градиентов ("ступени") поля, дополнительный критерий – резкое изменение глубины залегания верхних или нижних кромок возмущающих масс
	Дробление пород в зоне разлома вследствие дифференцированных подвижек сопряженных по нему блоков	Цепочки линейно-вытянутых магнитных и гравитационных минимумов, совпадающие в плане
Разломы, фиксирующие горизонтальные перемещения блоков, субгоризонтальные разрывы	Горизонтальное смещение пород, устанавливаемое из сопоставления возраста, структурных и фациальных особенностей пород по обе стороны разлома	Разрывы и кулисообразное смещение зон линейно-вытянутых аномалий, резкие изгибы изолиний, смещение участков однородного по характеру поля

#### 2.2.4. Системный подход к геофизическим исследованиям

Системный подход к проведению геофизических работ включает следующие принципы [1, 8]:

- последовательность укрупнения масштабов съемок от рекогносцировочных и региональных мелко- и среднемасштабных на больших территориях к сплошному попланшетному крупномасштабному картированию, а затем к поискам и разведке полезных ископаемых на перспективных участках;

- постепенная смена менее точных высокопроизводительных (аэрокосмических) методов менее мобильными, но более детальными (полевыми), а затем "громоздкими" (скважинными и подземными) геофизическими методами;

- переход от глубинного исследования земной коры к изучению глубин до 5–10 км и менее, от поисков – к разведке на меньших глубинах;

- чередование геолого-геофизических методов, нацеленных на последовательное уточнение геофизической информации и получаемых геологических результатов;

- цикличность исследований одними и теми же методами, но с более точной аппаратурой и по сгущенной сети наблюдений, с переинтерпретацией материалов с применением более совершенных компьютерных технологий.

На основе многолетнего опыта применения геофизических методов создаются обобщенные физико-геологические модели и осуществляется *выбор типового комплекса*. Такие модели и комплексы разработаны для решения задач тектонического районирования, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых в нефтегазоносных и рудных районах, поисков и прогноза месторождений конкретного минерального сырья, например, при поисках и разведке угольных месторождений.

В качестве примера в табл. 13 приведена система геофизических работ в рудных районах, в основу которой заложены типовые комплексы методов [8] по стадиям и конкретным геологическим задачам. При этом региональные исследования масштабов 1: 1 000 000 и 1: 500 000 являются единичными. В то же время выбор типового комплекса геолого-геофизических работ

для всех видов минерального сырья на этапе региональных исследований в масштабах 1 : 200 000 и 1 : 100 000 и крупнее имеет характерные особенности.

Таблица 13

**Обобщенная система геофизических работ  
в рудных районах (по В.В. Бродовому, с дополнениями)**

Стадии и подстадии	Основные геологические задачи	Основные технологические комплексы и методы
1	2	3
<p><u>1. Региональное геологическое изучение недр и прогнозирование полезных ископаемых</u> 1.1. Региональные геофизические работы масштабов 1:1000 000 – 1:500 000</p>	<p>Изучение глубинного геологического строения. Геотектоническое районирование региона по геофизическим данным и выделение рудодносных провинций. Подготовка региональной геологоструктурной основы. Исследование региональных закономерностей в размещении полезных ископаемых и региональный прогноз</p>	<p>Спутниковая геофизика (магнитные, гравитационные и электромагнитные съемки). Региональные аэрогеофизические (магнитные, электромагнитные, гравитационные, тепловые) и наземные гравиметрические съемки. Глубинные электроразведочные (МТП, МТЗ, ДЭЗ, ЗСП, ВЭЗ); глубинные сейсморазведочные (ГСЗ, МОВ, КМПВ) и сейсмологические исследования. Геофизические исследования глубоких скважин</p>
<p>1.2. Среднемасштабное геологическое картирование, региональные геофизические работы масштаба 1 : 200 000 – 1:100 000</p>	<p>Изучение структурно-тектонических условий рудных провинций. Выделение рудных поясов и рудодносных зон. Определение поисковых критериев. Исследования состава складчатого основания под чехлом рыхлых отложений. Изучение металлогении (геохимической специализации) провинции и среднемасштабный прогноз, оценка ресурсов по категории P<sub>3</sub> и P<sub>2</sub></p>	<p>Среднемасштабные аэрогеофизические съемки (магнитные, электромагнитные, тепловые, гамма-съемка). Среднемасштабные гравиметрические съемки. Структурная электроразведка (ВЭЗ, ДЭЗ, ЭСП). Рекогносцировочные геохимические исследования. Региональная сейсморазведка (КМПВ, МОВ) и сейсмология. Геологическое обследование аномалий, проверочное картировочное бурение. Геофизические исследования в опорных, параметрических и картировочных скважинах (каротаж)</p>
<p>1.3. Крупномасштабное геологическое картирование масштабов 1 : 50 000 – 1 : 25 000: а) опережающие геофизические работы</p>	<p>Геологическое изучение района для обоснования поисков. Выявление рудодносных структур, формаций, проявлений минерализации. Уточнение поисковых критериев и определение поисковых признаков, уточнение прогнозных ресурсов по категории P<sub>3</sub> и P<sub>2</sub></p>	<p>Крупномасштабные аэрогеофизические съемки (магнитные, электромагнитные, тепловые, гамма-съемка). Литохимические (по поверхности), гидрохимические и биохимические съемки. Наземные электроразведочные работы: картировочные (ВЭЗ, ДЭП, СЭП) и поисковые (ЕП, ВП, МПП) – выборочно</p>

Продолжение таблицы 13

1	2	3
б) сопровождающие геофизические работы	Решение частных геологических задач, возникающих в процессе геологической съемки. Выделение рудоперспективных площадей и крупномасштабный прогноз полезного ископаемого, уточнение прогнозных ресурсов по категории $P_3$ и $P_2$	Крупномасштабная гравиразведка – выборочно или повсеместно (закрытые площади). Сейсморазведка профильная (открытые районы) и площадная (закрытые районы). Геологическое обследование аномалий, проверочное картировочное бурение, скважинная геохимия и каротаж
<p><u>2. Поисковые работы</u></p> <p>2.1. Поиски масштабов 1 : 50 000 – 1 : 25 000</p>	Поиски проявлений полезного ископаемого, рудоносных структур, формаций, зон метаморфизма и минерализации. Оценка перспектив геофизических и геохимических аномалий на обнаружение ископаемого. Уточнение геологической основы и поисковых признаков. Выделение рудных полей месторождений. Локальный прогноз полезного ископаемого и оценка прогнозных ресурсов $P_3$ и $P_2$	Крупномасштабные и детальные аэрогеофизические съемки (гамма-съемка, магнитные). Аэроэлектроразведка поисковая (МПП, БДК, ВМП, ДИП, СДРВ). Наземная электроразведка. Гравиразведка – поисковая и детализационная. Литохимическая съемка – детализационная и глубинная (закрытые площади). Сейсморазведка рудоносных структур. Геологическое обследование аномалий и проверочные горно-буровые работы. Каротаж и подземная геофизика, геохимические исследования скважин
<p>2.2. Поиски масштабов 1 : 10 000 – 1 : 2 000</p>	Поиски месторождений в том числе глубокозалегающих. Изучение рудоперспективных участков, аномалий и проявлений полезных ископаемых. Выделение рудоконтролирующих структурных элементов, продуктивных горизонтов, рудных зон месторождения. Оценка прогнозных ресурсов $P_2$ и $P_1$ . Выбор объектов для разведки	Наземные магнитные, гамма-спектрометрические и ядерно-физические съемки. Литохимическая съемка поверхности (в открытых районах) и глубинная геохимическая съемка (в закрытых районах). Терморазведка. Наземная электроразведка – поисковая и картировочная. Гравиразведка – поисковая и картировочная. Сейсморазведка руд. поля (профильная или площадная). Геологическое обследование и проверочные горно-буровые работы. Геофизические и геохимические исследования скважин

Продолжение таблицы 13

1	2	3
<u>3. Оценочные работы</u>	Выделение рудных тел, определение их залегания, морфологии, строения. Оценка рудоносности меж-, около- и заскважинного (выработочного) пространства. Изучение геолого-структурной позиции месторождения. Качественная и количественная оценки руд в естественных условиях и лаборатории. Предварительная оценка месторождения (по категории С <sub>2</sub> и С <sub>1</sub> ) и выбор объектов для детальной разведки	Наземные геофизические (электроразведочные, магниторазведочные, гравиразведочные, радиометрические, ядерно-физические) и геохимические работы масштаба 1:2000 – 1:1000. Сейсмическая разведка месторождения. Скважинная и шахтно-рудничная геофизика. Каротаж разведочных скважин. Терморазведка. Ядерно-физический, спектральный и атомно-абсорбционный анализы проб. Геофизическое моделирование месторождения
<u>4. Разведка месторождения</u>	Детальное изучение условий залегания, морфологии и строения рудных тел. Уточнение геологоструктурной позиции месторождения и изучение его глубинного строения. Качественная и количественная оценки руд в скважинах, горных выработках и лаборатории. Промышленная оценка месторождения (по сумме всех категорий С <sub>2</sub> , С <sub>1</sub> , В, А). Изучение достоверности разведки. Выделение участков первоочередной разработки	Наземные детализационно-оценочные геофизические работы масштаба 1 : 1 000 – 1 : 500. Геофизические исследования параметрических скважин (каротаж). Скважинная и шахтно-рудничная геофизика и геохимия. Каротаж рядовых разведочных скважин (наземных и подземных). Ядерно-физическое и геофизическое опробование пород и руд в естественном залегании. Ядерно-физический анализ проб
<u>5. Эксплуатационная разведка</u>	Изучение флангов и глубоких горизонтов месторождения. Уточнение строения условий залегания и морфологии рудных тел. Исследование горнотехнических условий. Оценка руд, картирование в карьерах и подземных выработках технологических типов руд. Опробование рудных тел. Уточнение направления эксплуатации, подготовка блоков к отработке, учет движения запасов	Скважинная и шахтно-рудничная геофизика и геохимия. Каротаж разведочных скважин (подземных и наземных). Ядерно-физическое и геофизическое опробование пород и руд в естественных условиях и в технологическом потоке. Ядерно-физический анализ проб. Детальное геофизическое моделирование месторождения

## 2.3. НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОФИЗИКА

### 2.3.1. Поисковые работы на нефть и газ

Месторождения нефти и газа располагаются среди осадочных пород на глубинах 1–6 км и представляют собой структурно-тектонический и литологический комплекс, в котором располагаются залежи, т. е. скопления нефти и газа. Залежи приурочены к ловушкам, сложенным пористыми, трещиноватыми породами (коллекторами) и ограниченными, по крайней мере, в кровле слабопроницаемыми породами-покрышками (экранами). Основными структурными ловушками являются:

- крупные (размером с десятки и сотни километров и амплитудой свыше 1% от глубины залегания) антиклинальные и сводовые поднятия;
- локальные поднятия небольших размеров (единицы и первые десятки километров в поперечнике и амплитудой менее 0,1% от глубины залегания);
- структурно-литологические (комбинированные) ловушки, связанные с погребенными рифами, соляными куполами и тектоническими нарушениями;
- неантиклинальные ловушки в терригенных отложениях (зоны выклинивания слоев, фациальных замещений, стратиграфических несогласий, эрозионно-аккумулятивных древних долин, дельт и т. п.).

В зависимости от природной обстановки эти структуры в разной степени отличаются по физическим свойствам от окружающих пород. Поэтому они могут выделяться по аномалиям тех или иных геофизических методов.

Поиски и разведка нефти и газа с помощью бурения скважин стоят очень дорого, поэтому нефтяная геофизика, в которой основным методом является сейсморазведка МОВ, становится обязательной в этой отрасли исследований. Сейсморазведка для поисков на таких сравнительно больших глубинах (свыше 3 км), обходится в 3–10 раз дешевле и осуществляется во столько же раз быстрее, чем буровые работы. Комплексование сейсморазведки с другими геофизическими методами увеличивает геолого-экономическую эффективность исследований [10]. Следует

отметить необходимость использования аэрокосмической информации, и прежде всего – данных инфракрасной и спектротрической съемок. Кольцевые структуры, выделяемые с их помощью, иногда бывают приурочены к нефтегазоносным структурам.

Поисковые работы на нефть и газ следует начинать с анализа данных региональной аэромагнитной и гравитационной съемок. Над нефтегазоперспективными структурами в зависимости от их размеров, глубин залегания и величины избыточной плотности аномалии  $\Delta g$  могут составлять от долей до первых десятков миллигал [23, 25]. Хорошие результаты при изучении глубокозалегающих пологих форм складчатости позволяют получить электромагнитные зондирования.

Сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) являлась ведущим методом поисков таких нефтегазоперспективных структур, как антиклинальные ловушки. Однако в настоящее время чаще приходится иметь дело с малоамплитудными (амплитуды поднятий меньше 0,01 от глубины залегания), которые изучаются сейсмопрофилированием методом общей глубинной точки (МОГТ). Как известно, в МОГТ применяются системы наблюдений с многократным (до 24 раз и более) прослеживанием отраженных и других волн по одним и тем же профилям и всей изучаемой площади (трехмерная и объемная сейсморазведка). Это обеспечивает накопление информации, а в результате – повышение отношения сигнал/помеха, что способствует более четкому выделению полезных волн и построению временных разрезов. Для преобразования временных разрезов в глубинные необходимо определение скоростей упругих волн с малой погрешностью (до 1%). С этой целью желательно иметь структурные скважины и данные сейсмических наблюдений в них.

Автоматизированную обработку материалов проводят с помощью ЭВМ по программам с введением различных кинематических и динамических поправок. В результате строят временные или глубинные разрезы, структурные карты. Нефтегазоперспективная структура (НГПС) выделяется и оконтуривается по данным нескольких методов; если она расположена в нефтегазовой провинции, то производится заложение поисковых

скважин. В целом геофизические методы все еще остаются косвенными методами поисков и разведки нефти и газа.

При изучении НГПС кроме сейсморазведки можно использовать электрические и электромагнитные зондирования, грави- и магниторазведку. Площадная, трехмерная (3Д) и объемная сейсморазведка МОВ обладает наибольшей разрешающей способностью, так как позволяет выделять поднятия по нескольким структурным горизонтам с амплитудой свыше 30–100 м, или с погрешностью менее 1% от глубины залегания.

Установлено, что всего около 30% структур, выявленных геофизическими методами и проверенных поисково-разведочным бурением, оказываются промышленно нефтегазодоступными. Поэтому важное значение имеет разработка способов прямых поисков (ПП) углеводородов или оценка нефтегазодоступности выявленных структур до вскрытия их скважинами.

Основанием для осуществления прямых поисков является то, что физические свойства нефтегазонасыщенных залежей, а также подстилающих и перекрывающих их пород различаются между собой и отличаются от свойств пород аналогичных структурно-литологических этажей, где нефти и газа нет. Это объясняется тем, что присутствие углеводородов может формировать дополнительные физико-геологические неоднородности как в самой залежи, так и вокруг нее, и особенно над ней (вплоть до земной поверхности): разуплотнение пород; растворение некоторых минералов и окисление углеводородов, приводящее к возникновению вторичных минеральных образований в порах и трещинах, например, пирита; изменение минерализации подземных вод; образование вокруг залежи субвертикальных зонально-кольцевых физико-химических и деформационных полей, а над залежью – "столбов" пород с измененными физико-химическими свойствами.

Установлено, что в нефтегазонасыщенных коллекторах, а иногда и в перекрывающих породах, уменьшается акустическая жесткость ( $\sigma V$ ) за счет снижения скорости ( $V$ ) распространения продольных волн и уменьшения плотности ( $\sigma$ ). Над нефтегазовой залежью на фоне обычно наблюдаемого гравитационного максимума за счет антиклинальных структур и более высокой

плотности подстилающих водоносных пород могут быть получены локальные минимумы поля силы тяжести малой амплитуды (0,05–1 мГал). Они обусловлены разуплотнением пород, возникающим из-за наличия углеводородов и повышения пористости, трещиноватости пород в сводах антиклиналей. Нефтенасыщенные породы иногда выделяются отрицательными локальными магнитными аномалиями с амплитудой от единиц до первых сотен нанотесл. Достаточно эффективными методами для прямых поисков нефти и газа иногда оказываются электрические и электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП, ЗСБ), что обусловлено повышенными, по сравнению с окружающими породами, удельными электрическими сопротивлениями нефтегазо-насыщенных коллекторов.

На некоторых нефтяных и газовых месторождениях в контуре нефтеносности и над залежью параметры поляризуемости становятся несколько выше, чем вокруг залежи. Это обусловлено наличием вкрапленности мелкокристаллического пирита и других продуктов окисления, образующихся за счет миграции и окисления углеводородов залежи. Над многими нефтяными и газовыми месторождениями наблюдаются радиометрические и геохимические аномалии: минимумы гамма- и бета-активности, уменьшение содержания сорбированного урана, хрома, никеля и других тяжелых элементов. Причиной этого является поглощение их потоком углеводородов, распространяющихся от залежи. На некоторых месторождениях нефти и газа за счет конвекционного перемещения флюидов и газов наблюдаются положительные аномалии температуры (1–2°C) при измерении в неглубоких (1–2 м) шпурах на земной поверхности.

В целом поиски и разведка нефти и газа методами нефтяной геофизики являются сложным, перспективным, дорогим направлением геофизики, требующим выбора для каждого района своих комплексов геолого-геофизических методов и совместной интерпретации данных с помощью ЭВМ.

На эксплуатируемых месторождениях нефти и газа, например с помощью так называемой четырехмерной (4Д) сейсморазведки, когда площадные наблюдения по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  проводятся периодически через разное число месяцев ( $t$ ), можно осуществлять мониторинг контура залежи, т. е. изучать изменения

физических условий месторождения, происходящие в ходе откачки нефти и газа.

### ***2.3.2. Разведка месторождений углеводородов***

Нефтегазоперспективные структуры, выявленные в ходе поисковых геолого-геофизических работ, становятся объектом *детальной* разведки. Целью ее является уточнение геометрии нефтегазоперспективных структур (положения кровли и подошвы продуктивных пластов); определение коллекторских свойств пород; выявление положения в залежах нефти и газа водонефтяного, газонефтяного и газоводяного контактов; подсчет запасов нефти и газа.

На стадии разведки нефти и газа применяют следующие геофизические методы: сейсморазведку (МОГТ) в трехмерном (3Д) площадном варианте (сейсмическая томография), когда по сотням расставленных на изучаемой площади сейсмоприемников улавливаются упругие волны, приходящие от расположенных в разных частях этой площади пунктов возбуждения. Проверка выявленных структур-ловушек осуществляется бурением параметрических и поисково-разведочных скважин и проведением в них геофизических исследований. Окончательные выводы по разведанным месторождениям делают на основе результатов комплексных геолого-геофизических исследований, выполненных как при разведке, так и в ходе предшествующих поисковых работ и обычно заканчивающихся построением сеймостратиграфических карт и разрезов.

Особенностями полевых и скважинных разведочных работ на нефть и газ являются:

- повышенная детальность сейсмических работ и плотность сети наблюдений на изучаемых площадях;
- применение сложных приемов обработки информации с помощью ЭВМ для изучения кинематических (времен прихода) и динамических (амплитуд и их затуханий) характеристик волн;
- тесная связь данных полевых сейсмических работ и геофизических исследований скважин (электрическими, сейсмоакустическими, ядерными методами);

- геохимические, гидрогеологические, гидродинамические, технологические опробования и испытания скважин, позволяющие совместно с ГИС и петрофизическим изучением керна определять пространственные положения контактов газ–нефть–вода в разрезе скважин;

- тщательное использование всей геолого-геофизической информации для прогнозирования геологического разреза, четкого определения геометрии и контуров залежей, сейсмостратификации разрезов, изучения коллекторских свойств и нефтегазонасыщенности слоев для подсчета запасов и составления схемы разработки месторождения нефти и газа.

### ***2.3.3. Моделирование резервуаров нефти и газа***

Целью моделирования резервуаров углеводородов является построение цифровой физико-геологической модели месторождения в виде пространственной сетки, узлы которой содержат следующую информацию:

- положение геологических и петрофизических границ, характеризующих геометрию резервуара;

- параметры, определяющие литологию пород, физико-геологические свойства пород, свойства насыщающего флюида, включая фильтрационно-емкостные свойства (ФЕС).

Моделирование резервуаров углеводородов необходимо для подсчета запасов месторождения и мониторинга его эксплуатации, а также для гидродинамического анализа.

Исходными данными для построения модели являются:

- данные 3Д-сейсморазведки или детальной 2Д-сейсморазведки;

- данные вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и сейсмокаротажа;

- данные геофизических исследований скважин (ГИС), включающие кривые электрокаротажа с альфа ПС, акустического и плотностного каротажа с результатами их обработки и интерпретации;

- данные инклинометрии скважин;

- измерения на керне фильтрационно-емкостных свойств;

- литологический, петрографический и палеонтологический анализы;
- данные испытаний и контроля за разработкой месторождения.

Большинство существующих отечественных и зарубежных компьютерных систем, созданных для построения модели резервуара, решают три основные задачи моделирования: привязку продуктивных пластов к сейсмическому волновому полю, определение формы (конфигурации) границ, прогноз петрофизических свойств пород.

Привязка продуктивных пластов к сейсмическому волновому полю осуществляется на базе совместного анализа данных ВСП (сейсмокаротаж) и математического сейсмического моделирования. С помощью ВСП проводится отождествление временных интервалов наземной сейсмической трассы с интервалами глубин. Математическое моделирование обеспечивает решение этой задачи, представляя ориентиры для выбора временных интервалов и волновых параметров при интерпретации.

После нахождения целевых геологических границ во времени определяют их форму (конфигурацию) в пространстве. Конфигурация границ определяется седиментационной слоистостью, постседиментационными деформациями и т. д., а на поведение сейсмических осей синфазности, помимо указанной слоистости, оказывают влияние интерференционные явления, обусловленные изменением упругих свойств и мощностей (толщин) пластов.

Прослеживание геологических границ по волновому полю реализуется сочетанием приемов стандартной сейсмической корреляции и приемов ослабления интерференционных эффектов. Это обстоятельство особенно важно при изучении резервуаров. Коллекторам углеводородов, приуроченным к прибрежным отложениям, карбонатным постройкам и т. п. обычно соответствуют непротяженные оси синфазности с неустойчивыми характеристиками.

Следующей задачей является поиск и учет закономерностей изменения мощности (толщины) между целевой геологической границей и границей латерально выдержанного пласта.

Дальнейший прогноз петрофизических свойств пород базируется на предположении о том, что после современных приемов обработки волновое поле адекватно отображает распределение акустических свойств в геологической среде. Акустические параметры пород либо прямо, как пористость и флюидонасыщение, либо косвенно, т. е. с использованием корреляционных зависимостей, связаны с коллекторскими характеристиками резервуаров. Для извлечения из волнового поля данных о петрофизических свойствах отдельного пласта применяются два основных подхода.

Первый подход базируется на решении обратной динамической задачи и дальнейшем прогнозе коллекторских свойств пласта по найденным значениям упругих параметров породы (детерминированный подход).

Второй подход использует статические связи петрофизических характеристик резервуара с динамическими параметрами волнового поля в скользящем временном интервале (вероятностно-статистический или просто статистический подход).

В настоящее время создано не менее десяти компьютерных технологий для решения задачи построения геологических моделей месторождений. Среди зарубежных технологий отметим CYARISMA; INTEGRAL; TIGRESS; PETROSYS; ECHO и др.

Отечественные разработки начинались с таких технологий, как ПАРМ-КОЛЛЕКТОР (Г. Е. Руденко) и ЗАЛЕЖЬ (Е. А. Галаган). Наиболее развитой технологией, включающей целый ряд программных подсистем, является разработанная в ОАО ЦГЭ интегрированная система обработки и интерпретации геологической сейсморазведочной, промыслово-геофизической информации ГЕММА (И. М. Чурикова и др.).

Технология ГЕММА предназначена для решения таких задач, как:

- интерпретация данных ЗД-сейсморазведки (подсистема СЕЙС);
- обработка данных ГИС (подсистема ГИС);
- анализ результатов керна (подсистема КЕРН);
- геологический анализ (подсистема ГЕОАН);

- обработка данных ВСП (подсистема ВСП);
- интерпретация данных сейсморазведки, ВСП и ГИС (подсистема ИНПРЕС);
- обработка данных гидродинамических исследований (подсистема ГДИ);
- анализ результатов эксплуатации скважин для уточнения геологического строения межскважинного пространства (подсистем ЭКСПАН);
- обобщение данных и построение цифровой геологической модели (подсистема МОДЕЛЬ).

Основными этапами технологии моделирования резервуаров углеводородов являются:

- сопоставление разномасштабных данных (кern, сейсморазведка и данные ГИС) в одном масштабе измерений – масштабе геологических моделей;
- седиментационная интерпретация ГИС с обоснованием детальной стратиграфической корреляции, изучением элементарных седиментационных циклов, выяснением природы коллектора на базе фациального анализа;
- определение подсчетных параметров.

Единым масштабом измерений для сопоставления всех видов данных по С. Б. Денисову является седиментационная, или фациальная, обстановка осадконакопления. Кроме того, обстановка осадконакопления и постседиментационные процессы обуславливают те или иные физические параметры горных пород, их фильтрационно-емкостные свойства, используемые для оценки подсчетных параметров.

Принципиальная технологическая схема построения цифровой геологической модели резервуара приведена на рис. 2.6.

Принципиальная схема для петрофизического обоснования алгоритмов расчета подсчетных параметров в технологии ГЕММА может быть представлена в следующем виде (рис. 2.7).



Рис. 2.6. Технологическая схема построения модели резервуара (по С.Б. Денисову)



Рис. 2.7. Технологическая схема петрофизического обоснования для расчета подсчетных параметров в системе ГЕММА

Традиционными видами представления геологических моделей являются карты, разрезы, каротажные диаграммы. Современная детальная геологическая модель представляет собой набор карт, характеризующих строение седиментационных циклов и разделяющих их непроницаемых экранов. Для терригенного разреза это карты эффективных толщин или альфа ПС и глинистых перемычек.

Оценка достоверности построенной геологической модели до сих пор остается достаточно субъективной и, следовательно, дискуссионной. Известны два основных подхода к оценке достоверности геологической модели. При первом подходе на прогнозных участках проверка модели осуществляется просто бурением скважин. При втором подходе на участках эксплуатационного бурения, находящихся в разработке, проверка модели реализуется методами анализа процесса разработки или гидродинамического моделирования.

## 2.4. НЕРУДНАЯ, УГОЛЬНАЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА

### *2.4.1. Нерудная геофизика*

К нерудным (неметаллическим) полезным ископаемым относятся свыше 200 минералов и горных пород, которые могут служить сырьем: индустриальным (алмаз, пьезокварц, слюда, корунд, графит, барит, флюорит, боксит и др.); химическим и агрохимическим (соли натрия, калия, апатит, фосфорит, боксит и др.); строительным минеральным, в том числе керамическим (глина, полевошпат, кварцевый песок и др.), огнеупорным (магнезит, песчаники, кварциты и др.) и строительным (известняк, песок, гравий, изверженные и метаморфические породы и др.).

Объемы и стоимость разработки нерудных полезных ископаемых больше, чем рудных, а удельные затраты на геофизические методы среди других геологоразведочных работ меньше. Основными задачами нерудной геофизики являются следующие: выявление особенностей геологического строения, уста-

новление прогнозно-поисковых признаков, выделение перспективных площадей и, наконец, поиски и разведка сырья. Выбор того или иного комплекса методов геофизики определяется контрастностью физических свойств объектов исследований и вмещающих пород и их геометрий, т. е. начинается с формирования физико-геологической модели (ФГМ) объекта. В ходе поисково-разведочных работ ФГМ уточняют, а в результате проверки горно-геологическими работами получают точные сведения о положении и запасах выявляемого сырья или материалов.

Алмаз является одним из ценных видов индустриального сырья. Коренные месторождения алмазов приурочены к кимберлитам, а вторичные осадочные (россыпные) располагаются в углублениях палеозойских пород и речных долинах. Кимберлитовые, вертикально залегающие, столбообразные тела диаметром от 10 до 700–800 м, уходящие на большую глубину, сложены ультраосновной брекчированной породой с многочисленными включениями ксенолитов (обломков окружающих пород и фундамента). Физико-геологической моделью для кимберлитовых трубок служит вертикальный цилиндр (столб) бесконечного простираения с отличающимися от вмещающей среды плотностью, магнитной восприимчивостью, удельным электрическим сопротивлением. Сами же алмазы, занимая малый объем в кимберлите, не могут служить объектом геофизических поисков.

Ведущими методами поисково-разведочных работ на кимберлитовые трубки являются аэромагниторазведка и наземная магнитная съемка. Однако узкими локальными аномалиями на графиках магнитной съемки выделяются не только кимберлитовые трубки, но и многочисленные дайки пород основного состава, траппов и т. п. Поэтому для разбраковки полученных магнитных аномалий применяют гравиразведку, электрическое и электромагнитное профилирование (ЭП, ДЭМП, СДВР). Россыпные месторождения алмаза изучают так же, как и подобные месторождения металлов, с помощью геофизических методов (ВЭЗ, электропрофилирование, сейсморазведка МПВ). Они служат для выявления углублений в фундаменте, которые могут быть ловушками для алмазов.

Минеральные соли (простые и сложные хлориды и сульфаты натрия, калия, магния и ряд других соединений) разрабатываются открытым и закрытым способами. Месторождения представлены в виде пластовых, штокообразных, куполообразных залежей. От вмещающих терригенных пород минеральные соли отличаются пониженными плотностью и магнитной восприимчивостью; повышенными удельным электрическим сопротивлением, скоростью распространения упругих колебаний, теплопроводностью; пониженной для солей натрия и магния и повышенной для солей калия гамма-активностью.

Верхнекамское месторождение калийных солей (ВКМКС) характеризуется сложными горно-геологическими и гидрогеологическими условиями эксплуатации рудников. Надсоляная толща повсеместно значительно обводнена, в её разрезе выделяются верхнесоликамский и нижнесоликамский водоносные горизонты. Вскрытие горными работами природных или развитие техногенных водопроводящих трещин, связывающих водоносные горизонты с выработанным пространством, вызывает прямую угрозу затопления рудников [16].

Защита рудников от затопления надсолевыми водами обеспечивается сохранностью водозащитной толщи. ВЗТ представляет собой безводную и водонепроницаемую часть геологического разреза, расположенную между кровлей верхнего обрабатываемого пласта и кровлей первого (сверху) пласта каменной соли. ВЗТ по строению делится на три части: нижнюю (ВЗТ1), представленную чередованием пластов калийно-магниевых солей с разделяющей их каменной солью, среднюю (ВЗТ2) – покровной каменной солью и верхнюю (ВЗТ3) – ритмично чередующимися между собой пластами мергелей и каменной соли в переходной пачке. Аномальность состояния пород ВЗТ определяется полнотой разреза ВЗТ, расслоением и газонасыщенностью пород ВЗТ1, развитием динамических разновидностей каменной соли в ВЗТ2 и ВЗТ3, расслоением глинисто-мергелистых пород ВЗТ3, наличием открытых трещин, флексурных складок, разрывных дислокаций, зон замещения. В подобных горно-геологических условиях необходим достаточно широкий комплекс геофизических методов, основанных на изучении различных физических свойств.

На этапе разведки и освоения месторождения особый интерес представляет интервал разреза, включающий в себя соляную и надсоляную толщи. Надсоляная толща характеризуется достаточно высокой контрастностью по электрическим, плотностным и акустическим свойствам. Соленосный интервал разреза, включающий в себя продуктивную и водозащитную толщи, значительно дифференцирован по плотностным и акустическим свойствам. Высокоомные соляные породы ВЗТ затрудняют изучение соляной толщи методами наземной электроразведки на постоянном токе. По магнитным свойствам разрез надсоляной и соляной толщ слабо контрастен.

Представленные физико-геологические особенности ВКМКС легли в основу обоснования геологически эффективных комплексов геофизических исследований, разработанных сотрудниками Горного института УрО РАН (Новоселицкий В.М., Санфиоров И.А. и др.) В качестве обязательных методов разведочной геофизики, включаемых в состав комплексов при изучении соляной и надсоляной толщ, обоснована наземная и шахтная сейсмоакустика, наземная и наземно-подземная гравиразведка, наземная электроразведка методом сопротивлений. Шахтная электроразведка в результате доработки методик полевых работ и интерпретационного обеспечения на сегодняшний день является составной частью подземной эксплуатационной разведки.

Глебовым С.В. выполнена оценка эффективности применения отдельных геофизических методов и их комплексов при проектировании горных работ, когда на первый план выходит задача исследования ВЗТ [16]. Основные выводы заключаются в следующем:

- наиболее эффективным методом является малоглубинная сейсморазведка высокого разрешения с невзравными источниками упругих колебаний; несколько меньше эффективность высокоточной гравиметрии, существенно повысить ее можно за счет использования томографической интерпретации в системе VECTOR;
- максимальная эффективность наблюдается при комплексировании сейсморазведки и высокоточной гравиразведки, оба

этих метода позволяют решать основные задачи изучения геологического строения участка проектируемых горных работ;

- введение электроразведки ВЭЗ в комплекс любого состава даёт прирост геологической информативности, но за счёт относительно высокой стоимости работ снижает экономические показатели.

Рыхлые глинистые, песчанистые, песчано-гравийные, гравийно-галечниковые, галечно-валунные материалы, широко применяемые в строительстве, связаны, главным образом, с четвертичными отложениями и добываются как на суше, так и на дне акваторий (рек, озер, на шельфе морей). Для расчленения перечисленных рыхлых пород, поисков и разведки тех или иных из них можно использовать электрические профилирования (ЭП, ЕП, ВП) и зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП), сейсморазведку МПВ, гамма-съёмку, иногда гравимагниторазведку. Обычно применяют одновременно не более двух методов.

Физико-геологические модели при изучении скальных строительных материалов бывают разными: от горизонтально и полого залегающих пластов до мощных лакколитов. Поэтому комплексы геофизических методов различаются. Пластовые крутослоистые залежи изучают гравиразведкой и магниторазведкой, электрическим и электромагнитным профилированием, гамма- и эманиционной съёмкой, а полого залегающие – методами гравиразведки, магниторазведки, электрическими и электромагнитными зондированиями, сейсморазведкой.

Твердые горючие полезные ископаемые (уголь, горючие сланцы, торф) по количеству добываемого сырья, морфологическим особенностям месторождений, составу окружающих горных пород и физическим свойствам как полезных ископаемых, так и вмещающих пород похожи на нерудные полезные ископаемые. Ведущими наземными и скважинными методами разведки угольных месторождений являются электрические. Это объясняется характерными свойствами углей, удельное электрическое сопротивление которых изменяется в очень широких пределах (от  $10^{-5}$  до  $10^4$  Ом).

В целом с помощью геофизических методов решают следующие задачи при изучении месторождений твердых горючих полезных ископаемых:

- уточняют границы месторождения;
- картируют выходы пластов угля, сланцев под наносы;
- определяют мощность надугольных, угленосных отложений;
- прослеживают обводненные, трещиноватые и заржавленные породы;
- трассируют малоамплитудные нарушения в угленосной толще;
- изучают горно-геологические условия эксплуатации месторождений;
- оценивают физико-механические и прочностные свойства пород в целях прогнозирования устойчивости горных выработок;
- определяют литологический состав вмещающих пород, марку (зольность) углей, мощность угольных пластов, ведут подсчет запасов;
- выявляют зоны выгорания угольных пластов.

#### ***2.4.2. Инженерная геофизика***

Верхнюю оболочку земной коры (мощностью в первые тысячи метров), где в наибольшей степени проявляются природные, экзогенные геологические и антропогенно-техногенные процессы, геологи называют геологической средой, а геофизики – геофизической или геолого-геофизической средой (а также экзотехносферой).

К малоглубинным геофизическим методам, используемым для изучения геологической среды, предъявляют специфические требования:

- высокая детальность изучения геологической среды на сравнительно небольших глубинах (от нескольких единиц до десятков, реже первых сотен метров) с изменяющимися в пространстве и во времени физическими свойствами, а значит, литологией, водно-физическими характеристиками, с широким проявлением природных процессов и инженерно-хозяйственной деятельности человека;

- использование высокопроизводительных методов и облегченных измерительных установок для ускорения, удешевления геофизических работ и возможности проведения повторных наблюдений;
- применение нескольких (до 3–4) геофизических методов разной физической природы для повышения точности получаемой информации;
- широкое использование буровых скважин и горных выработок, проходка которых несложна при небольших глубинах разведки.

Раздел прикладной геофизики, предназначенный для решения всех малоглубинных задач, связанных с выявлением в геологической среде естественных и искусственных неоднородностей по изменениям их физических свойств и аномалий физических полей, мы называем инженерной геофизикой. Инженерная геофизика в широком смысле может быть подразделена на гидрогеологическую, почвенно-мелиоративную, инженерно-геологическую, мерзлотную, гляциологическую, а также техническую и археологическую.

Геофизические методы давно и с успехом используют для решения следующих гидрогеологических задач: гидрогеологических съемок разных масштабов; поисков и разведки грунтовых, пластовых, трещинно-карстовых и артезианских вод; изучения динамики подземных вод; выяснения условий обводнения месторождений полезных ископаемых и объектов строительства или реконструкции; определения минерализации грунтовых и подземных вод; проведения гидромелиоративных и почвенно-мелиоративных исследований. Методы решения этих и других задач исследований подземной гидросферы иногда объединяют в гидрогеологическую геофизику, выделяя в ней почвенно-мелиоративное направление.

Поиски и разведка пресных подземных вод. С увеличением водонасыщенности горных пород увеличивается их электропроводность и скорости распространения упругих волн, меняются электрохимическая активность и поляризуемость, поэтому методы электроразведки и сейсморазведки давно используются при поисках и разведке подземных вод. Основными методами

поисков и предварительной разведки месторождений пресных, пластовых и грунтовых подземных вод являются вертикальные электрические зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) и сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а при изучении глубоких артезианских бассейнов – сейсморазведка методом отраженных волн (МОВ) и электроразведка (ДЗ, ЗСБ). Пример использования метода ВЭЗ для определения уровня грунтовых вод и литологического расчленения верхней части геологического разреза представлен на рис. 2.8.

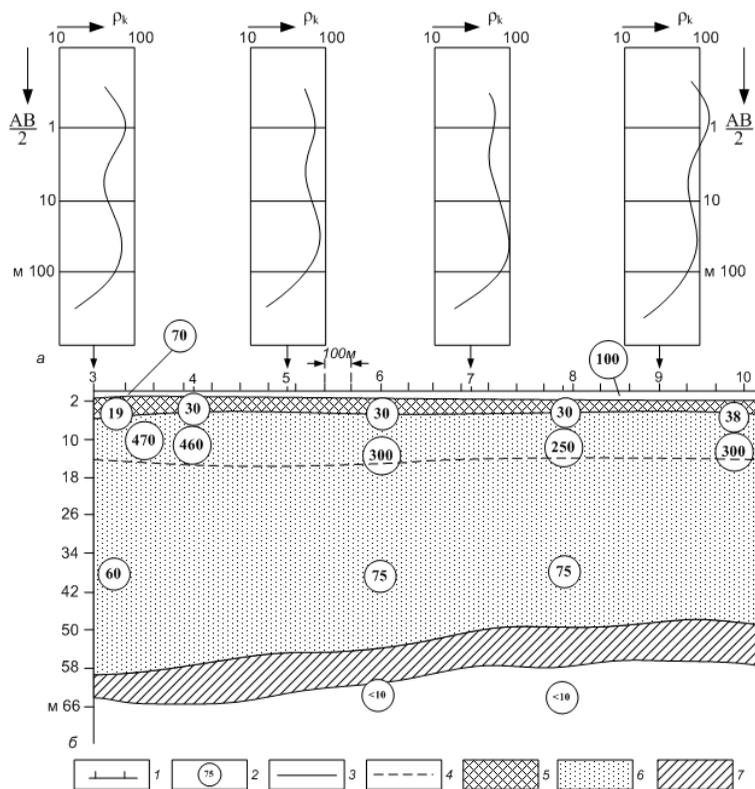


Рис 2.8. Кривые ВЭЗ (а) и геозлектрический разрез (б), полученные в одном из районов Куйбышевской области:  
 1 – точки ВЭЗ; 2– удельное электрическое сопротивление слоя в Омм;  
 3 – литологические границы; 4 – уровень грунтовых вод;  
 5 – суглинки; 6 – пески; 7– глины

Трещиноватые обводненные зоны выявляют с помощью методов электромагнитного профилирования. Детализацию выявленных зон с трещинно-карстовыми водами осуществляют методами кругового профилирования (КЭП) и кругового вертикального зондирования (КВЗ).

Сеть наблюдений зависит от масштаба съемок и сложности гидрогеофизических условий. Геолого-гидрогеологическое истолкование геофизических данных осуществляется на основе вероятностно-статистических связей между геофизическими параметрами и геофильтрационными свойствами в массиве горных пород, определяемыми по данным опытно-фильтрационных работ и геофизических исследований в скважинах.

Изучение условий строительства инженерных сооружений. Расчленение поверхностных и коренных отложений и изучение оснований проектируемых наземных и подземных инженерных сооружений (промышленных, гражданских, гидротехнических, транспортных и др.) проводят для оценки несущей способности и устойчивости массивов горных пород на конкретных строительных площадках. Эти работы характеризуются большой детальностью (масштаб исследований от 1 : 10 000 до 1 : 1000). Геофизические методы используют для картирования рыхлых отложений и определения глубины залегания коренных скальных пород, детального расчленения верхней части разреза, оценки физико-механических и водно-физических свойств пород в их естественном залегании, изучения трещиноватости и нарушения массива, определения уровня грунтовых вод и их динамики (рис. 2.9).

В задачи геофизических методов входит также изучение напряженного состояния коренных пород, выявление геодинамических явлений и сейсмичности (карст, суффозия, оползни, обвалы, просадки и др.), представляющих опасность для будущего строительства, проведение мониторинга за работой ответственных сооружений и изучение их влияния на геологическую среду.

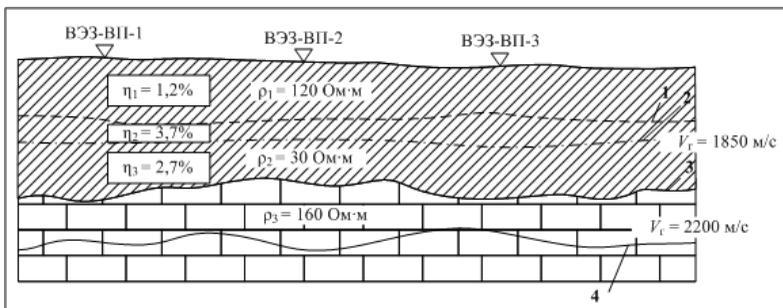


Рис. 2.9. Пример определения условий залегания скальных пород под рыхлыми образованиями по данным методов ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ:

- 1 – уровень капиллярного поднятия по данным ВЭЗ-ВП;
- 2 – поверхность грунтовых вод по данным ВЭЗ, ВЭЗ-ВП и МПВ;
- 3 и 4 – кровля скальных пород по данным ВЭЗ, сохранных пород по данным МПВ ( $V_r$  – граничная скорость)

Для этого применяют комплекс методов, состав которого в значительной степени аналогичен используемому на ключевых участках, но ведущими в комплексе являются сейсморазведка методом преломленных волн (МПВ), а также электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП или ЗСБ), которые дополняются, по возможности, микромагнитной, эманацционной, гамма-съемками. Применяют также сейсмоакустическое и электромагнитное межскважинные просвечивания.

Изучение физико-геологических явлений и процессов. Из всех физико-геологических явлений и процессов геофизические методы чаще всего используют при изучении карста и оползней.

Карст, т. е. наличие пустот и трещин в растворимых породах, активно изучается геофизическими методами, так как растворимые породы (карбонаты, соли) отличаются по физическим свойствам от нерастворимых (глины, песок, изверженные) горных пород.

Методика геофизических работ и состав методов определяются особенностями закарстованной территории. Например, при изучении поверхностных карстовых форм (воронки, впадины, понор), заполненных глинистым материалом и перекрытых рыхлыми отложениями небольшой мощности, используются

методы электроразведки (ВЭЗ или ЕП, ЭП); можно применять тепловую съемку, высокоточную гравиразведку. Изучение глубинных карстовых форм представляет собой сложную задачу. В этом случае, наряду с методами электроразведки (ВЭЗ, ЭП), можно использовать сейсморазведку (МПВ), гравиразведку, ядерно-физические и скважинные методы. Для детального изучения зон закарстованности используются круговые установки зондирований и профилирований. По ориентировке большой оси диаграмм КС можно определить направление трещиноватости, а по величине отношения больших осей диаграмм к малым – оценить ее интенсивность.

Предпосылки применения геофизических методов при изучении оползней заключаются в дифференциации физических свойств залегающих на склонах коренных пород и оползневых накоплений. В теле оползня появляются дополнительные границы, связанные с поверхностью фильтрационного потока. Оползневые накопления картируют методами электро- и сейсмопрофилирования (ЭП, ЕП, МПВ). Детальное расчленение разреза оползневого склона проводят методами зондирований (ВЭЗ, ВЭЗ-ВП) и МПВ. Изучение обводненности оползней имеет решающее значение для прогноза их устойчивости. При определении уровня грунтовых вод, степени увлажнения оползневых тел эффективны методы МПВ, ВЭЗ, ВЭЗ-ВП. Изучение изменения физических свойств и состояния оползневых накоплений во времени осуществляется режимными геофизическими наблюдениями с использованием тех же полевых, а также скважинных методов. Для изучения динамики оползневого процесса можно использовать магнитные реперы. Микромагнитная съемка, выполняемая над участком заземления таких реперов в режиме мониторинга, позволяет оценить движение оползневого тела по смещению создаваемых реперами локальных магнитных аномалий.

За последние годы сформировались два новых направления инженерной геофизики: *археологическая и техническая геофизика*, которые предназначены для выявления в верхней части геологического разреза (ВЧР) искусственных древних и современных сооружений, погруженных в землю, как правило, на небольшую глубину. Культурный слой – это, с одной сторо-

ны, исторически сложившаяся система многовековых напластований, образовавшихся в ходе жизнедеятельности древних людей, а с другой стороны, это могут быть современные антропогенные и техногенные осадки, появившиеся как результат накопления отходов производства при эксплуатации промышленных объектов и перепланировки местности при строительстве. Мощность культурного слоя может составлять от первых десятков сантиметров до 10–15 м.

Археологическая геофизика. Археологическая геофизика изучает скрытые под поверхностью земли объекты историко-культурного наследия:

- археологические объекты и комплексы, содержащиеся внутри культурных напластований, например гончарные и металлургические печи;
- археологические памятники и комплексы, утратившие внешние отличительные признаки; грунтовые могильники или фундаменты не сохранившихся архитектурных сооружений;
- древние гидросооружения в виде заполненных грунтом каналов или подземных тоннелей-каналов, а также объекты, затонувшие на дне рек, озер, болот и морей;
- умышленно спрятанные объекты-склады и другие сокрытия.

Геофизические методы исследований являются неразрушающими, что позволяет создавать кадастры археологических памятников и карты охранных историко-археологических зон без вскрытия (рис. 2.10). Следует иметь в виду, что тотальные археологические раскопки приводят, как правило, к полному разрушению археологического памятника, поэтому сочетание результатов геофизических исследований с раскопками небольшой его части позволяет законсервировать культурный слой на большей территории для будущих более совершенных методов исследований.

Элементарные расчеты показывают, что даже комплексные, детальнейшие, многометодные геофизические исследования являются во много раз более дешевыми, чем археологиче-

ские раскопки. Актуальность проведения геофизической разведки особенно возрастает при экстренных исследованиях большой территории перед застройкой или в процессе строительства.

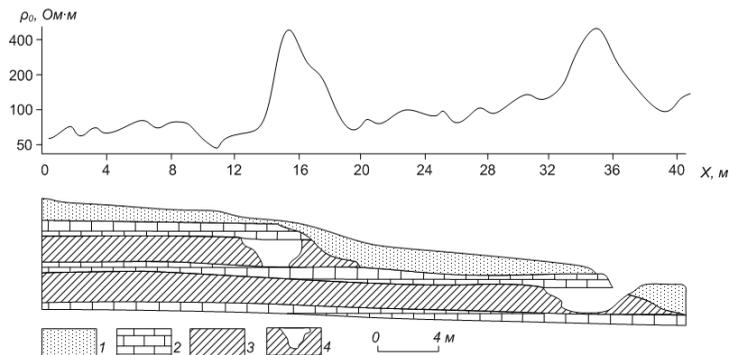


Рис. 2.10. Строение склона Песочной балки со склепами и график кажущегося сопротивления:

- 1 – культурный слой ( $\rho_k = 30 - 70$  Ом-м); 2 – плотные известняки ( $\rho_k = 300 - 600$  Ом-м); 3 – рыхлые обломочные известняки ( $\rho_k = 20 - 50$  Ом-м); 4 – склепы ( $\rho_k = \infty$ )

Основными методами археологической геофизики являются магниторазведка, электроразведка, георадар, гравиразведка, сейсморазведка и ядерно-физические методы. Хорошо зарекомендовали себя в археологии капаметрия (изучение магнитных свойств верхнего слоя грунта) и металлоискатели – приборы, аналогичные армейским миноискателям.

### 2.4.3. Экологическая геофизика

Главная особенность экогеологии и экогеофизики состоит в организации мониторинга, т. е. слежения за изменением состояния геологической среды с целью определения места и времени как быстрых (катастрофических), так и медленных (эволюционных) отклонений от нормального устойчивого состояния. Эти отклонения сказываются на функционировании природно-техногенных (технических) систем (ПТС), таких, например, как крупные электростанции, отдельные природно-техногенно-социальные объекты (ПТСО), хранилища ядерных

отходов, и особенно природно-техногенных процессов (ПТП). К последним относятся естественные и искусственно вызванные землетрясения, горные удары, оползни, сели, взрывы и т. п.

Экология в широком значении этого термина - это комплексная наука (или система наук), изучающая общие законы функционирования экосистемы и воздействие человеческой (антропогенно-техногенной) деятельности на них. Под экосистемой, называемой также геоэкосистемой, биосистемой или биогеоценозом, понимают сообщество живых организмов (растений, животных, микроорганизмов) и окружающей среды обитания. Такое сообщество представляется как единое функциональное целое с разными уровнями организации от отдельных особей до всей биосферы – "живой пленки" Земли, где существует жизнь. Биосфера состоит из естественной природной среды, занимая часть атмосферы, гидросферы, литосферы. Деятельность людей, находящихся в биосфере, создает искусственную антропогенно-техногенную среду, называемую социосферой. Она, в свою очередь, состоит из техносферы, включающей искусственно созданные объекты инженерно-хозяйственной деятельности людей (агломерации, сельхозугодья, а также водохозяйственные, транспортные, энергетические, промышленные и другие сооружения), и ноосферы (сферы разума по В. И. Вернадскому), связанной с преобразующей ролью человеческой цивилизации. Влияние техносферы на природную среду и биосферу настолько велико, что можно говорить о биотехносфере как окружающей среде обитания человека и биоты.

Таким образом, под окружающей средой (ее называют также географической оболочкой Земли) понимаются взаимосвязанные природная среда (части атмосферы, гидросферы, литосферы), биотехносфера и социосфера. В связи с возрастающими темпами роста населения Земли, интенсивным использованием природных ресурсов и загрязненностью природной среды человечество вступило в противоречие с ней. Судьба цивилизации окажется под угрозой, если не будет преодолено нарушение естественного экологического равновесия.

## Вопросы для самопроверки

1. Приведите примеры типовых комплексов геофизических методов при решении поисковых задач на рудные и нефтегазоносные объекты.
2. Назовите методы глубинной геофизики в порядке убывания степени их информативности по изучению оболочек Земли.
3. Как меняются основные физические свойства оболочек Земли от поверхности до ее центра?
4. Сущность региональных структурных среднemasштабных геофизических исследований.
5. Задачи и методы картировочно-поисковой крупномасштабной геофизики.
6. Какие методы геофизики и как применяются для изучения разрывных нарушений?
7. Общая характеристика и основные задачи нефтегазовой геофизики.
8. Какие бывают нефтегазовые ловушки и методы геофизики для их выявления?
9. Назовите геофизические методы, их цели и особенности методики при поисках нефти и газа.
10. Назовите методы геофизической разведки нефти и газа.
11. Что такое прямые геофизические поиски нефти и газа?
12. В чем сущность моделирования резервуаров нефти и газа?
13. Объекты, методы и задачи инженерной геофизики.
14. Задачи и методы археологической геофизики.
15. Задачи и методы гидрогеологической геофизики.
16. Что такое экологическая геофизика?

## Библиографический список

### Основной

1. Комплексование методов разведочной геофизики: Справочник геофизика / Под ред. В.В. Бродового, А.А. Никитина. М.: Недра, 1984. 384 с.
2. *Никитин А.А., Хмелевской В.К.* Комплексование геофизических методов: учебник для вузов. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2004. 294 с.
3. *Хмелевской В.К., Костицын В.И.* Основы геофизических методов: учебник для вузов /Перм. гос. ун-т. Пермь, 2010. 400 с.

### Дополнительный

4. *Аронов В.И.* Методы построения карт геолого-геофизических признаков и геометризации залежей нефти и газа на ЭВМ. М.: Недра, 1990. 300 с.
5. *Афанасьев Б.М., Долгаль А.С., Резников И.Г., Христенко Л.А.* Возможности наземной и скважинной магниторазведки при изучении Кингашского медно-никелевого месторождения // Геофизика. 2009. № 4. С. 36–41.
6. *Бабаянц П.С., Блох Ю.И., Трусов А.А.* Интерпретационная томография по данным гравиразведки и магниторазведки в пакете программ «СИГМА-3D» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей. Материалы 31 сессии Международного семинара им. Д.Г. Успенского. М., ОИФЗ РАН, 2004. С. 88–89.
7. *Боровко Н.Н.* Оптимизация геофизических исследований при поисках рудных месторождений. Л: Недра, 1979. 230 с.
8. *Бродовой В.В.* Геофизические исследования в рудных провинциях. М.: Недра, 1984. 269 с.
9. *Булах Е.Г., Маркова М.Н., Тимошенко В.И., Бойко П.Д.* Математическое обеспечение автоматизированной системы интерпретации гравитационных аномалий. Киев: Наук. думка, 1984. 112 с.
10. *Бычков С.Г.* Методы обработки и интерпретации гравиметрических наблюдений при решении задач нефтегазовой геологии. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 187 с.

11. *Бычков С.Г., Долгаль А.С., Щербинина Г.П., Простолупов Г.В.* Томографическая интерпретация аномалий силы тяжести с использованием системы VECTOR // Вестн. Перм. науч. центра. 2009. № 4. С. 28–39.
12. *Вахромеев Г.С.* Основы методологии комплексирования геофизических исследований при поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1973. 152 с.
13. *Вахромеев Г.С., Давыденко А.Ю.* Моделирование в разведочной геофизике. М.: Недра, 1987. 192 с.
14. *Временные* методические указания по комплексированию геолого-геофизических и геохимических методов при поисках медно-никелевых месторождений в Норильском промышленном районе. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1983. 88 с.
15. *Вычислительная* математика и техника в разведочной геофизике: Справочник геофизика / Под ред. В.М. Дмитриева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 498 с.
16. *Глебов С.В.* Обоснование рациональных комплексов геофизических исследований водозащитной толщи на месторождениях водорастворимых руд (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): автореф. дис... канд. техн. наук. Пермь, 2006. 23 с.
17. *Голыздра Г.Я.* Комплексная интерпретация геофизических полей при изучении глубинного строения земной коры. М.: Недра, 1988. 212 с.
18. *Гордин В.М.* Способы учета влияния рельефа дневной поверхности при высокоточных гравитационных измерениях. Обзор ОНТИ ВИЭМС. сер. IX. М.: ВИЭМС. 1974. 89 с.
19. *Гравиразведка:* Справочник геофизика / Под ред. Е.А. Мудрецов, К.Е. Веселова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 607 с.
20. *Долгаль А.С.* Компьютерные технологии обработки и интерпретации данных гравиметрической и магнитной съемок в горной местности. Абакан: Фирма-МАРТ, 2002. 188 с.
21. *Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф.* О гравитационной томографии и путях ее дальнейшего развития // Вестн. Перм. ун-та. Сер. Геология. 2009. Вып. 11(37). С. 114–121.

22. Долгаль А.С., Шархимуллин А.Ф. Повышение точности интерпретации моногеничных гравитационных аномалий // Геоинформатика. 2011. № 4. С. 49–56.
23. Костицын В.И. Методы повышения точности и геологической эффективности детальной гравиразведки /Перм. гос. ун-т. Пермь, 2002. 224 с.
24. Магниторазведка: Справочник геофизика / Под ред. Б.Е. Никитского, Ю.С. Глебовского. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1990. 470 с.
25. Маловичко А.К., Костицын В.И., Тарунина О.Л. Детальная гравиразведка на нефть и газ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1989. 224 с.
26. Методические рекомендации по средне- и крупномасштабной магнитной картографии. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1990. 84 с.
27. Методические рекомендации по геофизическому обеспечению геолого-съёмочных работ масштаба 1:200 000. СПб: Министерство природных ресурсов РФ, ВИРГ-Рудгеофизика, 2000. 240 с.
28. Прогнозирование не выходящего на поверхность оруденения при глубинном геологическом картировании и геологическом доизучении площадей. Методическое пособие / М.Л. Сахановский, П.А. Литвин, Б.М. Михайлов и др. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2003. 272 с. (МПР РФ, ВСЕГЕИ).
29. Рыбаков М.Б., Бурдэ А.И., Столпнер М.Н. Основные положения и проблемы комплексной геологической интерпретации геофизических материалов // Геофизические методы при геолого-съёмочных работах масштаба 1:50 000 с общими поисками. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1986. С. 16–26.
30. Столпнер М.Н., Бурдэ А.И., Рыжгий Б.П. Геофизическое обеспечение региональных геолого-съёмочных работ и общих поисков и пути его совершенствования // Геофизические методы при геолого-съёмочных работах масштаба 1:50 000 с общими поисками. Л.: НПО «Рудгеофизика», 1986. С. 5–15.
31. Страхов В.Н. Основные идеи и методы извлечения информации из данных гравитационных и магнитных наблюдений // Теория и методика интерпретации гравитационных и магнитных аномалий. М.: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1979. С. 146–269.

32. *Страхов В.Н.* Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. I // Геофизика. 1995. № 3. С. 9–18.
33. *Страхов В.Н.* Основные направления теории и методологии интерпретации геофизических данных на рубеже XXI столетия. II // Геофизика. 1995. № 4. С. 10–20.
34. *Хесин Б. Э.* Рудная геофизика в горных областях. М.: Недра, 1969. 200 с.
35. *Физические* свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика): Справочник геофизика./Под ред. Н.Б. Дортман. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1986. 455 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	3
<b>1. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ</b>	10
1.1. ЗАДАЧИ, ЭТАПЫ И КОМПЛЕКСЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	10
1.2. ФИЗИКО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ	28
1.2.1. Построение петрофизических моделей	28
1.2.2. Построение физико-геологических моделей	40
1.2.3. Геометрические параметры источников геофизических аномалий и влияние помех	53
1.2.4. Точность наблюдений и сеть геофизических съемок	64
1.3. НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЗИКИ	73
1.3.1. Качественная неоднозначность: определение природы геофизических аномалий	74
1.3.2. Количественная неоднозначность при решении обратных задач геофизики	77
1.3.3. Сужение пределов неоднозначности	83
1.4. КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ	90
1.5. ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ КОМПЛЕКСА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ	108
<b>2. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ РЕШЕНИИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ</b>	114
2.1. ГЛУБИННАЯ ГЕОФИЗИКА	114
2.2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ И КАРТИРОВОЧНО-ПОИСКОВЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	122
2.2.1. Региональные геофизические исследования	122
2.2.2. Среднемасштабное картирование	124
2.2.3. Крупномасштабное картирование	125
2.2.4. Системный подход к геофизическим исследованиям	132

2.3. НЕФТЕГАЗОВАЯ ГЕОФИЗИКА	136
2.3.1. <i>Поисковые работы на нефть и газ</i>	136
2.3.2. <i>Разведка месторождений углеводородов</i>	140
2.3.3. <i>Моделирование резервуаров нефти и газа</i>	141
2.4. НЕРУДНАЯ, УГОЛЬНАЯ, ИНЖЕНЕРНАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ГЕОФИЗИКА	146
2.4.1. <i>Нерудная геофизика</i>	146
2.4.2. <i>Инженерная геофизика</i>	151
2.4.3. <i>Экологическая геофизика</i>	158
<i>Библиографический список</i>	161

*Учебное издание*

**ДОЛГАЛЬ Александр Сергеевич**

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ**  
Учебное пособие

Редактор *М. А. Шемякина*  
Корректор *Н. А. Антонова*  
Компьютерная верстка *А.С. Долгаля*

Подписано в печать 29.11.2012. Формат 60x84 1/16.  
Усл. печ. л. 9,71. Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел  
Пермского государственного национального исследовательского университета  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

Типография  
Пермского государственного национального исследовательского университета  
614990, Пермь, ул. Букирева, 15

*При оформлении обложки использован рисунок из статьи  
А. А. Блискавицкого (журнал «Геоинформатика». 2011. №3)*