

Замеченные опечатки

Строка	Напечатано	Следует читать	По вине
0 сверху	геологических	геофизических	корректора
9 снизу	трещинами	трещинам	автора
3 "	Снижение	Склонение	корректора
6 "	участок	участком	"
1 "	получения	помутнения	автора
5 "	том	этом	"
3 "	Краснодар	Красноград	"

СТЕРОВ, Л. Я. и др. „Краткий курс разведочной геофизики для геологов“.

Л. Я. НЕСТЕРОВ, Л. Д. БЕРСУДСКИЙ, А. Т. ДОНАБЕДОВ,
Н. С. БИБИКОВ

550.3:550.8:622.1

550.3:550.8

1156

КРАТКИЙ КУРС
АЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ
ДЛЯ ГЕОЛОГОВ

4857
1497

Цена 5 руб. 50 коп., перепл. 1 р. 50 к.

БИБЛИОТЕКА
Геологического Ин-та
Арм. Фил. АН Наук СССР



ГОИТИ • НКТП • СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ГОРНО-ТОПЛИВНОЙ И ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД

1938

МОСКВА

„Краткий курс разведочной геофизики для геологов“ состоит из двух частей. В первой части, составляющей половину книги, дано описание основных методов разведочной геофизики, полевых процессов и основ интерпретации, в объеме, необходимом для общего ознакомления с их принципами. При изложении основ методов математическая сторона их сведена к минимуму.

Во второй части, занимающей вторую половину книги, изложены основы геолого-разведочного применения геофизических методов и на основании ряда практически выполненных работ даны схемы комплексного применения методов разведочной геофизики при решении некоторых геолого-разведочных задач.

Книга рассчитана на студентов геологической, разведочной, гидро-геологической и маркшейдерской специальностей, но, особенно в своей второй части, представляет несомненный интерес для широкого круга геологов и инженеров указанных специальностей, а также для студентов-геофизиков.

ПРЕДИСЛОВИЕ

«Краткий курс разведочной геофизики для геологов» предназначен для читателей, для которых геофизика не является основной специальностью. В соответствии с этим в книге максимально сокращен объем излагаемых обычно в учебных пособиях по геофизике физико-математических основ отдельных методов, теории аппаратуры и интерпретации. Книга содержит лишь краткое описание методов, полевых приемов и основ интерпретации, необходимых для общего ознакомления с принципами отдельных геофизических методов.

В то же время в настоящем курсе значительно более широко, чем в имеющихся учебниках по геофизике, изложены основы геолого-разведочного применения геофизических методов. На основе рассмотрения некоторых практических примеров впервые даны схемы комплексного применения геофизических методов при решении ряда геолого-разведочных задач.

При составлении учебника авторы имели в виду, что вследствие отсутствия в литературе подобных работ краткий курс разведочной геофизики может представить интерес не только для студентов старшего курса геолого-разведочных специальностей вузов, но и для широкого круга геологов и инженеров, работающих в различных отраслях геологии и разведочного дела.

Значительные трудности были встречены при подборе материалов по проводившимся в Союзе геофизическим исследованиям различных объектов. Отсутствие опубликованных в печати работ вынудило авторов пользоваться материалами и рукописными отчетами, хранящимися в библиотеках и отделах фондов различных организаций. Естественно, что при этом многие работы либо вовсе не могли быть использованы, либо были использованы недостаточно полно.

Авторы отдельных разделов курса следующие.

Л. Я. Нестерову принадлежит Введение и часть I, за исключением главы II, написанной А. Г. Тарховым и § 15, составленного совместно с П. Ф. Федотовым.

Л. Д. Берсудским написано Введение к части II и § 26, 27 и 28 главы VIII.

Н. С. Бибиковым составлена глава IX, § 25 главы VII и § 29 главы VIII.

А. Т. Донабедовым составлены § 21—24 главы VII.
Редактирование всего курса выполнено П. М. Татарино-
вым.

Авторы обращаются к читателям с просьбой присылать свои замечания и указания как о схеме построения курса, так и о всех замеченных ими недостатках и неполноте изложения отдельных разделов.

§ 1. ЗАДАЧИ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Первые попытки использования некоторых физических явлений в целях поисков и разведки полезных ископаемых относятся, повидимому, ко второй половине XVIII века, когда только что изобретенный магнитный компас был применен для обнаружения сильно-магнитных железных руд. Электричество для решения геолого-разведочных задач впервые было привлечено в 1829 г., когда Фокс наблюдал естественные электрические поля в медных рудниках Корнуэльса. Однако эти попытки были единичными, и лишь в конце прошлого века, когда был сконструирован магнитометр Талена, магниторазведка стала более систематически применяться для поисков железных руд. С начала XX века, благодаря работам Этвеша по конструированию приборов для измерений вариаций силы тяжести, на арену выступила гравиразведка. К этому же времени относится возникновение первых методов, использующих радиоактивные явления, а немного позднее, в 1910—18 гг., благодаря работам Шлюмберже и Лундберга, электроразведка при помощи постоянного и переменного тока также получила более надежную базу для развития. Методы, утилизирующие упругие свойства, — сейсморазведка — зародились в 1907—19 гг. на базе работ Вихерта и Минтропа, и, наконец, газовая съемка и методы физико-химии возникли в СССР в 1932—34 гг., — первая по предложению А. В. Соколова, последние в результате работ лаборатории физико-химии Центрального научно-исследовательского геолого-разведочного института (ЦНИГРИ).

В царской России, за исключением магниторазведочных работ в КМА и на Урале, разведочная геофизика не нашла себе применения. Широкое распространение получила она в СССР, начиная с 1925—1926 гг., и с тех пор неуклонно развивается, совершенствует методику и технику работ и находит все более и более широкое применение во всех областях геолого-разведочного дела.

В начале разведочная геофизика в СССР возникла как один из приемов поисков железных руд и сульфидных месторождений, теперь же, через 12—13 лет развития, с помощью геофизических методов решаются вопросы геологического строения больших районов на глубины 2—3 км и более, осуществляется картирование закрытых районов, ведутся поиски и разведка месторождений нефти, угля, золота, полиметаллов, олова, свинца, никеля, хромитов, редких и радиоактивных элементов, марганца, пегматитов,

рования, поисков, разведки и геологического обслуживания при эксплуатации — ничего кроме удорожания работ и замедления их темпов дать не может.

В задачу настоящего курса входит, на основе ознакомления с методами разведочной геофизики, показать на ряде конкретных примеров, как в том или другом случае практики могут решаться различные геолого-разведочные задачи с привлечением методов разведочной геофизики.

§ 2. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД

Поскольку методы разведочной геофизики занимаются изучением геологических тел через проявления их физических свойств, знание этих последних является совершенно необходимым. Физических свойств породы имеют очень много; мы рассмотрим лишь те из них, которые (на данном этапе развития) использует разведочная геофизика.

Это будут: плотность, пористость, влажность, электрическое сопротивление, магнитная восприимчивость, остаточное намагничение, упругие свойства, радиоактивность и термические свойства. При этом мы будем стараться не столько приводить значения физических свойств пород, сколько выяснять связи физических свойств между собою, с составом, возрастом и условиями залегания пород.

Плотность (δ) и пористость (K)

Ведущим фактором, влияющим на плотность осадочных пород, является их пористость, а минералогический состав, характер цемента и т. д. являются факторами второстепенными. Это положение иллюстрируется рис. 1 и 2, где приведены зависимости плотности песчаников и известняков от их пористости.

Н. Н. Самсоновым и А. Т. Донабедовым установлена изменимость плотности осадочных пород одного возраста и состава в пределах территории Большого Донбасса — именно, к центру Донбасса плотность увеличивается, к периферии падает (рис. 3). Учитывая данные рис. 1 и 2, мы можем сказать, что в центре Донбасса были условия, повлекшие за собой уменьшение пористости пород почти до нуля, тогда как к периферии пористость остается более заметной и доходит до 15—20%. Подмечаемая некоторыми авторами зависимость пористости от возраста осадочных пород является лишь частным случаем (и при том не всегда справедливым) более общей зависимости пористости от степени метаморфизма пород.

Отсюда следует, что пользоваться средними данными для плотности и пористости осадочных пород очень опасно, и лицам, занимающимся расшифровкой гравитационных наблюдений, необходимо иметь материал по плотностям пород изучаемого района и ни в каком случае не переносить значения плотностей пород из складчатых зон на платформы или обратно.

Плотность углей (на примере углей Донбасса) зависит от степени углефикации и от содержания летучих (рис. 4). Плот-

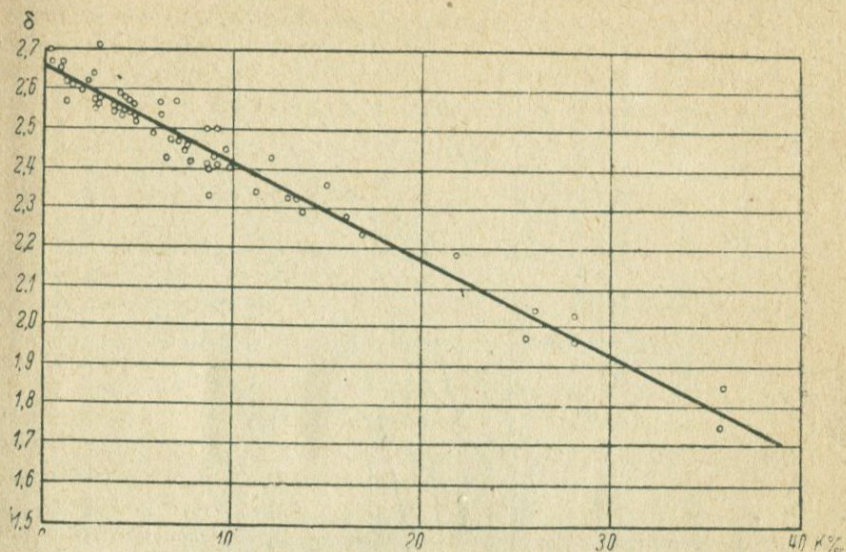


Рис. 1. Зависимость плотности (δ) песчаников от их пористости (K).

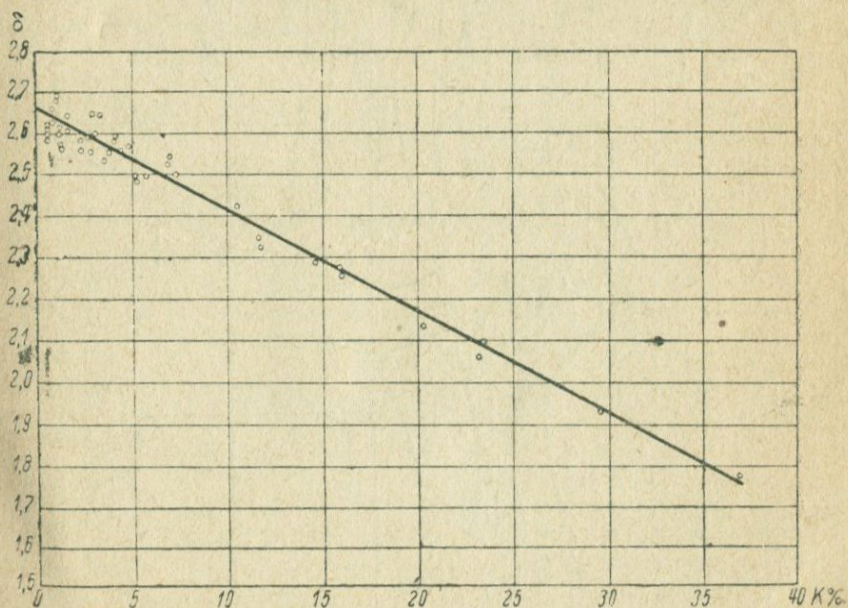


Рис. 2. Зависимость плотности (δ) известняков от их пористости (K).

ность быстро уменьшается при увеличении летучих от 0 до 10—15% и уменьшении содержания углерода до 90%, а затем

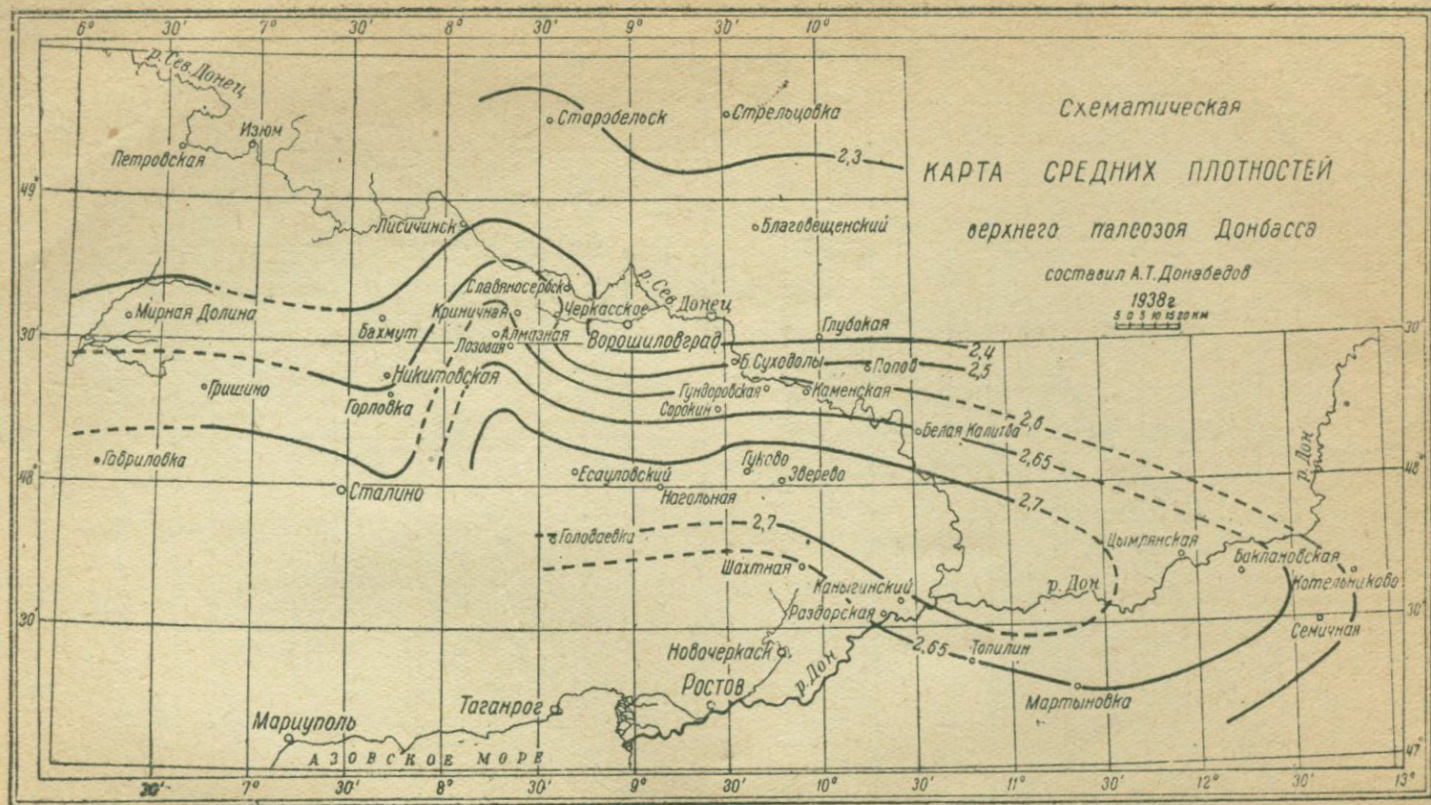


Рис. 3.

при дальнейшем уменьшении содержания углерода и увеличении летучих плотность падает более медленно. Некоторое влияние на повышение плотности имеет зольность углей.

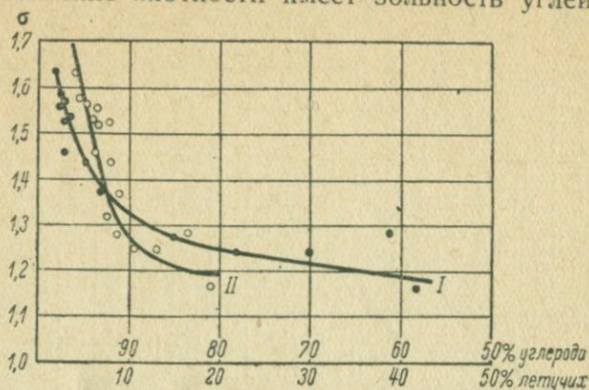


Рис. 4. Зависимость плотности углей от содержания в них летучих (I) и углефикации (II).

Плотность изверженных и метаморфических пород зависит как от пористости, так и от состава, причем главную роль играет состав. Если разделить изверженные породы на четыре группы: I — граниты и гнейсы, II — сиениты, III — гранодиориты, диориты, габбро и IV — ультраосновные породы,

то зависимость плотности от состава может быть иллюстрирована рис. 5 и 6 — вариационными кривыми плотностей изверженных пород Приазовья и Карелии. Эти кривые показывают, как часто может встречаться некоторая плотность у данной породы. Так, например, вариационные кривые пород I и II групп для Приазовья показывают, что наиболее часто встречающиеся плотности гранитов и сиенитов — 2,60—2,61 и отклонения от этих величин незначительны, тогда как наиболее часто встречающаяся плотность пород III группы будет 2,63—2,65, и пределы изменения плотностей пород этой группы гораздо шире.

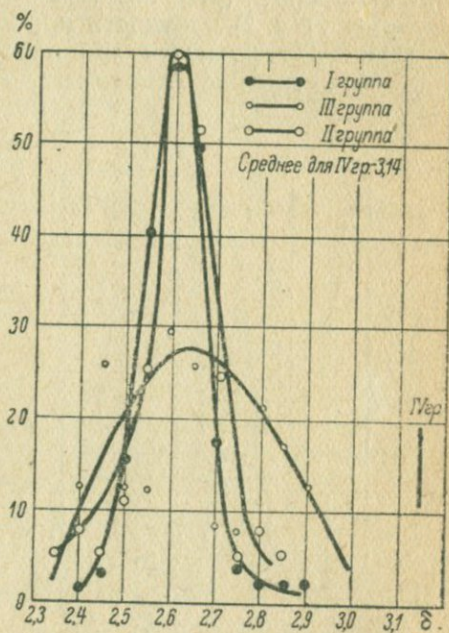


Рис. 5. Вариационные кривые плотностей изверженных пород Приазовья.

Рассмотрение рис. 5 и 6 приводит к заключению, что 1) плотности пород Приазовья меньше плотностей соответствующих

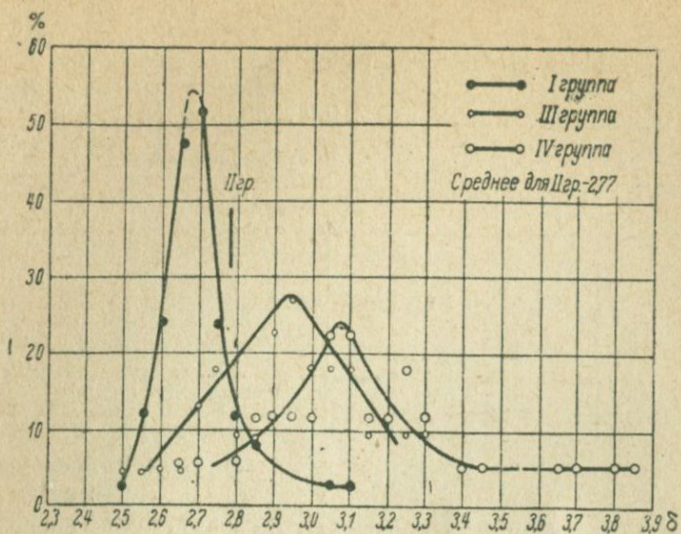


Рис. 6. Вариационные кривые плотностей изверженных пород Карелии.

пород Карелии (это же показывает рис. 7) и 2) плотности пород Карелии увеличиваются при переходе от кислых к основным до-

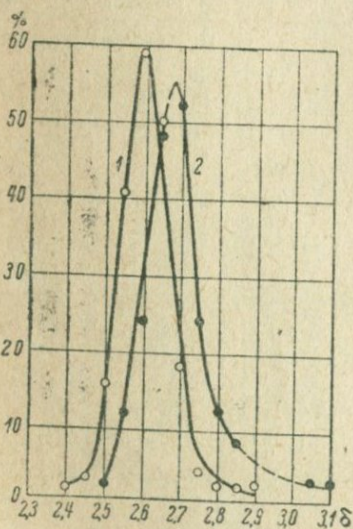


Рис. 7. Вариационные кривые плотностей гранитов и гнейсов Приозовья (1) и Карелии (2).

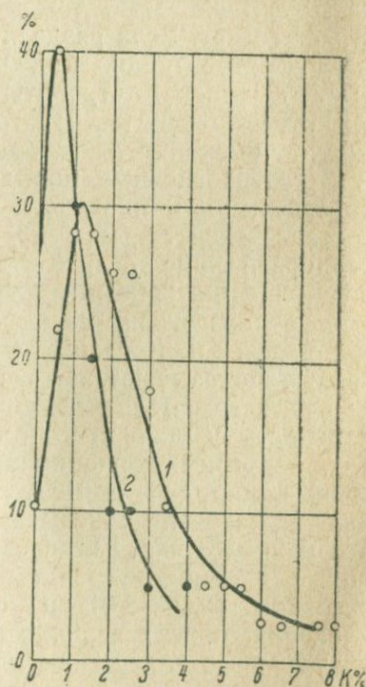


Рис. 8. Вариационные кривые по-ристости (К) гранитов и гнейсов Приозовья (1) и Карелии (2).

вольно плавно, тогда как плотности пород I, II и III групп Приозовья почти одинаковы.

Пористость изверженных пород Приазовья и Карелии характеризуется таблицей средних значений K (табл. 1).

Таблица 1

Породы	K для Приазовья				K для Карелии			
	от	до	средн.	колич. опред.	от	до	средн.	колич. опред.
I гр.	0,4	8,0	2,16	32	0	4,1	1,78	20
II гр.	0,5	7,6	2,49	23	—	—	2,1	3
III гр.	0,10	13,0	4,2	21	0	6,0	2,15	17
IV гр.	0,33	8,0	3,5	5	0	4,9	1,26	12

Как видим, K пород Приазовья больше K соответствующих пород Карелии: это особенно наглядно видно на вариационных кривых пористости гранитов и гнейсов (рис. 8). Повышенная пористость изверженных пород Приазовья по сравнению с Карелией может объяснить часть разницы в плотностях этих пород в пределах от 0,01 до 0,04—0,05 (тогда как фактически разница больше). Эту большую часть разницы, а также характер изменения плотностей пород при переходе от кислых к основным объясняет табл. 2 состава этих пород (по усредненным данным химических анализов).

Таблица 2

Группы	Тяжелые окислы $TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO$ в %		Средние окислы $SiO_2 + Al_2O_3$ в %		Легкие окислы $MgO + CaO + Na_2O + K_2O$ в %	
	Приазовье	Карелия	Приазовье	Карелия	Приазовье	Карелия
	I	2,9	2,9	84,5	86,4	12,6
II	6,8	9,7	74,7	76,0	18,5	14,3
III	14,2	19,9	54,1	60,8	31,7	19,3
IV	—	20,3	—	63,2	—	16,5

Если принять, что плотность тяжелых окислов — 4,8, средних — 2,7 и легких — 1,5, то по приведенным данным состава можно вычислить плотность пород по формуле:

$$\delta = \sum \delta_i s_i \quad (1)$$

где δ_i — плотность составной части, а s_i — содержание этой части в долях единицы. Эти вычисления приводят к следующим цифрам:

Для Приазовья $\delta_I = 2,61$, $\delta_{II} = 2,62$; $\delta_{III} = 2,62$

Для Карелии $\delta_I = 2,64$, $\delta_{II} = 2,73$; $\delta_{III} = 2,83$ и $\delta_{IV} = 3,00$

Как видим, характер изменений плотностей в этих цифрах находит наглядное отражение. Таким образом, состав извержен-

ных пород имеет решающее значение для их плотности, но пренебрегать изменениями пористости также нельзя.

Плотность руд варьирует около 4—5, доходя до 8 для киновари и снижаясь до 2,45 для боксита.

Таблица средних плотностей и пористостей некоторых осадочных, изверженных и метаморфических пород дается в конце этого параграфа (табл. 11). Пользоваться ею надо с учетом тех общих зависимостей, которые мы только что рассмотрели.

Влажность (ω) и электрическое сопротивление (ρ)

Влажность пород зависит от гидрорежима и от пористости. Для осадочных пород характер зависимости влажности от пористости иллюстрируется рис. 9, где изображена связь K и ω для

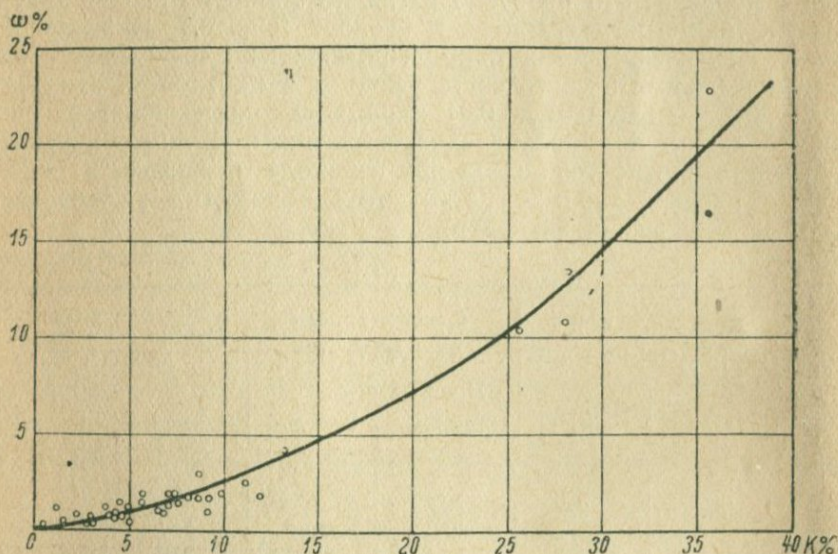


Рис. 9. Зависимость влажности (ω) от пористости (K) песчаников.

песчаников, однако она является типичной и для других осадочных пород.

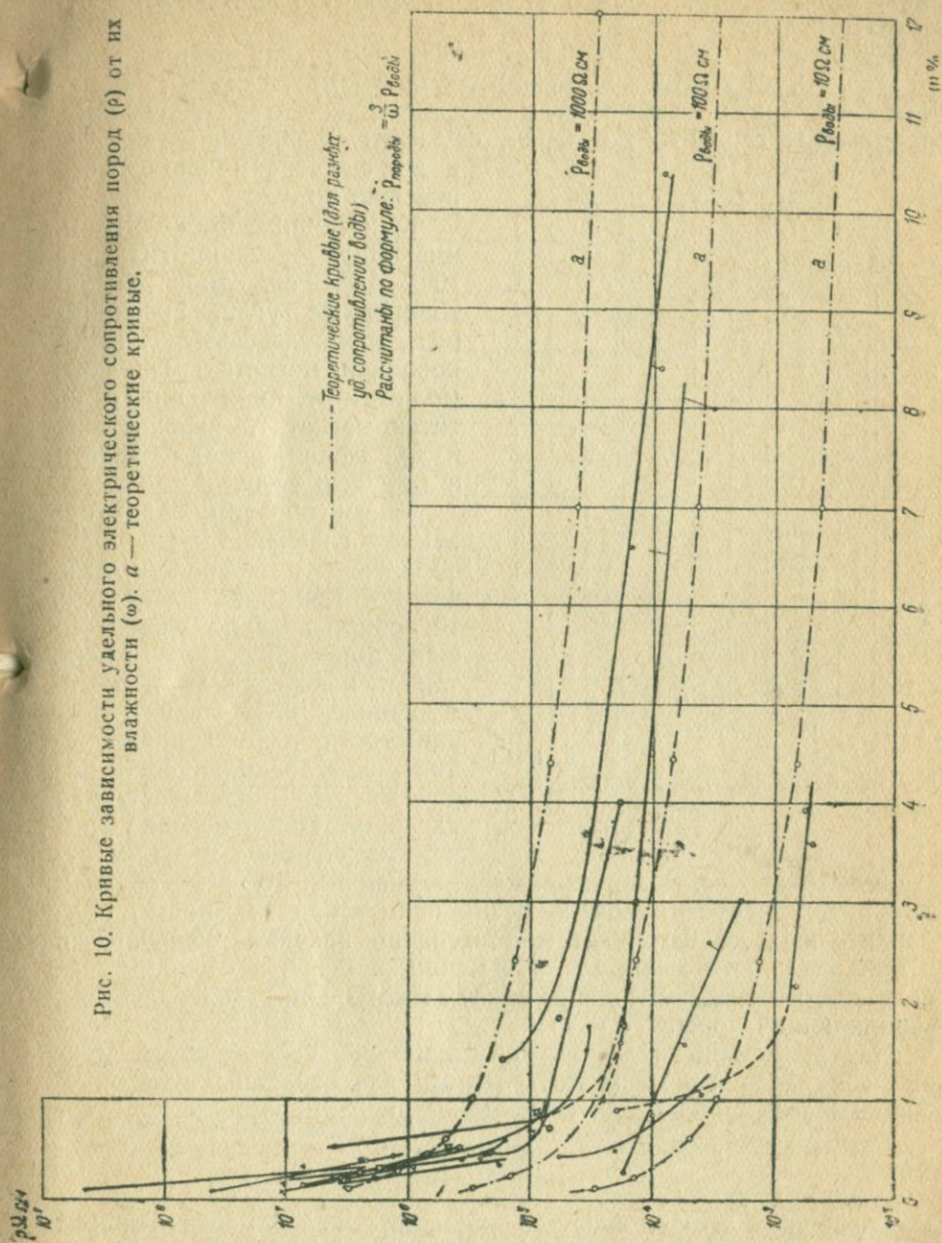
Следует заметить, что для углей влагоемкость больше, чем для песчаников, известняков и сланцев при той же пористости, что говорит, повидимому, за то, что угли более гигроскопичны и их поры чаще соединяются между собой, чем в других породах.

Влажность изверженных пород вообще не велика и в среднем колеблется от 0,07 до 2,9% (как максимум), но чаще в пределах 0,2—0,7%; более детальные данные приведены в табл. 11 в конце параграфа.

Электрическое сопротивление ρ пород зависит от сопротивления минералов, слагающих породу, влажности, сопротивления

воды в порах и структуры породы. По удельному электрическому сопротивлению все минералы можно разбить на три

Рис. 10. Кривые зависимости удельного электрического сопротивления пород (ρ) от их влажности (ω). a — теоретические кривые.



группы: плохие, средние и хорошие проводники. К плохим проводникам, имеющим сопротивления 10^{10} и выше $\Omega \text{ см}$, относятся: альбит, амфиболы, ангидрит, андезин, биотит, гиперстен,

группа гранатов, кальцит, каменная соль, кварц, лабрадор, микроклин, мусковит, нефелин, оливин, олигоклаз, ортоклаз, пироксены, сера, флогопит, флюорит, эпидот и др., сюда же относится нефть.

К средним проводникам, имеющим сопротивления 10^5 — $10^8 \text{ } \Omega \text{ см}$, относятся: антимонит, вольфрамит, гематит, ильменит, киноварь, каменные угли (курные), касситерит, лимонит, пиролюзит, серпентин, сидерит, сфалерит, франклинит, хромит

и др.; сюда же можно отнести пресную воду.

К хорошим проводникам, имеющим сопротивление 10^{-3} — $10^3 \text{ } \Omega \text{ см}$, относятся: антрацитовые угли, арсенопирит, борнит, графит, галенит, ковеллин, магнетит, марказит, молибденит, пирит, пирротин, титаномагнетит, халькопирит и др., сюда же надо отнести и морскую воду.

Таким образом, сопротивление главнейших породообразующих минералов очень велико. Как показывает рис. 10, сопротивление всех горных пород как осадочных, так и изверженных и метаморфических, зависит от влажности и от сопротивления воды, заполняющей поры. Рис. 10 показывает, что удельное сопротивление почвы всех пород в сухом состоянии

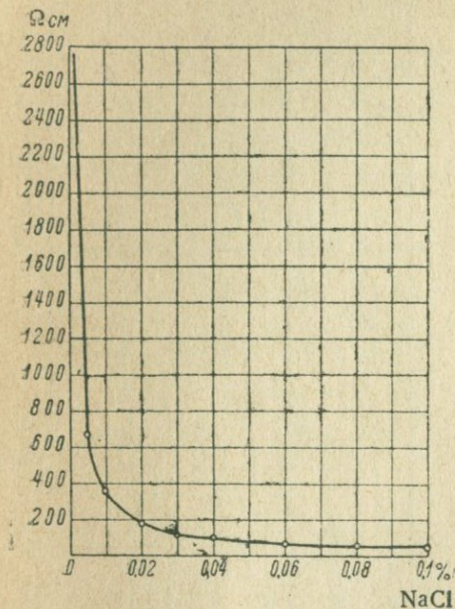


Рис. 11 Зависимость удельного сопротивления воды от процентного содержания в ней NaCl.

очень велико и выражается цифрами 10^8 — $10^{10} \text{ } \Omega \text{ см}$ и выше. Сопротивление очень резко падает при влажности, приблизительно, до 0,5%, затем постепенно падение уменьшается, и при влажности выше 1% ρ изменяется очень медленно, стремясь асимптотически к значению удельного сопротивления воды, заполняющей поры.

На том же рисунке пунктиром нанесены теоретические кривые ρ от ω , построенные для различных удельных сопротивлений воды, заполняющей поры, по формуле:

$$\rho_{\text{породы}} = \frac{3}{\omega} \rho_{\text{воды}} \quad (2)$$

Сравнение этих кривых с данными эксперимента говорит о том, что пользование упрощенной формулой (2) допустимо без введения особо крупных ошибок.

Сопротивление же воды зависит от количества растворенных в ней примесей. На рис. 11 дана зависимость удельного сопро-

тивления воды от процентного содержания в ней соли NaCl. Как видим, наиболее резко сопротивление падает при тысячных долях процента содержания NaCl, которое нередко встречается на практике.

Рис. 8, 9, 10 и 11 показывают, что для изверженных пород возможны весьма большие колебания ρ в зависимости от влажности и сопротивления воды в порах. Однако оно почти всегда велико и колеблется в пределах, указываемых в табл. 3.

Таблица 3

Порода	Колич. определ.	$\rho \Omega$ см породы при максимальной влажности	
		пределы	среднее
I гр.	75	$3,10^3 - 9,10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
II гр.	25	$3,1 \cdot 10^2 - 1,3 \cdot 10^7$	$2,9 \cdot 10^6$
III гр.	34	$2,3 \cdot 10^4 - 4,10^7$	$2,6 \cdot 10^6$
IV гр.	12	$1,10^5 - 4,5 \cdot 10^7$	$2,1 \cdot 10^6$
По всем изверженным	146	$3,1 \cdot 10^2 - 4,5 \cdot 10^7$	$1,8 \cdot 10^6$

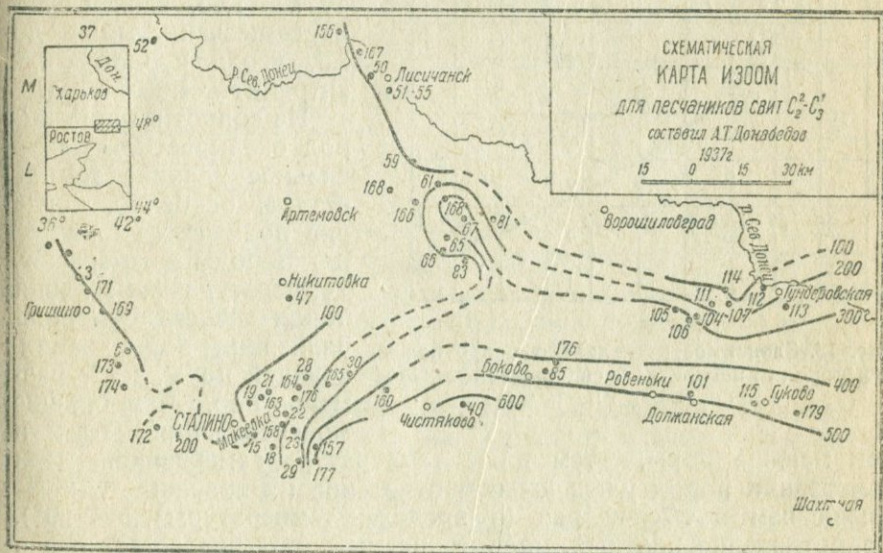


Рис. 12.

Ясно, что пользоваться средними цифрами надо крайне осторожно.

В связи с региональными изменениями пористости осадочных пород находится и региональное изменение сопротивления их. Пример такого изменения ρ приводится на рис. 12, где дана карта равных сопротивлений (изоом) для песчаников свит

$C_2^2 - C_3^1$ Донбасса. Совершенно ясно заметно, что в центре Донбасса, где пористость пород мала, ρ имеет большие значения, тогда как к периферии увеличение пористости приводит к уменьшению ρ .

Удельное сопротивление руд зависит, кроме указанных общих факторов, еще и от процента вкрапленности хорошо проводящих ток рудных минералов — это наглядно видно на рис. 13.

Мы уже говорили, что удельное сопротивление зависит от структуры породы. Породы сланцеватые имеют удельное сопротивление по сланцеватости (ρ_t) меньше, чем в перпендикулярном направлении (ρ_N).

Говорят, что сланцеватые породы обладают электрической анизотропией и коэффициент анизотропии

$$\lambda = \rho_N / \rho_t \quad (3)$$

у таких пород больше единицы. Так, например, слоистый песчаник имеет $\lambda = 1,65$, сланец глинисто-песчанистый — до 7,5, уголь курной — 6,5, антрацит — 4,6 и т. д.

На сопротивление пород оказывает довольно сильное влияние температура, особенно, когда она понижается ниже 0° и породы замерзают. Температура замерзания пород зависит от минерализации воды, заполнения поры, и от размеров пор. Чем больше минерализация воды и

чем меньше поры, — тем ниже температура замерзания. При замерзании пород удельное сопротивление их возрастает, но не свыше чем в тысячу раз (в пределах температуры до -20°). Сопротивление плотных, мало пористых пород возрастает очень мало — при пористости до 5% (влажности до 1%) возрастание не превышает 10 раз. Сопротивление пористых влажных пород возрастает при их замерзании тем сильнее, чем больше минерализация воды, заполняющей поры. Температура замерзшей породы также влияет на ее сопротивление: последнее тем больше, чем ниже температура тела. Так, например, наносы, имеющие при температуре их $+18, +20^\circ$ сопротивление 150—4500 $\Omega \text{ см}$, повышают его, примерно, в 27 раз при температуре -5° и почти в 1000 раз при температуре от -16° до

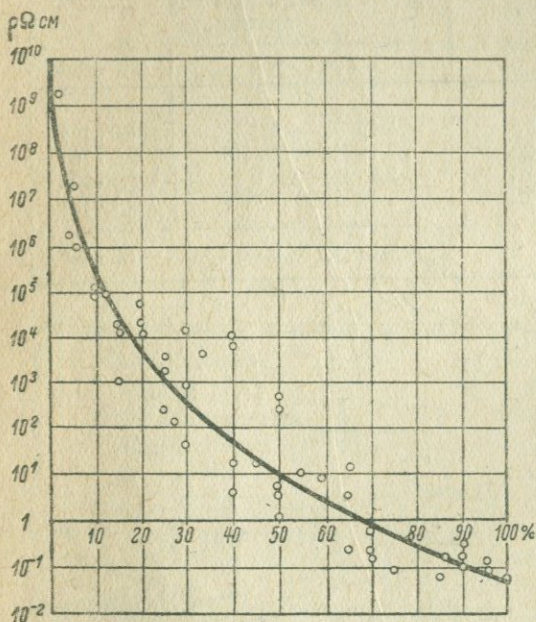


Рис. 13. Зависимость удельного сопротивления пород от процентного содержания хорошо проводящих минералов.

—20°. Это, вероятно, зависит от того, что при понижении температуры все большее и большее количество воды, заполняющей поры, обращается в лед.

Упругие свойства

Таблицы средних значений упругих констант для горных пород приводятся ниже, но пользование ими возможно при учете ряда общих зависимостей, которые мы сейчас рассмотрим.

Так, на примере изверженных пород Приазовья и Карелии видно, что:

1) модуль Юнга (E) пород Карелии больше модуля Юнга соответствующих пород Приазовья;

2) модуль Юнга и в том и в другом случае (Приазовье и Карелия) растет при переходе от кислых пород к основным.

Причины, вызывающие наличие подобных закономерностей, вероятно, те же, которые повлияли на наличие аналогичных закономерностей в плотностях этих пород.

Значение коэффициента Пуассона (σ) для всех типов изверженных пород колеблется от 0,1 до 0,4.

Средние значения σ сведены в табл. 4.

Таблица 4

Район	I гр.	II гр.	III гр.	IV гр.
Приазовье	0,240	0,244	0,235	0,230
Карелия	0,254	0,250	0,253	0,251

Рассмотрение табл. 4 приводит к заключению, что для пород Приазовья коэффициент Пуассона несколько меньше, чем для пород Карелии, тогда как при переходе из группы в группу особых изменений σ не заметно. Для всех изверженных пород среднее $\sigma = 0,246$. Данная цифра говорит за то, что принимая в среднем $\sigma = 0,25$, мы не сделаем существенной ошибки, влияющей заметным образом на значения скорости распространения упругих волн.

На рис. 14 изображены вариационные кривые для скорости распределения упругих волн (V) для пород I группы Приазовья и Карелии. Мы видим, что скорости распространения упругих волн в гранитах и гнейсах Карелии выше, чем в Приазовьи, это же заметно и для других групп пород (см. табл. 5, где даны полученные в лаборатории значения V в метрах в секунду).

Из сравнения всех четырех групп видно, что скорости, в общем, возрастают от I-й к IV-й группе, причем следует отметить, что скорости для пород Карелии несколько больше, чем скорости для тех же пород Приазовья.

Характер нарастания V при переходе от кислых к основным

Район	I гр.	II гр.	III гр.	IV гр.
Приазовье	5000	5100	5900	7800
Карелия	6400	7000	7600	6650

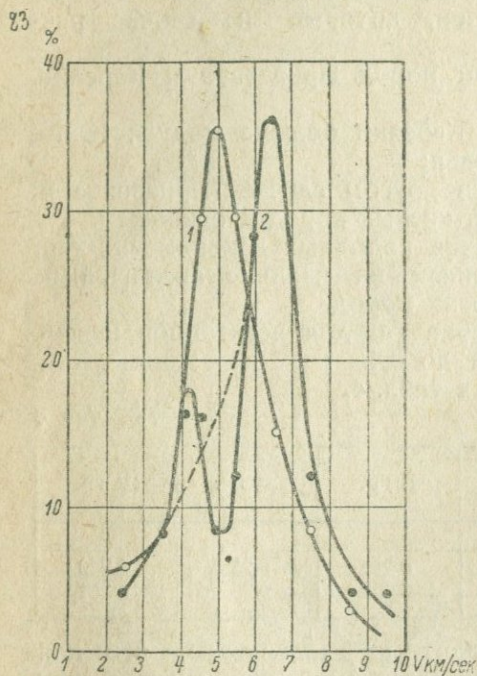


Рис. 14. Вариационные кривые скорости распространения упругих волн (V) в гранитах и гнейсах Приазовья (1) и Карелии (2).

до 6800 м/сек, чаще — в пределах 3000—5000 м/сек.

Скорость распространения упругих волн в осадочных породах падает при увеличении пористости пород. Так, увеличение K от 0 до 15—20% влечет уменьшение V почти в два раза. Изменение скорости упругих волн для одних и тех же пород (по возрасту и литологически) в региональном масштабе видно на рис. 15. В центре Донбасса средняя скорость в породах верхнего палеозоя, по полевым данным, доходит до 5000 м/сек, тогда как на севере она спускается до 3100 м/сек, т. е. упругие свойства подчиняются здесь таким же закономерностям, как и плотность и удельное электрическое сопротивление.

В. В. Weatherby и L. Y. Faust указывают на изменяемость V от глубины залегания пород и от их возраста, приводя таблицы

породам для Приазовья и Карелии похож на нарастание плотностей этих же пород.

Упругие константы осадочных пород могут весьма сильно варьировать. Так, E песчаников сильно изменяется от $1,27 \cdot 10^{11}$ до $17,6 \cdot 10^{11}$ дн/см², чаще же в пределах $3,5—6,0 \cdot 10^{11}$ дн/см²; E известняков колеблется от $2,0 \cdot 10^{11}$ до $22,0 \cdot 10^{11}$ дн/см²; чаще — в пределах $4,0—7,0 \cdot 10^{11}$ дн/см²; E сланцев изменяется от $0,5 \cdot 10^{11}$ до $10,1 \cdot 10^{11}$ дн/см², чаще — в пределах $2,0—4,0 \cdot 10^{11}$ дн/см².

Коэффициент Пуассона (σ) песчаников варьирует в пределах 0,10—0,38, σ известняков — от 0,11 до 0,38. Скорости распространения упругих волн (V) для песчаников варьируют от 2550 до 9000 м/сек, чаще в пределах 3000—5000 м/сек; V известняков, от 3000 до 10000 м/сек, чаще — в пределах 4000—7500 м/сек и V сланцев колеблется от 1700

для глинистых сланцев и песчаников (табл. 6) и для известняков (табл. 7).

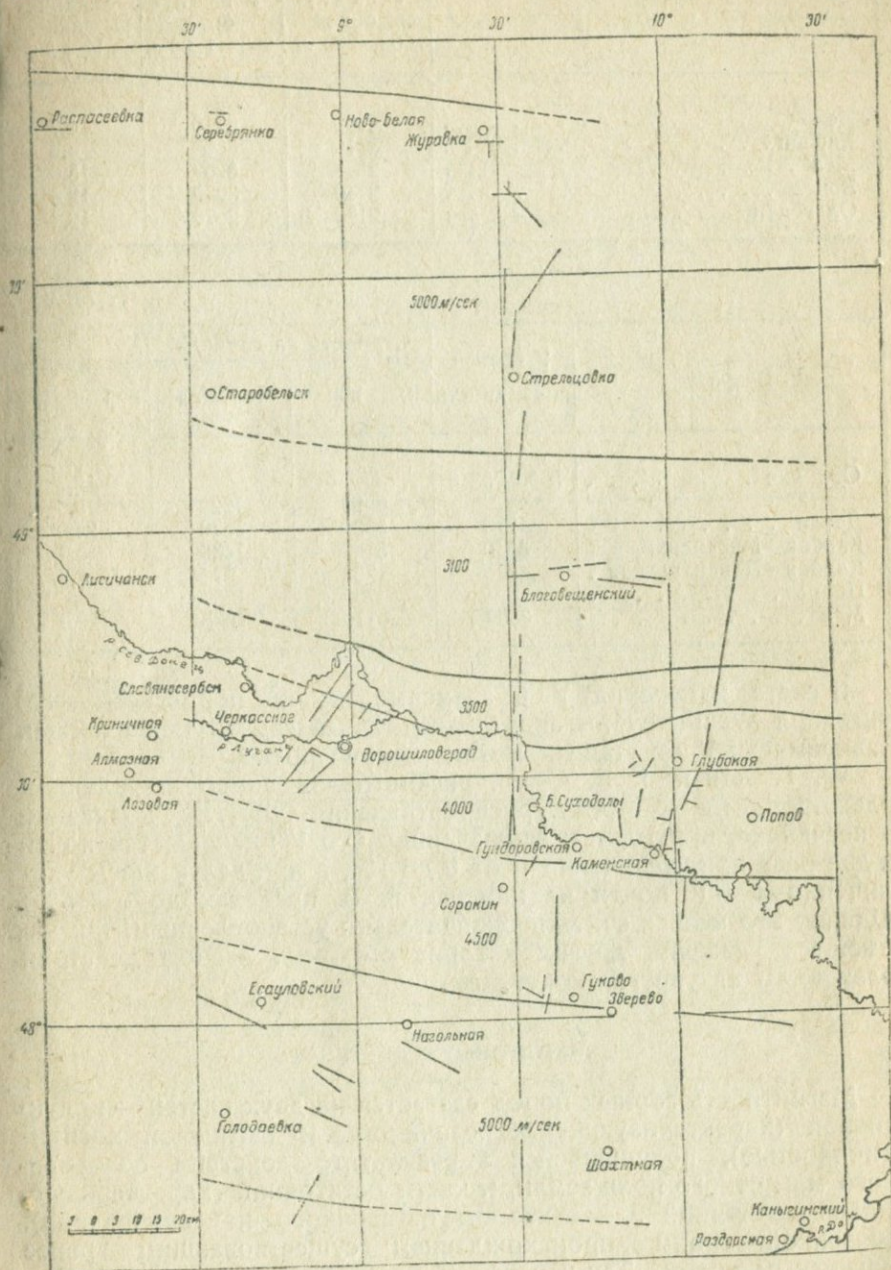


Рис. 15. Схематическая карта средних скоростей распространения упругих волн в породах верхнего палеозоя Б. Донбасса (по А. Т. Донабедову).

Таблица 6

Возраст	V на глубине	V на глубине	Увеличение V в %
	600—900 м	900—1200 м	
Девон	4080	4110	0,7
Карбон	3410	3560	4,4
Мел	2840	3260	15,0
Эоцен	2740	3080	12,6
Олигоцен	2190	2470	12,8

Таблица 7

Возраст	V вблизи поверхности	Скорость на глубине		Увеличение V в %
		V	глубина	
Ордович	5090—5300			19,7
Девон	4270	6090	1220	15,0
Карбон—Миссисипи . .	3810	5380	1370	24,8
Карбон—Пенсильвания .	4570	5180	1430	36,0
Пермь	—	4720	914	3,3
Мел	3350	4750	1190	—
		4110	1005	22,6

В свете изменения V в зависимости от пористости, эти указания Weatherby выглядят как частный случай более общей зависимости V от степени метаморфизма пород.

W. T. Borg и J. E. Owen, рассматривая вопрос о влиянии влажности на быстроту распространения упругих колебаний в песчанике, приходят к заключению, что V уменьшается почти в два раза при увеличении ω от 0 до 1%, а при дальнейшем увеличении ω — V почти не изменяется (в пределах до $\omega = 5\%$). Однако это нельзя считать окончательно установленным, так как имеются указания других авторов об очень слабом действии влажности на упругие константы.

Магнитные свойства

Магнитность горных пород складывается из двух частей — индуктивной (характеризующейся величиной χ — магнитной восприимчивостью), получившейся в результате действия современного магнитного поля земли, и части остаточной (характеризующейся величиной J_r — вектором остаточного намагничивания), обязанной своим происхождением существовавшим ранее магнитным полям. Так как теперь известен ряд магнитных аномалий, вызванных намагничиванием пород, не совпадающим по направлению и величине с современным магнитным полем, и так

как результаты лабораторных испытаний образцов пород в лаборатории геофизического опробования ЦНИГРИ говорят о том, что до 30% изверженных пород обладают остаточным магнетизмом, то пренебрегать этим параметром, как это делали до последнего времени, очевидно нельзя. К сожалению, изучения направления остаточного магнетизма пород почти не велось (для этого надо иметь ориентированные образцы), хотя его величина в ряде случаев измерялась, и эти данные, наравне с данными для χ , приведены ниже в таблице физических констант пород (табл. 11).

Большинство минералов, слагающих горные породы, имеют очень маленькую магнитную восприимчивость, а некоторые даже диамагнитны (соль, кварц и др.). Магнитными минералами являются: магнетит, пирротин, франклинит, ильменит, халькопирит, гематит.

Важнейшим является магнетит, имеющий довольно разнообразную магнитную восприимчивость (см. табл. 8); все остальные минералы гораздо менее магнитны.

Таблица 8

Минерал	χ в слабых полях	Автор
Магнетит	0,1—29,2	Вейсс, Вильсон и Хероун
Пирротин	0,007—0,43	Вейсс
Фраклинит	0,036	Штугер
Ильменит	0,031	"
Халькопирит	0,006	Бахурин
Гематит	0,0032	Кенигсбергер

Очень большие колебания величины магнитной восприимчивости магнетита и пирротина (иногда он может быть практически не магнитен) еще не получили достаточно удовлетворительного объяснения, а поэтому, естественно, не устанавливается прямой связи между магнитностью породы и процентом содержания в ней железа.

Осадочные породы очень слабо магнитны, а иногда диамагнитны. Так, χ песчаников, в среднем, $32 \cdot 10^{-6}$, остаточный магнетизм равен нулю. Для известняков $\chi = 5 \cdot 10^{-6}$ и $J_r = 0$, для сланцев песчано-глинистых, глинистых и песчаных $\chi = 17 \cdot 10^{-6}$ и $J_r = 0$, и т. д.

Большой магнитной восприимчивостью обладают изверженные породы. По данным лаборатории геофизического опробования ЦНИГРИ χ и J_r для пород, разделенных на 4 группы (см. выше), собраны в табл. 9.

Из табл. 9 видно, что, в среднем, χ и J_r и по Карелии и по Приазовью возрастают при переходе от щелочных к основным породам, причем для I и II групп особой разницы в значениях χ пород Приазовья и Карелии не наблюдается, тогда как для

Группа и район	Колич. образцов	$\times \cdot 10^{-6} \text{CGSM}$			Колич. образцов	$\times \cdot 10^{-6} \text{CGSM}$		
		от	до	средн.		от	до	средн.
I. Приазовье	34	0	5000	430	4	30	1700	1030
I. Карелия	28	5	2000	400	2	1440	2130	1785
II. Приазовье	31	0	5300	210	13	0	2100	450
II. Карелия	3	0	265	88	—	—	—	—
III. Приазовье	15	0	5800	900	7	165	1700	570
III. Карелия	23	30	13800	2060	14	78	9370	2060
IV. Приазовье	4	0	3800	1190	—	—	—	—
IV. Карелия	17	25	72800	8820	7	500	43700	10300

пород III и IV групп для Карелии мы имеем значительно более высокие значения \times , чем для Приазовья. Что касается J_r , то и здесь, как будто бы, J_r образцов Карелии выше J_r подобных же образцов Приазовья. Однако никаких конкретных зависимостей \times и J_r от содержания Fe_2O_3 , FeO и TiO_2 или SiO_2 не устанавливается.

Радиоактивность (R)

Радиоактивных минералов существует очень много. Мы дадим лишь краткий перечень главнейших из них: а) первичные минералы пегматитов — уранинит, бреггерит, клеветит, бетафит, самарскит, эвксенит, торанит, торит, оранжит, монацит, ортит (алланит), ловчоррит; б) первичные гидротермальные минералы — настуран, урановая чернь; в) вторичные минералы — кюрит, шепит, отенит, торбернит, ураноцируит, фосфоруранилит, ураноспинит, цейнерит, трегерит, ураконит, циппеит, ураноталлит, фоглит, гуммит, питтинит, соддит, казолит, складовскит, карнотит, тьямунит, радиобарит, радиофлюорит.

Повышенная радиоактивность наблюдается или тогда, когда имеется повышенное содержание в породах под наносами радиоактивных элементов, или же тогда, когда в породах скапливаются эманации радия и тория (газ), поднявшиеся с некоторой глубины. На основании большого количества наблюдений радиоактивности пород можно сделать вывод, что она зависит от условий образования породы и лишь только в некоторой степени — от химико-петрографического состава пород. В самом деле, табл. 10 позволяет сделать некоторые общие заключения, а именно: а) изверженные породы обладают большей радиоактивностью, чем осадочные, однако глубоководные отложения могут иметь весьма повышенную активность; б) кислые породы более активны, чем основные, причем кислые молодые образования активнее более древних.

Порода	Содержание		
	Ra в г · 10 ⁻¹² на 1 г породы	Th в г · 10 ⁻⁶ на 1 г породы	
Изверженные:			
кислые	3,01	20,5	
промежуточные	2,57	16,4	
основные	1,28	5,6	
Граниты Финляндии:			
более древние	2,36	8,7	
средние	4,60	26,7	
молодые	6,21	58,5	
Осадочные (среднее)			
глины	1,4	1,2	
песчаники	1,5	0,6	
известняки	1,3	1,3	
Глубоководные отложения	{ глобигериновый ил красная глина . . . радиоляриевый ил .	0,5	< 0,05
		7,2	—
		27,0	—
		36,7	—

Месторождения радиоактивных руд промышленного характера характеризуются значительными концентрациями радия. Так, например, урановая смолка из Иохимсталля содержит около $1,8 \cdot 10^{-7}$ г Ra/г, карнотит из Колорадо $0,38 \cdot 10^{-7}$ г Ra/г и т. д. Отсюда следует, что такие месторождения отличаются по активности от вмещающих пород в 10^4 — 10^5 раз, а поэтому могут быть достаточно легко обнаружены радиоразведкой. С другой стороны, в ряде случаев, благодаря выносу по сбросам, трещинами и т. д. эманаций, по наблюдениям этих последних могут быть прослежены линии тектонических нарушений под небольшими наносами.

Термические свойства

Использование данных о термических свойствах пород в геотермии находится в самом зачаточном состоянии; однако мы считаем нужным привести некоторый цифровой материал по этому вопросу (см. общую таблицу 11). Мы приводим также некоторые общие закономерности.

1. Более плотные породы имеют более высокие коэффициенты теплопроводности (λ) и температуропроводности (a), чем породы пористые.

2. Теплопроводность увеличивается с увеличением влажности.

3. Горные породы обладают анизотропией термических свойств: по напластованию теплопроводность выше, чем вкрест напластованию.

Вполне вероятно возможность регионального изменения термических свойств в связи с изменением пористости и влажности.

Средние значения физических
(по данным Лаборатории геофизики)констант горных пород
химического опробования ЦНИГРИ)

Порода	δ гp/cm ³	K %	ω %	ρ Ω см (влажн.)	E 10 ¹¹ дн/cm ²	σ	V км/сек	α 10 ⁻⁶ CGSM	J _r 10 ⁻⁶ CGSM	R % U ₃ O ₈	λ кг. кал/ м · град · час	a 10 ⁻⁴ м ² /час	Теплоем-
													кость С
Амфиболит	3,05	1,1	0,37	2,4 · 10 ⁶	9,64	—	5,9	90	110	0,0026	—	—	—
Ангидрит	2,60	1,0	0,46	1,8 · 10 ⁶	6,91	0,28	6,1	7	0	0	—	—	—
Андезит	2,54	6,0	1,87	4,1 · 10 ⁵	7,69	0,24	5,8	240	815	—	1,88	27,6	0,283
Базальт	2,40	—	—	5,7 · 10 ⁴	—	—	—	2900	—	—	—	—	—
Габбронорит	3,11	1,1	0,22	7,0 · 10 ⁵	15,8	—	7,8	60	0	0	—	—	—
Гипс	2,21	6,1	0,96	3 · 10 ⁵	5,65	0,26	5,7	-0,5	0	—	—	—	—
Гнейс	2,65	2,4	0,60	2 · 10 ⁶	9,23	0,26	6,7	30	0	0,019	—	—	—
Гранит	2,60	1,9	0,76	8 · 10 ⁵	6,7	0,25	5,7	590	600	0,032	3,50	58,7	0,229
Глина	1,91	27,0	12,0	5 · 10 ³	—	—	1,8—2,8 ¹	0	0	0	—	—	—
Диабаз	3,00	1,7	0,45	2 · 10 ⁶	11,2	0,27	7,0	4140	2330	0,001	2,98	47,4	0,208
Диорит	2,63	2,2	0,58	4 · 10 ⁵	3,39	—	5,8	60	140	—	1,32	30,7	0,165
Доломит	2,69	4,9	1,51	3 · 10 ⁵	11,6	0,24	7,4	0	0	—	0,93	18,0	0,229
Известняк	2,59	5,8	1,78	3,0 · 10 ⁵	7,0	0,24	6,0	5	0	0,0015	1,89	42,2	0,162
Кварцит	2,66	3,4	1,16	7,0 · 10 ⁵	5,3	0,23	4,8	3	0	0	2,73	62,0	0,187
Микропесчаник	2,59	5,8	0,46	3 · 10 ⁴	6,4	0,26	5,6	15	0	—	2,32	47,2	0,120
Мрамор	2,78	6,0	1,43	5 · 10 ⁵	5,9	—	4,9	7	0	0	—	—	—
Норит	3,14	1,1	0,22	2 · 10 ⁷	27,3	—	10,1	290	320	0	—	—	—
Перидотит	3,04	1,15	0,17	4 · 10 ⁶	11,0	—	5,9	3360	3360	0,003	—	—	—
Песок, делювий	2,0	40,0	25,0	1 · 10 ⁶	—	—	0,5—1,0 ¹	—	—	—	—	—	—
Песчаник	2,51	7,0	1,63	3,9 · 10 ⁴	5,0	0,24	4,5	35	0	0,0037	2,6	58,1	0,183
Пироксенит	3,29	4,0	0,55	10 ⁶	15,3	0,21	7,0	150	—	0,011	3,0	53,4	0,174
Пегматит	2,62	—	0,32	—	—	—	—	2	0	—	—	—	—
Порфирит	2,61	5,4	1,02	4 · 10 ⁵	7,5	0,23	5,7	1520	—	—	1,4	20,8	0,222
Сиенит	2,62	2,8	0,70	2 · 10 ⁵	6,4	0,24	5,1	200	450	0,001	2,2	45,6	0,120
Серпентинит	2,50	—	—	3 · 10 ⁵	—	—	—	1500	—	—	—	—	—
Сланец песчанистый	2,20	18,8	—	7 · 10 ³	3,3	—	4,3	0	0	0,003	0,92	21,9	0,175
" глинистый	2,31	8,8	—	4,5 · 10 ³	3,11	—	4,1	20	0	0,006	—	—	—
Соль каменная	2,12	—	—	8 · 10 ⁶	8,6	0,23	5,9	-2	0	0	1,11	27,2	0,191
Уголь антрацит	1,53	4,46	2,60	1,0 · 10 ³	2,5	0,27	4,2	0	0	—	—	—	—
" курной	1,25	4,03	3,55	1,0 · 10 ⁶	2,54	0,27	4,1	0	0	—	—	—	—
" бурый	1,1—1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Вода речная	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
" грунтовая	—	—	—	1,1 · 10 ⁴	—	—	1,4 ¹	—	—	—	—	—	—
" глубинная	—	—	—	3,1 · 10 ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Нефть чистая	0,6—0,9 ¹	—	—	1,0 · 10 ¹	—	—	1,5 ¹	—	—	—	—	—	—
Хромит	3,7	—	—	10 ¹²	—	—	1,35 ¹	—	—	—	—	—	—
				10 ⁵ —10 ⁶	—	—	—	600	—	—	—	—	—

¹ По данным других авторов.

ОСНОВЫ МЕТОДОВ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

ВВЕДЕНИЕ

Методы разведочной геофизики по характеру изучаемых с их помощью физических полей можно разделить на две категории.

К первой категории относятся методы, которые используют поля, существующие независимо от воздействия человека, — естественные или природные поля. Это методы: гравиразведка, изучающая поле силы тяжести; магниторазведка, использующая магнитное поле земли; электроразведка природных электрических полей, существующих над некоторыми рудными объектами; радиоразведка, позволяющая изучать явления радиоактивного распада ряда элементов в самых верхних слоях земной коры; методы физико-химического анализа, применяемые для изучения содержания интересующих элементов в элювие-делювие и иногда аллювие; геотермия, занимающаяся исследованием поля температуры в глубоких скважинах, шахтах и т. д.

Ко второй категории методов относятся электроразведка и сейсморазведка, имеющие дело с искусственно возбуждаемыми полями. Электроразведка использует различные свойства электромагнитных полей, создаваемых искусственно, главным образом, на поверхности земли; сейсморазведка утилизирует упругие колебания, возбуждаемые в земле с помощью взрывов или других сотрясений.

Излагая далее все перечисленные методы разведочной геофизики, мы будем придерживаться следующих общих положений. Раскрывая сущность метода, мы будем избегать математических выкладок и обоснований, концентрируя внимание на принципиальной, физической стороне метода. Описание аппаратуры мы сводим до минимума, давая, в большинстве случаев, лишь общую, принципиальную схему приборов и их общие фотографии, но не входя в детали конструкций и в описание различных существующих достаточно сложных и точных геофизических приборов. Полагая, что полевые процессы являются в значительной мере таким этапом работ, на котором часто и непосредственно переплетаются интересы геолога и разведчика-геофизика, мы стараемся изложить их достаточно подробно, не впадая, однако, в описание технических деталей и приемов.

Излагая обработку материалов полевых наблюдений, мы довольно подробно останавливаемся на вопросах о том, в каком

графическом виде следует представлять материал и как эти графики и карты читать.

Вопросы расшифровки геофизических наблюдений и планирования геолого-разведочных работ являются несомненно такими вопросами, где больше всего необходим контакт геологов и разведчиков-геофизиков. Этим вопросам посвящена вся вторая часть данной книги; однако и в пределах части первой мы также приводим некоторые, более общие, методы интерпретации, порою базирующиеся не только на теоретических соображениях, но и на примерах из практики применения разведочной геофизики.

Чтобы не повторять при обсуждении отдельных методов общих для всех них вопросов организации и ведения полевых работ и обработки материалов, мы приводим их конспективно сейчас.

Деятельность полевой геофизической партии может быть разделена на три периода: подготовительный, непосредственно полевой и период окончательной обработки материалов.

Подготовительный период включает: 1) составление детального проекта работ, обосновывающего выбор методов решения конкретно сформулированных геолого-разведочных задач и устанавливающего методику и технику работ (густота сети, размер планшетов и т. д.); 2) составление сметы, финансового плана, календарно-производственной программы и списка оборудования; 3) комплектование партии кадрами и оборудованием и снаряжением; 4) отправка груза и переезд штата партии к месту полевых работ. Подготовительный период играет весьма большую, а зачастую и решающую роль в успешности всей работы в целом.

Непосредственно полевой период можно разделить на следующие пять этапов, во времени частично идущих параллельно.

1. Организационный этап на месте работ, включающий организацию жилья и питания для работников и помещений для складов оборудования и материалов, наем рабочих и транспорта, оборудование машинных и зарядных станций и полевых лабораторий партии, организацию связи с местными органами и ознакомление всего технического состава партии с геологией, географией и т. д. района работ путем личного обхода или объезда, ознакомление рабочих с задачами, основами техники работ и техники безопасности, и т. д.

2. Топографическая подготовка участков и профилей, включающая разбивку точек, привязку их к триангуляционной сети, составление планов, схем и т. д.

3. Непосредственные полевые промеры физических полей, включающие на первых порах в большом количестве, а затем по мере надобности параметрические замеры физических свойств пород на обнажениях, в шурфах, скважинах, шахтах и т. д.

4. Полевая обработка материалов до такой степени, чтобы могло быть обеспечено конкретное техническое руководство работами, необходимая перестройка работ на ходу и возможность

использования материалов работающими смежными партиями и организациями.

5. Ликвидационный этап, включающий составление и сдачу предварительного отчета о работе, проверку материальной части партии с составлением дефектных ведомостей, упаковку и отправку имущества и сотрудников к месту окончательной обработки материалов.

Окончательная обработка материалов, производимая чаще всего вне полевых условий, включает в себя: проверку всех вычислений (если это нужно), окончательное построение карт, разрезов, схем и т. д., производство различных анализов и определений, осуществление сложных обоснований интерпретации, расшифровку материалов, составление, оформление и защиту окончательного отчета, и т. д.

Глава I

ГРАВИРАЗВЕДКА

В гравirazведке существуют два метода — маятниковые наблюдения и вариометрические наблюдения. Маятниковые наблюдения дают, в конечном счете, величины ускорения силы тяжести; чувствительность метода порядка 10^{-3} CGS. Вариометрические наблюдения дают изменения (градиенты) ускорения силы тяжести; чувствительность метода до 10^{-9} CGS.

Маятниковые наблюдения употребляются для выявления структур больших регионов, вариометрические — для решения геологических и разведочных задач в более локализованных участках. Принято считать, что маятниковые наблюдения отражают влияние более глубоко залегающих объектов, чем вариометрические.

§ 3. ЗЕМНОЕ ГРАВИТАЦИОННОЕ ПОЛЕ

На всякую массу m , расположенную в земном гравитационном поле (в поле силы тяжести), действуют две силы: сила притяжения к земле, выражающаяся по закону Ньютона

$$f = k \frac{mM}{r^2}, \quad (4)$$

где M — масса земли, r — расстояние от массы m до центра земли и k — постоянная тяготения, равная $6,67 \cdot 10^{-8}$ CGS), и центробежная сила, вызванная вращением земли вокруг своей оси. Центробежная сила f_1 равна:

$$f_1 = \frac{mv^2}{r}, \quad (5)$$

где v — линейная скорость вращения.

Тогда значение силы тяжести, как сумма этих двух сил (сумма геометрическая), может быть выражено как

$$F = k \frac{mM}{r^2} + \frac{mv^2}{r}. \quad (6)$$

Известно, что сила может быть выражена как произведение массы тела на ускорение, сообщаемое ей этой силой, т. е. в данном случае:

$$F = mg, \quad (7)$$

где g — ускорение силы тяжести.

Сравнивая формулы (6) и (7), получаем:

$$g = k \frac{M}{r^2} + \frac{v^2}{r}. \quad (8)$$

Так как земля представляет собой тело довольно сложной конфигурации, приближающейся к эллипсоиду вращения, то расстояние r будет для разных точек земной поверхности различным: на экваторе оно будет иметь максимальное значение, на полюсе минимальное, а во всех промежуточных широтах — также промежуточное значение между значениями на полюсе и на экваторе.

Отсюда совершенно ясно, что ускорение силы тяжести также будет меняться от точки к точке.

На полюсе, где r — минимально, а центробежная сила равна нулю, ускорение силы тяжести будет иметь максимальное значение:

$$g_{\max} = 983,215 \text{ см/сек}^2.$$

На экваторе, где r — максимально и центробежная сила также максимальна, ускорение силы тяжести будет иметь минимальное значение:

$$g_{\min} = 978,049 \text{ см/сек}^2.$$

Во всех других точках поверхности эллипсоида g будет иметь промежуточное значение. Для вычислений существуют формулы, позволяющие заранее предвидеть ускорение силы тяжести в любой точке поверхности эллипсоида — это будет нормальное значение ускорения силы тяжести, обозначаемое обычно γ_0 .

Если производить измерения g на земной поверхности фактически, то получаемые значения будут отклоняться от теоретически вычисленных по следующим возможным причинам:

- 1) превышение или понижение точки наблюдения над поверхностью эллипсоида (над уровнем моря);
- 2) влияние на величину g слоя, заключенного между поверхностью эллипсоида и горизонтом точки наблюдения;
- 3) действие рельефа земной поверхности и
- 4) влияние неравномерного распределения плотностей пород преимущественно в верхних слоях земной коры.

Очевидно, что наиболее интересным для геолого-разведочных целей является изучение действия четвертой причины. Однако, чтобы им заниматься, необходимо сначала в полевые измерения ускорения силы тяжести внести поправки или, как говорят, редукции, учитывающие действие первых трех причин расхождений.

Приведение к уровню моря или, иначе, внесение поправок Фая производится так: из наблюдаемого значения g вычитают $\Delta_1 g$ — поправку Фая, определяемую формулой

$$\Delta_1 g = \frac{2gh}{R}, \quad (9)$$

где h — высота в метрах над уровнем моря и R — средний радиус земли, равный 6371 228 м.

Если из приведенного к уровню моря значения $g_0 = g - \Delta_1 g$ вычесть теоретическое значение γ_0 , то мы получим так называемую аномалию Фая:

$$\Delta g = g_0 - \gamma_0. \quad (10)$$

Аномалия Фая есть разница между приведенным к уровню моря наблюдением ускорения силы тяжести и нормальным ускорением силы тяжести.

Поправка Фая положительна для точек наблюдений, расположенных выше уровня моря, и отрицательна для точек, находящихся ниже его.

Поправка за действие промежуточного слоя — поправка Буге — вычисляется по формуле:

$$\Delta_2 g = - \frac{3}{4} \frac{\delta}{\delta_0} \Delta_1 g, \quad (11)$$

где δ — средняя плотность пород, расположенных вблизи места наблюдения, а δ_0 — средняя плотность всей земли $\approx 5,52$.

Если из исправленного значения $g'_0 = g_0 - \Delta_2 g$ вычесть нормальное значение ускорения силы тяжести, мы получим так называемую аномалию Буге:

$$\Delta' g = g'_0 - \gamma_0. \quad (12)$$

Аномалия Буге есть разница между приведенным к уровню моря и исправленным на действие промежуточного слоя наблюдением ускорения силы тяжести и нормальным ее значением.

Редукции на рельеф позволяют привести наблюдаемое значение ускорения силы тяжести к горизонтальной поверхности, проходящей на высоте наблюдения над уровнем моря.

Если из исправленного за рельеф значения $g''_0 = g'_0 - \Delta_3 g$ ($\Delta_3 g$ — поправка за рельеф) вычесть нормальное значение ускорения силы тяжести, то мы получим аномалию:

$$\Delta'' g = g''_0 - \gamma_0. \quad (13)$$

вызываемую неоднородным распределением плотностей горных пород, слагающих земную кору.

Если рельеф в районе наблюдения спокоен, то на практике часто ограничиваются вычислением только аномалий Фая, если район горный — необходимо введение всех поправок.

Поправка за рельеф плюс поправка Буге часто называется поправкой за топографию, а конечное значение аномалии $\Delta'' g$ — аномалией Юнга-Буге.

Аномалии Юнга-Буге объясняются недостатком или избытком массы, по сравнению с теоретическим, в верхних частях земной

кору. Недостаток или избыток массы может вызываться двумя причинами: изменением подземного рельефа, когда более плотные или, наоборот, менее плотные породы приближаются к поверхности земли, и изменением плотностей пород в зависимости от их состава и степени метаморфизма (даже если породы залегают горизонтально). Естественно, что эти факторы могут действовать и порознь и совместно.

Определения ускорения силы тяжести чаще всего производятся с помощью маятников различных конструкций. В принципе дело сводится к установлению периода качания маятника вокруг точки опоры. Известно, что период качания приближенно выражается:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \quad (14)$$

где $\pi = 3,14$, l — длина маятника, g — ускорение силы тяжести. Отсюда легко найти g . Однако практически установление абсолютного значения g является сложной задачей, так как при этой операции необходимо принимать во внимание весьма большое количество различных факторов, влияющих на показания приборов (плотность воздуха, изменения l от температуры, поправки на ход хронометров, поправки на качание штатива, на котором укреплен маятник, и т. д.). Поэтому абсолютные определения g сделаны в очень небольшом количестве опорных пунктов (Пулково, Московская обсерватория, Париж, Вена и т. д.). Чаще же ограничиваются относительным определением g путем сравнения наблюдений данным маятниковым прибором в какой-либо точке с наблюдением, выполненным на этом же маятнике в опорном пункте (Пулково, Москва и др.). Если на опорном пункте

$$T_0 = \pi \sqrt{\frac{l}{g_0}}, \quad (15)$$

то на каком-либо i -ом пункте.

$$T_i = \pi \sqrt{\frac{l}{g_i}}. \quad (16)$$

Отсюда:

$$g_i = g_0 \frac{T_0^2}{T_i^2}. \quad (17)$$

Наблюдения T_i также не являются простым делом и здесь тоже вводятся поправки за качание штатива, ход хронометра, температуру, амплитуду колебаний маятника, плотность воздуха и др.

Маятниковое наблюдение на точке требует от 12 до 48 час., чаще 24 часа непрерывной работы, и стоит 400—800 руб., иногда выше. В месяц партия в составе 5—6 человек может снять от 8 до 15 точек.

Начиная с 1921 г., для целей геодезии и картографии осуществляется систематическая маятниковая съемка территории СССР. В Европейской части СССР заснята значительная часть площади с густотой 40×40 км (в среднем). В азиатской части СССР съемка проводилась пока, главным образом, вдоль железных дорог и рек с той же примерно густотой.

Естественно, что при такой густоте сети, точки наблюдений устанавливаются по карте и обычно приурочены к населенным пунктам, железно-дорожным станциям и т. д. Работа облегчается, если вблизи точки наблюдения имеется триангуляционный пункт, тогда, привязавшись к нему, можно получить широту, долготу и высоту над уровнем моря. За отсутствием триангуляции координаты точки наблюдения могут быть сняты с хорошей карты с надежными горизонталями. Если работа идет в районе, где нет карт, то параллельно с маятниковыми наблюдениями необходимо производить астрономические наблюдения для установления широты и долготы и барометрические для получения превышения над уровнем моря.

Наблюдения ведутся в помещениях с равной температурой, лишенных сотрясений, — подвалах, землянках и реже — палатках.

Сравнительно редко маятниковые наблюдения ведутся разведочными организациями с целью выяснения поведения более локализованных структур, в этом случае густота точек может быть и гораздо больше, известны случаи, когда точки задавались даже через 1,5—2 км.

Предварительная обработка наблюдений, заключающаяся во введении указанных выше инструментальных поправок и редуциций, происходит параллельно наблюдениям, окончательная — после полевого периода и возвращения партии на основную базу. Тогда же происходит еще раз проверка констант маятника и заключительное наблюдение на том же опорном пункте, с которого начиналась работа полевой партии.

Материал представляется в виде графиков аномалий ускорения силы тяжести по некоторым профилям и карт равных значений аномалий — *изоаномал*. Графики Δg строятся так: по оси абсцисс откладываются расстояния по профилю в масштабе имеющихся карт района, а по оси ординат — соответствующие значения аномалии ускорения силы тяжести (аномалия Фая, или Буге, или полные аномалии). Удобный масштаб для оси ординат в сантиметре 10, 20 или 50 миллигал,¹ но может быть и другим. Карты аномалий ускорения силы тяжести или, как их называют, гравитационные карты строятся путем соединения плавными линиями точек с одинаковыми значениями аномалий — эти линии называются *изогаммами*. Изогаммы чаще проводятся через 10, 20 и т. д. миллигаль и бывают как положительные (характеризуют «избыток массы»), так и отрицательные («недостаток массы»).

Расшифровка профилей и карт должна производиться с учетом, как мы уже отмечали, двух факторов — подземного рельефа и изменения плотностей пород как подстилающих, так и покрывающих, особенно когда мощность последних достигает сотен и тысяч метров. Некоторое время тому назад недооценивали

¹ Миллигал равен $0,001 = 10^{-3}$ галля — единицы ускорения силы тяжести в системе CGS, названной так по имени Галилея.

возможного влияния состава пород и все аномалии связывали с подземным рельефом, мы хотим на двух примерах предостеречь против таких недостаточно обоснованных заключений.

На рис. 16 представлен профиль Δg , построенный Б. А. Андреевым с ЗЮЗ на ВСВ между 60 и 62 параллелями, начинающийся у Аландских островов и кончающийся на восточном берегу Онежского озера. На этом же рисунке нанесены соответствующие геологические данные, взятые с геологической карты, и кривая плотности пород, построенная по многочисленным определениям. Мы видим, что характер изменения Δg даже до деталей повторяет характер изменения плотностей пород, выходящих в соответствующих местах на поверхность или прикрытых маломощным покровом.

На рис. 17 приведен профиль по линии Ровеньки — Миллерово (Донбасс), включающий аномалии Фая и Буге и кривую плотностей пород карбона. Здесь же приве-

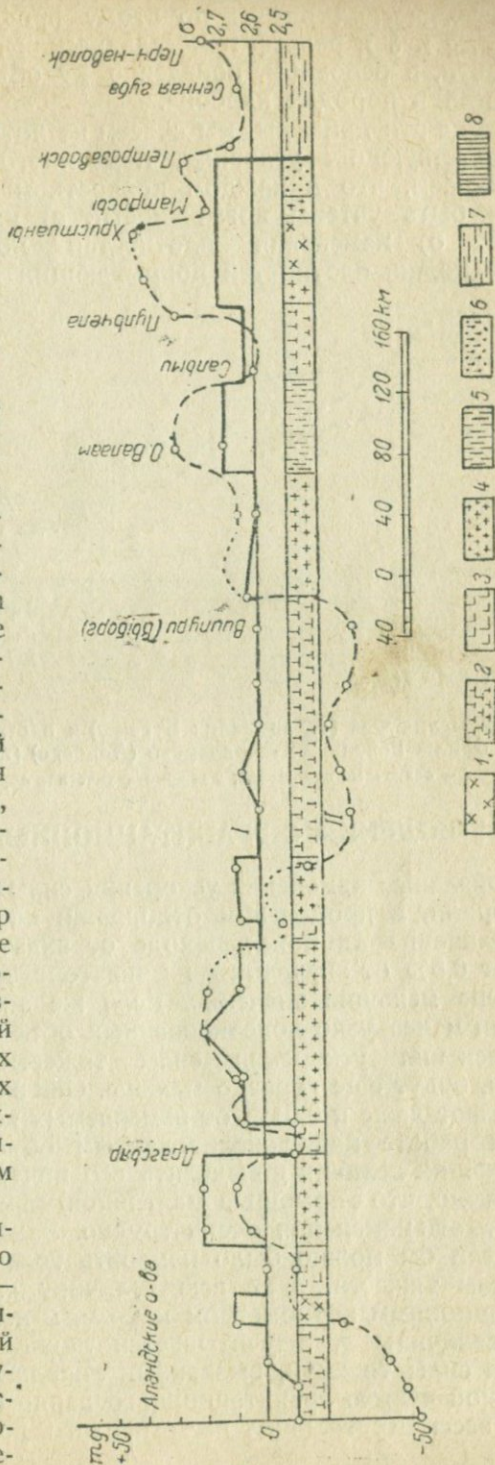


Рис. 16. Геологический разрез, кривая изменения плотностей пород (I) и кривая ускорения силы тяжести (II) по профилю Аландские острова — Петрозаводск (по Б. А. Андрееву).
1 — архейские гранито-гнейсы; 2 — граниты рапакиви; 3 — мигматиты; 4 — постоболонские граниты; 5 — диабазы; 6 — кварциты и песчаники; 7 — свита доломитов и кварцевых эффузивов; 8 — фyllиты.

ден геологический разрез по этому профилю. Сравнивая ход кривых Δg и δ и рельеф кристаллических пород докембрия, мы видим, что, в основном, поведение Δg объясняется изменением плотностей в породах карбона.

Приводя эти примеры, мы совсем не хотим отрицать влияния, в соответствующих условиях, подземного рельефа, мы лишь подчеркиваем, что в каждом конкретном случае расшифровки должны быть учтены возможности: а) изменения подземного рельефа, б) изменения плотностей подстилающих пород и в) изменения плотностей покрывающих пород.

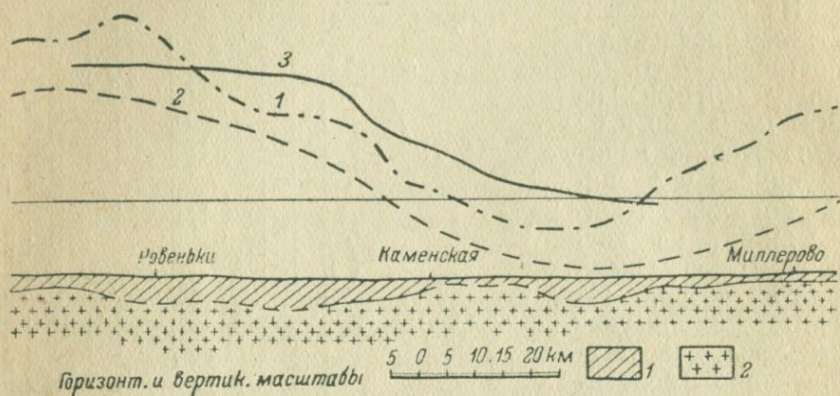


Рис. 17. Аномалия Фая (1), аномалия Буге (2) и плотности пород карбона (3) по профилю Ровеньки — Миллерово (Донбасс) (по А. Т. Донабедову).

1 — осадочные отложения; 2 — кристаллические породы докембрия.

§ 4. НАБЛЮДЕНИЯ С ГРАВИТАЦИОННЫМ ВАРИОМЕТРОМ

Региональные изменения ускорения силы тяжести, о которых мы говорили, в процентном отношении не велики, так, например, увеличение Δg при переходе от экватора к полюсу едва достигает 0,5% от значения g на экваторе, другие же изменения имеют еще меньшие значения. Если же заниматься изучением более или менее узко локализованных объектов, то естественно, что изменения ускорения силы тяжести, вызванные этим объектом, будут еще гораздо меньше. Они в большинстве случаев не достигают даже и 0,01% от измеряемых величин. Таким образом, при работе над локализованным объектом требуется на фоне больших величин g выделить его ничтожно малые изменения. Понятно, что с помощью маятников, измеряющих g целиком, установить эти изменения очень трудно. Задача была бы гораздо проще, если бы можно было измерять только изменения ускорения силы тяжести, а не всю величину g . При наблюдениях с гравитационным вариометром как-раз и исключается действие полной величины g , а учитывается лишь влияние изменений ускорения силы тяжести, вызванных локализованным объектом.

Основной частью гравитационного вариометра являются крутильные весы. Крутильные весы первого рода изображены на

рис. 18, а. На тонкой платино-иридиевой или вольфрамовой нити, закрепленной неподвижно в точке Π , подвешено горизонтальное коромысло, на концах которого укреплены грузики с массой m каждый. Поместим такую систему в нормальное поле силы тяжести. В нормальном поле силовые линии направлены к центру земли, и если взять небольшую площадь, то можно приближенно считать, что они идут параллельно. В этом случае поверхности одинакового влияния силы тяжести или, как их называют, изопотенциальные поверхности или уровенные поверхности, будут горизонтальными плоскостями. Таким образом крутильная система, расположенная горизонтально, будет находиться на уровенной поверхности и понятно, что действие поля будет на оба грузика одинаково, веса останутся уравновешенными, а поле вызывает лишь натяжение нити.

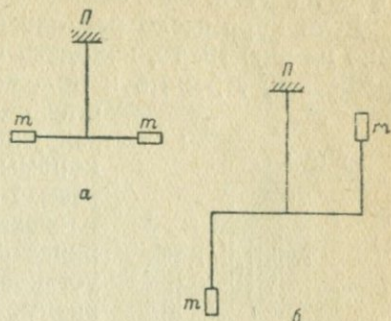


Рис. 18. Крутильная система 1-го рода (а) и 2-го рода (б).

Не трудно видеть, что такой же эффект получится, если рассматривать уровенные поверхности сферической формы, но крутильную систему располагать в горизонтальной плоскости, касательной к уровенной поверхности.

Таким образом, мы видим, что крутильные весы 1-го рода в нормальном поле силы тяжести не испытывают от сил этого поля никакого действия.

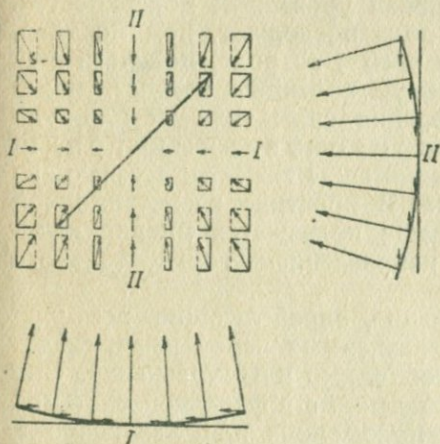


Рис. 19. К вопросу о величинах, измеряемых гравитационным вариометром.

Другое получится, если вблизи крутильной системы находится какой либо объект, имеющий отличную от окружающей среды плотность. Суммарное поле, происходящее от наложения поля, вызванного рассматриваемой неоднородностью на нормальное поле, будет обладать уровенными поверхностями, кривизна которых в различных направлениях различна, и силы поля будут иметь более сложный вид.

Проведем горизонтальную плоскость, в которой лежало бы коромысло. Так как теперь силовые линии не перпендикулярны к этой плоскости, то появятся горизонтальные составляющие сил, расположенные, например, так, как это показано на рис. 19 —

для одного из простых случаев. Два направления, обозначенные на рисунке цифрами I и II, будут характеризовать минимальное (I) и максимальное (II) значения кривизн урвенной поверхности; эти направления называют главными нормальными сечениями.

Если коромысло расположено, например, так, как это показано на рис. 19, то, находясь под действием пары сил, оно будет вращаться, стремясь к положению I—I, до тех пор, пока действующая пара сил не уравновесится силой закручивания нити, на которой подвешено коромысло. Таким образом крутильные весы 1-го рода будут реагировать на отклонение урвенной поверхности от сферической формы и дадут возможность установить направление наименьшей кривизны.

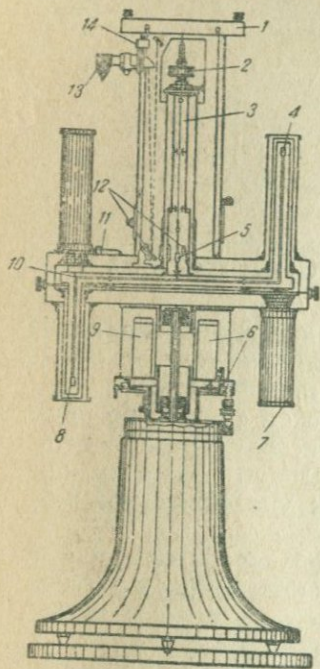


Рис. 20. Продольный разрез вариометра Z-40.

Возьмем теперь Z-образные весы 2-го рода (рис. 18,б), характеризующиеся тем, что грузики находятся на разных уровнях, а следовательно, и на разных урвенных поверхностях, имеющих различную кривизну. Тогда появятся еще новые действующие горизонтальные составляющие силы поля, обусловленные именно разностью кривизн урвенных поверхностей. Весы 2-го рода позволяют, помимо того, что давали весы 1-го рода, получать еще горизонтальную проекцию скорости изменения ускорения силы тяжести или, как говорят, горизонтальный градиент ускорения силы тяжести, а также его направление. В практике гравитационной разведки чаще пользуются именно величиной и направлением горизонтального градиента.

В уравнения, определяющие все указанные величины, входит пять независимых переменных, следовательно, для решения задачи необходимо пять уравнений. Они могут быть составлены, если наблюдения с крутильной системой произвести в пяти различных ее положениях или, как говорят, в пяти азимутах, например — через 72° , т. е. при положении коромысла под углами 0° , 72° , 144° , 216° , 288° к какому-либо направлению. Можно, однако, уменьшить число наблюдений, если ввести в прибор второе коромысло. С введением его вводится еще одно неизвестное — шестое, — и все эти неизвестные могут быть определены, если измерения произвести в трех азимутах. Практически вариометр с Z-образным коромыслом, в том виде, в каком его выпускает завод «Геологоразведка», устроен следующим образом (рис. 20) На подставке-колонке расположен сам прибор, могущий автоматически вращаться вокруг верти-

кальной оси с помощью часового механизма 6 и устанавливаться в некоторое число азимутов. К двум установочным головкам 2 подвешены на нитях 3 два коромысла 4, 10, 8, между собой не связанные, но расположенные под углом 180° друг к другу. Если после установки прибора в каком-либо азимуте освободить крутильную систему, то под действием горизонтальных составляющих ускорения силы тяжести и противодействующей им силы раскручивания нити система начинает колебаться вокруг состояния равновесия. Эти колебания продолжаются у различных конструкций приборов разное время, всегда довольно длительно — 20—40 мин., в частности тот прибор, который мы рассматриваем, рассчитан на время успокоения 40 мин. в азимуте (поэтому он и называется Z-40). Правда, благодаря некоторым простым мерам, время успокоения этого прибора можно снизить до 30 мин. в азимуте.

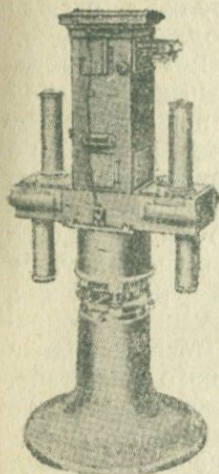


Рис. 21. Вариометр Z-40. Общий вид.

После успокоения прибора автоматически 9 включается свет, и с помощью особой осветительной системы 13, 12 пучок света попадает на зеркальце 5, связанное с крутильной системой, а затем, отражаясь, падает на фотографическую пластинку 1 и фиксируется на ней в виде

точки. По положению этой точки на пластинке можно судить о величине отклонения крутильной системы от нулевого положения. Фотография вариометра Z-40 приведена на рис. 21; прибор стоит около 40 000 руб. В последнее время завод «Геолого-разведка» начал выпускать вариометры S-20 — с наклонными коромыслами и с временем успокоения 20 мин. в азимуте; его общий вид приведен на рис. 22.



Рис. 22. Вариометр S-20. Общий вид.

точке. По положению этой точки на пластинке можно судить о величине отклонения крутильной системы от нулевого положения.

Фотография вариометра Z-40 приведена на рис. 21; прибор стоит около 40 000 руб. В последнее время завод «Геолого-разведка» начал выпускать вариометры S-20 — с наклонными коромыслами и с временем успокоения 20 мин. в азимуте; его общий вид приведен на рис. 22.

Крутильная система во всех вариометрах весьма тщательно изолируется от окружающей среды с помощью многослойной тепловой изоляции (см. рис. 20). Однако, так как тепловые влияния весьма существенно отражаются на работе прибора, изменения температуры внутри прибора измеряются и также фотографическим путем регистрируются на ту же фотопластинку, на которой записываются отклонения коромысла. Помимо этих данных на пластинку фотографически же наносится прямая линия, показывающая ход пластинки во все время стояния ва-

риометра на данном пункте (нулевая линия). Точки этой линии являются исходными точками при измерении расположения других точек (обоих коромысел и температуры).

На рис. 23 дано примерное расположение точек на фото-пластинке, причем O — нулевая линия, t — точки, отмечающие изменения температуры внутри прибора, I и II — точки, отмечающие положения обоих коромысел в трех азимутах через 120° и одном контрольном азимуте, соответствующем начальному положению коромысел прибора.

Можно различать три вида вариометрических съемок: рекогносцировочную или маршрутную, общую площадную или поисковую и детальную. Рекогносцировочная съемка применяется для установления общего характера гравитационного поля, а отсюда характера поведения подлежащих исследованию структур или месторождений полезных ископаемых. С этой целью съемка ведется по отдельному маршруту или по ряду приблизительно параллельных маршрутов, задаваемых, примерно, вкрест простиранию изучаемого объекта. Маршруты задаются обычно по дорогам, речкам и другим легко доступным путям передвижения,

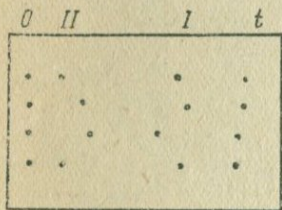


Рис. 23. Пример записи показаний вариометра Z-40.

причем наблюдения располагаются лишь с примерным сохранением одинаковых расстояний между точками. Места стоянки вариометра устанавливаются по картам крупного масштаба. Расстояния между точками при рекогносцировочной съемке зависят от размеров изучаемого объекта и глубины его залегания, причем они тем больше, чем больше размеры и глубина залегания объекта. Для предварительных суждений часто бывает достаточно, чтобы хотя бы пара точек попала в пределы интересующей аномалии, так, при рекогносцировке в Эмбенском солянокупольном районе расстояния между точками достигали до 3—5 км, такие же расстояния в ряде случаев выдерживались в восточном секторе Б. Донбасса. При рекогносцировках в Кривом Роге точки располагались на расстоянии порядка 100 м друг от друга при мощности наносов до 50 м и при средней мощности пластов железистых кварцитов около 100 м.

Общая вариометрическая площадная съемка употребляется для того, чтобы в общих чертах выявить строение района или поведение месторождения полезного ископаемого. Профили, по которым производится общая съемка, задаются обычно вкрест простирания пород, а в случае исследования изомерных геологических тел — по шахматной или квадратной сетке. В ряде случаев строгая геометричность сети не выдерживается, а точки располагаются вблизи дорог или других путей передвижения и отмечаются по глазомеру на карте достаточно крупного масштаба (иногда применяется инструментальная съемка). Таким образом, осуществляется, например, общая съемка

Урало-Эмбенского района (рис. 169). Густоту точек при общей съемке определяют, исходя из ожидаемой формы и размеров геологического тела, глубины его залегания и разности в плотностях тела и вмещающих его пород. При поисках соляных куполов, антиклинальных и синклинальных складок, месторождений пластового типа — расстояния между точками по профилю примерно равны средней глубине залегания искомого объекта. При поисках более локализованных и мелких объектов, например, хромитов, следует учитывать размер тел и их избыточную плотность (превышение плотности тела над плотностью вмещающих его пород). Так, например, задавая сетку 20×20 м, можно выявить хромитовые тела ($\delta = 3,5-4,2$) среди змеевиков ($\delta = 2,0-2,6$) объемом $1000-2000$ м³, расположенные на глубине менее 10 м от поверхности земли.

При общей съемке в Урало-Эмбенском районе (δ соли 2,15, δ вмещающих песчано-глинистых пород 2,3—2,6) расстояния между точками бывают порядка от 1,5 до 4 км. При съемках, вне пределов обнаженного Донбасса, с целью установления рельефа карбона под третичными и меловыми отложениями применяли сетку — по профилям через 100 м и выше, между профилями — до 5 км. При съемке в Кривом Роге — расстояния между точками около 50 м и между профилями порядка 500 м. В КМА, где глубина залегания коренных пород от 50 до 200 м и мощность пластов железистых кварцитов больше, чем в Кривом Роге, — расстояние между профилями доходит до 1000 м и между точками порядка 100 м (δ железистых кварцитов 3,2—3,8; δ вмещающих пород 2,7).

Детальная вариометрическая съемка ставится в местах, где общая съемка выделила аномалию, или в местах, которые выявлены другими геофизическими методами. Детальная съемка имеет целью установить более подробно очертания интересующего геологического тела и дать материал для расчетов размеров мощности и глубины залегания объекта. Наблюдения располагаются по профилям, причем используются профили общей съемки и задаются промежуточные, но обычно более короткие, дополнительные профили в интересных местах. Расстояния между точками в несколько раз меньше таковых при общей съемке. Так, при детальной съемке над соляными куполами Урало-Эмбы применялась сетка от 1000×1000 м до 250×500 м. При работах в КМА и Кривом Роге расстояния между точками доходили до 20 м и между профилями — до 100 м. При детализационных работах при поисках хромитов расстояние между пикетами было до 10 м, а иногда даже и до 5 м.

При общей детальной съемке пикеты, на которых происходят наблюдения, выставляются на местности заранее, причем, для возможности учета топографии, вокруг точек по радиусам до 50 м, а иногда и 100 м, осуществляется нивелировка. Так как при крутом рельефе учет его влияния на величины градиентов ускорения силы тяжести становится очень трудным, варио-

метрические наблюдения производят лишь там, где уклоны не превышают 0,1, выбрасывая из изучаемой площади участки с более крутым рельефом. В непосредственной близости от места стоянки вариометра поверхность должна быть горизонтальной.

Полевые работы с вариометром заключаются в следующем. На пикете устанавливается специальная будка (фанерная с прослоем ваты), закрытая со всех сторон, которая предохраняет прибор от ветра, дождя и резких колебаний температуры. Прибор устанавливается внутри будки на расчищенную площадку; его положение выверяется по уровням. Заводятся все ведущие механизмы, заряжается кассета, прибор проверяется и пускается. Будка закрывается, оператор, рабочие и т. д. удаляются от прибора на 25—30 м и выжидают там, пока прибор автоматически не произведет всех необходимых перестановок на азимутах (например, при трех азимутах с 30-минутной экспозицией в азимуте время ожидания равно 90 мин.). По истечении установленного заранее срока оператор входит в будку, вынимает кассету и проявляет фотопластинку. Убедившись, что пластинка не является браком, перевозят прибор (при длинных переездах — в разобранном виде) и будку на новый пикет и там вновь устанавливают их.

Работа ведется круглые сутки и обычно все 30 дней в месяц. Производительность зависит от густоты сети, возможности легкого проезда от точки к точке (особенно ночью) и количества азимутов, на которых работает прибор.

При трехазимутной съемке вариометром Z-40 с экспозицией в 30 м количество точек, при возможности проезда гужем по всему участку работ, колеблется от 14—15 при расстояниях между пикетами 25—50 м и до 6—8 — при расстояниях 2—3 км. Стоимость одной точки варьирует в пределах от 20 до 100 руб. в зависимости от объема работ, района, вида транспорта, густоты сети и т. д.

§ 5. ОБРАБОТКА И РАСШИФРОВКА ВАРИОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Первичным полевым документом является фотографическая пластинка. Обработка материалов начинается с измерения положения зайчиков (точек) на пластинке, что осуществляется с помощью особых палеток. Имея результаты измерения пластинки и зная постоянные, характеризующие данный вариометр, можно вычислить, с помощью специальных таблиц, горизонтальный градиент ускорения силы тяжести и кривизны уровенной поверхности. Вычисленные величины выражаются в этвешах (этвеш равен $1,0 \cdot 10^{-9}$ CGS), эти величины называются полными градиентами и полными кривизнами.

В полные значения вносятся поправки. Так как земля имеет эллипсоидальную форму и вращается вокруг оси, то ускорение силы тяжести меняется от точки к точке, если даже нет ника-

ких региональных или местных аномалий. Для облегчения учета этого, так называемого, нормального действия существуют специальные таблицы, пользуясь которыми вносят поправку в наблюденные величины.

Неровности рельефа вблизи места стоянки вариометра также вносят искажения в значения измеряемых величин. Чтобы избавиться от этих влияний, пользуясь специальными палетками, вводят поправки на топографические влияния и после этого получают аномальные значения горизонтальных градиентов, по которым можно вычислить разности кривизн, азимуты главных сечений и векторы-градиенты, — расшифровка которых и представляет наибольший интерес для геолога-разведчика.

Полученные величины векторов-градиентов и разности кривизн наносятся на план или карту в некотором масштабе.

Пример построения векторов горизонтальных градиентов ускорения силы тяжести приведен на рис. 24. Соляной купол Тюлюс характеризуется тем, что на вершине купола векторы малы по величине, к периферии они увеличиваются и приобретают направления от вершины купола в стороны. Вдали от вершины купола векторы вновь будут уменьшаться (это на рисунке не изображено), стремясь к нулю.

Разность кривизн наносится на план или карту в виде отрезка прямой, расположенной по направлению наибольшей кривизны и по величине равной этой разности, взятой в некотором масштабе.

Если наблюдения были площадные, как это, например, имеет место на рис. 24, можно построить изогаммы, еще более наглядно выявляющие аномалию. Изогаммы — это линии одинаковой аномалии ускорения силы тяжести. Если в какой-либо точке известна величина аномалии ускорения силы тяжести, например, из маятниковых наблюдений, то можно, пользуясь градиентами ускорения силы тяжести, для всех других точек наблюдений вычислить значения аномалии ускорения силы тяжести. Эта операция называется интегрированием градиента силы тяжести. Нанеся полученные значения аномалий ускорения силы тяжести для всех точек на карту и соединив одинаковые значения плавными линиями, мы получим карту изогамм. Пример карты изогамм соляного купола Тюлюс приведен на рис. 24. Легко видеть, что изогаммы должны быть перпендикулярны векторам градиента.

В тех случаях, когда на участке вариометрических работ нет маятниковых наблюдений, значение аномалии ускорения силы тяжести для какой-либо точки может быть выбрано условно и к этой условной величине приведены значения аномалий в других точках.

Помимо карт векторов-градиентов, изогамм и разностей кривизн можно строить профили градиентов, обычно используемые при всякого рода количественных расчетах, относящихся к установлению интересующего объекта. Графики градиентов строятся следующим образом. По оси абсцисс откла-

дываются расстояния по профилю, а по оси ординат — величины проекций векторов градиента на направление данного профиля. При этом устанавливается, что если проекция вектора направлена слева направо, — она считается положитель-

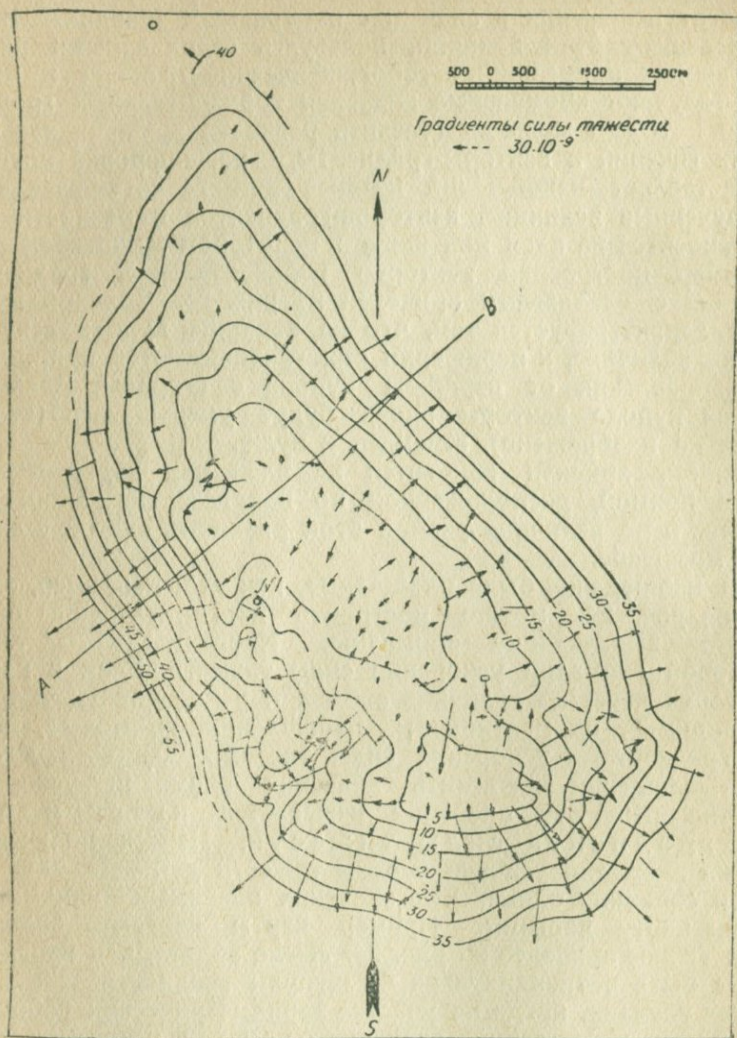


Рис. 24. Аномалии силы тяжести в районе Тюлюса.

ной и откладывается вверх, а если справа налево — отрицательной и откладывается вниз. Пример графика градиента над соляным куполом приводится в § 25 на рис. 168.

Расшифровка наблюдений с гравитационным вариометром осуществляется с привлечением геологических данных, данных о плотностях пород и результатов работ другими геофизиче-

скими методами. По карте изогамм или векторной диаграмме градиентов легко устанавливаются места недостатка масс (пример — соляной купол на рис. 24) или, наоборот, избытка масс (пример дан в § 28 при описании поисков и разведки хромитов — рис. 208). Зная геологию района и физические свойства пород, в большинстве случаев недостаток или избыток масс удастся связать с появлением на некоторой глубине того или иного геологического тела. Общая, приближенная конфигурация тела также легко устанавливается по карте изогамм; так, например, из рис. 24 видно, что соляной купол вытянут в ССЗ направлении. Его северное крыло падает более полого, чем восточное, западное и южное, — это видно потому, что на севере изогаммы более разрежены, чем в других местах.

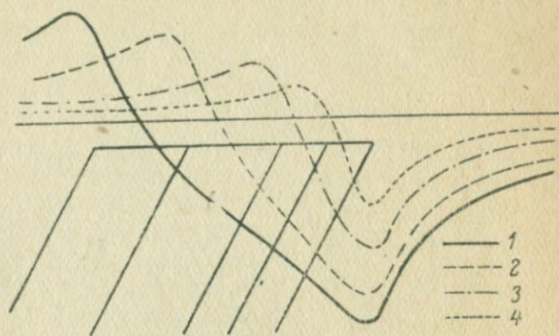


Рис. 25. Зависимость кривой горизонтального градиента от мощности слоя.

1 — $d = 300$ м, 2 — $d = 200$ м, 3 — $d = 100$ м, 4 — $d = 50$ м.

Много сложнее вопрос об определении глубины залегания искомого объекта, его мощности и других элементов залегания. Общий прием расшифровки такого рода заключается в том, что к практически полученному графику градиента подбирают наиболее близко подходящий теоретический график, относящийся к такому телу и к такой разнице плотностей, которые наиболее вероятны в данных геологических условиях. Если такой подбор удастся, тогда данные о размерах и элементах залегания тела, для которого рассчитан график, могут быть перенесены на исследуемое геологическое тело. Теоретически рассчитано довольно большое количество графиков градиентов, относящихся к случаям залегания сферы, горизонтального бесконечно длинного кругового цилиндра, параллелепипеда, бруса прямоугольного сечения, бесконечного горизонтального слоя, сброса, наклонного слоя и т. д. В качестве примера на рис. 25 и 26 приводим теоретические графики градиента для наклонных пластов различной мощности, расположенных на разной глубине. Как видим, с увеличением глубины залегания пласта кривые градиента становятся менее резкими, стремясь к прямой линии, наоборот, увеличение мощности пласта действует в сторону увеличения аномалии.

Ниже, в § 25 и 28, приводятся случаи, когда задача установления размеров и элементов залегания тела решена для достаточно сложных тел — например, даны разрезы соляного тела на месторождении Доссор-Таскудук и т. д. Если в одной или нескольких точках известны глубины до искомого тела или

горизонта (например, по данным бурения или сейсморазведки или электроразведки), то по результатам детальной вариометрической съемки может быть построена карта изогипс этого опорного горизонта. Пример такой карты изогипс кровли соляного купола Доссор мы встретим в § 25 (рис. 173). Если же опорных глубин нет, то по данным гравиразведки удастся указать лишь относительное поведение опорного горизонта без абсолютных значений глубин.

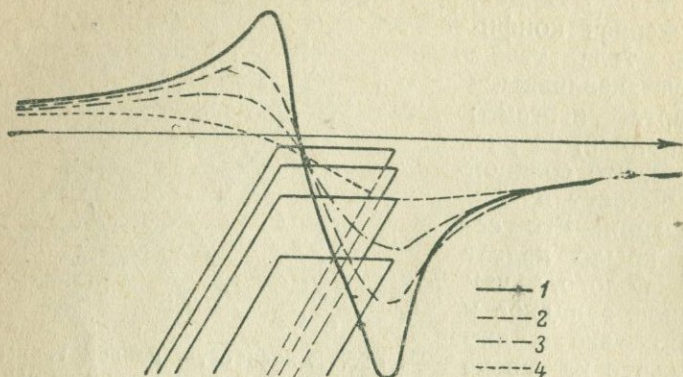


Рис. 26. Зависимость кривой горизонтального градиента от глубины залегания слоя.
 1 — $h = 10$ м, 2 — $h = 25$ м, 3 — $h = 50$ м, 4 — $h = 100$ м.

Наблюдения с гравитационным вариометром нашли применение, например, при решении следующих геолого-разведочных задач: поиски и детализационные работы на соляных куполах, поиски антиклинальных структур, благоприятствующих скоплению нефти и газа, изучение геологической структуры угленосных бассейнов и, в частности, — установление рельефа пород карбона (Донбасс), поиски и детальные работы на железу, особенно на железистые кварциты типа КМА и Кривого Рога, поиски и разведка хромитов (главным образом на Урале) и т. д. С примерами гравитационных работ на все эти объекты мы встретимся в главах VII и VIII.

Глава II

МАГНИТОРАЗВЕДКА¹

§ 6. ЗЕМНОЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Еще в древнем Китае было известно свойство свободно подвешенной магнитной стрелки устанавливаться всегда в строго определенном направлении: север — юг. В эпоху великих географических открытий, путешествий Колумба, Васко де-Гама,

¹ Составлена А. Г. Тарховым.

Магеллана и других появились первые указания на то, что это далеко не всегда справедливо, и весьма часто наблюдаются отклонения положения стрелки от астрономического меридиана. Возникновение и развитие учения о магнетизме в XVII и XVIII вв. позволили установить, что земля подобна гигантскому магниту, ось которого сравнительно немного сдвинута относительно оси вращения земли. Наконец, Гаусс, в первой половине XIX в., создав теорию земного магнитного поля, одновременно положил начало систематическому его изучению. В дальнейшем научными организациями многих стран, из которых особенно выделяются Английское адмиралтейство, Американский институт Карнеджи, а за последнее время — Главная геофизическая обсерватория СССР, проделана колоссальная работа по исследованию земного магнитного поля, которая тем не менее ни в коей мере не может еще считаться законченной. В частности, совершенно неясен вопрос о самих причинах этого поля; в этой области до сих пор приходится довольствоваться, в значительной мере, гипотезами.

Подобно тому, как намагниченный стальной стержень в различных своих частях обладает различными магнитными свойствами, земное магнитное поле в различных участках сильно меняется как по величине, так и по направлению. Магнитное поле в каждой точке характеризуется величиной и направлением вектора магнитной силы. В целях удобства измерения, графического представления и упрощения интерпретации магнитных полей пользуются не самим вектором, а его компонентами по различным осям прямоугольной системы координат.

Расположение этих осей показано на рис. 27. Вектор магнитной силы F может быть разложен на горизонтальную компоненту H и вертикальную Z . Горизонтальная компонента, в свою очередь, может быть разложена на составляющую X (проекцию H на направление астрономического меридиана) и составляющую Y (проекцию H на направление астрономической параллели). Угол D , показывающий отклонение горизонтальной компоненты вектора магнитной силы от направления астрономического меридиана, называется *склонением*, а угол J , определяющий наклон этого вектора по отношению к горизонтальной плоскости XY , — *наклоном*.

Очевидны равенства:

$$\begin{aligned} X &= H \cos D & D &= \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} \\ Y &= H \sin D & J &= \operatorname{arctg} \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \\ Z &= H \operatorname{tg} J & H &= \sqrt{X^2 + Y^2} \end{aligned} \quad (18)$$

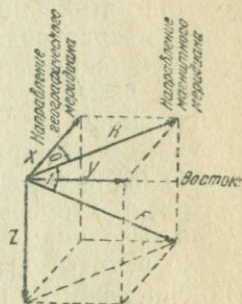


Рис. 27. Разложение вектора магнитной силы на составляющие.

пользуясь которыми можно совершить переход от одной системы обозначений к другой. На практике, при генеральной магнитной съемке (подробнее об этом далее) измеряются H , D и J .

Пункты наблюдения наносятся на карты, после чего плавными линиями, носящими название изолиний, соединяются точки, имеющие равные значения того или иного магнитного элемента, подобно тому как в топографии изображается рельеф местности. Так, существуют карты изогон (линий равных склонений), изоклин (линий равных наклонений), а также карты изодинам (линий равной магнитной силы). В качестве иллюстрации на рис. 28 приводится карта изодинам H .

Магнитное поле земли непостоянно и во времени. Под влиянием целого ряда причин, среди которых непостоянство солнечной радиации занимает одно из первых мест, магнитное поле все время изменяется; эти изменения называются обычно вариациями.

Различают три вида вариаций:

1) периодические вариации — суточные и годовые, обусловленные непрерывно меняющимся положением земли относительно солнца;

2) вековые вариации, хотя и не имеющие периода, но все же подчиняющиеся некоторым закономерностям;

3) магнитные возмущения или бури, характерные отсутствием каких-либо закономерностей как в частоте появления, так и в своей интенсивности; возникновение их обычно связывается с изменением режима на поверхности солнца (изменение числа солнечных пятен).

По абсолютной величине вариации достигают особенно большой величины в северных широтах (от 67°), тем самым значительно осложняя производство магнитных наблюдений. Именно вследствие влияния таких вариаций магнитные карты обычно составляются применительно к тому или иному моменту времени, называемому эпохой; так, существуют магнитные карты эпохи 1925 г., 1930 г. и т. д.

Все виды магнитных вариаций непрерывно регистрируются в магнитных обсерваториях, расположенных в ряде городов СССР (Ленинграде, Москве, Казани, Тбилиси и т. д.). При производстве магнитных съемок в средних и южных широтах можно пользоваться данными обсерваторий, удаленных от точки наблюдения на 500 и даже 1000 км, так как можно считать, что на всей этой площади вариации тождественны. Не то при работе в северных районах: там необходимо регистрировать вариации непосредственно на месте, для чего пользуются специальными вариационными станциями с автоматической записью хода магнитных элементов или же одновременно с площадной съемкой ведут наблюдения вариаций на одной точке с помощью дополнительного комплекта приборов. В том и другом случае введением соответствующих поправок можно добиться приведения всех данных к одному моменту времени.

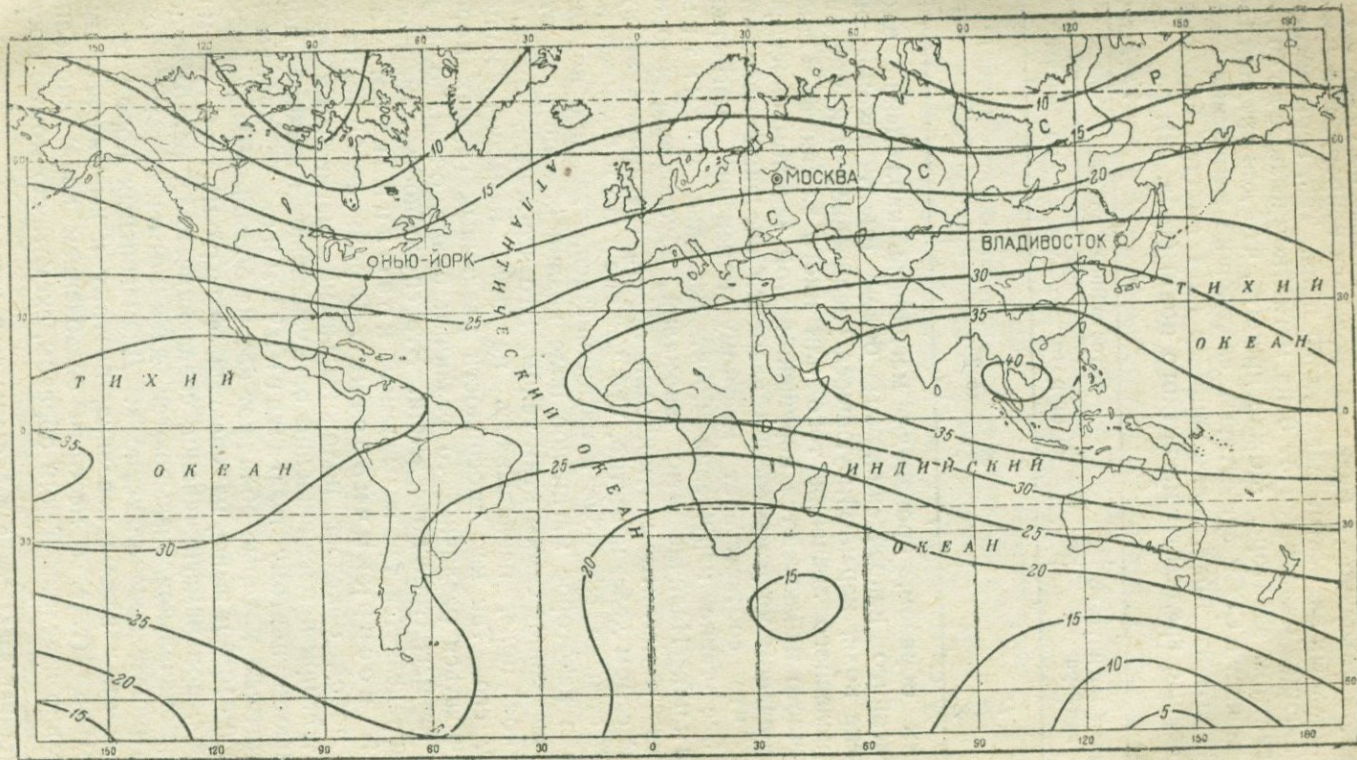


Рис. 28. Мировая карта изодинам H (в тысячах гамм). Эпоха 1922 г.

Из рис. 28 можно видеть, что при переходе из точки в точку на земной поверхности будет наблюдаться непрерывное изменение отдельных элементов магнитного поля. Так, горизонтальная составляющая изменяется от 0 на магнитном полюсе до $40\,000 \gamma^1$ на магнитном экваторе. Можно принять, что для средней Европейской части СССР существуют следующие изменения элементов магнитного поля, происходящиеся на 1 км (так называемые естественные градиенты магнитного поля) (табл. 12):

Таблица 12

Элементы магнитного вектора	Естественный градиент	
	по широте	по долготе
<i>D</i>	0^1	1^1
<i>H</i>	от 3 до 25γ	0γ
<i>Z</i>	5γ	5γ

Таким образом, производя магнитные наблюдения вдоль определенного направления, мы будем иметь закономерное изменение поля, характеризующееся увеличением или уменьшением численного значения того или иного элемента. Однако весьма часто наблюдаются нарушения этой закономерности; на общем плавном ходе изменения элемента внезапно появляется выскок, что соответствует местному изменению магнитного поля. Все такие нарушения носят название магнитных аномалий. Наличие этих аномалий обусловлено неоднородностью в магнитном отношении пород, слагающих земную кору. В самом деле, известно, что каждое тело в большей или меньшей степени способно намагничиваться, т. е. при помещении его в некоторое магнитное поле возникает еще поле вторичное, вызванное самим этим телом. Это вторичное, или индуцированное поле, накладываясь на поле намагничивающее, изменяет его. Так как способности различных горных пород намагничиваться различны, то различны будут, очевидно, и их влияния на магнитное поле земли. Эта способность намагничиваться определяется так называемым коэффициентом магнитной восприимчивости χ . Огромное большинство горных пород обладает положительными магнитными свойствами, т. е. при намагничивании они усиливают первичное поле и называются поэтому парамагнитными. Те породы из парамагнитных, которые обладают весьма большими значениями χ от $10\,000 \cdot 10^{-6}$ и выше, называются ферромагнитными.

Породы, при намагничивании создающие поле, ослабляющее поле первоначальное, называются диамагнитными; они имеют отрицательное значение χ . Диамагнитных пород очень немного и их χ весьма невелика, поэтому и вызываемые ими отрицательные (т. е. с местным ослаблением поля) аномалии относительно невелики. Таким образом, схематично можно пред-

¹ 1γ (гамма) равняется одной стотысячной части единицы магнитной силы в абсолютной системе единиц, называемой эрстедом.

ставить, что магнитное поле земли повсюду деформировано, причем масштаб и характер этих деформаций в разных местах различен, в той или иной степени следуя за изменениями магнитных свойств пород в данном месте. Кроме коэффициента магнитной восприимчивости горных пород, на магнитное поле оказывает большое влияние еще остаточное намагничивание их.

Оказывается, что горные породы в процессе своего формирования, благодаря воздействию высоких температур, обладают сильно повышенным коэффициентом магнитной восприимчивости. Будучи намагничены земным полем в этот момент, ферромагнитные породы сохраняют приобретенный ими магнетизм и вызывают магнитные аномалии, превышающие по интенсивности те, которые можно было предвидеть от данных пород, учитывая их современную способность намагничиваться.

Известные магнитные аномалии — Курская, Криворожская и другие — являются примерами таких аномалий, в которых остаточное намагничивание имеет преобладающее значение.

Некоторые авторы указывают на то, что причинами местных магнитных аномалий могут иногда быть породы, намагниченные другими способами, как, например, ударом молний, протекающими в земле (теллурическими), электрическими токами. Однако имеются основания считать, что таких аномалий немного.

§ 7. МАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Все приборы, применяемые для определения земного магнитного поля, делятся на две большие группы:

- 1) абсолютные, позволяющие установить полное значение того или иного магнитного элемента в данной точке, и
- 2) относительные, дающие возможность определить разницу в значении этих элементов на точке наблюдения некоторой другой, принимаемой за исходную.

В разведочной геофизике применяются только относительные приборы, как более простые в работе, дающие результаты со значительной экономией времени, хотя и с меньшей точностью.

Приборы для абсолютных измерений

Снижение D измеряется теодолитом Бруннера-Шасселона. Операция сводится к определению астрономического меридиана по солнцу или звездам и магнитного меридиана по положению весьма чувствительного магнита, подвешенного внутри футляра, называемого домиком. Помощью зеркала, укрепленных на концах магнита, и оптической трубы определение его положения может быть сделано с весьма большой точностью, достигающей до $1'$, однако измерение довольно длительно и занимает около 15 мин. (без астрономических наблюдений).

Горизонтальная составляющая H может быть определена тем же самым теодолитом Бруннера-Шасселона. Для этого измеряется сначала период колебаний свободно подвешенного магнита T , а затем угол отклонения этого магнита φ под влия-

янием некоторого добавочного магнита, подносимого сбоку прибора. Зная T и φ , вводя различные поправки на влияние на прибор побочных факторов (температура, ход хронометра и т. д.), можно вычислить H с точностью 10 γ . Измерения с вычислениями занимают около двух часов.

Наклонение чаще всего определяется стрелочным инclinатором. Последний в принципе представляет собою магнитную стрелку, которая может вращаться вокруг горизонтальной оси, проходящей через центр тяжести стрелки. Очевидно, что если прибор ориентировать так, чтобы ось вращения была перпендикулярна плоскости магнитного меридиана, то магнитная ось стрелки будет стремиться стать по направлению магнитного вектора, а угол, образованный ею с горизонтальной плоскостью, как раз и будет углом наклоения. В действительности прибор снабжен некоторыми дополнительными приспособлениями, с помощью которых точность отчета J доводится до 2'. Наблюдения на одной точке занимают несколько больше часа.

Кроме этих приборов, за последнее время для абсолютных измерений величины и направления вектора магнитной силы стали применять различного рода индукционные приборы, основанные на измерении тех электродвижущих сил, которые возникают в контуре, состоящем из нескольких витков проводника, при пересечении им линий магнитного поля земли. Индукционные приборы при несколько большей быстроте измерения могут дать и большую точность.

✓ Приборы для относительных измерений

Универсальный магнитометр Тибберг-Талена. Изобретенный в 70-х годах прошлого столетия универсальный магнитометр

Тибберг-Талена, в силу своей простоты, удобства и быстроты работы и до сих пор является незаменимым для локализации магнитных аномалий с интенсивностью, превышающей 3000 γ .

Устройство его весьма просто (рис. 29). На деревянной треноге укреплен металлическая го-
ловка с длинной ли-

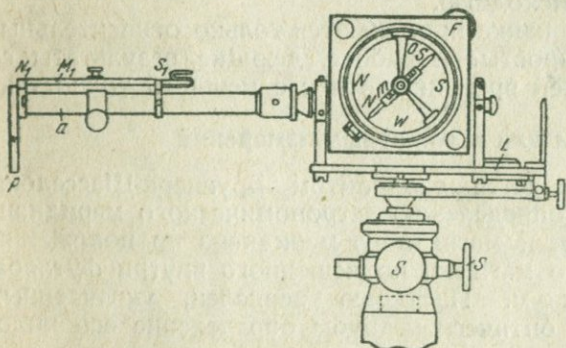


Рис. 29. Магнитометр Тибберг-Талена.

нейкой и цапфами для помещения в них выступающих концов оси коробки буссоли. Буссоль может поворачиваться в этих цапфах и занимать как горизонтальное, так и вертикальное положение. При измерении склонения буссоль стоит горизон-

тально, а линейка визируется по профилю или на некоторую заданную точку; тогда магнитная стрелка, остановившись, непосредственно укажет положение магнитного азимута данного направления. Зная астрономический азимут этого же направления, нетрудно получить и само склонение.

Горизонтальная компонента определяется по углу отклонения стрелки буссоли под влиянием дополнительного магнита, укрепленного на линейке. При этом полученный угол сравнивают с углом отклонения, полученным на исходной точке, горизонтальная составляющая в которой принимается за единицу и обозначается H_0 . Помощью несложных расчетов можно определить H в точке наблюдения в долях H_0 . Зная склонение и H в точке наблюдения, можно вычислить и аномальную часть H , обозначаемую H_a , которая целиком обусловлена влиянием местных геологических причин, а также азимут вектора H_a .

Третьим элементом, определяемым с помощью этого прибора, является аномальная часть вертикальной составляющей магнитной силы, — Z_a , которая также дается в долях H_0 . Для этого буссоль устанавливается отвесно в плоскости, перпендикулярной плоскости магнитного меридиана. Величина Z_a вычисляется по углу наклона стрелки, ось вращения которой смещена относительно центра тяжести.

Точность, достигаемая этим прибором, невелика и в среднем равна $0,5^\circ$ для D , 5% H_0 для H_a и Z_a .

Следовательно, таким прибором можно исследовать лишь сильные аномалии с интенсивностью, превышающей по крайней мере 3000γ .

С другой стороны, производительность при работе с магнитометром Тибберг-Талена весьма высока, и в зависимости от характера местности колеблется в пределах, указанных в табл. 13.

Таблица 13

Расстояния между точками наблюдений в м	10	20	40	60	100	200
Количество точек	150—100	140—80	130—70	110—60	100—50	70—25

Стоимость одной точки наблюдения, в зависимости от типа съемки и района, может меняться от 1 до 3 руб.

Вертикальные весы Шмидта. Весы предназначены для измерения вертикальной аномальной компоненты магнитной силы. Общий вид представлен на рис. 30. По идее это именно весы, но только магнитные. Горизонтально расположенная магнитная система имеет возможность свободно вращаться вокруг горизонтальной оси.

Установив систему в каком-либо определенном положении в точке, которую принимают за исходную (и которую обычно выбирают вне пределов возможных аномалий, в так называемом

нормальном поле), можно наблюдать, что при переходе на другую точку, с измененным значением вертикальной составляющей, — изменяется и само положение магнитной системы. Эти изменения, даже весьма малые, тем не менее легко отмечаются в трубе (микроскопе), благодаря использованию довольно сложной оптической системы.

Конструктивно прибор оформлен с принятием ряда предосторожностей, исключающих возможность появления грубых ошибок. Кроме того, в показания прибора вводятся различные поправки, аналогичные тем, которые вводятся при работе с абсолютными приборами.

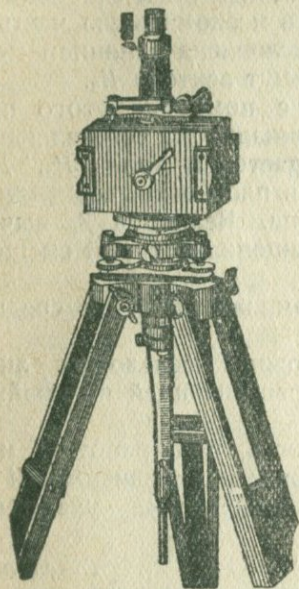


Рис. 30. Вертикальные
весы Шмидта.

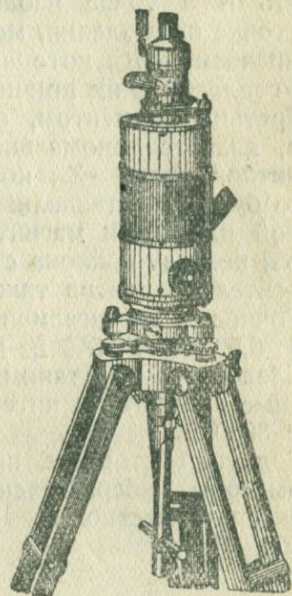


Рис. 31. Горизонтальные
весы Шмидта.

Горизонтальные весы Шмидта. Горизонтальные весы по идее не отличаются от вертикальных, только здесь магнитная система помещена вертикально, что соответственно меняет и внешний вид прибора (рис. 31).

Весы Шмидта позволяют измерить H_a и Z_a с весьма большой точностью, доходящей до 15—20 γ , что обуславливает их применимость к исследованию слабых магнитных аномалий, не связанных с влиянием близко расположенных ферромагнитных пород.

Производительность работы с этим прибором хотя и ниже, чем с магнитометром Тиберг-Талена, но все же достаточно высока (см. табл. 14)¹.

¹ Приведенные данные соответствуют наблюдениям повышенной точности. При обычной точности наблюдений производительность увеличивается на 50—100%.

Расстояние между пунктами в м	10	20	40	60	100	200	500
Количество точек	40—31	39—29	37—26	35—22	32—19	26—18	18—8

Стоимость одной точки наблюдения колеблется от 3 до 8 руб.

Магнитная съемка в движении. В 1936 г. старший инженер ЦНИГРИ А. А. Логачев разработал прибор оригинальной конструкции, по идее сходный с индукционными абсолютными приборами, с помощью которого можно производить непрерывную магнитную съемку в движении. Этот прибор был испытан при полете на аэроплане над Старорусской, Курской и др. аномалиями и показал свою пригодность для локализации достаточно крупных аномалий. Точность измерений с этим прибором оказалась равной, примерно, точности, достигаемой с магнитометром Тибберг-Талена. Значительно бóльшая производительность, возможность проведения съемок в трудно доступных (таежных, заболоченных) районах позволяют говорить о больших перспективах, открывающихся перед этим прибором. Кроме того, съемки аномалий, произведенные на различных высотах, интересны в том отношении, что с их помощью можно определять глубины залегания пород, вызывающих ту или иную аномалию.

§ 8. МАГНИТНЫЕ СЪЕМКИ

Предварительное, самое общее представление о характере земного магнитного поля геофизик-разведчик может получить из материалов Генеральной магнитной съемки СССР, которую начали проводить с 1919 г.

Эта съемка ведется абсолютными приборами, причем точки наблюдения, в среднем, отстоят на 20 км одна от другой. Помимо чисто теоретического интереса, обусловленного тем, что ее данные войдут в составляемую мировую магнитную карту, эта съемка имеет большое значение для целей аэронавигации. О геологической интерпретации ее результатов будет сказано ниже.

Поисково-разведочные магнитные съемки делятся на три группы: 1) рекогносцировочные, 2) общие и 3) детальные. В этом порядке их удобнее всего и рассматривать.

Рекогносцировочные съемки

По приезде на место работ, геофизик-разведчик прежде всего должен ознакомиться с характером района в магнитном отношении: выяснить наличие и интенсивность магнитных анома-

лий, их расположение и ориентировку, выбрать места проведения общих съемок (см. ниже). Все эти задачи в той или иной степени решаются рекогносцировочной (иначе маршрутной) съемкой. Характерный ее признак — отсутствие предварительной разбивки топографической сети наблюдений. Измерения проводятся вдоль дорог и рек, причем ориентировка на местности осуществляется глазомерным способом по топографической карте достаточно крупного масштаба (чаще всего в масштабе около 1 : 100 000). Так как топографическая основа при таком способе съемки отсутствует, измерений склонения обычно не делают, ограничиваясь определением H и Z_a . В очень редких, специальных случаях при рекогносцировках определяют и D , пользуясь для этого положением географического меридиана, полученным из астрономических наблюдений.

Точки наблюдения вдоль хода располагаются обычно через 100—200 м, а число таких рекогносцировочных ходов определяется задачами, стоящими перед магниторазведкой в данном районе, количеством дорог и степенью легкости ориентировки на местности (отсутствие или малая площадь лесов, наличие ориентиров и т. п.) При работе в западной области, БССР и некоторых других районах можно иногда получить достаточно полное представление о магнитном поле из одних рекогносцировок, которые в этом случае ведутся по достаточно густой сетке, используя не только шоссейные, но и все проселочные дороги, а также речки, если только они нанесены на топографическую карту. По данным таких рекогносцировок строятся карты изодинам Z_a , которые позволяют выбрать участки, подлежащие детализации.

Общие съемки

Районы, которые по данным рекогносцировочной съемки в магнитном отношении являются наиболее интересными и перспективными, покрываются общей магнитной съемкой, имеющей целью установление характера магнитного поля в этих районах, выявление и оконтуривание всех имеющихся аномалий, нахождение участков для детальной (см. ниже) съемки. Измерения производятся в точках топографической сети, вид и густота которой зависят от формы объекта и аномалий, их интенсивности, точности применяемой аппаратуры и т. п. Так, например, изомерные штокообразные залежи вызывают аномалии, захватывающие на поверхности большие или меньшие участки, имеющие также изомерную форму. Ясно, что в этом случае квадратная сеть наблюдений (при которой точки наблюдений располагаются в вершинах квадратов) будет наиболее рентабельной. Если же аномалии вытянуты в том или ином направлении, то точки наблюдения нужно помещать в вершинах прямоугольников, большая сторона которых направлена вдоль простиранья аномалий. При том и другом виде сети применяется еще иногда распределение точек наблюдения в шахматном порядке. Как

показывает теория, такое расположение точек обеспечивает наилучшую гарантию того, что при съемке не будут пропущены сколько-нибудь значительные аномалии.

Для определения густоты сети пользуются формулами, определяющими величину аномальной магнитной силы на некотором расстоянии l от эпицентра залежи; эта сила зависит от формы залежи, глубины ее, магнитных свойств и т. п. Задавшись некоторым минимальным значением аномалии, которое может быть отмечено применяемыми приборами, вычисляют то значение l , при котором получается такая величина аномалии. Очевидно, что расстояние между точками наблюдения должно быть равным $2l$, так как даже в самом худшем случае, когда залежь расположена посередине между двумя точками сети, влияние ее будет отмечено. При расстояниях между пунктами наблюдения, большими нежели $2l$, создается угроза пропустить некоторые аномалии и вызывающие их геологические тела. При работе в совершенно неисследованных районах, когда нельзя заранее определить возможную форму и размеры искомым объектов, густота сети определяется из данных предварительных рекогносцировок. Чаще всего при обследовании месторождений магнитного железа, имеющих пластовый характер, пользуются сетью 40×100 м или 50×200 м. Для месторождений, не имеющих ясно выраженного простирания (гнездовые, штокообразные), средняя густота сети 40×40 м. Эти цифры являются, конечно, ориентировочными, и в каждом отдельном случае выбор наиболее рациональной сети наблюдений надлежит производить специально, руководствуясь положениями, частично указанными выше. Правильно выбранная сеть наблюдений при общей съемке, так же как и при всех других видах магнитных съемок, обеспечивает при минимальных затратах на производство работ полное изучение магнитного поля района в желательном направлении.

При общей съемке измеряются все элементы, характеризующие магнитное поле местности, что позволяет по ее данным построить карту изолиний Z_a и нанести на нее положение векторов H_a .

Детальные съемки

После проведения общей съемки более или менее редкой сетью наблюдений выявляются участки с местными изменениями магнитного поля. Но при относительно малых размерах разных тел и вызываемых ими аномалий — трудно обычно судить по одним этим данным о характере нарушений. В этом случае требуется детализация, т. е. проведение съемки более густой сетью. Детальные съемки применяются и в тех случаях, когда характер аномалий выяснен, но нет достаточных данных для проведения теоретических расчетов о форме тел, вызывающих аномалию, и элементах их залегания. Густота сети детальной съемки зависит от тех же факторов, которые указаны выше в разделе об общих съемках. На практике, обычно, добиваются того, чтобы при

переходе с точки на точку наблюдалось плавное изменение Z_a или H_a . Если при выбранной сети наблюдаются резкие перемены в кривых Z_a и H_a , то надлежит сеть сгустить. Для определения возможности разрежения сети пользуются следующим правилом: через исследуемую аномалию проводится профиль с точками наблюдения, расположенными достаточно часто; строятся кривые H_a или Z_a ; затем из полученных данных исключается половина точек (через одну) и по оставшейся половине строятся опять кривые H_a и Z_a . Если в обоих случаях получатся тождественные кривые — сеть следует разредить. Такую операцию можно последовательно провести 2—3 раза, выбрав в конце концов ту сеть, которая обеспечит полную детализацию съемки при минимальном числе наблюдений. Выбранная подобным способом густота сети, очевидно, годится для детализации всей аномалии, а не только одного профиля, хотя и здесь встречаются исключения. Можно указать, что предельные значения густоты сети при детальных съемках будут колебаться от 5×5 м до 100×40 м и даже 200×40 м.

При любой густоте сети при детальной съемке с помощью дополнительных наблюдений следует определить положение пунктов с максимальными значениями H_a и Z_a , а также точек максимумов восточного или западного склонения и перехода склонения через среднее его значение.

Детальная съемка производится хотя и теми же приборами, что и общая (магнитометр Тибберг-Талена, весы Шмидта), но сами наблюдения ведутся по несколько усложненной методике, позволяющей получить наибольшую точность.

По данным детальной магнитной съемки при наличии некоторых благоприятных условий (знание магнитных свойств пород, формы их залегания и т. п.) можно производить расчеты размеров месторождения и элементов его залегания.

Технико-экономические показатели

Технико-экономические показатели работы магнито-разведочной партии изменяются в весьма широких пределах в зависимости от района работ, вида съемок и т. п. Большое значение имеет также и то обстоятельство — изолированно применяется магниторазведка в данном месте или в комплексе с работами по другим геофизическим методам.

Полевую работу можно разделить на три этапа:

- 1) подготовка топографической сети (при общей и детальной съемках);
- 2) производство магнитных наблюдений;
- 3) обработка результатов (вычисления, построения карт, профилей и т. п.).

Исходя из этого и зная объем работ, надлежит рассчитывать необходимый персонал и стоимость работ. Для изолированной магниторазведочной партии в 2—3 прибора можно считать необходимым следующий состав (ориентировочно):

1. Начальник партии — инженер	1
2. Наблюдатели-техники	2—3
3. Съемщик-тспсграф	1
4. Вычислитель-чертежник	1
5. Рабочие	6

В комплексной геофизической партии топографическая основа для всех методов обычно общая, что соответственно меняет и потребный персонал магнитометрической партии.

Для определения стоимости исследования магнитным способом 1 км² площади следует исходить из густоты сети и стоимости одной точки наблюдения, которая указана выше.

§ 9. ИСТОЛКОВАНИЕ ДАННЫХ МАГНИТНОЙ СЪЕМКИ

Прежде всего посмотрим, что могут дать наблюдения, выполненные в порядке осуществления Генеральной магнитной съемки, о которой мы уже упоминали выше. Как показывают теоретические расчеты, если бы земная кора была однородна, то магнитное поле должно было бы быть правильным. В частности, изодинамы вертикальной и горизонтальной составляющей должны были бы идти в виде правильных окружностей, сохраняя взаимную параллельность. При перемещении наблюдателя по магнитному меридиану от магнитного экватора к полюсу наблюдалось бы непрерывное уменьшение горизонтальной и увеличение вертикальной составляющей вектора магнитной силы. Действительная картина значительно сложнее. Если обратиться к рис. 28, то можно видеть, что линии изодинам H не сохраняют плавности и параллельности, а наоборот в целом ряде мест имеют сгущения и разрежения их, местные искривления и т. д. Чем это вызвано? Причина может быть только одна — неоднородность земной коры в магнитном отношении. Поскольку такие неправильности магнитного поля захватывают громадные пространства земной поверхности, а величина нарушений весьма значительна, можно предположить, что источником этих деформаций могут быть породы, простирающиеся на весьма большую глубину. Современная геофизика такие региональные аномалии связывает именно с целыми материками. В истолковании мировых магнитных карт наблюдается полная аналогия с истолкованием гравитационных аномалий.

Если взять карту Генеральной магнитной съемки в более крупном масштабе, то можно видеть появление значительно менее крупных по площади аномалий. Так, например, на рассмотренном выше рисунке территория СССР характеризуется сравнительно правильным распределением изодинам; другая картина будет на более детальной карте. Сейчас, хотя Генеральная магнитная съемка еще далеко незакончена, уже известен целый ряд крупнейших аномалий — таких, как Курская, Криво-рожская и десятки других. Эти аномалии в средней Европейской части СССР обычно находятся в связи с рельефом древнего

кристаллического докембрийского ложа и лишь изредка, например, на Урале объясняются местными рудопроявлениями. Таким образом можно сказать, что данные Генеральной магнитной съемки могут быть использованы для общих геологических прогнозов и выбора участков, заслуживающих более детальных исследований. С этим вопросом мы еще встретимся в главе VII.

Современная магниторазведка чаще всего применяется для решения следующих геологических задач:

- 1) поиски и разведка сильно магнитных руд (магнитный железняк, титаномагнетит);
- 2) определение контактов кристаллических пород с осадочными и между собой (например, кислых с основными);
- 3) локализация зон разломов, нарушений и смятия;
- 4) поиски структур, благоприятных для нахождения нефти и соли;
- 5) поиски тех полезных ископаемых, которые, хотя и не являются магнитными, но содержат в себе примеси магнитных минералов, главным образом, магнетита. Сюда относятся красные и бурые железняки, россыпные месторождения золота, платины, вольфрама и т. п.

Кроме того, магнитный способ разведки, особенно в комплексе с другими геофизическими методами, может оказаться полезным и в целом ряде других случаев. Применимость его в каждом отдельном случае определяется степенью различия магнитных свойств объекта и вмещающих пород. Подробно этот вопрос рассмотрен в главе VIII.

В зависимости от решаемой задачи выбирается не только вид магнитометрической съемки, но и сам способ геологической интерпретации данных. Здесь сразу же следует отметить, что в общем случае на основании одних магнитных наблюдений нельзя однозначно определить характер объекта и элементы его залегания, так как совершенно аналогичные аномалии могут быть вызваны самыми разнообразными расположениями возмущающих масс. Так, например, маленький намагниченный шар, находящийся на некоторой глубине под дневной поверхностью, вызывает такую же магнитную аномалию как шар больших размеров, но погруженный на соответственно большую глубину.

Однако в большинстве случаев практики еще перед началом магнитометрической разведки известны некоторые данные о форме и характере объекта, магнитных свойствах. Существуют те или иные геологические прогнозы или гипотезы, помогающие избранию правильного пути интерпретации. Указанное не следует понимать буквально в том смысле, что все данные магниторазведки привязываются к уже существующим предположениям. Наоборот, в результате проведения магниторазведочных работ эти представления могут в значительной степени измениться, так как они играют лишь роль некоторых исходных, первоначальных положений.

Таким образом, ограничения, накладываемые на возможности магниторазведки, которые определяются ее физико-математиче-

скими основами, на практике не имеют доминирующего значения, и решение отдельных геологических задач возможно, — правда, не с абсолютной точностью, а с тем или иным приближением.

Укажем прежде всего на возможность суждения о характере вещества искомого тела по вызываемым им магнитным аномалиям. И. М. Бахурин дает следующие соотношения между веществом неглубоко (в сравнении с ее размерами) залегающей залежи и максимальными значениями вертикальной аномальной компоненты (табл. 15).

Таблица 15

Магнитный железняк. Крутопадающие пласты (Кируна, Тагил)	300 000—150 000γ
Магнитный железняк. Пологопадающие пласты (гора Магнитная)	20 000—15 000γ
Железистые кварциты (Кривой Рог)	60 000—40 000γ
Змеевики	7500γ
Базальты	2000γ
Осадочные породы	100—80γ
Бурые железняки	80—60γ
Марганцовые руды (Никополь)	600—100γ
С.ль	60—10γ

Далее существует правило, применяемое, правда, тоже только к неглубоко залегающим телам, согласно которому величина аномалии в гаммах равняется от $0,3(x_1 - x_2)$ до $0,6(x_1 - x_2)$, где

x_1 и x_2 — коэффициенты магнитной восприимчивости вещества залежи и вмещающих пород. Пользуясь этим правилом, зная магнитные свойства пород, можно определить величину аномалии, и обратно — по величине аномалии судить о веществе залежи. Однако для глубоко залегающих объектов это правило совершенно не применимо; иногда слабые аномалии вызываются глубоко залегающими сильно магнитными породами, и наоборот, достаточно резкая аномалия может

быть обусловлена слабо магнитными, но близко подходящими к дневной поверхности породами.

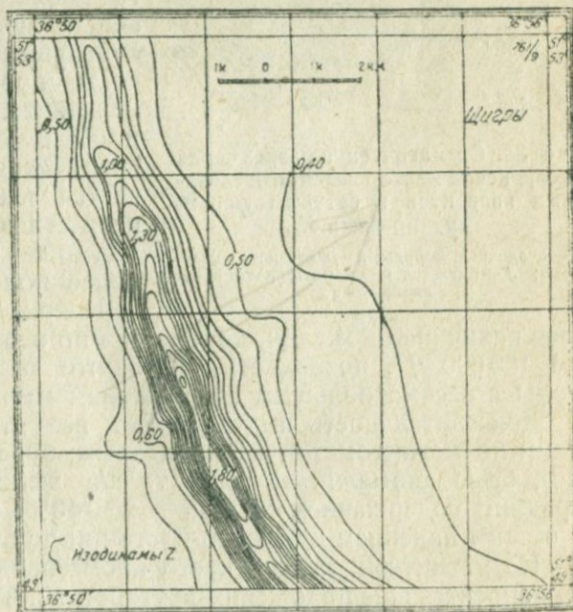


Рис. 32. Магнитометрическая карта изодинам Z Шигровского месторождения (КМА).

Представление об элементах залегания магнитной залежи можно получить из анализа магнитометрических карт. В качестве примера рассмотрим карту изодинам Z Щигровского месторождения (КМА), представленную на рис. 32. Как видим, ось аномалии простирается в ССЗ направлении. Очевидно, что в этом направлении тянутся и породы, вызвавшие эту аномалию. Далее обращает на себя внимание факт непостоянства величины Z вдоль оси: в пределах взятого участка она изменяется от 1,9 до 0,8 эрстеда. Причиной такого ослабления может быть либо

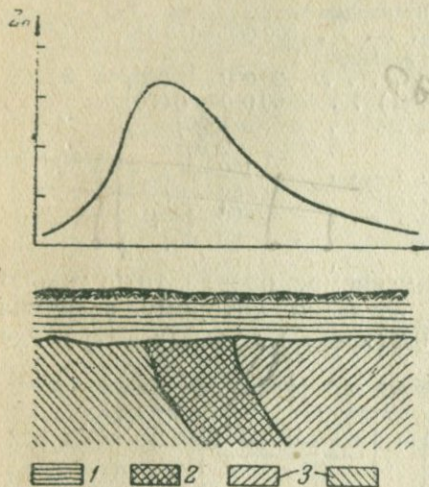


Рис. 33. Схематический разрез через Щигровское месторождение железистых кварцитов и соответствующий ему профиль Z_a .

1 — осадочные породы; 2 — железистые кварциты; 3 — вмещающие породы докембрийского ложа.

погружение магнитных пород на большую глубину, либо же изменение их магнитных свойств, т. е., в конечном счете, уменьшение содержания магнетита.

Небезынтересно и то, что изолинии Z располагаются значительно гуще, теснее с западной стороны аномалии, чем с восточной. Если построить кривую Z вдоль профиля, проходящего через аномалию перпендикулярно ее оси (рис. 33), то можно видеть, что график получается асимметричный: уменьшение Z с восточной стороны происходит значительно медленнее, чем с западной. Как показывают теоретические расчеты, такая асимметрия вызывается невертикальностью магнитной залежи, причем в сторону падения обычно наблюдается более пологое уменьшение.

Наконец, исключительно большая величина аномалии, доходящая по вертикальной компоненте до $150\,000 \gamma^1$, позволяет думать, что аномалию вызывают породы с весьма большим содержанием магнетита.

Действительность подтверждает все эти выводы, сделанные нами по магнитометрическим данным; бурением непосредственно под осью аномалии вскрыта толща железистых кварцитов со средним содержанием железа в 25—40%, мощностью до 600 м, с общим падением на северо-восток под углом 80—85°.

На магнитных картах часто кроме изодинам H и Z или H_a и Z_a наносятся еще положения векторов H_a . Такие карты приведены в разделе о применении геофизики к разведке рудных месторождений.

Из рассмотрения этих карт можно сделать вывод, что эти векторы помогают определению оси и центров аномалии, т. е.

¹ Нормальное значение Z в этом районе около $40\,000 \gamma$.

роль их аналогична роли градиентов силы тяжести в гравиразведке.

Теоретическим путем рассчитаны профили Z_a и H_a для рудных тел различных форм и положения. На рис. 34 приведены некоторые из них¹: а — для шаровой залежи, б, в и г — для вертикального, наклонного и горизонтального пластов, д — для прямого сброса. Как видим, иногда по самой форме кривой можно судить о характере залежи. Однако не следует забывать, что все эти расчеты произведены для некоторых теоретических образцов, а не для реальных геологических тел. В самом деле, никогда в природе мы не встречаем залежи в виде шара, эллипсоида, цилиндра, но математические трудности не позволяют нам отойти от этих элементарных форм и рассмотреть более сложные. С другой стороны, нельзя найти залежь, состав которой был бы постоянен во всем объеме; однако в расчетах его считают постоянным. Подобных допущений довольно много. Таким образом, пользование теоретическими расчетами возможно лишь при условии соблюдения постоянного геологического контроля.

То же следует сказать и о некоторых других, например, графических, методах определения глубины залежи и других элементов ее залегания. В общем случае магниторазведка решает те или иные геологические задачи не полностью, а частично, и при этом не совершенно точно, а с большим или меньшим приближением.

В комплексе с другими геофизическими методами результаты получают и точнее и надежнее, но все же и в этом случае окончательные выводы можно делать лишь после проведения дополнительных геолого-разведочных работ.

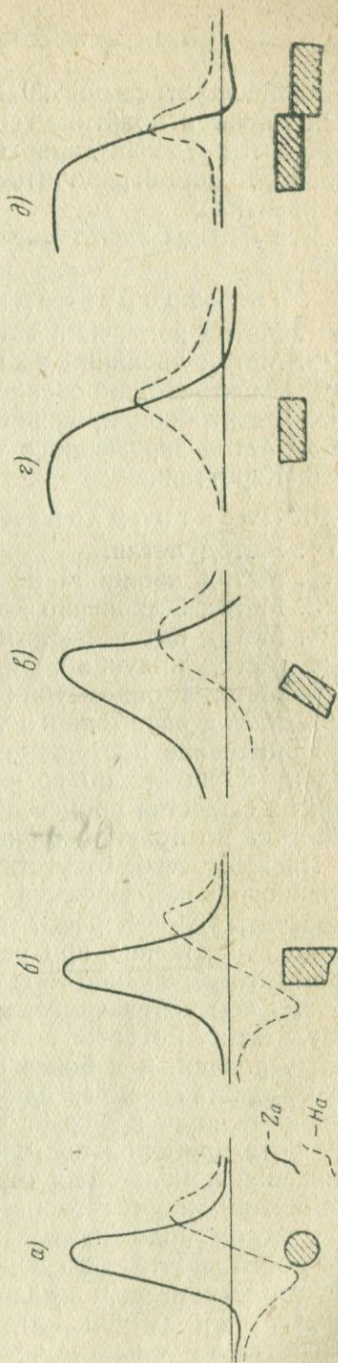


Рис. 34. Магнитные поля некоторых тел правильной формы.

¹ Сплошная линия — Z_a , пунктир — H_a .

ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА

Существует свыше 20 методов электроразведки, утилизируемых сейчас в практике геолого-разведочного дела. Нет особой нужды в пределах данного курса рассматривать все методы детально, можно ограничиться только более часто встречающимися на практике.

Все методы электроразведки можно подразделить на следующие:

I. Электроразведка постоянным током

- ✓ 1. Метод измерения естественных полей.
- 2. Метод изолиний на постоянном токе.
- ✓ 3. Электронзондирование.
- ✓ 4. Электронзондирование (со всеми модификациями).
- ✓ 5. Метод заряженного тела на постоянном токе.
- ✓ 6. Кароттаж.

II. Электроразведка переменным током

- 1. Метод петли.
- 2. Метод изолиний на переменном токе.
- 3. Метод бесконечно длинного кабеля.
- 4. Метод интенсивности с модификациями.
- 5. Метод индукции.
- 6. Методы ондометрии.
- ✓ 7. Метод заряженного тела на переменном токе.

Применение постоянного тока в разведочной геофизике дает ряд преимуществ по сравнению с переменным током, вытекающих из существа процессов, которые происходят при прохождении тока по полупроводнику трех измерений — земле.

Прежде всего, отсутствие, при установившемся режиме постоянного тока, эффекта индукции и скин-эффекта позволяет упростить условия работ и повысить глубину разведки, что особенно существенно при решении вопросов глубинной геологии. Кроме того, физико-математические основы постоянного тока проще, чем переменного, а это ведет к лучшему пониманию тех результатов, которые получаются во всегда сложных естественных условиях, и к более широким возможностям расшифровки (перевода на язык разведки) измеряемых физических полей. Немаловажную роль играет также наличие простых и устойчивых в работе приборов постоянного тока для измерения малых напряжений и малых сил токов и простых источников энергии — элементов, аккумуляторов. Хотя в этом смысле переменный ток имеет свои положительные особенности, выражающиеся в возможности почти безграничного усиления полей с помощью электронных ламп и в наличии такого простого индикатора тока как телефон (наушники), все же в тех методах, которые занимают не только констатацией наличия или отсутствия тока, а и его измерением, эти преимущества в значительной мере

исчезают, так как телефон — не измерительный прибор, а усиление — осложняет и утяжеляет технику.

С другой стороны, методы постоянного тока всегда имеют один недостаток — необходимость непосредственного контакта с землей цепи питания, создающей поле в земле, и цепи измерения этого поля. Контакт металлических электродов и пропускание по ним тока влекут за собой поляризацию электродов и электролиз, иногда сильно сказывающийся вблизи заземлений. С этими осложняющими факторами при электроразведке постоянным током всегда приходится иметь дело, и надежность результатов работы во многом зависит от того, насколько правильно и полно сумел разведчик учесть и исключить их влияние.

§ 10. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Задачи, решаемые с помощью методов сопротивлений, весьма разнообразны и значительны; в главах VII и VIII мы их разберем на примерах из практики, а сейчас ограничимся лишь неполным их перечислением.

Основное — это: 1) решение различных структурных задач — установление и прослеживание антиклинальных и синклинальных складок, соляных куполов, линий крупных тектонических нарушений, изучение гипсометрии различных маркирующих горизонтов (в частности рельефа кристаллических пород) и т. д.; 2) решение ряда инженерно-геологических и гидро-геологических задач, в частности, — помощь в выборе оснований под крупные гидротехнические и инженерные сооружения, определение направления и скорости подземного потока и т. д.; 3) помощь при картировании, когда электроразведка может выяснить ряд частных вопросов — установление мощности наносов, прослеживание контактов и пластов под наносами, и т. д.

Данная структурная особенность может быть выявлена и прослежена, если выполнены, по меньшей мере, два условия:

1) имеется опорный, маркирующий горизонт, участвующий в строении прослеживаемой структуры; под маркирующим горизонтом понимается горизонт, заметно отличающийся по электропроводности от окружающих пород и выдерживающий это отличие на значительном пространстве;

2) мощность опорного горизонта достаточна для его установления на данной глубине и при данном отношении электропроводностей пород, слагающих маркирующий горизонт и окружающих его. При этом мощность должна быть тем больше, чем глубже залегает опорный горизонт и чем меньше электрическая дифференциация его от вмещающих пород.

На данном этапе развития электроразведки постоянным током лимитирующим фактом является еще глубина залегания опорного горизонта. Практически можно считать разработанной методикой изучения структур до глубин порядка 2—3 км, чего, однако, в большинстве случаев бывает достаточно.

✓ Электроразведка постоянным током применялась также для

установления газоносных структур, обнаружения и прослеживания кварцевых жил (например, при поисках золота), пегматитовых жил и т. д.

При разведке рудных объектов она также часто применяется в комплексе с другими методами для решения частных задач: установления мощности наносов, прослеживания контактов пород, определения глубины залегания рудного тела, оконтуривания последнего, когда оно вскрыто хотя бы в одной точке и т. д., и т. п.

В методах электроразведки, носящих общее название «методы сопротивлений», утилизируется электрическое поле двух питающих заземлений A и B , через которые вводится в землю постоянный ток силы I (рис. 35). Ток распространяется от одного заземления к другому и уходит в землю на большую глубину, причем ближе к электродам и вообще к поверхности земли плотность тока больше, а в глубину она уменьшается. На рис. 35 нанесены токовые линии, наглядно показывающие характер поля.

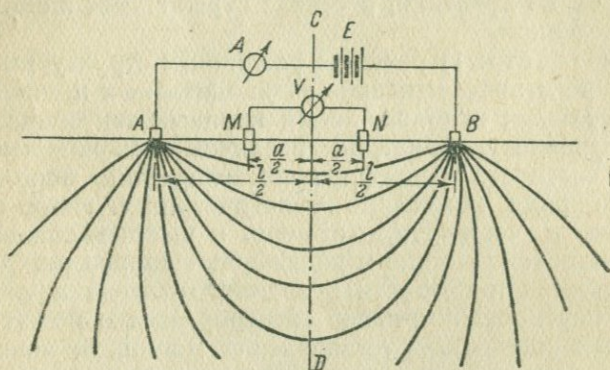


Рис. 35. Поле двух электродов и схема установки.

Так как земля обладает известным сопротивлением, то в ней на всех участках происходит падение напряжения. В частности, если поместить в пределах поля два приемных электрода M и N , то между ними образуется разность потенциалов, которую можно будет измерить. Эта разность потенциалов ΔU связана с силой питающего тока I соотношением:

$$\rho = K \frac{\Delta U}{I}, \quad (19)$$

где ρ — удельное сопротивление среды, расположенной под установкой $AMNB$, и K — некоторый коэффициент, зависящий только от взаимного расположения электродов $AMNB$.

Таким образом получается возможность, измерив силу тока I в цепи питания и разность потенциалов ΔU между приемными электродами, определить удельное сопротивление среды. А так как у различных пород ρ различно, то перед нами открывается путь применения данной установки к расчленению пород и поискам интересующих объектов.

Измерение разности потенциалов ΔU осуществляется по компенсационной схеме (рис. 36). Неизвестная разность потенциалов между электродами MN уничтожается известной разностью потенциалов, падающей на части ab сопротивления R , под влиянием проходящего по нему тока I , от эталонного элемента E . Момент уничтожения — или, как говорят, компенсации — устанавливается по отсутствию тока в цепи гальванометра G .

Измерение силы тока в цепи питания AB происходит по схеме рис. 37. Если в цепь питания включить последовательно известное сопротивление R и измерить на той же компенсационной схеме падение напряжения U_R на концах этого сопротивления, то тогда силу тока легко найти по закону Ома:

$$IR = U_R. \quad (20)$$

Таким образом, измерения ΔU и I можно осуществлять на одном при-

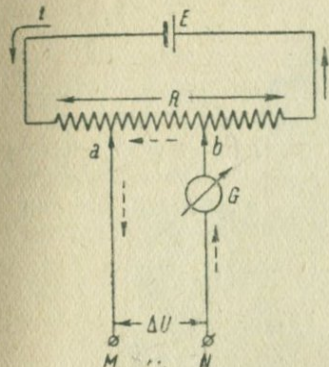


Рис. 36. Компенсационная схема.

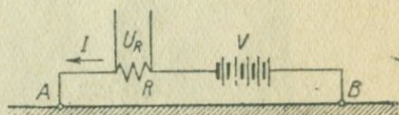


Рис. 37. Схема измерения силы тока.

боре. Практически такой прибор является довольно сложным и стоит дорого (цена порядка 10 000 руб.); он называется потенциометр или компенсатор. Фотография потенциометра одной из последних конструкций приведена на рис. 38.

Написанная выше формула для вычисления ρ относится к случаю, когда среда под установкой $AMNB$ однородна; но мы знаем, что идеальных однородных сред в природе не существует (за исключением, пожалуй, воды) — в частности, все горные породы, если к ним подходить с точки зрения микроструктуры, в большей или меньшей степени неоднородны. Но те масштабы, с которыми приходится иметь дело электроразведке (метры, километры), приводят к тому, что отдельные, мелкие микронеднородности при их хаотическом распределении тушуются, исчезают, и отдельные породы выступают как однородные с макроскопической точки зрения, а их электрическое сопротивление является средним суммарным сопротивлением отдельных компонентов, слагающих породу. С этой точки зрения мы рассматриваем породы как однородные, и их электрическое сопротивление — как один из физических параметров, характеризующих данную породу. Но другое получится, если мы производим измерения ρ , допустим, на контакте двух пород однородных каждая порознь, но разнородных между собой. Очевидно,

что мы можем произвести все измерения, требуемые для вычисления ρ (расстояние, силу тока в цепи питания AB и разность потенциалов на приемных электродах MN). При подобном измерении мы находим ρ не равное ни ρ_1 ни ρ_2 . Так как реально не существует среды с измеренным нами сопротивлением, то, следовательно, полученное является фиктивным, не имеющим прямого физического смысла, — его принято называть «кажущимся» сопротивлением и обозначать ρ_k . Задачу разведки по методу сопротивлений можно формулировать так: на практике в большинстве случаев мы наблюдаем ρ_k , от этой фиктивной

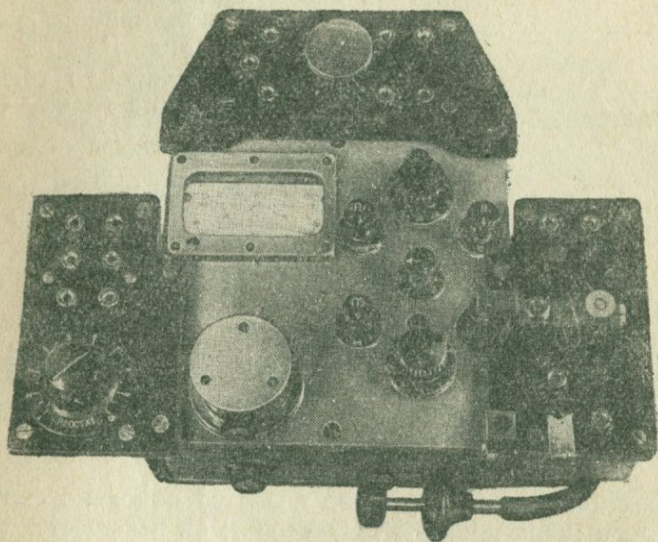


Рис. 38. Общий вид потенциометра.

величины мы должны перейти к истинным сопротивлениям пород, входящих в зону измерений, и по истинным сопротивлениям перейти к характеристике состава и условий (элементов) залегания пород.

Электрическая дифференциация пород, вообще говоря являющаяся благоприятным фактором для электроразведки, может оказаться и, наоборот, сильно мешающим фактором, коль скоро количество пород, обладающих различными свойствами, будет так велико, что расшифровка наблюдений станет чрезвычайно трудной.

Электропрофилирование

Один из наиболее распространенных видов работ по методу сопротивлений — электропрофилирование — состоит в изучении вдоль по профилю или по серии профилей распределения кажущегося удельного сопротивления пород, полученного с фиксированной установкой питающих и приемных электродов.

Если породы, залегающие вблизи дневной поверхности, в частности, наносы, не претерпевают очень резких изменений удельных сопротивлений вдоль по профилю, то тогда приблизительно можно сказать, что электропрофилирование отражает изменения ρ_k , примерно, на одинаковых глубинах от поверхности земли.

Если такое допущение можно распространить на некоторую площадь, то тогда можно сказать, что электропрофилирование есть метод, занимающийся изучением распределения ρ_k на некоторой площади и на примерно одинаковых глубинах.

Если же образования, лежащие вблизи поверхности, резко неоднородны по своим электрическим свойствам, а нас интересуют объекты, залегающие ниже, то уже нельзя говорить, что профилирование изучает ρ_k , примерно, на одних глубинах, так как в данных условиях может легко случиться, что породы, оказывающие преобладающее действие на величину ρ_k , будут находиться в разных точках профиля на разных глубинах. Этот существенный момент следует всегда иметь в виду при электропрофилировании и или отказываться от последнего в подобных

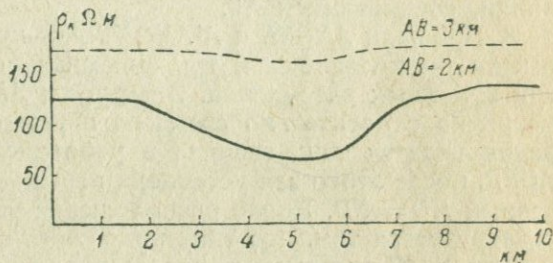


Рис. 39. Электрический профиль.

сложных условиях, или применять специальную методику работ, учитывающую неравномерности распределения сопротивлений в верхних слоях.

Практическое изображение результатов электропрофилирования — электропрофиль строится так: по оси абсцисс откладывается расстояние по профилю в принятом для карт данного района масштабе, а по оси ординат — значения ρ_k , наблюдаемые в данной точке. Пример электропрофиля дан на рис. 39 сплошной линией. Рассматривая его, можно сделать две гипотезы: хорошо проводящие породы в середине профиля подходят ближе к поверхности или хуже проводящие породы в средней части погружаются. Для того чтобы сделать более однозначный выбор решения, одного только электропрофиля недостаточно.

Совершенно очевидно, что если породы залегают горизонтально, электропрофиль будет представлять собой прямую, параллельную оси абсцисс, из которой можно получить полезный для разведчика материал лишь в специфических случаях. Электропрофилирование можно применять тогда, когда искомые (интересующие) геологические тела не горизонтальны или узко локализованы. Величина угла залегания пород, доступная профилированию, может быть различной в зависимости от условий залегания маркирующего горизонта; крутые углы безусловно благоприятствуют профилированию, но и весьма пологие структуры могут быть изучены, если они имеют большие размеры.

Существует несколько распространенных модификаций профилирования.

1. Схема $AMNB$ — обычно симметричная установка с $l=3,5$, 7 или 9а, перемещаемая вдоль по профилю.

2. Схема A^1AMNB^1 — также обычно симметричная установка, имеющая две пары питающих электродов и одну — приемных; обычно $l=3а$, $l'=5а$ или $l=5а$, $l'=9а$. В результате перемещения установки вдоль по профилю получаются два электропрофиля, относимые к двум разным глубинам. Очевидно можно увеличить еще число питающих электродов и иметь профили на трех и т. д. глубинах.

3. Съёмка градиентов. Питающие электроды AB имеют большие разности, приемные электроды MN составляют $1/40—1/60 AB$ и перемещаются внутри средней трети AB вдоль по профилю — линии, соединяющей AB .

4. Профили $AMONB$ и A^1AMONB^1 — профили с повторением — имеют два питающих и три приемных или четыре питающих и три приемных заземления. Электроды $AMNB$ располагаются симметрично относительно среднего приемного электрода O . Измерения ведутся так: сначала в работе установка $AMOB$, затем $AONB$, после этого вся установка переходит по профилю на шаг, равный $MO=NO$. Новое расположение установки $A_1M_1O_1N_1B_1$ характеризуется тем, что электроды $A_1N_1B_1$ занимают новые места. Электрод M_1 стоит на точке O предыдущей стоянки, электрод O_1 — на месте N . Измерения происходят по схеме: сначала $A_1M_1O_1B_1$, затем $A_1O_1N_1B_1$. Легко видеть, что второе измерение предшествующей стоянки и первое измерение последующей стоянки имеют дело с одним и тем же расположением приемных электродов (почему методика и называется «профиль с повторением»), но с разным расположением питающих.

5. Профиль $AMN(B \rightarrow \infty)$. Съёмка с одним заземлением A , электрод B — в бесконечности. Измерения ведутся вокруг электрода A_1 , причем разнос приемных электродов мал и они перемещаются по радиусам. Сюда же можно отнести установку $AM(N$ и $B \rightarrow \infty)$.

6. Профиль $AMNB$ с разностями вкрест профиля. Симметричная установка перемещается подобно схеме $AMNB$ по профилю, с той лишь разницей, что электроды расположены перпендикулярно профилю и при переходе на следующую точку перемещаются параллельно самим себе. Профилем считается линия, по которой перемещается центр установки.

Каждая из этих шести схем расположения электродов может применяться в соответствующей ей обстановке. Профиль $AMNB$ может применяться как при прослеживании глубинных структур, так и при поисках и разведке мелких объектов, подходящих близко к поверхности, например, пегматитовых жил, пластов угля и т. д.

Однако, имея в виду возможные неоднородности в верхних слоях и многозначность возможных расшифровок профилей, о чем выше уже говорилось, следует использовать этот прием

работы лишь в тех случаях, когда выделение маркирующего горизонта может быть, например, в силу хорошей геологической изученности района, произведено безошибочно. Во многих случаях практики лучше переходить на более совершенную методику A^1AMNBV^1 , дающую электропрофили на двух глубинах и тем самым облегчающую интерпретацию и установление степеней влияния поверхностных неоднородностей. Некоторый проигрыш в количестве точек, которые может взять рабочая бригада в день, с лихвой компенсируется большей достоверностью интерпретации.

Съемка градиентов в поле точечных заземлений и, особенно, в поле линейных заземлений применяется для обнаружения и прослеживания круто падающих маломощных объектов под сравнительно небольшими наносами, например, кварцевых жил, пегматитовых жил, зон разломов, пластов угля и т. д. Сравнение различных методик обнаружения плохо проводящих круто падающих пластов приведено на рис. 40, из которого видно, что если в совершенно идентичных условиях аномалия над пластом при съемке градиента в поле линейных заземлений дает 8,5 единиц, то съемка градиентов в поле точечных заземлений — 5,1 таких единиц, профиль $AMNB$ — 2,5 единицы, и, наконец, профиль $AMNB$ с разносами вкrest профиля дает два расплывчатых максимума с величиной, равной 1,5 единицы.

Поискам плохо проводящих пластов благоприятствуют такие условия, когда наносы проводят электрический ток хуже, чем вмещающие породы, и условия разведки ухудшаются по мере того, как наносы становятся более электропроводными.

Профили с повторением нужно ставить в условиях, когда наносы имеют неравномерную мощность и резко изменяющееся удельное сопротивление (например, морена), а объектом поисков является неглубоко залегающее и не особенно большое геологическое тело. В этом случае также следует по возможности утилизировать схему $A^1AMONBV^1$.

Схема с выносом одного электрода в бесконечность может применяться для точной отбивки контакта пород под наносами не особенно большой мощности, для установления мощности круто падающих пластов под наносами и для других детализационных и точных работ, а также для поисков хорошо проводящих рудных тел, расположенных на небольших глубинах. Наконец, схема $AMNB$ с разносами вкrest профиля иногда применяется для точного установления контакта пород под наносами. Однако, ввиду трудности технического осуществления схемы, особенно в залесенной местности, она вряд ли может найти широкое применение.

Размер установки определяется глубиной залегания опорного горизонта и отношением проводимостей верхних слоев к нижележащим. Как правило, размер установки тем больше, чем глубже залегает маркирующий горизонт и чем более электропроводны верхние слои земли. Например, для схемы $AMNB$ или A^1AMNBV^1 размер AB должен быть раза в 4—5 больше ожидаемой

глубины горизонта (объекта) при средней электропроводности верхних слоев, в частности наносов, и в 8—10 раз больше при хорошей электропроводности их. Разносы MN должны быть в целое нечетное число раз меньше AB , и шаг должен быть равен или MN или $\frac{MN'}{2}$.

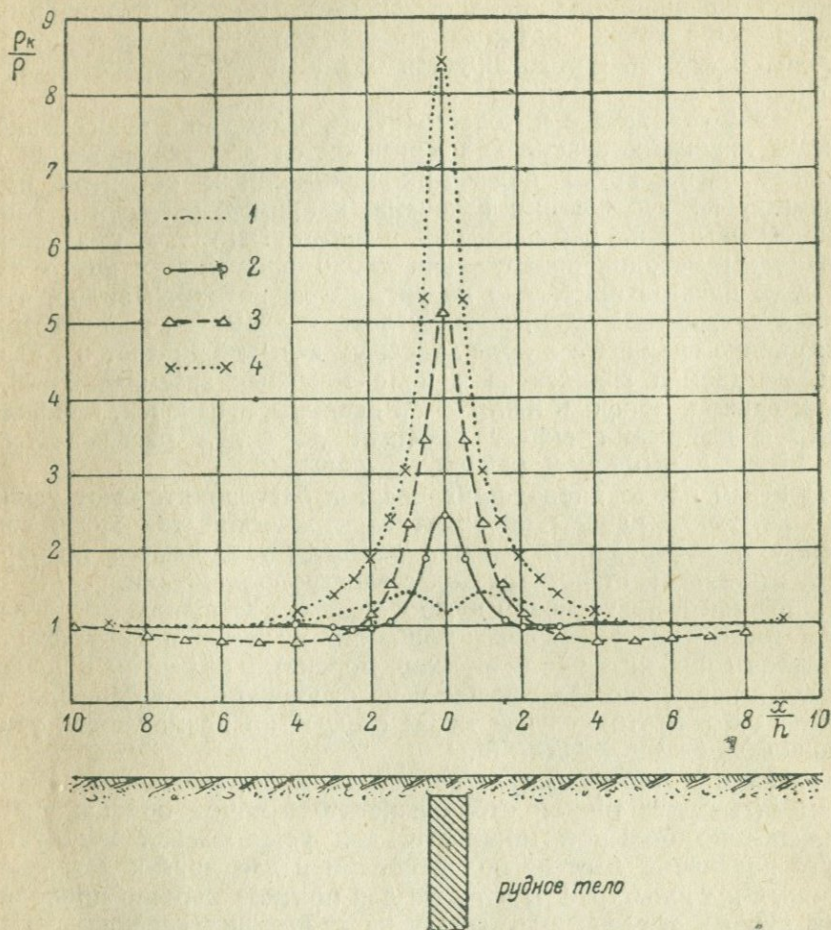


Рис. 40. Сравнение различных методов обнаружения круто падающих, плохо проводящих пластов.

1 — $AMNB$ по простиранию; 2 — $AMNB$ вкrest простирания; 3 — съемка градиентов поля Шлюмберже; 4 — съемка градиентов поля Лундберга.

При прослеживании маломощных пластов, контактов и зон нарушений и др. мелких объектов надо стремиться к увеличению AB , чтобы создать в середине AB по возможности однородное поле, на фоне которого легче выявить даже слабое его искажение. Наоборот, MN и шаг должны быть как можно меньше ($\frac{1}{40} - \frac{1}{20} AB$) с тем, чтобы не пропустить объекта, а выявить,

по возможности, все его детали. Конечно, сгущение точек наблюдений лимитируется глубиной залегания и мощностью объекта. Не имеет смысла делать шаг, а значит и MN , много меньше мощности наносов или мощности пласта, достаточно иметь эти величины одного порядка. Расстояния между профилями устанавливаются сообразно геологическим условиям и экономике разведки. Как правило, надо считать, что если при поисковых работах 2—3 электропрофиля пересекут искомое геологическое тело, то этого вполне достаточно.

Расположение профилей на местности и топообслуживание работ также зависят от задачи, стоящей перед разведчиком. Если в задачу входит предварительное установление структур больших размеров, например, антиклинальных складок с линейными размерами порядка десятков километров, то тогда работу можно вести следующим образом. Направление профилей выбирается, примерно, вкрест ожидаемым структурам вдоль шоссе, дорог и т. д. Не следует при этом бояться, если приходится искривлять (ломать) профиль, следуя за крупными изгибами дорог или для того, чтобы обойти встречающийся на пути город, лесок или гору. Нужно при предварительной съемке иметь в виду, что скорость работы — это основное, а скорость в решающей степени зависит от быстроты переезда с точки на точку. Так как при больших масштабах работы (длинные профили, большие разносы AB) необходимым условием рациональной организации работ является наличие автотранспорта в рабочей бригаде, то становится ясным стремление придерживаться удобных путей сообщения, конечно не в ущерб качеству работ. Расстояние между точками по профилю также может не промеряться, а примерно устанавливаться с помощью детальной топографической карты.

При предварительной съемке больше чем когда-либо требуется, чтобы построение электропрофилей и их предварительная расшифровка велись немедленно, с тем, чтобы иметь возможность быстро провести детализацию по пройденным профилям или задать новые дополнительные или промежуточные профили или электротзондирования.

При поисково-разведочных работах на меньшие глубины и на мелкие и неглубоко залегающие объекты профили задаются вкрест ожидаемому простираению, сеть наблюдений обычно — геометрически правильная (прямоугольная, шахматная, квадратная) и все точки наблюдений заранее отмечены на местности колышками. В случае извилистости объекта, например, зоны нарушения или контакта под небольшими наносами, можно и не придерживаться параллельности профилей, однако и в этом случае рационально иметь заранее разбитые точки наблюдений.

Пример графика ρ_k в случае схемы $AMNB$ и A^1AMNB^1 дан на рис. 39, графика при профилировании с повторением — на рис. 41, а при съемке градиентов — на рис. 42.

Разброс точек на рис. 41 характеризует степень неоднородности верхних слоев, в частности, наносов. Неполное смыкание

участков профиля рис. 42 также объясняется влиянием расположения питающих заземлений АВ.

Электропрофили строятся в одном и том же масштабе как для длин, так и для ρ_k для всего планшета (если идет съемка

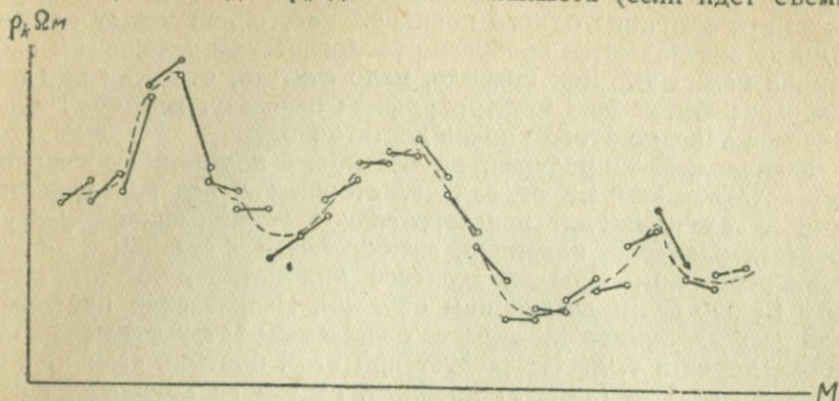


Рис. 41. Электропрофиль с повторением.

по площади). Удобно при построении профилей пользоваться полулогарифмической бумагой, откладывая по оси ординат $\lg \rho_k$. Электропрофили могут явиться конечным материалом, по которому уже производится расшифровка наблюдений, если поверхностные слои неоднородны и влияние неоднородностей на ρ_k велико.

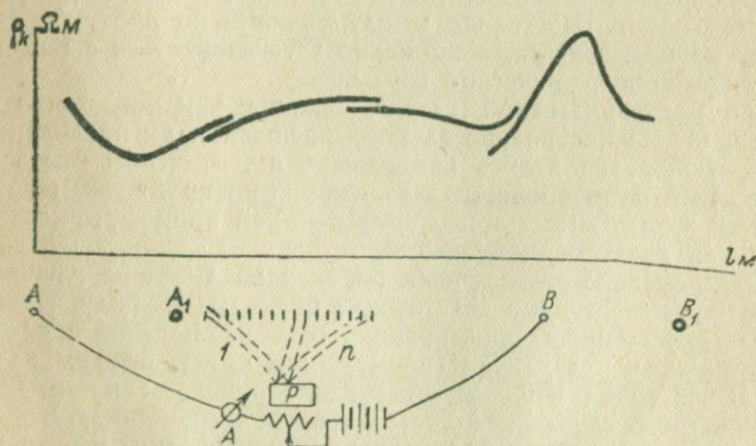


Рис. 42. Съемка градиентов по профилю.

Карты изоом нужно строить в тех случаях, когда влияние поверхностных неоднородностей на ρ_k особенно не заметно. Карты строятся аналогично тому, как строятся горизонталы на топографических картах, т. е. на карту около точек профилирования наносят значения ρ_k в омах на метр и затем плавными

кривыми, интерполируя на-глаз между отдельными пунктами, соединяют точки, имеющие одинаковые значения ρ_k . Обычно изоомы проводятся для ρ_k кратного 10 или 100 (изоомы в 10, 20 . . . 80 и т. д. *ом* или 100, 200 . . . 600 и т. д. *ом м*), но могут быть проведены в специфических случаях и для других значений ρ_k .

При съемке схемой A^1AMNBV^1 строятся две карты изоом: для разносов AB и для разносов A^1B^1 . Величина разносов должна обязательно отмечаться на карте.

Вместо карт изоом можно строить карты равных проводимостей, их можно назвать «карты изоом». Очевидно, что по тем данным, которые из этой карты могут быть получены, она совершенно аналогична карте изоом, и поэтому строить обе карты для одного и того же участка бессмысленно.

Готовых рецептов для перевода карт изоом в геологические карты и профилей в разрезы не существует. Расшифровка сильно облегчается, если:

1) широко используется геологический, гидрогеологический и др. материал по району;

2) сделаны многочисленные и рационально организованные параметрические замеры на выходах, в шурфах и т. д., электрозондирования возле механических буровых, кароттаж скважин;

3) учтена в процессе полевых работ искажающая роль наносов и изучено явление анизотропии;

4) изучается полевой материал по работам, выполненным в сходных условиях, так как метод аналогий иногда может быть весьма полезно утилизирован, и т. д.

При расшифровке данных профилирования особенно существенно учесть влияние наносов, так как наносы весьма сильно экранируют нижележащие породы. Кажущееся сопротивление, наблюдаемое на поверхности земли, может очень сильно различаться от сопротивления пород, прикрытых наносами. Если представить себе, что однородные наносы постоянной мощности h покрывают некоторые породы с сопротивлением ρ , то ρ_k будет составлять некоторый процент от ρ , зависящий от $\frac{\rho_{\text{породы}}}{\rho_{\text{наносов}}}$ и относительного разноса AB (см. табл. 16).

Таблица 16

AB	$\frac{\rho_{\text{породы}}}{\rho_{\text{наносов}}}$				
	2	3	5	10	100
10h	82%	70	54	33	4,5
20h	91%	87	74	52	8,5

При наносах, сопротивление которых в 10 раз меньше сопротивления лежащих ниже пород, а это часто бывает на практике, кажущееся сопротивление, измеренное с разностями AB , в 20 раз превышающими глубину h , составляет всего лишь 52% от сопротивления пород.

При профилировании с целью решения структурных вопросов можно встретиться с таким явлением, когда однородная анизотропная среда, перекрытая однородными электрически и по мощности наносами, дает максимум и минимум ρ_k . Максимумы электропрофиля получаются над антиклиналями, сложными анизотропными породами, минимумы — над синклиналями (рис. 43), их происхождение объясняется увеличением плотности тока в антиклинальной части против нормы и уменьшением — в синклиналях.

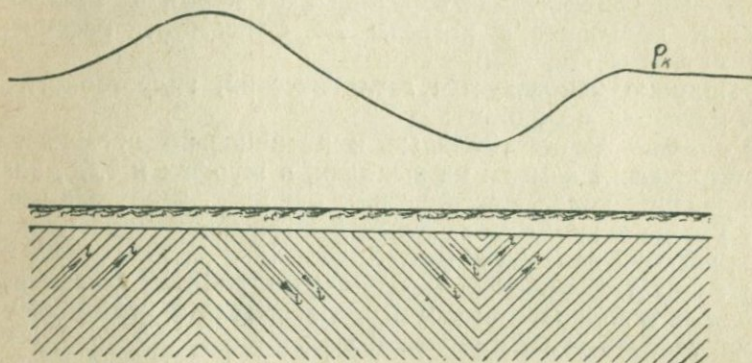


Рис. 43. Эффект антиклинали и синклинали анизотропных пород.

При работах на глубокие структуры, т. е. при больших разностях AB , наносы сказываются меньше, чем при поисках неглубоко залегающих небольших объектов.

С примерами расшифровки карт изоом и профилей мы встретимся в главах VII и VIII, здесь же рассмотрим лишь один пример обнаружения глубоких структур и один — поисков мелких объектов (с методической стороны).

На рис. 44 дана электрическая карта грозненской антиклинали. Основным материалом для построения карты изоом являются данные электропрофилей с разностью $AB = 1000$ м, сопровождаемого рядом зондирований, поставленных на крыльях складки для установления глубины погружения опорного горизонта-глин сармата. Изоомы даны для 3, 5, 10, 20, 30, 50, 75 и 100 $\Omega\cdot\text{м}$. Профили, как видим, задавались неравномерно и непрямолинейно, следуя за удобным для перемещения направлением. Длина профилей различна — от 1,2 км (профиль № 211, 251) до 12—13 км (профиль № 6), расстояния между профилями — от 0,3 до 3—3,5 км, расстояния точек по профилю — от 200 м. В средней части карты мы видим наиболее низкие сопротивления, возрастающие к краям. По данным зондирования

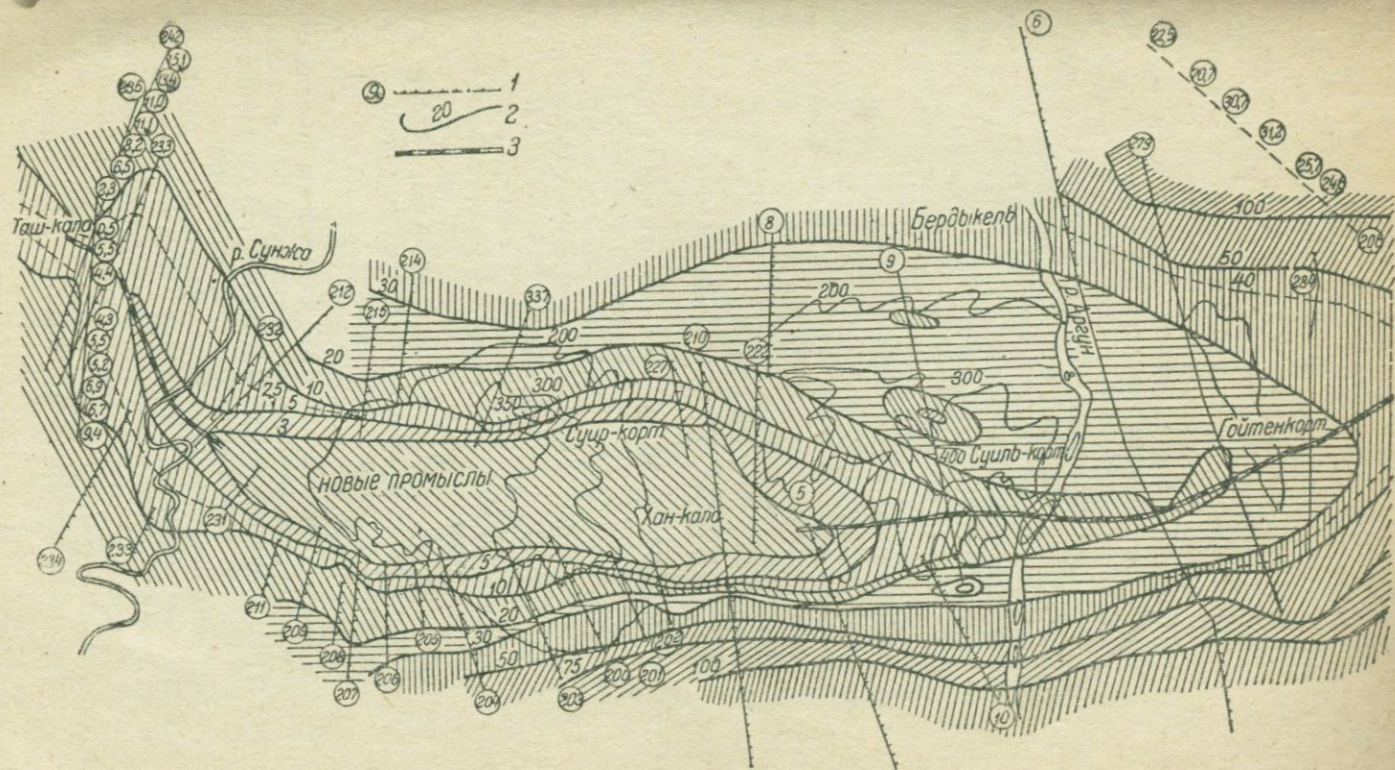


Рис. 44. Электрическая карта грозненской антиклинали при $AB = 1000$ м.
 1 — электропрофиль; 2 — кривые равных сопротивлений; 3 — ось антиклинали.

на краях эти низкие сопротивления находятся на большей глубине, чем в центре; следовательно, карта отображает антиклинальную складку. Ядро складки на данной глубине сложено сарматскими глинами (миоцен), сильно минерализованными, имеющими удельное сопротивление от 2 до 5 Ω м, выдерживающееся постоянным на очень больших площадях. Глины сармата вследствие большой их мощности и постоянства ρ являлись прекрасным маркирующим горизонтом. Отложения меотиса и плиоцена (акчагыл, апшерон) содержат помимо глин еще ракушняки и рыхлые песчаники и имеют ρ от 5 до 30 Ω м. Четвертичные отложения — лессовидные глины, пески, речные отложения — имеют сопротивление от 20 до 500 Ω м. Ось складки довольно медленно погружается сначала в восточном, а затем в северо-восточном направлении. Западная часть складки погружается сначала в северо-северо-западном направлении, а затем в северо-западном, причем здесь, судя по резким изгибам изоом, можно ожидать нарушения северо-северо-восточного простирания.

Так как изоомы в южной части складки расположены более часто, а в северной значительно реже, можно сделать заключение о крутом падении крыльев антиклинали на юг и более пологом на север. Углы падения крыльев и погружения осей могут быть определены по данным 2—3 зондирований, заданных по одному направлению, — если углы меньше 40—45°; если же углы больше 45°, — их определение становится очень трудным делом.

В качестве примера работ по прослеживанию плохо проводящих пластов по простиранию, на рис. 45 приводим часть пластовой карты лога «Крутые Топки» в Прокопьевске, построенной по данным бурения и шурфов. На карту нанесены графики профилирования схемой $AMNB$ с разносами $AB = 180$ м и $NM = 30$ м шагом 10 м, полученные Л. Я. Нестеровым в опытным порядке. Расстояния между профилями 100—150 м. Мощность наносов, определенная рядом зондирований и шурфами, колеблется от 6 до 10 м по профилю № 3, 12—14 м по профилям № 4 и 5 и около 20—25 м по профилям № 1—2. Сопротивление насосов довольно постоянно — порядка 20—25 Ω м.

Рисунок ясно указывает, что при наносах до 15 м пласты угля вполне удовлетворительно обнаруживаются и прослеживаются по характеру и расположению максимумов. Но при данной установке и наносах 20—25 м (профили № 1, 2) большинство пластов уже не отмечается и лишь наиболее мощные дают весьма слабые и расплывчатые максимумы. Некоторый выигрыш получается, если еще увеличить при таких наносах разносы AB или перейти на съемку градиентов. Однако мощность наносов порядка 25—30 м, при их проводимости лучшей, чем вмещающие уголь породы, повидимому все же является предельной для возможности прослеживания круто падающих плохо проводящих пластов.

Если плохо проводящие пласты наклонны и угол менее 60°

к горизонту, — направление их падения устанавливается по несимметричности графика. Более пологая часть графика указывает направление падения.

Нормы производительности по профилированию очень сильно зависят от величины разностей и местности; при АВ порядка 50—100 м за день можно взять от 100 до 200 точек, а при АВ=2—3 км — от 10 до 40 точек.

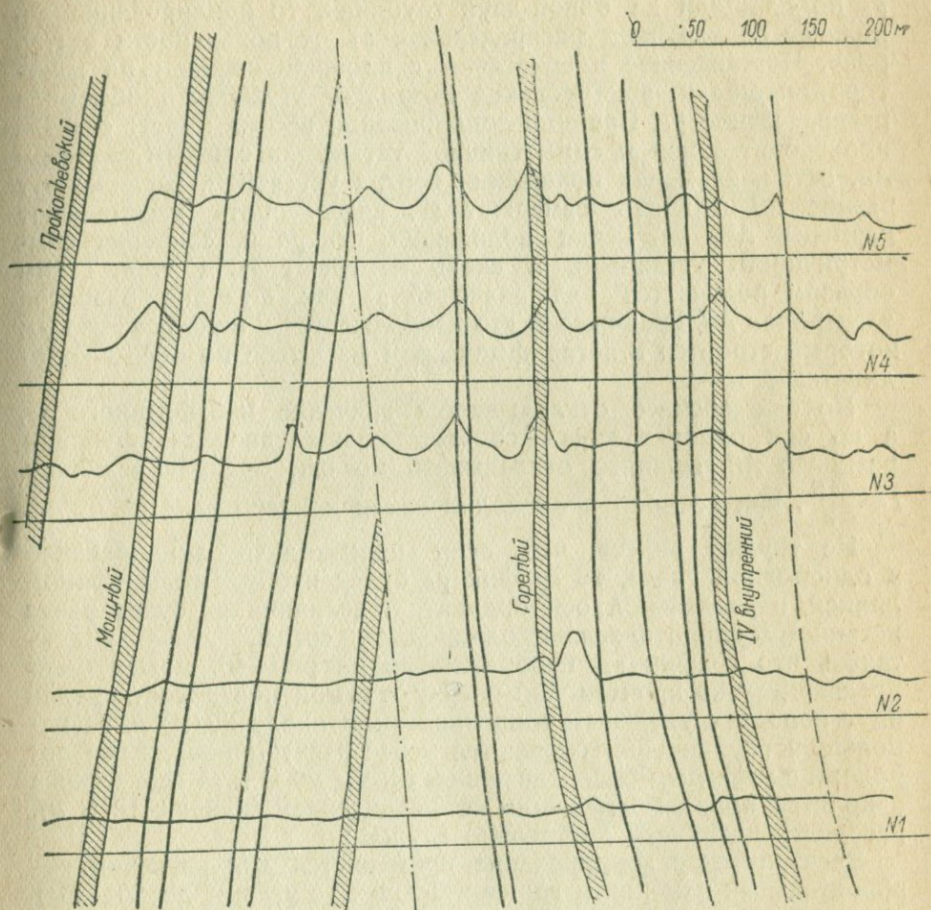


Рис. 45. Пластовая карта и электропрофили лога „Крутые Топки“ — Проктобедацк (Кузбасс) (по Л. Я. Нестерову).

Состав бригады: 2 оператора и 4 рабочих при разностях АВ до 200—300 м, а при АВ=2—3 км число рабочих может доходить до 12—15 чел.

Электронзондирование

Электрическое зондирование или, как его часто называют, электрическое бурение является, наравне с электропрофилиро-

ванием, одним из самых распространенных методов электроразведки постоянным током. Взаимо сочетаясь и дополняя друг друга, зондирование и профилирование составляют серьезный инструмент в руках разведчика при решении большого числа, главным образом, структурных задач и задач инженерной геологии.

Если электропрофилирование дает картину распределения ρ_k по площади на одной-двух глубинах, то зондирование дополняет ее картиной распределения ρ_k от поверхности в глубину. Поставленное в сочетании с профилированием на некоторой площади, зондирование позволяет установить объемное распределение ρ_k . Принцип зондирования весьма прост: сначала производят замер ρ_k симметричной установкой с малым разносом AB , затем, не меняя положения центра установки, увеличивают разнос AB и вновь замеряют ρ_k , далее опять увеличивают размеры AB , не меняя положения центра и сохраняя симметричность установки, и вновь измеряют ρ_k , и т. д. Таким образом получается ряд значений ρ_k как функция разносов электродов AB . Графически это изображается в виде графика ρ_k , который строится в логарифмическом масштабе по обоим координатным осям.

По оси абсцисс откладывается значение наблюдаемого ρ_k , а по оси ординат вниз — соответствующее значение функции разносов AB . Принято откладывать по оси ординат величину $l = \frac{AB}{2}$, при которой происходил замер данного ρ_k .

Не трудно видеть, что если производить зондирование в однородной среде, то график ρ_k будет изображаться прямой линией, параллельной оси ординат, и величина ρ_k будет равна истинному сопротивлению однородной среды. Легко видеть также, что график ρ_k , изображенный на рис. 46, может быть предварительно прочтен так: вверху от самой поверхности земли идут породы с удельным сопротивлением около $30 \text{ } \Omega \text{ м}$, на небольшой глубине они сменяются менее электропроводными породами с удельным сопротивлением свыше $60 \text{ } \Omega \text{ м}$, а еще глубже находятся породы с меньшим сопротивлением (меньше $18 \text{ } \Omega \text{ м}$), распространяющиеся достаточно глубоко.

Электрическое зондирование применяется для изучения горизонтальных или почти горизонтальных (с углами до $20\text{--}25^\circ$) структур. Правда, если производить зондирование, например, вблизи вертикального контакта двух разнородных пород, то график ρ_k не будет прямой, параллельной оси ординат, а будет отражать наличие второй среды; однако правильно расшифровать график ρ_k мы не сумеем. Теоретически доказанные приемы расшифровки графиков ρ_k предусматривают горизонтальное залегание маркирующего горизонта (или горизонтов).

Максимальная величина разносов AB , которая должна быть принята при установлении глубины залегания (H) маркирующего горизонта, зависит от величины H и проводимости вышележащих слоев. AB максимум должен быть не менее $5H$ при

слабо проводящих породах сверху и может доходить до 12—15 Н, если выше маркирующего горизонта встречаются пласты, очень хорошо проводящие. АВ минимум бывает 1—3 м. Количество разносов АВ на одном зондировании или, иными словами, количество точек, по которым строится кривая ρ_{Σ} , определяется, исходя из соображений, что каждый следующий разнос должен быть больше предыдущего в 1,3—1,5 раза.

Точки зондирования на местности располагаются в зависимости от характера стоящей задачи и глубины, подлежащей исследованию. Иногда бывает, что зондирования носят эпизодический характер и ставятся для помощи другим методам разведки в местах, определяемых потребностями этих методов; тогда вопрос о сетке отпадает. Когда же зондирование ставится на профилях или даже на площади и ему дается задача проследить некоторый маркирующий горизонт, то вопрос о сетке приобретает существенное значение. Если прослеживаемая структура имеет явно выраженное простирание, то сетка может быть прямоугольной, если же простирания не установлено, то сетку лучше делать шахматную. Соблюдение строгой геометрической сети совершенно не обязательно; наоборот, гораздо продуктивнее будет, если сеть выдерживается только примерно, а зондирования ставятся в точках, где их легче всего технически осуществить (по возможности не попадают в болота, леса, поселки и т. д.), но, конечно, без ущерба качеству и полноте работы.

При расположении точек наблюдений нужно помнить, что учет влияния рельефа не может быть произведен достаточно точно и правильно; поэтому профили и разносы АВ при зонди-

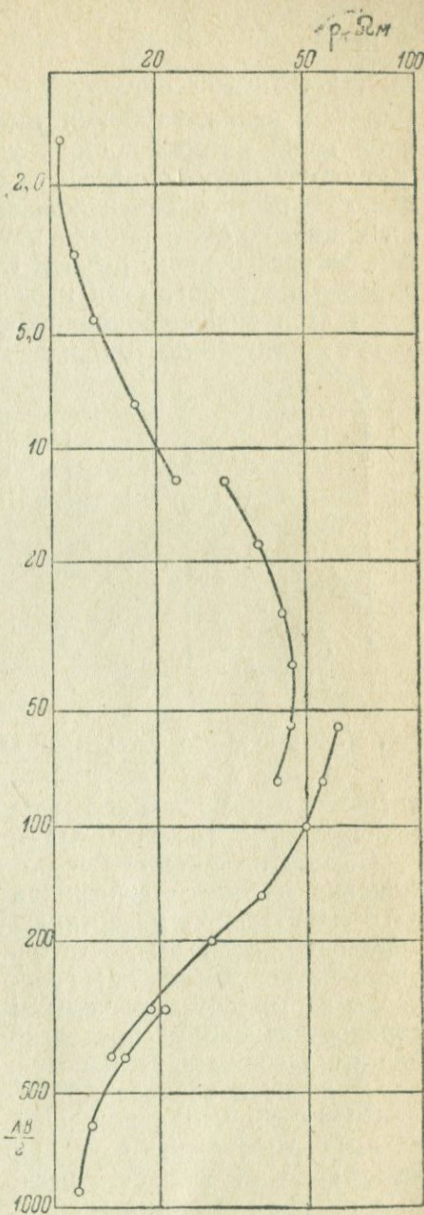


Рис. 46. График ρ_{Σ} .

ровании надо, по возможности, направлять по ровному месту вдали от гор или крутых обрывов. Теория и практика говорят, что крупные неровности рельефа начинают вносить ошибки в наблюдения порядка 1—2%, если хотя бы один из питающих электродов подойдет к ним на расстояние порядка $\frac{2AB}{3}$.

Работа в узких, глубоких ущельях и саях должна проводиться с большой осторожностью, учитывая эти данные.

Густота сети определяется глубиной залегания маркирующего горизонта. Точки должны ставиться тем чаще, чем ближе он к поверхности; однако нет смысла располагать точки чаще, чем на расстояниях, равных глубине искомого горизонта. Иногда же, наоборот, если известно, что маркирующий горизонт ведет себя очень спокойно, расстояния между зондированиями могут достигать до 10 H и даже более. Поэтому при правильном

оперативном руководстве работами расположение точек зондирования не равномерное, они сгущаются там, где опорный горизонт приближается к поверхности и разрежаются при его погружении. Электрондирование обычно обозначается на карте кружком со стрелками в две стороны; направление стрелок и их

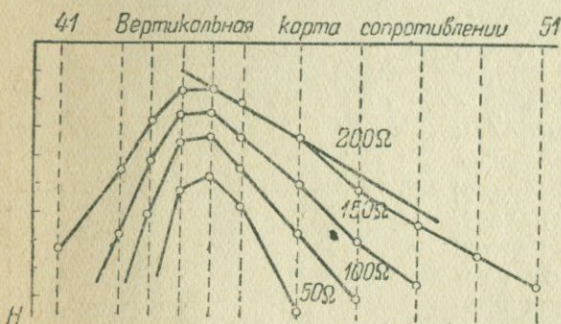


Рис. 47. Вертикальная карта изоом над проводящей линзой.

величина в масштабе карты определяют направление и величину максимальных разносов электродов AB.

Обработка материалов по зондированию сводится к вычерчиванию отдельных графиков ρ_k и к построению карт изоом в горизонтальной и вертикальной плоскостях. По данным зондирований, если их достаточно много, полезно и нужно, при учете ранее сделанных оговорок, построить карты изоом или карты изома для одинаковых разносов AB, т. е. карты примерно горизонтального распределения ρ_k по площади. Величина ρ_k для построения карт непосредственно снимается с графика ρ_k для заданного разноса AB.

Очевидно, что таких карт изоом или изома может быть сделано достаточно большое количество для разных горизонтов. Вместе с тем, если есть несколько зондирований, расположенных по прямой линии (или приблизительно по прямой), можно построить карту изоом или изома в вертикальной плоскости, проходящей через данные точки. Способ построения такой карты понятен из рис. 47, представляющего карту изоом в вертикальной плоскости, пересекающей хороший проводник (составлена инж. В. А. Шпак на основании данных модельных работ). Хо-

рошо проводящее рудное тело также изображено на рис. 47.

Масштаб при построении вертикальных карт изоом может быть 1 : 1 или (горизонтальный : вертикальный) 1 : 5, или 1 : 10 и т. д.

Интерпретация кривых зондирования осуществляется путем сличения практически наблюдаемых графиков ρ_k с теоретически рассчитанными — палетками ρ_k и представляет иногда довольно трудную задачу. Конечным итогом расшифровки кривой зондирования должно являться установление глубин до некоторых горизонтов и построение литологического разреза. Для того, чтобы это могло быть выполнено, даже в простейших случаях необходимо знание удельных сопротивлений пород, для чего должны быть произведены замеры их на обнажениях, в выработках и скважинах, т. е. сделаны так называемые параметрические замеры. Они должны проводиться в начальный период работы на участке и охватывать возможно большее количество обнажений и выработок; при этом надо стремиться к тому, чтобы опробовать свежие, еще не выветрелые породы.

Проще интерпретируются так называемые двухслойные кривые ρ_k , когда требуется найти лишь одну глубину и сопротивление верхнего и нижнего слоя, мощность которого велика.

На рис. 48 приводим кривую зондирования, выполненного А. С. Семеновым и Б. Н. Достоваловым в районе ст. Невинномысской с максимальным разносом $AB = 10\,000$ м. Майкопская свита, форамениферовые слои, меловые и возможно юрские отложения не дифференцируются, имея сопротивление около 4,5—5 Ω м. Первой границей, отбиваемой путем сличения этой кривой с двухслойной палеткой, являются кристаллические породы, устанавливаемые, примерно, на глубине 2700 м.

Гораздо сложнее интерпретировать трехслойные кривые, пример которых был уже приведен на рис. 46, и еще сложнее многослойные. Для расшифровки существуют десятки палеток, но более или менее достоверное определение глубин h_1 и h_2 и т. д. возможно лишь если известны сопротивления нижнего и других слоев. Благоприятствует расшифровке наличие чередующихся сопротивлений по глубине и не благоприятствует — когда сопротивления с глубиной нарастают или, наоборот, падают.

На рис. 49 представлен график ρ_k , снятый около г. Сальска. Здесь можно выделить 4 горизонта (не считая поверхностного слоя): 1) четвертичные отложения, имеющие $\rho = 4 \Omega$ м, 2) третичные — $\rho = 14 \Omega$ м, 3) майкоп и мел — $\rho = 1,3 \Omega$ м (подтверждено по данным кароттажа), 4) кривая дает ρ_k , стремящаяся к бесконечности, что соответствует карбону и докембрию.

Далеко не всегда количество границ раздела, полученное на графиках ρ_k , равно количеству литологически различных горизонтов. В большинстве случаев электроразведка дает меньше границ раздела, чем их реально существует, усредняя в один несколько слабо дифференцированных или маломощных пластов.

Бывает и так, что внутри одного стратиграфического горизонта выделяются несколько границ раздела, обусловленных наличием водоносных горизонтов или переходом из глинистой в песчанистую фацию и обратно.

Если анизотропные породы перекрыты изотропными наносами, то мощность наносов может быть установлена с помощью электротондирований и палеток достаточно точно. Теория и практика показывают, что если мы ищем мощности анизотропных горизонтально расположенных свит, то глубины, определяемые с помощью палеток, будут кажущимися глубинами (h_k),

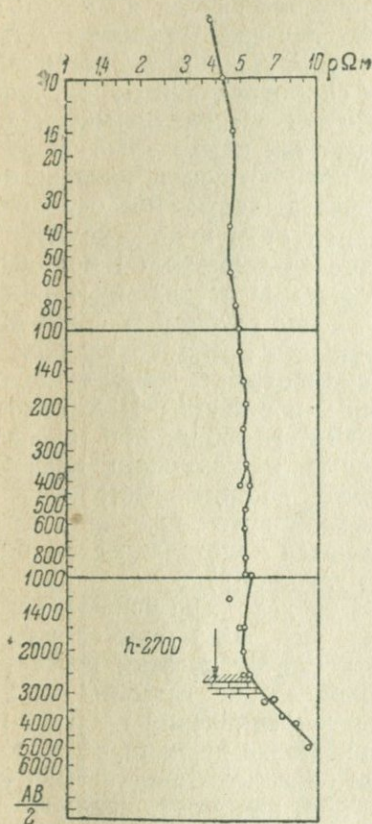


Рис. 48. Кривая зондирования около ст. Невинномысской.

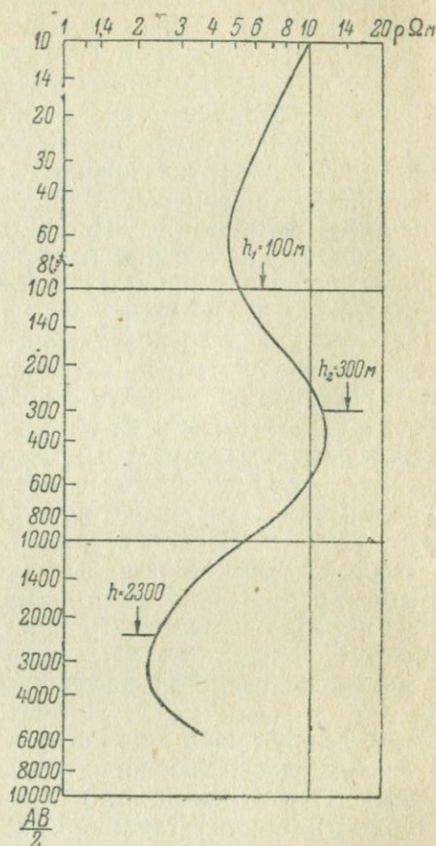


Рис. 49. Кривая зондирования около г. Сальск.

большими истинных. Связь между h_k и $h_{ист}$ устанавливается формулой:

$$h_k = h_{ист} \lambda, \quad (21)$$

где λ — коэффициент анизотропии.

Последнее обстоятельство нужно учитывать при электротондировании в осадочных образованиях. Однако поверхностных наблюдений недостаточно для того, чтобы найти λ . Наиболее надежным путем установления λ (среднего для района) является путь сличения истинных глубин, определенных скважиной, с глубинами, получаемыми по палеткам при зондировании около

механических скважин; чем больше таких определений, — тем точнее удастся отбить глубины пород, перекрытых анизотропными свитами.

По ряду кривых зондирований может быть построен разрез, если удалось идентифицировать пласты и перейти от ρ_k к ρ отображаемых им пород. Пример дан на рис. 50, изображающем разрез по профилю Сальск-Котельниково протяжением в 175 км, построенный на основании 8 электрозондирований, одно из которых приводилось уже на рис. 49. Вверху разреза дан электропрофиль, построенный по зондированиям.

Если зондирование проводилось по площади, то могут быть построены гипсометрические карты кровли или подошвы ряда отбиваемых горизонтов; с этим мы встретимся в главе VII.

Производительность по методу зондирования сильно колеблется в зависимости от величины разносов АВ, характера местности и других условий. При разносах АВ до 100 м можно сделать до 15 зондирований, при разносах до 1 км — до 6—7 зондирований, а при разносах до 8—10 км не всегда удается сделать даже 1 зондирование в день. Соответственно и стоимость зондирования варьирует в очень широких пределах: от 20—30 руб. при малых разносах АВ до 500—1000 руб. при больших АВ. Зимой работа возможна, но нормы снижаются, в среднем, на 25—50%.

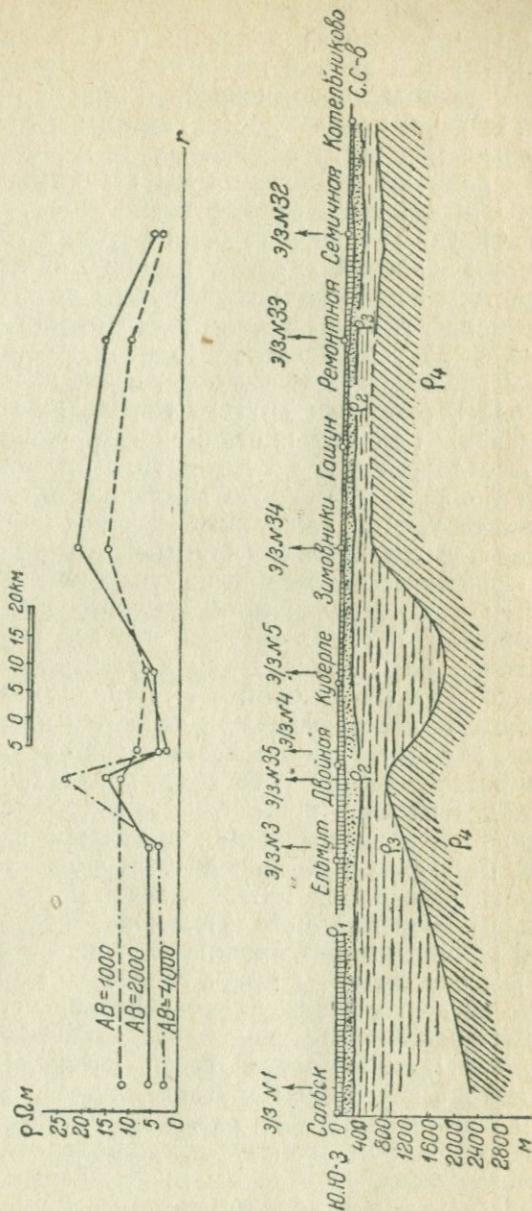


Рис. 50. Разрез Сальск — Котельниково, построенный по электрозондированиям.

§ 11. МЕТОДЫ ИЗОЛИНИЙ, ИНТЕНСИВНОСТИ И ИНДУКЦИИ

Рассматриваемые в данном параграфе методы имеют много общего как в смысле их физических основ и аппаратуры, так и в смысле области применения и приемов расшифровки наблюдений. Все они используются, главным образом, для поисков сульфидных и полиметаллических месторождений; с конкретными примерами их применения мы встретимся в главе VIII части II этого курса. В настоящее время еще точно не установлено, — где следует употреблять один метод, а где другой; ряд преимуществ и недостатков есть у каждого из этих методов, и поэтому в каждом конкретном случае надо решить, сообразуясь с условиями работ, какому из методов отдать предпочтение. При выборе следует учитывать, что по существу решаемых задач методы сходны, а поэтому перекрытие площадей, заснятых одним методом, работами другого метода не может считаться рациональным. Правда, иногда, когда рудные тела расположены близко друг к другу и для метода изолиний и интенсивности создают общую суммарную аномалию, тогда детализацию, расчленение ее удастся выполнить методом индукции, и в этом случае такое последовательное применение методов вполне законно.

Применимость рассматриваемых методов к поискам сульфидных и полиметаллических месторождений, наравне с другими причинами, обусловлена тем, что эти объекты часто имеют достаточно большую разницу в электрическом сопротивлении по сравнению с вмещающими их породами. Однако причинами, могущими вызвать аномалии, являются наравне с рудными объектами, например, такие: местное узко локализованное увеличение мощности наносов, особенно когда они вытянуты (лога, сая и т. д.); местное повышение электропроводности наносов, вызванное локализованным повышением влажности или содержания растворенных минерализаторов, тонкие пакки (пласты) хорошо проводящих пород, зажатые, среди плохо проводящих, линии нарушений с значительной зоной, выполненной обводненным глинистым материалом, и т. п.

Все эти причины могут создавать аномалии, весьма похожие друг на друга, и задача установления того, какая аномалия вызвана рудным объектом, а какая безрудным — является крайне трудной. Как и во всех геофизических методах, установлению характера аномалии помогает знание и учет геологии и гидрогеологии района работ, характера возможного оруденения, топографии района, характера и мощности наносов и т. д. Некоторую помощь оказывают также обязательные к проведению до или параллельно поисковым работам параметрические замеры (замеры удельных сопротивлений пород) на выходах и выработках, причем особое внимание должно быть обращено на установление электрической однородности или дифференциации наносов как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении.

В ряде случаев оказывают значительную помощь другие геофизические методы, например, метод измерения естественных

полей, зондирование и физико-химические методы. Метод измерения естественных полей и метод капельных индикаций должны всегда использоваться на аномальных участках планшетов метода изолиний, интенсивности или индукции. Они дадут указание на наличие или отсутствие естественных электродвижущих сил и усиленной концентрации ценных элементов месторождения (например, меди, цинка и т. д.) в наносном слое на участке аномалии, а это в совокупности с другими данными поможет в решении вопроса о характере аномалии.

Применение зондирования весьма полезно для установления мощности наносов в районе аномалии. Действительно, расположив 5—7 зондирований с разнесами до 100—200—300 м по профилю вкрест простирания аномалии, примерно, в ее середине, можно будет построить примерный геологический разрез, а следовательно, установить роль наносов в создании аномалии. Вообще следует принять за правило, что получив в поле аномалию, нужно найти в поле же и объяснение ей путем постановки детализационных работ этим же методом, постановки других видов геофизических работ, изучения геологии, топографии и физических свойств пород района аномалии, а, может быть, и постановки небольших горно-разведочных работ. Никогда не следует откладывать объяснение аномалии на период окончательной обработки, так как обычно этот период не приносит новых данных для решения обратной задачи геофизики.

Метод изолиний

Метод изолиний или, как его часто называют, метод эквипотенциальных линий или метод Лундберга впервые был использован в 1919 г. Лундбергом. В СССР применение метода началось с 1924—25 гг., главным образом, для поисков сульфидных месторождений на Урале и в северных частях страны. В силу простоты и наглядности, метод очень быстро нашел весьма широкое применение.

Электрический ток вводится в землю с помощью двух линейных параллельных электродов *A* и *B* (рис. 51), имеющих длину по 800—1200 м каждый и расположенных на расстоянии, чаще всего равном длине электродов. Практически электроды представляют собой голый, луженый провод, раскладываемый прямо по земле и для улучшения контакта прикрепляемый через 3—5 м железными шпильками длиной 0,4—0,5 м и диаметром 1—1,5 см, забиваемыми в наносный слой. Электроды соединены с источником тока *G* изолированным проводником *II*, также обычно раскладываемым по земле или подвешиваемым на деревьях и кустах. Внутри планшета прослеживаются линии равного потенциала — изолинии. Если на участке среда однородная и нет хорошо проводящих электрический ток тел, то тогда изолинии будут иметь вид, изображенный на рис. 51 сплошными линиями. Здесь же проведены пунктиром пути распространения тока по земле — токовые линии, всегда перпендикулярные изолиниям.

Ток в землю можно пускать и переменный и постоянный. Если вводится переменный ток, то тогда в качестве источника тока (I) употребляется обычно электромагнитный преобразователь, специально сконструированный для электроразведки — в практике называемый «пищиком». Он преобразует постоянный ток от аккумуляторов в ток звуковой частоты порядка 500—1000 пер/сек. Изолинии в этом случае непосредственно прослеживаются на местности, и затем топографом с помощью мензуральной съемки наносятся на план. Прослеживание осуществляется с помощью искательной цепи, состоящей из двух железных тросточек — щупов с включенным между ними телефоном — наушниками. Две точки, располагаемые обычно на расстоянии 15—20 м одна от другой, находятся на линии равного потенциала, если в искательной цепи в телефоне отсутствует

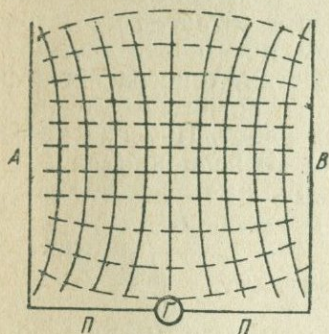


Рис. 51. Нормальное поле линейных электродов.

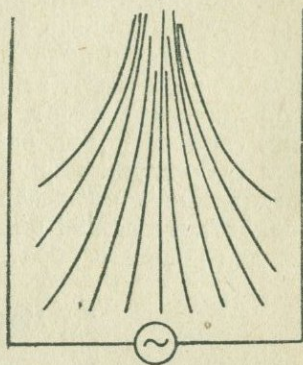


Рис. 52. „Самоварный эффект“.

звук, хотя установка работает и щупы касаются земли. Изолинии прослеживаются легко и бригада из наблюдателя и двух рабочих может за рабочий день найти до 200—300 точек равного потенциала, т. е. проследить до 4—6 изолиний километровой длины.

В тех случаях, когда применение переменного тока влечет за собой появление мешающих индукционных явлений, приводящих к так называемым «самоварным эффектам» (рис. 52) (это наблюдается чаще в более южных районах СССР), когда прослеживаемые изолинии стягиваются к центру планшета, — следует вводить в землю постоянный ток от аккумуляторов. В этом случае снимаются с помощью потенциометров, описанных сжато ранее, разности потенциалов между отдельными точками планшета, расположенными по квадратной сетке, а изолинии наносятся на план графическим путем подобно тому, как строятся горизонтали по высотным отметкам отдельных точек. Производительность этого варианта работ, примерно, такая же, как и при применении переменного тока, но требуется более квалифицированный наблюдатель, так как потенциометр гораздо более сложный и дорогой прибор, чем наушники.

В обоих случаях целесообразно вести работу на планшете 2—3 бригадами, которые за день успеют снять весь планшет размером порядка 1 км². Стоимость 1 км² будет 800—2000 руб., в зависимости от района и объема работ.

✓ Тот вид изолиний, который изображен на рис. 51 для нормального поля, нарушается, коль скоро в земле имеются включения, отличающиеся по проводимости от окружающих пород. Токовые линии концентрируются в теле, если оно обладает лучшей проводимостью, чем вмещающие породы, а, следовательно, изопотенциальные поверхности охватывают, оконтуривают тело хорошей проводимости, и на поверхности земли это проявляется в виде разрежения изолиний — аномалии — в районе проекции тела на дневную поверхность (на рис. 53 изолинии нанесены сплошными линиями, токовые линии — пунктиром). Наоборот,

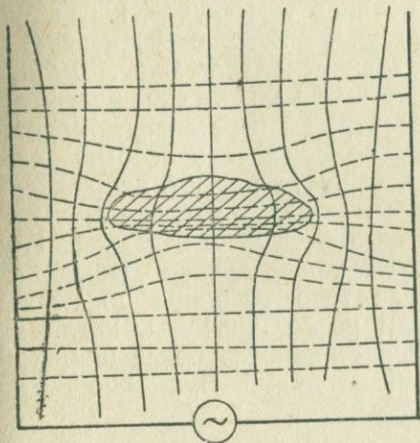


Рис. 53. Аномальное поле Лундберга над проводящим телом.

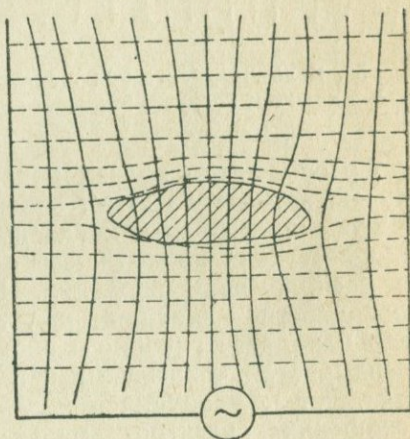


Рис. 54. Аномальное поле Лундберга над телом плохой проводимости.

токовые линии огибают тело плохой проводимости, и на поверхности земли это проявляется в виде некоторого сгущения изолиний в районе проекции тела (рис. 54). Следует заметить, что искажения поля от плохо проводящих объектов меньше, чем искажения от хорошо проводящих тел при прочих равных условиях.

Выявление аномалии зависит в весьма сильной степени от того, как ориентированы электроды; максимально резкая аномалия получается тогда, когда электроды заданы вкрест простираения проводника, и проводник может быть пропущен, если электроды ему параллельны. Наоборот, если ищется плохой проводник, то электроды следует располагать параллельно телу, так как при положении электродов вкрест простираения легко пропустить этот плохой проводник. Если проводящее тело имеет склонение, то аномалия получается однобокой — пример такой аномалии дан на рис. 55. Здесь левый конец проводящей пластины находится на глубине 6,4 см от поверхности воды, а пра-

вый конец — на глубине 1,0 см. Если тело имеет падение (рис. 56, а), то аномалия получает несимметричный вид. Более пологие и плавные изгибы изолиний указывают направление падения тела; наибольшая асимметрия наблюдается при углах порядка 45° ; как при увеличении, так и при уменьшении углов асимметрия уменьшается. Практически доказано, однако, что определение угла падения по асимметрии изолиний невозможно, ввиду наличия большого числа других осложняющих картину факторов. Рис. 56, б дает представление о характере аномалии в том случае, когда проводник имеет одновременно и падение и склонение.

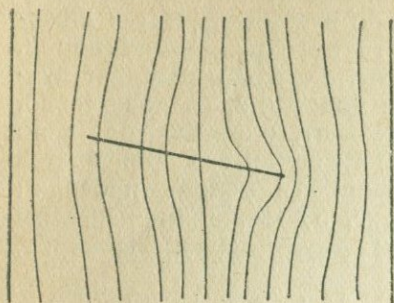


Рис. 55. Поле Лундберга над телом, имеющим погружение.

оно расположено вблизи поверхности. На рис. 57 изображены случаи, когда тело имеет значительную длину и сразу попадает под оба электрода и когда протяженность тела невелика. Глубина залегания проводящего объекта также сильно сказывается на расположении изолиний. Когда тело расположено вблизи поверхности — изолинии над телом резко изогнуты, когда же тело находится глубоко — аномалия становится более широкой, расплывчатой, с плавными изгибами изолиний. Примерно так же действует и величина отношения электропроводностей вмещающих пород и проводящего объекта; если это отношение велико — изолинии резко изогнуты; при сравнительно небольших значениях относительной электропроводности изолинии становятся более плавными. Практически нельзя ограничить действие

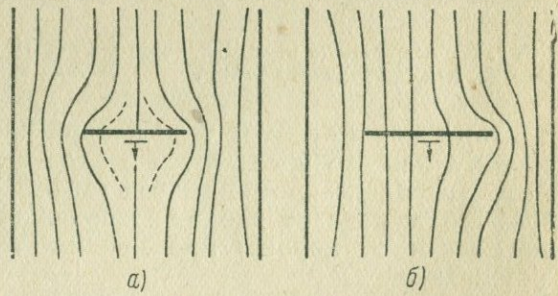


Рис. 56. Аномалии над телом, имеющим падение (а) и падение и склонение (б).

глубины залегания и отношения проводимостей; поэтому задача установления глубины проводящего объекта по изолиниям решается лишь грубо качественно. Мощность проводящего объекта действует в сторону усиления аномалии с одновременным некоторым сглаживанием резких изгибов — сравнение рис. 58 и 59 это наглядно показывает (пластины расположены на одинаковой глубине от поверхности). Наиболее резкие аномалии, при про-

чих равных условиях, создают круто падающие вытянутые проводники — жилы, линзы; гораздо слабее проявляются на поверхности земли тела более изомерные и горизонтально расположенные: штоки, пластовые залежи и т. д.

Если проводящих объектов на планшете не один, а несколько, то все они могут быть выявлены лишь тогда, когда расположены друг от друга на значительных расстояниях. Близлежащие тела создают общую аномалию, действуя так, как будто бы под землей было более

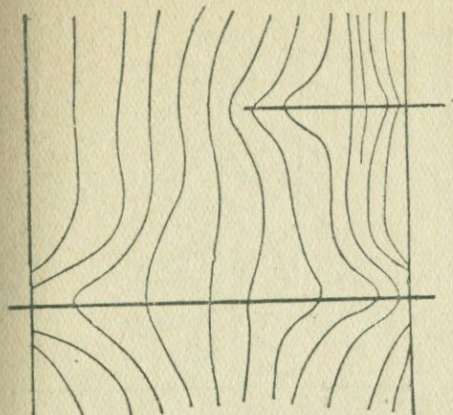


Рис. 57. Поле Лундберга над телом, выходящим за пределы планшета.

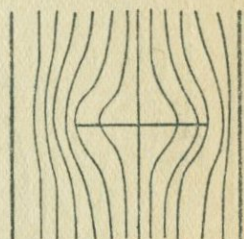


Рис. 58. Изолинии над телом небольшой мощности.

мощное тело (рис. 60, где две пластины размером $20 \times 20 \times 0,3$ см расположены на глубине 1,5 см от поверхности и на расстоянии 3,0 см друг от друга). Те же пластины, но раздвинутые до 4,3 см, уже могут быть выявлены раздельно (рис. 61). На рис. 62

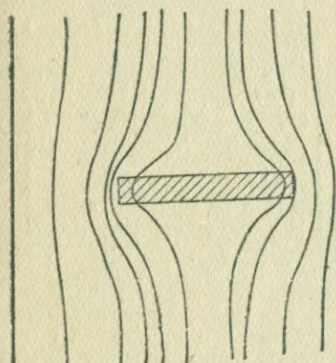


Рис. 59. Аномалия мощного тела.

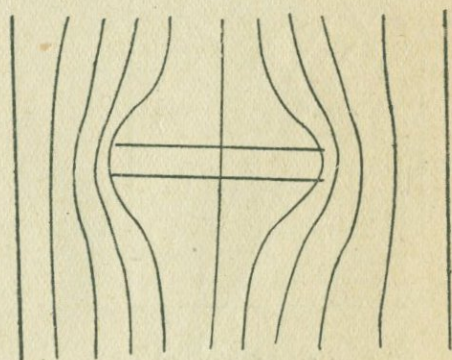


Рис. 60. Аномальное поле над двумя близко расположенными телами.

даются, в качестве примера, еще некоторые случаи взаимного расположения проводящих тел. Планшет снят в Карабаше в 1929 г.

Если в силу каких-либо условий одна часть электрода заземлена плохо, то получается «перекос поля», резкость которого

зависит от того, насколько неравномерно произведены заземления. На рис. 63 изображен «перекос поля», произошедший потому, что верхний конец левого электрода оказался плохо заземленным — пунктиром нанесены токовые линии. Иногда бывает объединенное действие «самоварного эффекта» и «перекоса

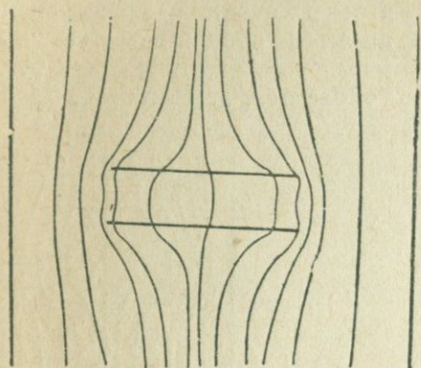


Рис. 61. Аномальное поле над двумя раздвинутыми телами.

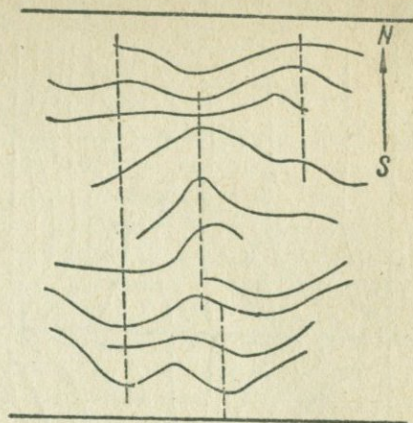


Рис. 62. Планшет поля Лундберга в Карабаше.

поля»; в этом случае концентрация изолиний происходит не к середине, а к одному из углов планшета.

✗ Уже отмечалось, что интерпретация получаемых аномалий является трудным делом и требует привлечения других данных.

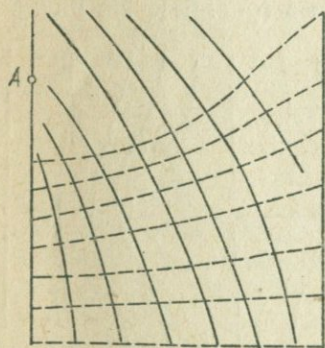


Рис. 63. «Перекос поля».

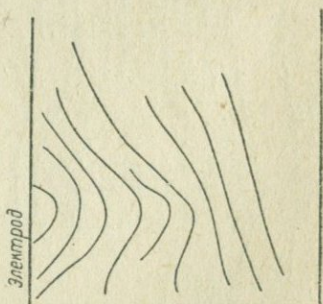


Рис. 64. Аномалии на Андреевском руднике.

Сам характер изолиний может дать лишь некоторый, небольшой материал для расшифровки. Например, для Урала, на основании опыта, можно все аномалии метода изолиний разделить на три типа: 1) аномалии, связанные со сплошными колчеданными телами; 2) аномалии, вызванные кварцево-серицитовыми, кварцево-хлоритовыми, графитистыми и кремнистыми сланцами,

3) аномалии, вызванные поверхностными явлениями, — неравномерной мощностью проводящих наносов, неравномерным удельным сопротивлением наносов, зонами разломов и трещин, заполненных рыхлым, влажным материалом, и т. д.

Аномалии третьего типа могут быть разделены на аномалии, вызванные проводниками, выходящими на поверхность, и проводниками, прикрытыми наносами. Аномалии проводников, выходящих на поверхность, если они пересекаются электродом, характеризуются изгибом изолиний в сторону планшета; пример — рис. 64, аномалия на Андреевском руднике. Если выходящие на поверхность более влажные наносы попадают в середину планшета, то они часто не будут проявляться в виде аномалии, так как разница в проводимости их с соседними частями наносов не может достигнуть большого значения. Аномалии этого же типа, но прикрытые наносами, если разница в проводимости достигает больших значений, будут очень похожи на аномалии от рудных объектов; но так как в большинстве случаев нет оснований ожидать очень большой разницы в проводимостях проводников этого типа и окружающих их пород, то аномалии могут быть наблюдаемы со сравнительно небольшой глубины (вряд ли свыше 20 м).

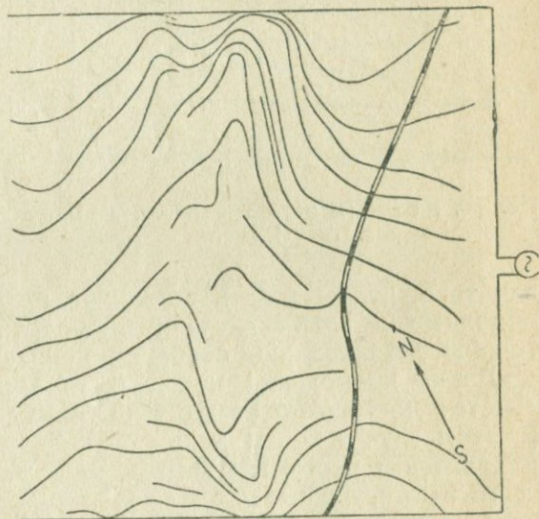


Рис. 65. Аномалии в Карабаше.

Аномалии второго типа, происходящие от сланцев, могут иметь весьма резкий вид; они характеризуются, если сланцы подходят под заземления, постепенным уменьшением кривизны изолиний по мере удаления от электродов, пример — рис. 65 — аномалии над полосами кварцево-серицитовых сланцев, сильно обогащенных сульфидами, расположенных в заболоченном участке под наносами малой мощности в Карабаше.

Аномалии над сланцами, когда они по протяжению меньше размеров планшета и располагаются в его средней части, характеризуются тем, что их длина велика и превышает, как правило, возможную длину рудных тел.

Часто сланцы, расположенные внутри планшета, даже не дают заметных аномалий. На рис. 66 изображены три планшета, снятые в районе реки Салды; два из них выявляют аномалию над

сланцами, когда общий электрод пересекает их, а планшет, заданный так, чтобы сланцы оказались в его середине, нормален.

Аномалии над сплошными сульфидными телами, расположенными внутри планшета, характеризуются тем, что кривизна изолиний увеличивается от середины аномалии к концевой зоне (рис. 65).

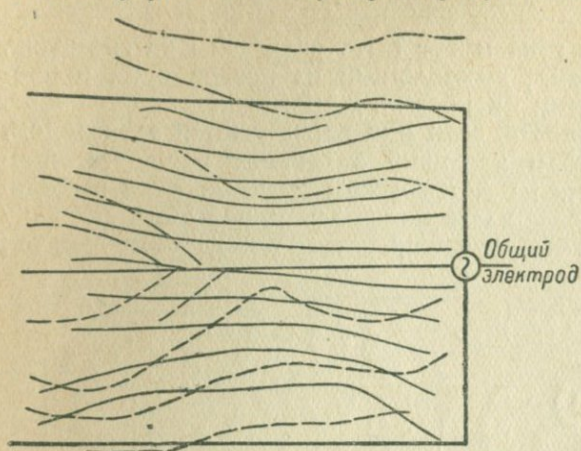


Рис. 66. Планшеты метода изолиний в районе реки Салды.

Однoboкие аномалии помимо того, что могут указывать на скатывание проводника, могут получаться также вследствие наличия на планшете нескольких тел, соответственным образом расположенных; например, на рис. 67 дан планшет, снятый на Левихе V с указанием осей проводников. Ясно, что

для того, чтобы делать возможно правильные заключения, необходимо в таких случаях проводить дополнительную очень точную детализацию, особенно концевых зон.

Длина проводника может быть приближенно найдена, если имеется достаточно резко выраженная двусторонняя аномалия. В этом случае конец тела находится в месте, где максимально сгущены изолинии; на рис. 59 это более или менее наглядно видно.

Что касается мощности тела, глубины залегания и углов падения и скатывания, то здесь данные, получаемые методом изолиний, недостаточны для того, чтобы делать какие-либо цифровые заключения, хотя в благоприятных случаях четких аномалий можно делать качественные заключения на основе тех соображений, которые высказывались ранее.

Пользуясь замечаниями, изложенными выше, о различии аномалий разных типов, следует, конечно, иметь в виду, что они

Рис. 67. Аномалии на Северной Кузнециле.

94

сделаны с целым рядом упрощающих положений и могут быть утилизированы, когда аномалия ясная, и только с учетом других данных, о которых говорилось в начале данного параграфа.

Метод интенсивности

Другим методом переменного тока, применяемым при поисках сульфидных и полиметаллических месторождений, является метод интенсивности. При этом методе в землю вводится ток частоты 500 пер/сек с помощью двух заземлений *C* и *D* (рис. 68). Так как магнитное поле зависит, помимо прочих причин, от расположения кабеля, подводящего ток к заземлениям, то для того, чтобы не делать осложнений в работе от произвольной формы кабеля, в СССР принята форма полупетли (полуквадрата) *GAC* и *GBD*.

Переменный ток вырабатывается особой установкой, состоящей из двигателя внутреннего сгорания в 2—3 лс, приводящего в движение динамомашину на 1—1,5 кВт и с напряжением 110 В. Параллельно динамомашине для выравнивания напряжения, подаваемого на мотор-генератор, включается буферная батарея щелочных аккумуляторов Си-1 на 110 В. Динамомашину

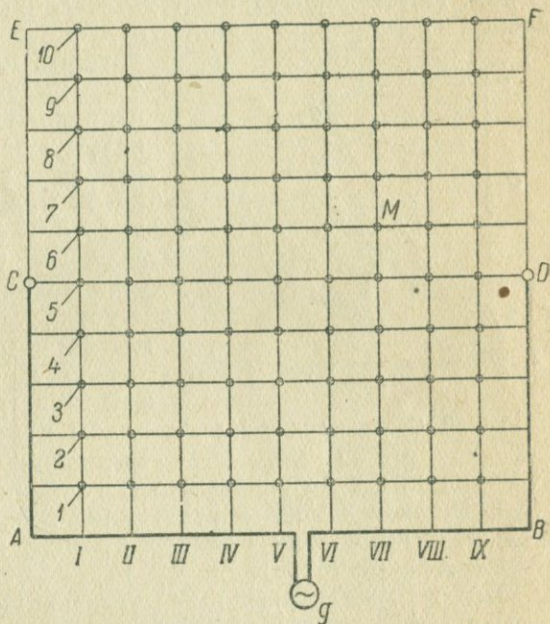


Рис. 68. Планшет метода интенсивности.

на питает мотор постоянного тока, насаженный в одном корпусе и на общем валу с альтернатором, дающим переменный ток 500 пер/сек с напряжением 220 В. Мотор с альтернатором, применяемый при методе интенсивности, называется мотор-генератором типа ОП-0,5. Для управления динамо и мотор-генератором имеются специальные распределительные щиты и частотомер, а для возможности регулировки напряжения, подаваемого в полупетлю, включается специальный секционированный трансформатор. Вся генераторная установка весит 0,4—0,5 т, в поле располагается в особой моторной палатке и требует для ухода квалифицированного электромеханика. Провод, подводящий ток от генератора к заземлениям, или раскладывается прямо по земле или подвешивается на кустах и деревьях; он должен обладать хорошей изоляцией. Магнитное поле из-

меряется внутри полного квадрата $AEFB$ в отдельных точках, располагаемых чаще всего по квадратной или прямоугольной сетке. Величина магнитного поля помимо формы кабеля зависит от силы тока, вводимого в землю, от его частоты, от электропроводности пород, расположенных в пределах планшета $AEFB$, от величины планшета и от положения точки, в которой измеряется поле. Чтобы упростить расшифровку наблюдений, обычно силу питающего тока и его частоты держат постоянными при работе на данном планшете. В этих условиях интенсивность магнитного поля зависит от положения точки на планшете, величины планшета и распределения проводимостей пород. Интенсивность поля устанавливается с помощью специальной секционированной индукционной рамки, в витках

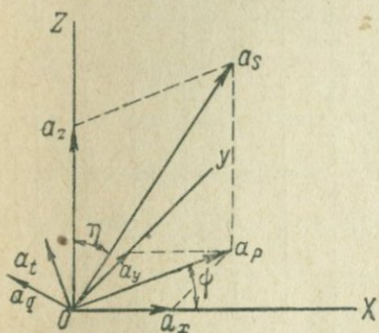


Рис. 69. Составляющие поля.

которой при пропускании по земле тока индуцируется некоторая электродвижущая сила, пропорциональная величине поля. Эта переменная электродвижущая сила очень мала (порядка микровольт); для того чтобы ее измерить, она сначала усиливается ламповым усилителем, а затем выпрямляется и тогда уже измеряется гальванометром — милливольтметром, Усилитель и выпрямитель специальной конструкции помещаются в одном приборе, носящем название аудионного вольтметра АД-500.

Рамка имеет вертикальную и горизонтальную оси вращения; это позволяет измерять следующие величины (рис. 69):

- 1) a_s — амплитуду полного вектора напряжения магнитного поля в данной точке;
- 2) a_p — горизонтальную составляющую вектора поля;
- 3) a_z — вертикальную составляющую вектора поля;
- 4) η — (угол эта) — угол между a_s и a_z ;
- 5) ψ — (угол пси) — угол между a_p и направлением линии, по которой производятся наблюдения.

Наиболее характерными величинами являются a_p и a_z . Если среда под планшетом однородна, т. е. поле нормальное, то a_p и a_z зависят от координат точки измерения и величины параметра $p = 4nl\sqrt{5v\gamma}$, где l — длина CD в км, v — частота тока и γ — электропроводность пород под планшетом.

Для сети, изображенной на рис. 68, сделаны расчеты магнитного поля для различных значений параметра p от нуля (постоянный ток) до 3,0.

На рис. 70 изображены нормальные графики горизонтальной составляющей (a_p) для разных параметров для V линий поля, а на рис. 71 — графики a_z для той же линии. На рис. 70 приведен пунктиром график a_p для I и IX линий поля при $p = 0$, а на рис. 71 — график a_z для тех же линий. Как видим, ближе к за-

землеям графики a_p и a_z имеют значительно более резкий характер, что мало благоприятно для выделения на подобных графиках аномальных мест. Помимо профилей a_p и a_z , поле может быть охарактеризовано картами распределения a_p и a_z . На рис. 72 приведена нормальная карта a_p для параметра $p=0$, а на рис. 73 — карта a_z — для того же параметра.

Если в пределах планшета метода интенсивности на некоторой глубине от поверхности земли расположено включение иной проводимости, чем вмещающие его породы, то токовые линии поля претерпят изменение, а, следовательно, изменится и распределе-

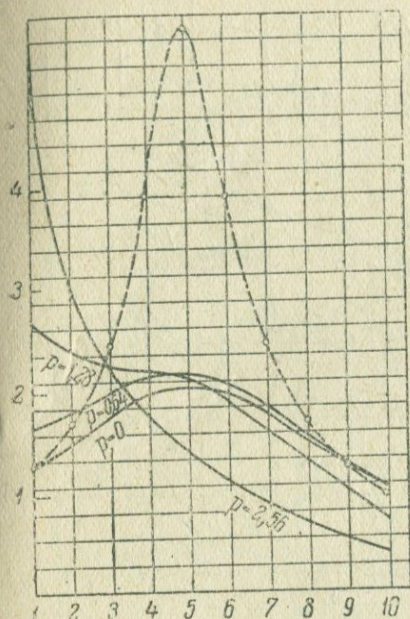


Рис. 70. Нормальные графики горизонтальной составляющей (a_p).

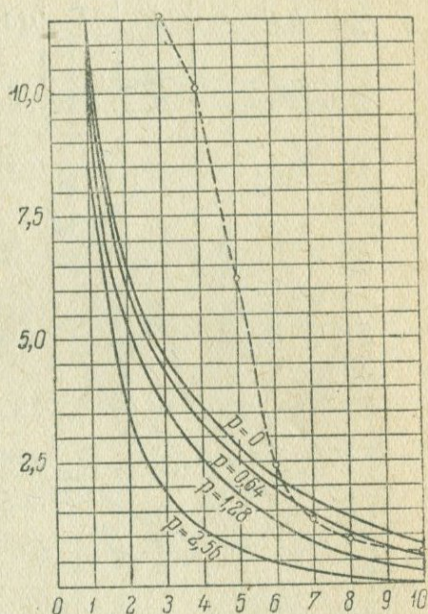


Рис. 71. Нормальные графики вертикальной составляющей (a_z).

ние магнитного поля тока. Если для простоты рассуждения допустить, что под землей расположен проводник линейной формы, лежащий по направлению от одного заземления к другому, то можно будет хотя бы качественно посмотреть, как будет выглядеть магнитное поле над таким проводником. На рис. 74 (представляющем сечение планшета плоскостью, проходящей через какую-либо линию планшета перпендикулярно дневной поверхности) А — сечение проводника, 1, 2, 3... — точки профиля. Токовые линии концентрируются в проводник за счет некоторого разрежения их в окрестностях проводника, тогда как вдали от проводника они изменений не претерпевают. Рассмотрим, как будет вести себя a_p , если производить измерения вдоль по профилю. Вдали от точки 6 (например, в точках 1, 2, 3, 9, 10, 11) a_p имеет нормальное значение, т. е. то значение, которое получилось

бы, если бы проводника не было; затем вследствие разрежения токовых линий значения a_p должны быть несколько ниже нормы, а при дальнейшем приближении к точке b с обеих сторон a_p должно быстро нарастать, достигая максимума в точке, лежащей над проводником; при этом значение a_p в этой точке больше нормы. Качественный характер изменения a_p приведен на этом же рисунке, причем нормальное поле нанесено пунктиром. Поведение a_z будет понятно, если рассмотреть поле только линейного

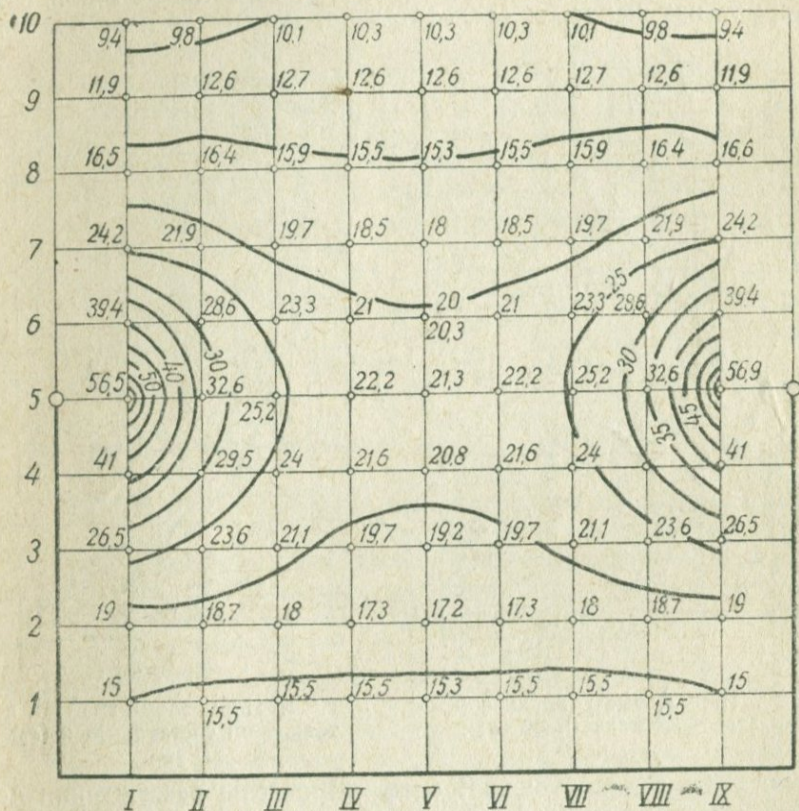


Рис. 72. Карта изолиний a_p нормального поля.

проводника в земле (см. расположение векторов на рис. 74). Вдали от проводника $a_{znp} = 0$, по мере приближения к проводнику a_{znp} начинает нарастать, достигая максимума несколько левее проводника, затем начинает резко падать, проходя через нуль над самим проводником; на некотором расстоянии вправо от точки b будет минимум a_{znp} , а по мере дальнейшего продвижения в сторону больших номеров точек a_{znp} постепенно увеличивается до нуля. Такое изменение a_{znp} накладывается на нормальные значения вертикальной составляющей, правда, несколько осложненные за счет разрежения токовых линий по сторонам проводника.

Суммарное действие всех трех причин приводит к тому, что график a_z имеет примерный вид рис. 74, где для сравнения нормальное поле нанесено пунктиром. (На рис. 74 графики a_p и a_z даны в разных масштабах, чтобы они не накладывались друг на друга.) Таким образом, наличие линейного проводника отмечается на графиках a_p и a_z тем, что a_p имеет максимум над проводником, и одновременно для a_z над проводником располагается

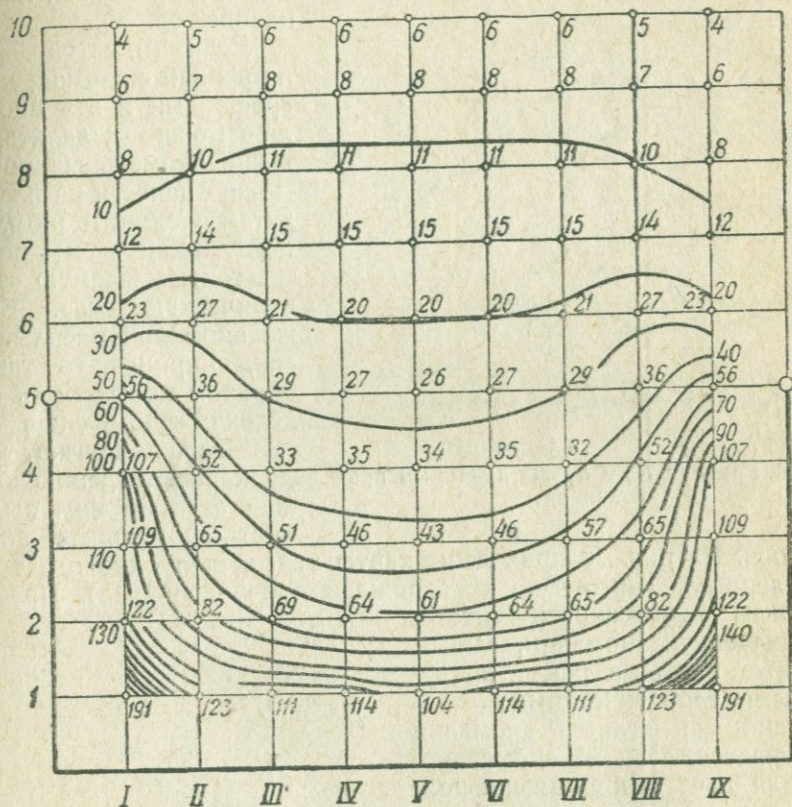


Рис. 73. Карта изолиний a_z нормального поля.

середина круто падающего отрезка, а по бокам имеются максимум и минимум.

Проводники не линейные, а имеющие объемные размеры, создают аномалии a_p и a_z , похожие отчасти на аномалии от линейных проводников. Например, на рис. 75 приведены графики a_p и a_z , снятые на модели пластины; как видим, максимум a_p и круто падающая часть a_z несколько смещены к краю пластины.

Величина аномалии зависит от целого ряда причин: от глубины проводника, от его проводимости по отношению к вмещающим породам, от расположения планшета относительно проводника, от формы и размеров проводника, и т. д. Аномалии, практически наблюдаемые в поле, бывают легко распознаваемые —

такие, как на приведенных рисунках, а также и слабые, выявить которые на картах и графиках представляется не таким простым и легким делом. Приведем несколько практически полученных аномальных графиков a_p и a_z . На рис. 76 представлены графики a_p и a_z , снятые на месторождении Левиха (Урал) над сланцами,

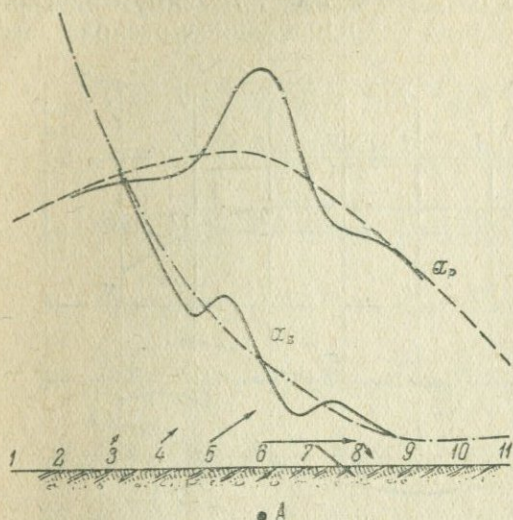


Рис. 74. Графики a_p и a_z над линейным проводником.

или оси. На рис. 78 приведены карты a_p и a_z для одного и того же планшета, снятого на месторождении Левиха (Урал). Предоставляем возможность читателю выделить аномалии, сличая полевые карты с ранее приведенными теоретическими.

Наиболее наглядно аномалия выражается, если из аномального поля вычесть нормальное поле и полученный результат выразить в процентах по отношению к нормальному полю. Точки, обладающие одинаковыми процентами аномалий, соединяются плавными линиями и получается карта изоаномал. Такие карты строятся, преимущественно, для a_p и носят название «карта изоаномал a_p ». Из предыдущего ясно, что рудные тела должны оконтуриваться положительными изоаномалами a_p , а по бокам должны быть расплывчатые отрицательные изоаномалы. В качестве примера практически

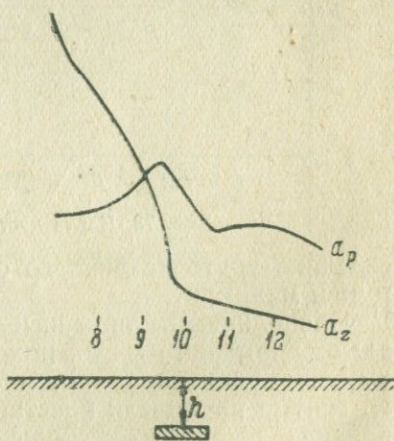


Рис. 75. Графики a_p и a_z над пластиной.

полученных карт приводим на рис. 79 карту изоаномал a_p планшета, снятого в Джекказгане. На ней отмечены черными кружками буровые скважины, встретившие богатую руду, белыми

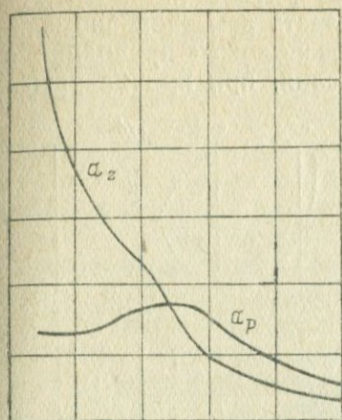


Рис. 76. Графики a_p и a_z над сланцами на Левихе (Урал).

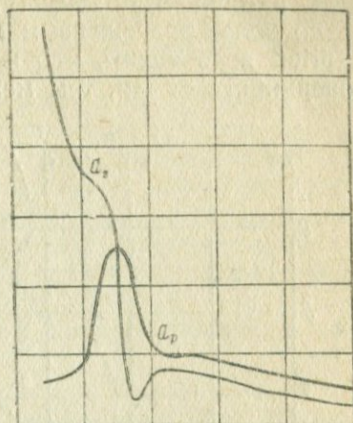


Рис. 77. Графики a_p и a_z над рудным телом на Левихе (Урал).

кружками — безрудные скважины и наполовину черными кружками — скважины, выявившие убогую руду.

✓ Точность работ по методу интенсивности такова, что аномалии до 5—8% лежат в пределах ошибок и пользоваться ими вряд ли возможно.

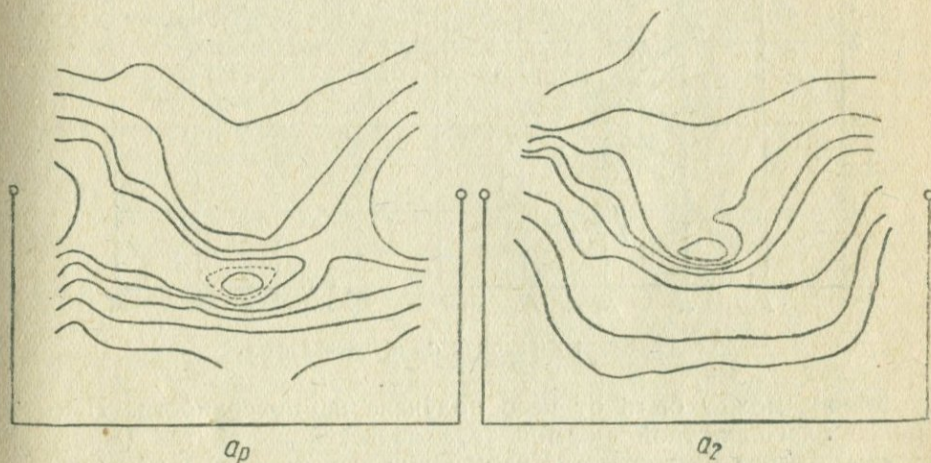


Рис. 78. Карты a_p и a_z на Левихе (Урал).

Легко видеть, что наиболее четкая аномалия будет получена, если планшет расположен так, что линия, соединяющая заземления, параллельна проводнику. Если же проводник перпендикулярен длинной стороне полуквадрата, то есть опасность, что он

будет пропущен при разведке. Очевидно также, что планшет целесообразно задавать так, чтобы проводник попал в его середину, так как если он окажется на краю планшета, то может быть пропущен потому, что там токи, идущие по земле, гораздо более разрежены и могут не вызвать заметной аномалии. А priori ясно также, что чем глубже расположен проводник от поверхности земли, тем меньшая аномалия, при прочих равных

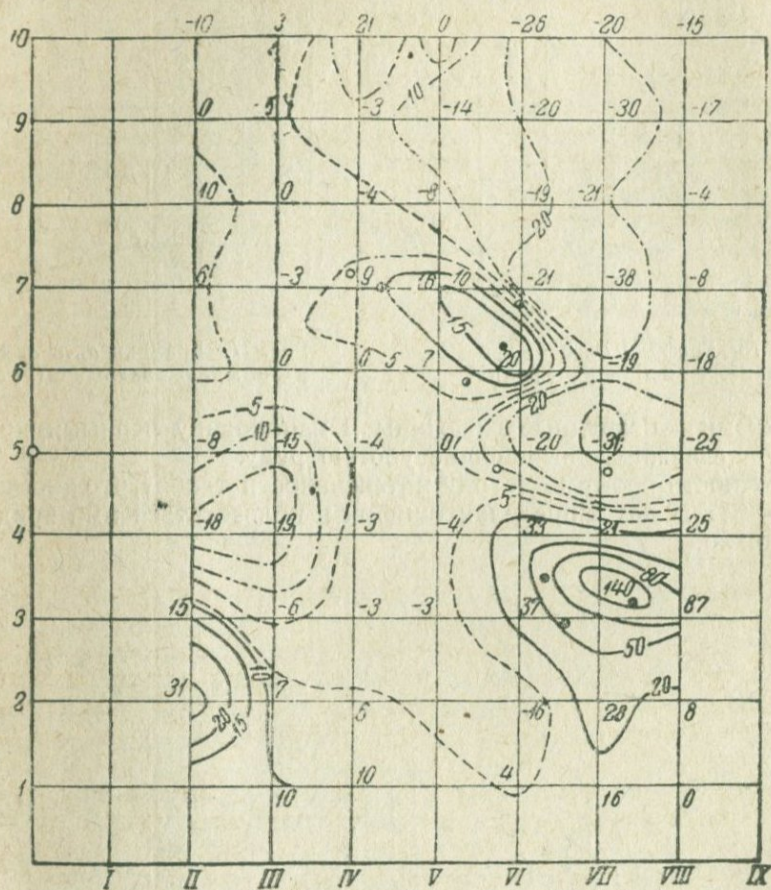


Рис. 79. Карта изоаномал a_p в Дзержкагане.

условиях, может быть от него получена на поверхности. Наиболее благоприятной формой тела является вытянутая (жилы, линзы), менее благоприятна изометрическая (штоки) и наименее благоприятны горизонтальные пластовые залежи, хотя и они могут быть обнаружены. Точно также ясно, что аномалия будет тем больше, чем больше разница в проводимости тела и вмещающих его пород. Однако не следует, повидимому, называть каких-либо крайних величин отношений проводимости, при которых возможна аномалия. Глубоко залегающее тело должно

обладать резко отличной проводимостью от вмещающих пород для того, чтобы могло быть обнаружено, тогда как, вероятно, достаточно, чтобы залегающее вблизи поверхности тело (например, местное утолщение в наносах) отличалось в несколько раз по проводимости от окружающих пород — чтобы оно уже смогло создать вполне измеримую аномалию.

В зависимости от всех этих данных выбираются размеры сети точек наблюдений по методу интенсивности, руководствуясь соображением — чем больше тело, чем глубже оно залегает, тем реже можно ставить точки. При телах сильно вытянутых — сетка прямоугольная, при более изомерных телах — сетка близка к квадратной. Употребляется также расположение точек наблюдения в шахматном порядке. Употребительные размеры сети: 50×40 м, 50×20 м, 40×20 м, 25×20 м.

Метод интенсивности по сравнению с методом изолиний, как мы видели, имеет ряд преимуществ:

- 1) он более чувствителен;
- 2) позволяет приближенно найти глубину залегания проводника, если последний хотя бы грубо может считаться линейным;
- 3) позволяет вести работу при неравномерных и сухих наносах, так как сделать два хороших заземления (С и D) гораздо легче, чем устраивать линейные заземления;
- 4) позволяет вести работы там, где по методу изолиний на переменном токе получаются «самоварные эффекты»;
- 5) позволяет, хотя и с затруднениями, вести работу зимой.

Вместе с тем, следует отметить и недостатки этого метода по сравнению с методом изолиний: его сложность и громоздкость, что не позволяет легко транспортировать его в трудно доступные или гористые районы; его меньшую производительность (от 60 до 200 точек на приемную рамку) и большую стоимость — от 2000 до 6000 руб. за 1 км^2 . Практически рационально на планшете вести работу 2 или 3 рамками, и тогда состав партии будет 9—11 чел. инженерно-технического персонала и 12—15 чел. рабочих.

Исходя из этих данных методу интенсивности следует отдавать предпочтение перед методом изолиний тогда, когда в районе трудно делать линейные заземления, месторождения ожидаются сравнительно мелких размеров или они довольно бедные. Так же, как и в методе изолиний, в методе интенсивности сильно пересеченный рельеф осложняет работу и расшифровку данных; поэтому надо стремиться избегать таких участков.

Метод индукции ✓✓

В отличие от предыдущих методов, метод индукции утилизирует токи большой частоты — длина волны порядка 5000—12000 м. Кроме того, этот метод индуктивный и совсем не требует заземлений. В какой-либо точке подлежащего исследованию участка ставится переносный передатчик G, питаемый от

ручного динамопривода мощностью 30—40 W и работающий на вертикально расположенную рамку А диаметром 120 см, в каркасе которой он и размещен. Рамка ставится на треногу и может вращаться вокруг вертикальной оси. Поле такой рамки схематично изображено на рис. 80, напряжение его обычно обозначается H_1 — это поле называется первичным полем. На расстоянии 50—100 м от генератора располагается приемная рамка В диаметром 60—70 см с большим числом витков проволоки, также устанавливаемая на треноге. Рамка имеет вертикальную и горизонтальную оси вращения и может принимать поэтому любое положение в пространстве. Электромагнитное поле возбуждает в приемной рамке некоторую электродвижущую силу той же частоты, усиливаемую и преобразуемую приемником Р (располагаемым вблизи приемной рамки) в ток звуковой частоты, регистрируемый с помощью телефона — наушников.

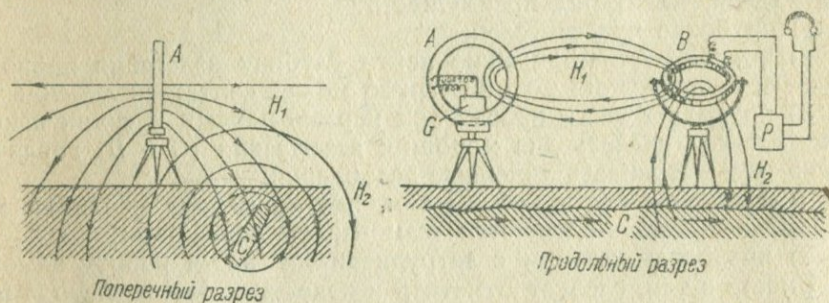


Рис. 80. Схема работ по методу индукции.

В поле работа ведется так, что генератор стоит на месте, а приемник перемещается около него по кругу радиуса 50—70 м, останавливаясь на круге 12—16 раз. Если при каждой остановке сначала вертикальные плоскости генератора и приемника совместить, а затем вращать приемную рамку вокруг горизонтальной оси, то минимум звука в телефоне, при однородной среде под рамками, получится тогда, когда приемная рамка примет горизонтальное положение.

Если вблизи генераторной рамки имеется под землей хороший проводник, то поле рамки в нем возбуждает электрический ток той же частоты. Ток начнет циркулировать по проводнику, причем грубо можно себе представить, что в верхней части проводника будет протекать ток одного направления, а глубже — ток обратного направления. Магнитным полем обратного тока в первом приближении можно пренебречь, считая, что он течет очень глубоко. Тогда получается так, что в проводнике на некоторой глубине под землей течет ток, создающий вокруг себя новое поле — вторичное поле (H_2), накладывающееся на первичное (H_1). В этом случае приемная рамка будет находиться под действием обоих полей, и если мы будем проходить с ней, пересекая проводник, то минимум звука будет получаться при следующих

положениях рамки: вдали от проводника рамка располагается горизонтально, по мере приближения она будет наклоняться так, что нормаль к ней будет направляться в сторону проводника. Будем отмечать такие углы знаком плюс. Угол наклона рамки к горизонту достигает максимума, немного не доходя до проводника, затем он быстро уменьшается, и рамка вновь принимает горизонтальное положение над проводником. При дальнейшем движении угол наклона рамки вновь нарастает, но уже в другом направлении (будем отмечать это знаком минус), достигает максимума, а затем доходит вновь до нуля вдали от проводника. Пример получения аномалии показан на рис. 81, где отмечены номера стоянок приемника вокруг генератора и соответствующие углы наклона приемной рамки при установке на минимум. Имеют место четыре точки, где рамка расположена горизонтально: 1) между стоянками 1 и 17, 2) стоянка 4, 3) ме-

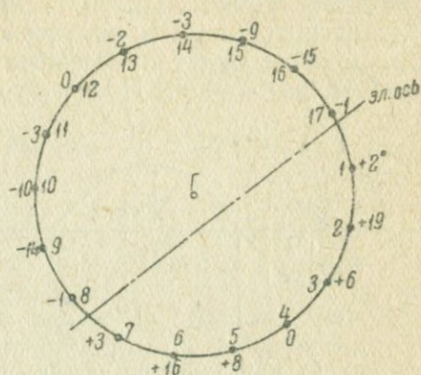


Рис. 81. Схема наблюдений вокруг генератора.

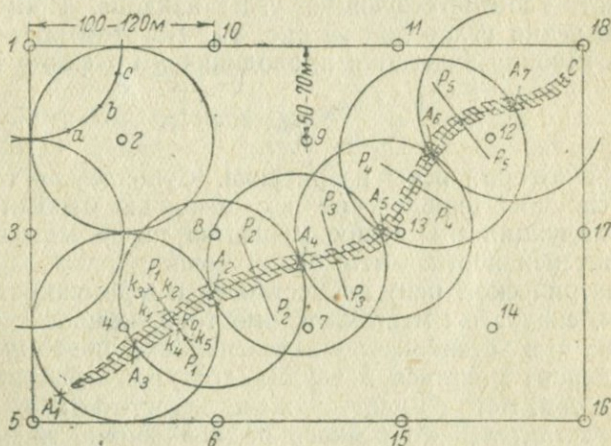


Рис. 82. Прослеживание «электрической оси».

жду стоянками 7 и 8 и 4) стоянка 12. Однако «электрическая ось» проходит так, как показано на рис. 81 пунктиром, т. е. там, где происходит переход углов через нуль со сменой знака.

На планшете, подлежащем исследованию, намечаются точки для стоянок генератора в шахматном порядке (рис. 82), и работа начинается с какого-либо угла планшета.

• Приемник обходит вокруг точки 1, затем генератор переносится в точку 2, приемник снова обходит круг и т. д. до тех пор,

пока, например, на стоянке 4 не будет обнаружена «электрическая ось», отмечаемая на местности пикетами A_1 и A_2 . После нахождения оси генератор снимается с работы по шахматной сетке и переходит на прослеживание оси — в точку A_2 (или A_1). Находятся точки A_3 и A_4 , генератор переносится в точку A_4 , находится точка A_5 и подтверждается точка A_2 и т. д. до тех пор, пока не будет прослежена вся «электрическая ось» в обе стороны до конца. После этого генератор возвращается на шахматную сетку и начинаются розыски новой оси. Оси топографом наносятся на план.

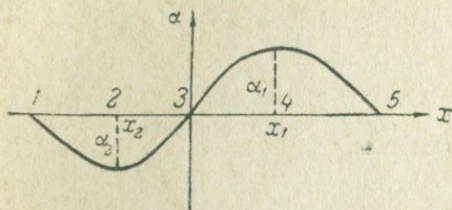


Рис. 83. Кривая обращения углов.

в следующем: генератор стоит на оси — например, в точке A_2 , приемник перемещается по густой сетке по профилю P_1P_1 , перпендикулярному электрической оси. Получается возможность построить кривую углов наклона рамки — по оси абсцисс откладываются расстояния по линии P_1P_1 в некотором масштабе, а по оси ординат — соответствующие углы наклона. Пример такой кривой изменения углов дан на рис. 83. По этой кривой можно определить глубину залегания проводника h по формуле:

$$h = \frac{1 - \sin \alpha_m}{\cos \alpha_m} x_m \quad (m = 1, 2), \quad (22)$$

обозначения которой ясны из рисунка. Существуют также графические способы определения h с помощью особых палеток.

Метод индукции имеет преимущества перед методами изолиний и интенсивности — это более точное установление аномалии (электрической оси) на местности и возможность работы в гористых, скалистых местах. Кроме того, комплект индукции более легок, чем установка по интенсивности, поэтому он легче может транспортироваться в трудно доступные районы.

Вместе с тем, метод имеет крупные недостатки:

1) он чувствителен ко всякого рода поверхностным неоднородностям и обычно поэтому дает больше аномалий, чем другие методы;

2) вследствие сильного поглощения энергии в наносах, особенно в хорошо проводящих, метод становится бессильным, если влажные наносы достигают мощности 10—15 м;

3) метод более медленный (от 10 до 35 генераторных стоянок в день, т. е. с обычной сеткой исследование 1 км^2 занимает 8—25 дней) и более дорогой (1 км^2 от 3000 руб. и выше).

Наилучшие результаты получаются методом индукции при работе на круто падающих вытянутых месторождениях, менее

благоприятны штоки и горизонтальные пластовые залежи. Методом индукции можно открывать слепые тела, залегающие в плотных породах, — объект мало благоприятный для методов изолиний и интенсивности. Иногда метод применяется для прослеживания линий тектонических нарушений, являющихся путями минерализованных растворов.

§ 12. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В данном параграфе мы рассмотрим некоторые из методов электроразведки, имеющие более или менее широкое применение в геолого-разведочном деле. Прежде всего, это будет метод измерения естественных электрических полей, употребляемый чаще всего как проверочный контрольный метод при поисках сульфидных месторождений. Затем будет рассмотрен метод заряженного тела, применяемый для оконтуривания уже вскрытого (хотя бы в одной точке) оруденения, а также для прослеживания направления и скорости подземного водного потока. Будет уделено внимание методу исследования анизотропных образований с более или менее крутыми углами падения — методу петли. И, наконец, будет кратко изложен один из методов ондометрии — теневой метод, имеющий, хотя и сравнительно редко, применение при обнаружении пропущенных горными выработками рудных тел или скоплений вод внутри соляных тел вблизи от выработок.

Метод измерения естественных полей

Метод измерения естественных (природных) электрических полей является одним из самых старых геофизических методов и впервые применен Р. В. Фоксом на жилах Корнуэльса в 1829—1843 гг.

Начиная с 1913 г. К. Шлюмберже были выполнены работы методом измерения естественных полей на месторождениях: Сен-Бель, Рона (пирит), Во, Рона (магнитный пирит), Сен-Феликс де-Паллиер, Гар (пирит со свинцовым блеском), Эррериас и Кампандрио, Андалузия (медный колчедан), Бор в Сербии (пирит с ковелином).

Им же было констатировано отсутствие заметных естественных полей на месторождении галенита (шахта Вилленуэва дель-Дюке в Пенарруа), на месторождении магнетита в Нормандии и на месторождении пиролюзита в Романеш (Сона и Луара).

В СССР впервые естественное поле измерялось в 1924 г. на рудном Алтае проф. А. А. Петровским. В 1930 г. Л. Я. Нестеровым над штоком пирита в Чираги-Дзоре (Закавказье) и К. К. Федченко над линзами цинково-медистого колчедана (пирит, сфалерит, халькопирит, ковелин) в Тагильском районе Среднего Урала получены весьма четкие результаты, и с этого времени применение метода значительно расширилось. В результате достаточно широкой практики установлено, что рудные залежи,

содержащие пирит, халькопирит, пирротин, в условиях Урала, Карелии, Кольского полуострова и т. п. создают вполне измеримое на поверхности земли естественное электрическое поле, а месторождения свинцово-цинковых руд Алтая, Южного Казахстана, Киргизии и т. д. являются менее благоприятными объектами для применения этого метода. Оказалось, что помимо сульфидных месторождений еще ряд других объектов создает заметные естественные поля: так, наблюдались естественные поля над листовитами в Алапаевском районе Урала, над совершенно непромысленной вкрапленностью пирита в кварцево-серицитовых и кварцево-хлоритовых сланцах в ряде мест Среднего Урала и над угленосной зоной около с. Полтавки — ст. Карталы-Урал.

Рядом полевых работников наблюдались естественные поля над углистыми сланцами и над графитовыми сланцами.

С другой стороны, ряд известных рудных объектов, содержащих пирит, халькопирит, пирротин, в некоторых случаях не создавал на поверхности земли заметных естественных полей. Так, на заболоченных участках Левиха VI, Южная Кузнечиха и отчасти Южно-Ковелиновая в Калате на Урале отмечалось отсутствие естественного поля, хотя на том же участке Южно-Ковелиновая и в окрестностях Уралмедьстроя (г. Кабан) на заболоченных участках в том же году наличие естественного поля было зафиксировано. Подавляющее большинство естественных полей, наблюдаемых над рудными и нерудными объектами, выражается на поверхности земли отрицательными значениями потенциала; однако в ряде случаев наблюдались положительные значения потенциалов над рудными телами, имеющими крутое падение — около шахты Лондон на Дегтярском месторождении, Шайтанская аномалия, около Карпушихи в Калатинском районе, и т. д.

Все эти факты вызвали необходимость разработать теорию возникновения естественных полей, что и было выполнено Е. А. Сергеевым в 1936 г.

Представим себе схематично рудное тело (рис. 84), залегающее под наносами в породах, обладающих некоторой электропроводностью.

Сульфидные минералы, окисляясь в водяно-воздушной зоне (I) вадозовой циркуляции, образуют в большинстве случаев легкорастворимые сульфаты.

Сульфатные растворы, опускаясь по трещинам вниз, постепенно из кислых ниже уровня грунтовых вод переходят в щелочные; их щелочность особенно резко проявляется в зоне застойных вод. Следовательно, верхняя часть рудного тела омывается окислительными сульфатными растворами и получает положительный потенциал относительно нижней части, находящейся в зоне щелочно-восстановительных растворов. Устанавливается замкнутая электрическая цепь: + электрод (верх) — металлический проводник (руда), играющий роль внешней части цепи, — электрод (низ) и вмещающие породы, играющие роль внутренней, электролитической части этого элемента.

Окружающие рудное тело растворы получают обратное распределение знаков потенциала: над положительным зарядом головы тела будут иметь место отрицательные потенциалы раствора, а в глубине у отрицательно заряженного конца рудного тела — положительные потенциалы раствора. Такое расположение знаков потенциала тела и раствора соответствует наиболее часто встречающейся картине расположения отрицательных максимумов потенциала на поверхности земли над рудным телом. Сколь долго может продолжаться описанный процесс? Известно, что опускание зоны

окисления происходит чрезвычайно медленно, а поэтому проявления естественного поля на поверхности также должны быть весьма долговечны: до тех пор, пока зона окисления не опустится так глубоко, что проявления существующего естественного поля на поверхности практически не будет заметно, или до тех пор, пока в силу каких-либо изменений режима не прекратятся окислительный процесс и циркуляция вод. Действительно, К. Шлумберже, произведя измерения есте-

ственных полей на Сен-Бель в 1913 и в 1920 гг., отмечает полную их идентичность. Представляет чрезвычайно большой интерес вопрос о возможности установления величин потенциалов, возникающих в процессе окисления рудного тела, и выяснения степени влияния на величину потенциала минерального комплекса оруденения, характера и концентрации омывающих тело растворов и других факторов.

Очевидно, что та разность потенциалов, которая возникает между концами рудного тела, будет больше максимальной разности потенциалов, которая может наблюдаться на земной поверхности над данным рудным телом.

Некоторое представление об очень мало изученных величинах возможных электродвижущих сил, развиваемых рудными телами, дает практика измерения естественных полей.

Так, над линзой пирита Левиха X, глубина зоны окисления которой менее 20 м, Л. Я. Несеровым наблюдались разности по-

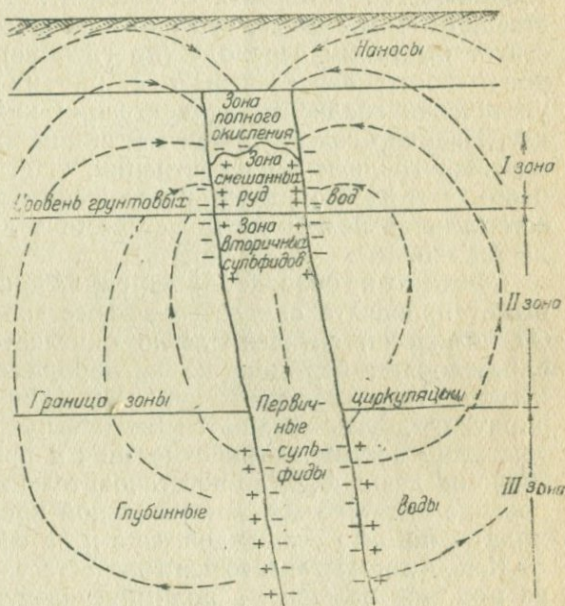


Рис. 84. Схема возникновения естественного поля.

тенциалов, доходящие до — 750 mV, тогда как над штоком пирита в Чираги-Дзоре (Закавказье), расположенном на глубине 20—22 м от поверхности, максимальная разность потенциалов не превышала — 170 mV.

Поведение различных минералов в различных концентрациях природных растворов изучено также совершенно недостаточно, хотя некоторые данные уже имеются.

Галенит в сульфатных окислительных растворах устойчив и не способен давать при взаимодействии с электролитами активно-восстановительных компонент. Второе свойство существенно в том смысле, что оно или способствует или не способствует быстрому переходу (по глубине) окислительных растворов в восстановительные, т. е. оно или направлено в сторону увеличения градиента концентрации кислорода в растворе или нет. Наличие галенита, как мы видим, не благоприятствует увеличению градиента концентрации, т. е. галенит является минералом, который сам в силу устойчивости не способен создавать естественное поле и не может помочь другим минералам в создании его.

Сфалерит не обладает электронной проводимостью, а потому не может проявлять окислительно-восстановительных потенциалов. Он химически активен, легко окисляется, при взаимодействии с растворами без доступа кислорода очень быстро сообщает им восстановительный характер. Пирит, пирротин, халькопирит и другие являются активными минералами, обладают высокими потенциалами окисления и при взаимодействии с растворами дают активно-восстановительные компоненты. Формирование щелочно-восстановительной природы вод может происходить, помимо сульфидов, еще и за счет щелочных силикатов.

Как будет выглядеть картина естественного поля, если брать не мономинеральную, а полиминеральную залежь? В случае наличия нескольких минералов, обладающих электронной проводимостью и резко различных по активности, будут существовать местные (межминеральные) коротко-замкнутые, электрохимические пары, действующие в сторону выравнивания потенциала и, следовательно, при прочих равных условиях, — в сторону уменьшения величины естественного поля залежи. Особенно значительную роль в снижении потенциалов играет галенит, как устойчивый минерал.

Влияние вкрапленности на величину потенциалов естественного поля изучено слабо, однако практически известно, что над даже весьма убогой вкрапленностью иногда наблюдается вполне заметная разность потенциалов. Повидимому, вкрапленное оружие следует рассматривать в этом смысле как систему элементарных диполей, ориентированных по направлению поля концентрации растворов, а следовательно, могущих в сумме создавать заметное внешнее электрическое поле.

Решающую роль в создании поля, как мы видели, играет концентрация кислорода в растворах и, конечно, наличие самих растворов. В местах сухих следует ожидать уменьшения, а мо-

жет быть даже и исчезновения естественных полей. Точно также заболоченность района может оказаться весьма неблагоприятным фактором, когда водоупорный горизонт, перекрывая рудное тело, препятствует доступу к нему вод, богатых кислородом. Наоборот, наличие резко выраженного зеркала грунтовых вод, разделяющего рудное тело, является благоприятным фактором.

В свете изложенного, становится понятным наличие положительных потенциалов над некоторыми круто падающими телами. Действительно, если представить себе, что часть тела по простиранию расположена в условиях хорошего окисления и, следовательно, образует над головой отрицательный минимум, а другая часть тела находится в заболоченном участке без доступа кислорода к поверхности тела, то тогда легко видеть, что над этой второй частью тела должен получиться положительный максимум потенциала. Конечно, при этом надо иметь в виду, что, с точки зрения изложенного выше, наличие одного только положительного максимума весьма мало вероятно: он должен сопровождаться непременно отрицательным максимумом.

Все полевые поверхностные наблюдения над рудными объектами согласуются с изложенной схемой возникновения природных электрических полей. В 1936 г. Е. А. Сергеевым на Северной жиле Зыряновского свинцово-цинкового месторождения на Алтае были проделаны измерения потенциала поверхности оруденения и окислительно-восстановительных потенциалов растворов, пронизывающих рудное тело на различных глубинах.

Вмещающими породами всяческого бока являлись известково-глинистые сланцы, лежащего бока — хлоритовые сланцы, жильные минералы: кварц, кальцит, анкерит.

Распределение металлов — неравномерное, с преобладанием галенита и сфалерита, но с участием меди (в среднем 3%), серебра, золота и др. Горизонт застойных вод, благодаря откачке, понижен до 220 м.

Результаты экспериментов представлены на рис. 85, где кривая *I* дает изменение потенциала рудного тела, а кривая *II* — изображает окислительно-восстановительный потенциал растворов, пронизывающих рудное тело. Ход обеих кривых целиком подтверждает ранее высказанные соображения о поляризации рудного тела. Из кривой *I* следует, что максимальная разность потенциалов, развиваемых рудным телом, около — 230 mV, а на поверхности она выявляется потенциалами порядка — 20—25 mV. Сравнительно небольшая величина $E = -230$ mV вызывается, по видимому, полиминеральным составом оруденения.

Полевые наблюдения по методу естественных полей весьма просты — они сводятся к измерениям разности потенциалов между отдельными точками земной поверхности. Если метод употребляется для проверки аномалий, полученных другими методами, то чаще измерения разностей потенциалов ведутся по отдельным профилям и при этом используется сеть, разбитая для основных методов. Встречающаяся густота точек по таким профилям — 20 или 10 м. Если метод применяется как поиско-

вый или при проверке нужно исследовать некоторую площадь, тогда разбиваются вкрест простирания профили, расстояние между которыми должно быть таким, чтобы хотя бы два профиля пересекли ожидаемое оруденение. Точки по профилю располагаются в зависимости от мощности и ожидаемой глубины тела: чем мощнее тело и чем оно глубже, тем реже могут задаваться точки. Часто встречается такая сеть площадной съемки методом

естественных полей:
 50×20 м, 40×20 м,
 40×10 м и 20×10 м.

Измерения в поле осуществляются с помощью пары неполяризуемых электродов, вставляемых в землю в двух соседних точках профиля. Эти электроды соединительным проводом приключены к рассмотренному уже выше потенциометру, на котором и происходит измерение разностей потенциалов. Неполяризующийся электрод устроен следующим образом: в пористый сосуд, вставляемый в землю, налит раствор медного купороса и в него опущен стержень

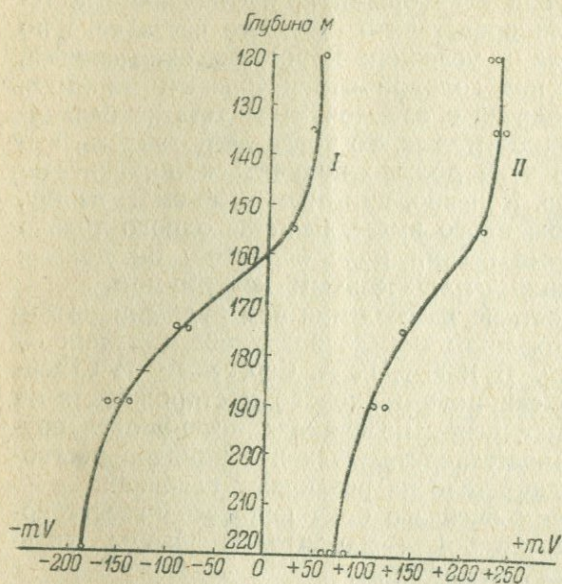


Рис. 85. Зависимость изменения потенциала рудного тела (I) и растворов (II) с глубиной (Зырянковский рудник).

красной меди, соединяемый во время работ с потенциометром. Пара таких электродов, тщательно приготовленная, дает электродвижущую силу поляризации порядка 1—2 mV, тогда как, например, пара медных стержней, непосредственно втыкаемая в землю, может развивать до 150—200 mV. Пара неполяризуемых электродов в заводском изготовлении с упаковкой и т. д. стоит 1200 руб.

Практически в поле работа начинается с какого-либо угла планшета, расположенного на заведомо безрудном участке. Потенциал этой точки условно принимается за нуль. Наблюдатель с потенциометром Н (рис. 86) делает остановки через пикет, каждый из электродов также переставляется через пикет (если местность открытая, то один электрод и потенциометр могут стоять на месте, а передвигаться будет только второй электрод). Последовательно обходится замкнутый контур 0/I—25/I—25/II—0/II—0/I, затем делается замер между 0/II и 0/III точками, далее обходится второй замкнутый контур 0/III—25/III—25/IV—0/IV—

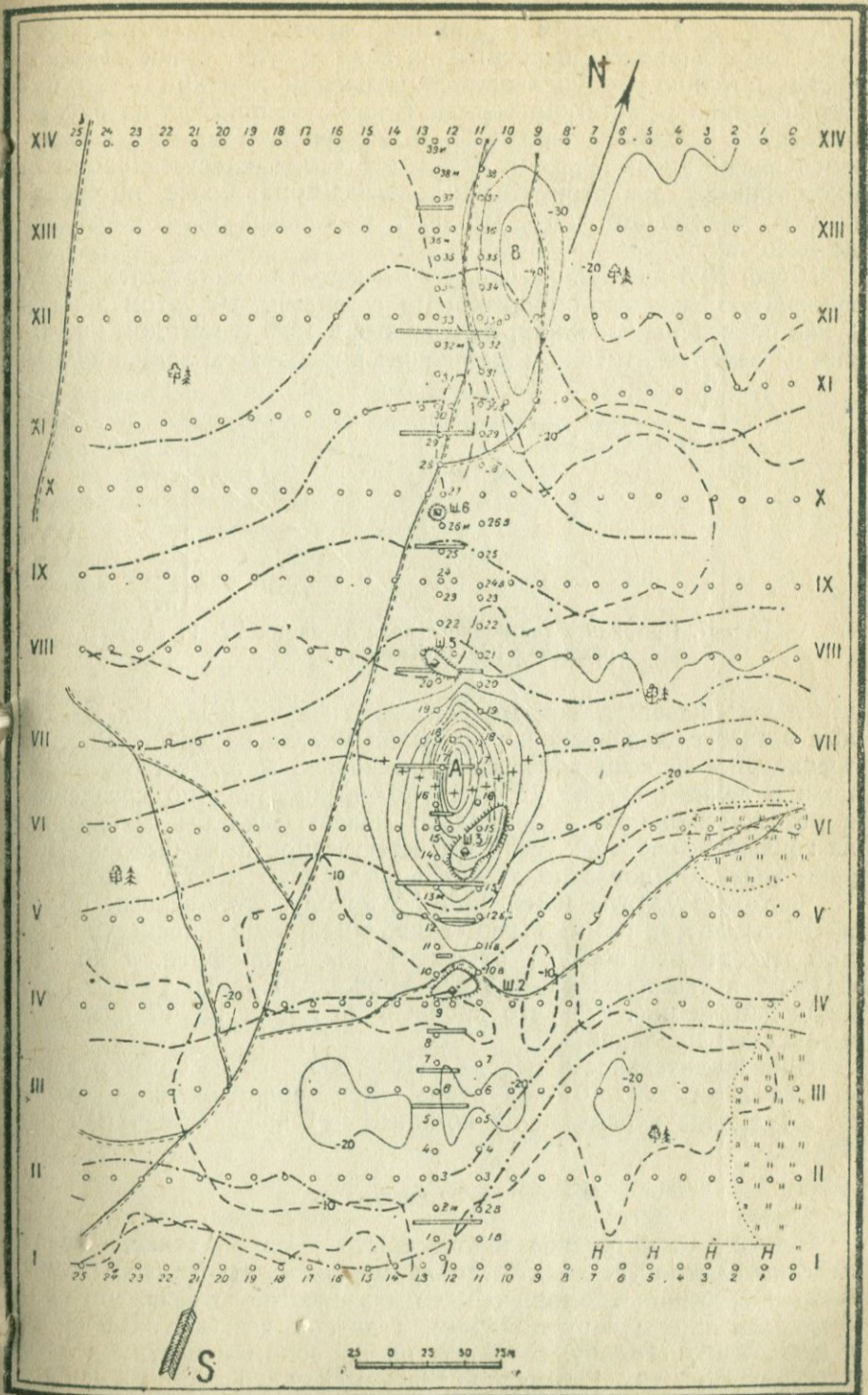


Рис. 86. Изолинии естественного поля (I) на месторождении Юрьев-Камень (Урал) (по Л. Я. Нестерову).
 2 — шпелты; 3 — дороги; 4 — изолинии метода Лундберга; 5 — каналы; 6 — отвалы; 7 — шурфы.

0/III и т. д. По данным наблюдений вычисляются потенциалы всех точек планшета, наносятся на план и затем точки с одинаковым потенциалом соединяются плавными линиями — это будут изолинии естественного поля. В качестве примера на рис. 86 приведены изолинии, снятые Л. Я. Нестеровым на месторождении Юрьев-Камень (Урал) в 1931 г. Изолинии естественного поля оконтуривают два отрицательных максимума: более интенсивный А, достигающий до -120 мV, и слабый В, достигающий до -40 мV.

Шурф № 3 на глубине около 30 м встретил пиритовую линзу, прикрытую кварцево-серицитовыми сланцами. На этом же рисунке приведены изолинии, полученные в 1929 г. методом изолиний на переменном токе и выявившие проводящую зону, идущую

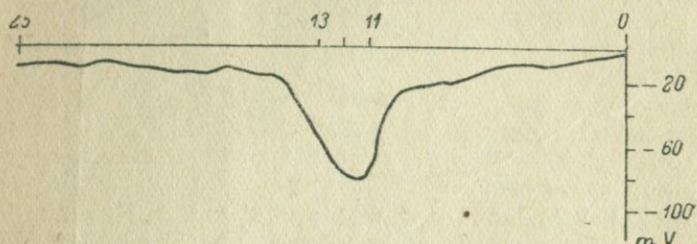


Рис. 87. Профиль естественного поля по линии VI—VI месторождения Юрьев-Камень (Урал).

через весь планшет. Там же показаны канавы и шурфы, заданные в 1930 г. для проверки аномалии метода изолиний. Рассмотрение рис. 86 ясно показывает, насколько метод естественного поля в данном случае уточняет положение тела по сравнению с методом изолиний и насколько можно было бы сэкономить на горных выработках, если бы естественное поле было промерено сразу же после получения аномалии по методу изолиний.

Часто результаты измерений по методу естественных полей представляются, помимо карты изолиний, еще профилями, на которых по оси абсцисс отложена длина профиля, а по оси ординат потенциалы точек этого профиля. Пример такого профиля дан на рис. 87 — это профиль по линии VI—VI предыдущей карты изолиний.

Производительность метода — 100—200 и выше точек в день, стоимость точки — 0,5—1 рубль. Вес оборудования — около 20 кг. Состав персонала на комплект — 1 наблюдатель и 2 рабочих.

Метод заряженного тела

Иногда, когда рудное тело вскрыто в одной точке, бывает полезно быстро установить его примерные контуры. Это может быть сделано с помощью метода заряженного тела. Устроим одно заземление в рудном теле, а другое вынесем за 1—2 км в какую-либо сторону, соединим их проводом и пустим в него электрический ток. Все рудное тело, в силу его хорошей прово-

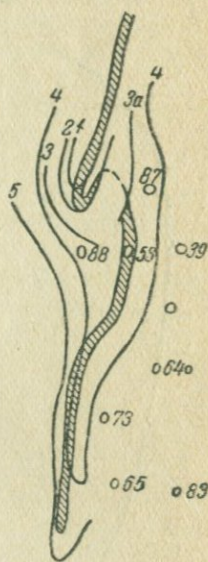
димости, можно рассматривать как большой электрод, находящийся при одном и том же потенциале. Если на поверхности земли над рудным телом снять линии одинакового потенциала, то они в общих чертах оконтурят это рудное тело. Контур будет дан тем точнее, чем ближе к поверхности расположено тело.

Ток, вводимый в землю, может быть и постоянным и переменным. Если вводится переменный ток, изолинии прослеживаются с помощью щупов и наушников так же, как и при методе изолиний, а затем топографом наносятся на план. Если вводится ток постоянный, — работу лучше вести по заранее разбитой сетке так же, как при методе естественных полей, а изолинии на плане получать путем построения по вычисленным потенциалам точек.

Можно также при пропускании переменного тока 500 пер/сек от установки метода интенсивности производить наблюдения с помощью индукционной рамки и аудионного вольтметра и затем по изолиниям a_p и a_z судить о контуре тела. В местах, где наносы сухие или почва каменистая, применение индукционной рамки вполне целесообразно.

В качестве примера работ по методу заряженного тела приводим изолинии, снятые в Дегтярском месторождении (Урал) с целью оконтуривания продолжения рудного тела к югу от шахты Лондон, не встреченного 88 скважиной (рис. 88). Заземление было сделано в рудном теле на горизонте 42 м. 1 и 2 изолинии показывают, что тело кончается, не достигая 88 скважины. 3, 3а, 4 и 5 изолинии наглядно отмечают наличие рудного тела, смещенного несколько к востоку и продолжающегося далеко на юг. Последующими данными указанное положение тела подтверждено. Работа была выполнена в течение двух дней и стоила не выше 1500 руб.

Метод заряженного тела может быть использован также для определения направления и скорости подземного потока по одной скважине. Для этого в скважину вводится электролит, например, крепкий раствор поваренной соли; он захватывается потоком и распространяется вместе с ним. Один электрод погружается в скважину, второй относится на 1—1,5 км, вокруг устья скважины снимаются несколько раз изолинии через некоторые интервалы времени (десятки часов, сутки).



- — 1
- ✓ — 2
- ▨ — 3

Рис. 88. Изолинии метода заряженного тела на Дегтярском месторождении (Урал) (по П. Ф. Родионову). 1 — скважины; 2 — изолинии; 3 — контур рудного тела по горизонту 42 м.

Так как минерализованная вода является хорошим проводником, то изолинии будут вытянуты в направлении подземного потока. Можно считать, что скорость потока равна делению длины засоленной части потока на время, прошедшее с момента загрузки соли до снятия изолиний.

Практически можно производить съемку 2—3 раза, выявлять центры смещенных изолиний и по направлению смещения цен-

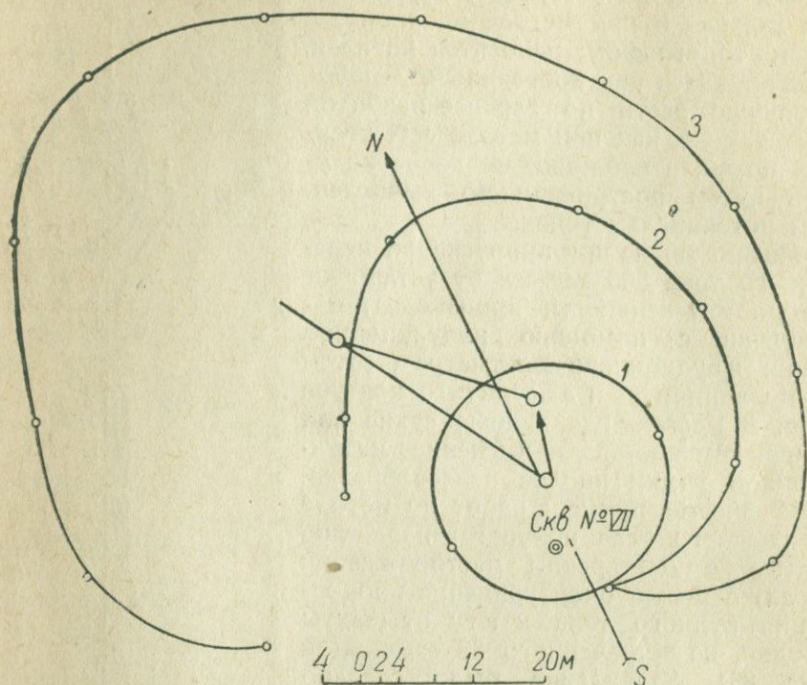


Рис. 89. Изолинии метода заряженного тела при исследовании направления и скорости подземного потока.

1 — измерения сразу после загрузки электролита; 2 — измерения через 3 часа; 3 — измерения через 12 часов.

тров устанавливать направление, а по величинам смещения — скорость подземных потоков. В качестве примера такой съемки на рис. 89 приводим карту расположения изолиний, полученную В. С. Барковым при изучении скорости и направления потока карстовых вод. Глубина водоносного горизонта 36 м. Сильная вытянутость линий за сравнительно короткий срок говорит о наличии большой скорости подземного потока. А. С. Семеновым были вычислены по двум изолиниям, снятым около одной скважины, скорости потока вод со следующими результатами. По одной изолинии, снятой через 3 дня после засыпки соли, получилась скорость 1,95 м в сутки, а по изолинии, снятой через 5 дней, — скорость, равная 1,75 м в сутки. Средняя скорость 1,85 м в сутки достаточно обычна для района съемки.

Определения скорости и направления потока проще и точнее в необсаженных скважинах. В обсаженных надо учитывать действие труб на характер электрического поля. Искажающее действие может оказать также фильтрация электролита в другие горизонты помимо изучаемого.

Этот метод исследования направления и скорости подземных потоков еще не вышел из опытно-производственной стадии, поэтому его можно утилизировать при глубинах водных горизонтов до 30—50 м в необсаженных скважинах и до 10 м в обсаженных, при скорости потока более 1—2 м в сутки.

Метод петли ✓

Мы уже видели, что большинство осадочных пород в той или иной мере анизотропны; это свойство их может утилизироваться с геолого-разведочными целями.

В частности, существует особый метод исследования структуры анизотропных образований — метод петли, применимый при углах падения пород порядка от 10 до 15° и больше к горизонту. Его физические основы доста-

точно просты. Расположим линию AB по простиранию пород и введем через заземления A и B в землю переменный ток низкой (звуковой) частоты (рис. 90). Ток будет стремиться уклониться по направлению падения пород, а вектор магнитного поля тока будет стремиться встать перпендикулярно напластованию.

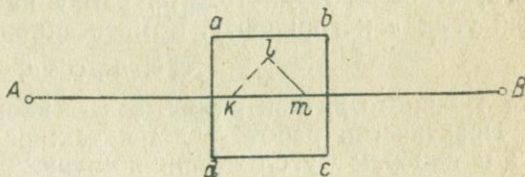


Рис. 90. Схема метода петли.

Если расположить петлю $abcd$ строго симметрично относительно питающей линии AB , то в случае изотропных пород количество силовых линий, пронизывающих верхнюю часть петли, равно количеству силовых линий, проходящих в нижней части петли; но так как они обратны по направлению, то, взаимно уничтожаясь, не создают в контуре индукционных электродвижущих сил. Другое дело в анизотропных средах, когда симметрия тока нарушается; тогда в части контура, расположенного в направлении падения пород, силовых линий будет больше, и в контуре возникнет индукционный ток, величина которого определяется анизотропией пород, углом падения их, площадью контура, частотой тока и т. д.

Однако всегда можно изменить площади выше и ниже (рис. 90) питающей линии так, чтобы произведение площади на плотность силовых линий с одной стороны равнялось произведению плотности на площадь контура с другой стороны питающей линии.

Изменение площади может производиться, например, путем оттягивания в сторону питающей линии в виде треугольника до

тех пор, пока при некотором положении линии $AklmB$ ток в контуре не исчезнет. Направление оттягивания указывает на направление падения пород, а величина треугольника компенсации klm дает представление о суммарном действии ряда перечисленных выше факторов. Роль контуров лучше переменить: контур $abcd$ сделать питающим — в него тогда легко загнать большой ток, ибо он не заземлен, а контур A земля B klm A сделать приемным. От перемены ролей контуров рассуждения, приведенные выше, не меняются.

В качестве источника тока можно употреблять пульсер и аккумуляторы или пищик. Примной частью (треугольником компенсации) может служить индукционная рамка, применяемая в методе интенсивности или индукции, а индикатором — или потенциометр (с выпрямлением тока пульсером — в этом случае можно найти величину электродвижущей силы индукции в рамке) или телефон (тогда употребляется метод настройки рамки на минимум звука). Рамка, включенная в цепь AB , располагается в центре петли $abcd$ и устанавливается отвесно. В случае, если среда анизотропна, в приемном контуре возникнет ток, и для того, чтобы его уничтожить, рамку надо наклонить на некоторый угол α к горизонту. Компенсационная площадь

$$s_k = ns_p \cos \alpha,$$

где n — число витков рамки, а s_p — площадь витка рамки.

Практически работа ведется так: разбивают контуры $abcd$ и AB и замеряют угол α при компенсации — вычисляют «вектор петли»:

$$D = \frac{s_k \cdot 1000}{L}, \quad (23)$$

где L — площадь $abcd$ (D направлен \perp AB в сторону угла α).

Затем переключают линию AB на 90° , располагая ее опять симметрично относительно контура $abcd$, и замеряют α_1 . Геометрическая сумма двух «векторов петли» D и D_1 дает искомым вектор, характеризующий анизотропию; этот вектор для данной точки — центра петли $abcd$ — наносится на карту района.

Что касается выбора размеров петли и величины разносов AB , то на основании лабораторных и небольших полевых работ устанавливается, что «глубина разведки» приближенно равна диаметру петли. Величина AB особо существенной роли не играет, но должна быть больше диаметра петли в 3—4 раза. Наиболее четкие результаты получаются при углах падения пород около 45° и при горизонтальном контакте наносов с анизотропными породами.

Сильное искажающее влияние оказывают контакты разнородных сред (не горизонтальные). Если подстилающие породы имеют большее сопротивление, чем вышележащие, «вектор петли» указывает направление падения контакта; если вышележащие породы имеют большее сопротивление, — «вектор петли» дает направление восстания контакта. Эти реакции заметны даже при углах падения контакта в $4—5^\circ$ и при разнице

в сопротивлениях в 2—3 раза. Вообще всякая неоднородность, ведущая к местной концентрации или разрежению токовых линий, влияет на величину «вектора петли», причем ближе расположенные к поверхности объекты вызывают больший эффект чем нижележащие.

Влияние рельефа также заметно сказывается на «векторе петли». Не плоское расположение петли и линии АВ может привести к очень трудно учитываемым искажениям, тогда как рас-

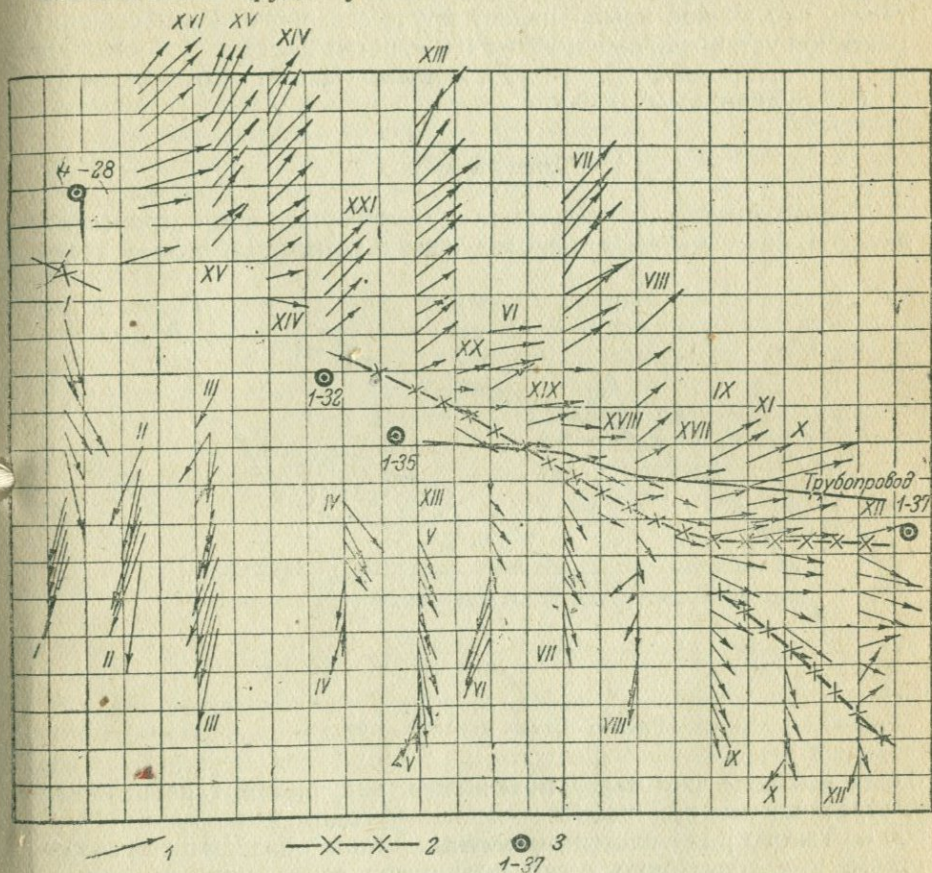


Рис. 91. Карта «векторов петли» района Ханкала (Новогрозненская антиклиналь).
1 — векторы петли; 2 — предполагаемая ось антиклинали; 3 — буровые скважины.

положение установки на плоской, но не горизонтальной поверхности вполне допустимо; уклон может быть легко учтен, если относить все наблюдения к наклонной плоскости так, как будто это горизонтальная плоскость. Учитывая все эти осложнения, можно рекомендовать метод петли применять в тех местах, где наносы однородны по мощности и электрическим свойствам и при углах падения анизотропных образований около 45° .

В качестве примера работ, выполненных по методу петли, на рис. 91 приводится карта «векторов петли», снятая в районе Ханкала (Грозный) с целью определения поведения антиклинали, сложенной сланцеватыми глинами верхнего сармата и погребенной под аллювиальными отложениями (мощностью 10—30 м) долины, разделяющей возвышенности Сюил-корт и Сюир-корт.

Карта наглядно показывает характер складки и выявляет раздвоение на востоке погружающейся оси складки. Заметно также, что южное крыло падает круче северного. Размеры примененной установки были: $AB = 100$ м, петля квадратная 50×50 м. Работа выполнена В. Н. Дахновым, Д. А. Соколовым и П. С. Брудницким.

Теневого метод

Теневого метод принадлежит к категории ондометрических методов, т. е. методов, использующих электромагнитные коле-

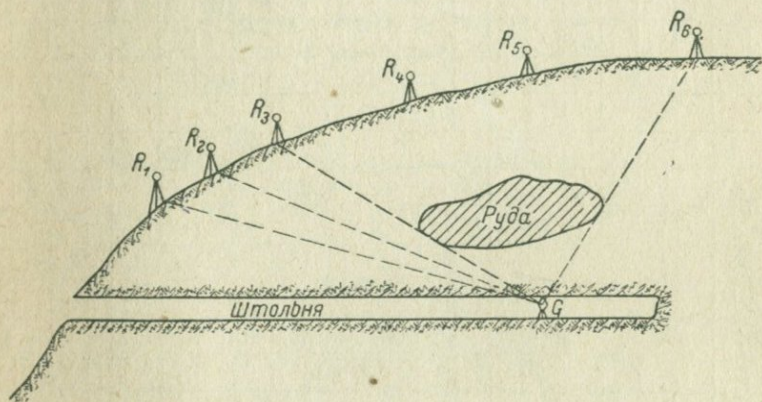


Рис. 92. Схема теневого метода.

бания высокой частоты. Длина волны, излучаемой генератором, употребляемым при работе теневого методом, — порядка 100—500 м. Такого рода электромагнитные волны обладают тем свойством, что достаточно легко проникают через сухие, плотные горные породы, но поглощаются очень сильно хорошо-электропроводными рудами и минерализованными водами.

Представим себе, что между выработкой и поверхностью земли или между выработками осталось не замеченным какое-либо рудное тело или карст, заполненный водой (рис. 92). Установим генератор G в выработке, а с приемником будем перемещаться по соседним выработкам или по поверхности земли. Тогда в точках R_1 , R_2 и других приемник будет улавливать сигналы, передаваемые генератором, а в точках R_4 , R_5 и других приемник не будет принимать сигналов, так как электромагнитная волна поглощена расположенным на пути рудным телом. Говорят,

что приемник попал в тень, полученную от рудного тела. В точках R_3 , R_6 и др. мы имеем явление полутени, когда звук сигнала уже ослаблен, но еще не исчез совсем.

Переставляя генератор и приемник в различные точки выработки, можно с той или другой точностью оконтурить пропущенное тело.

Ламповый генератор, употребляемый при теновом методе, имеет мощность несколько ватт, работает на рамку, которая может вращаться вокруг вертикальной оси; весит 20—50 кг, в зависимости от источников питания ламп. Прием сигналов происходит на рамку, могущую вращаться около вертикальной и горизонтальной осей. Поступающие колебания усиливаются усилителем, и сила приема может быть установлена количественно по шкале гальванометра. Сила приема зависит от расстояния между генератором и приемником и электрических свойств среды. Приемная установка весит 20—30 кг. Дальность действия всей установки в воздухе порядка 1 км, в сухих, плотных породах — до 100—200 м.

Мешающими факторами являются наличие влажных мощных наносов (если приемник или генератор должен перемещаться по поверхности земли) или вкрапленности, хотя и не богатой, но имеющей широкое распространение.

В СССР работы теновым методом производились в Илецке на солерудниках, Чираги-Дзорском месторождении в Закавказьи, в Мончегорске и других месторождениях сульфидов.

Глава IV

СЕЙСМОРАЗВЕДКА

§ 13. ОБЩИЕ ОСНОВЫ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Сейсморазведочные методы, подобно большинству электро-разведочных, принадлежат к той категории методов разведочной геофизики, которые базируются на изучении физических полей, возбужденных искусственным образом.

Если в какой-либо точке поверхности земли произвести взрыв (или удар), то энергия взрыва превращается в энергию разнообразных колебательных процессов, распространяющихся от точки взрыва во все стороны с конечными скоростями. Вследствие ряда причин энергия бегущих волн постепенно рассеивается и колебания затухают.

Распространение упругих волн зависит от характера самой волны и от упругих свойств среды, по которой распространяются колебания. По характеру волны можно разделить на два класса: волны продольные — когда колебания частиц тела происходят по направлению распространения самой волны, и волны поперечные — когда колебания частиц совершаются перпендикулярно к направлению распространения волны. Упругие свойства однородной и изотропной среды характеризуются, как мы

видели во введении, упругими константами: модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона σ . [Модуль Юнга численно равен силе (в динах), отнесенной к единице площади (1 см^2), необходимой для того, чтобы удвоить длину испытуемого тела. Коэффициент Пуассона — отвлеченное число, являющееся частным от деления относительного поперечного сжатия на относительное продольное растяжение при приложении к телу растягивающей силы.] Коэффициент Пуассона для различных горных пород изменяется не особенно сильно и в среднем с некоторым приближением может быть принят равным 0,25; модуль же Юнга меняется в широких пределах и зависит от состояния (пористости, влажности, структуры и т. д.) и состава горной породы. Для пород рыхлых, слабо уплотненных, мы имеем E порядка долей единицы на 10^{11} дн/см^2 , а плотные ультра-основные породы давали E до $20 \cdot 10^{11} \text{ дн/см}^2$.

Таким образом, общая задача сейсморазведки может быть сформулирована так: если на поверхности земли производить взрывы, то, так как упругие константы горных пород различны, параметры распространяющихся упругих волн будут также различны и, следовательно, можно, наблюдая эти волны на поверхности земли, судить о том, какими упругими свойствами обладают породы, расположенные под дневной поверхностью, а, в конечном счете, устанавливать — какие породы и как залегают на некоторой глубине.

В настоящее время практически используются далеко не все могущие быть использованными параметры распространяющихся волн. Используется лишь скорость распространения упругих колебаний, а по применению в разведке амплитуд, фаз коэффициента затухания и других параметров делаются лишь первые экспериментальные исследования.

Скорость распространения упругих волн зависит от характера волны и от упругих свойств среды. Для однородной изотропной среды скорость распространения продольных упругих волн может быть выражена:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\delta} \frac{1-\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)}} \quad (24)$$

или, приближенно, считая $\sigma = 0,25$:

$$V_p = \sqrt{1,2 \frac{E}{\delta}}, \quad (25)$$

где δ — плотность.

Скорость распространения поперечных упругих волн выражается:

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{2\delta(1+\sigma)}}, \quad (26)$$

или приближенно:

$$V_t = \sqrt{0,4 \frac{E}{\delta}}. \quad (27)$$

Легко видеть, что $V_p > V_t$;

$$\frac{V_p}{V_t} = \sqrt{2 \frac{1-\sigma}{1-2\sigma}} \approx \sqrt{3} \approx 1,7. \quad (28)$$

На практике чаще используются скорости распространения продольных упругих волн, хотя иногда пользуются и поперечными волнами. В вводной части мы приводили значения скоростей распространения продольных упругих волн и обозначали их V , скорости распространения поперечных волн в горных породах изучены весьма слабо.

Для того, чтобы конкретнее подойти к сущности отдельных методов сейсморазведки, рассмотрим следующую простейшую геологическую структуру (рис. 93). Пусть имеются две среды, каждая из которых однородна и изотропна: одна — верхняя — имеет скорость распространения упругих волн V_1 и мощность h , а другая — нижняя — имеет очень большую мощность и скорость распространения упругих волн V_2 .

Пусть в точке O производится взрыв (взрывают обычно динамит или аммонал), а, например, в точке 5 он принимается. Упругие колебания, возникающие при этом и используемые сейсморазведкой, можно разделить на три класса: 1) волны, распространяющиеся вблизи поверхности земли, — прямые волны; 2) волны, распространяющиеся по пути $Oab5$ и подчиняющиеся принципу минимума времени, — преломленные волны; 3) волны, идущие по пути $Oв5$, — отраженные волны.

Очевидно, что прямые волны не представляют интереса для сейсморазведки; другие же два класса волн используются для геолого-разведочных целей, и сообразно классам волн сейсморазведка делится на две ветви — сейсморазведку преломленными

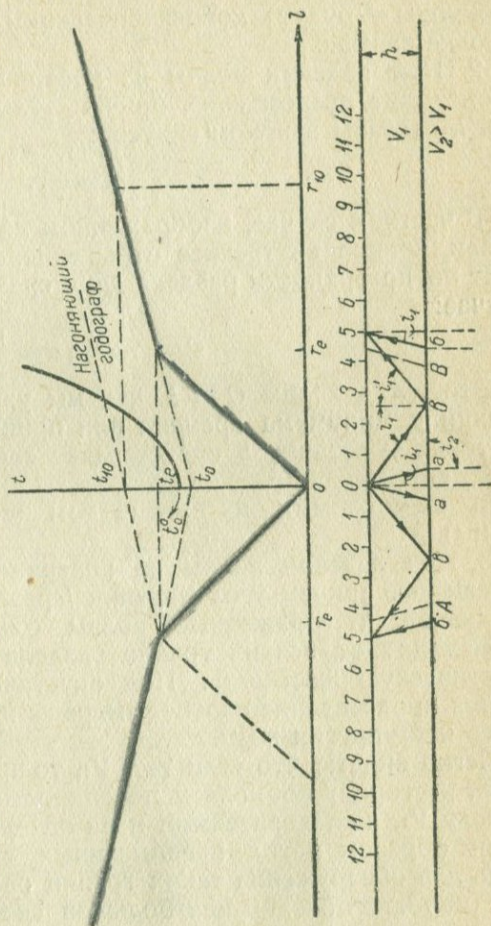


Рис. 93. Прохождение упругих волн в случае двухслойной структуры.

волнами и сейсморазведку отраженными волнами, — далее рассматриваемыми нами в отдельных параграфах.

Вводя такое деление по классам волн, мы принимаем следующее.

1. Волны в однородной и изотропной среде распространяются во все стороны с одинаковой скоростью, и, следовательно, поверхности с одинаковым временем пробега упругой волны — изохроны — будут концентрическими полусферами с центром в точке взрыва.

2. При падении волны на поверхность раздела двух сред происходит преломление, причем углы падения i_1 и преломления i_2 связаны законом синусов:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{V_1}{V_2}. \quad (29)$$

В частном случае, изображенном на рис. 93, $i_2 = 90^\circ$, т. е. мы имеем полное внутреннее отражение, когда преломленный луч идет по поверхности раздела двух сред со скоростью V_2 . В этом случае:

$$\sin i_1 = \sin \alpha = \frac{V_1}{V_2}. \quad (30)$$

Этот путь волны $O a b 5$, как мы уже отмечали, подчиняется принципу минимума времени или принципу Ферма: путь волны из точки O в точку 5 представляет собой такой путь, который проходится волной в самое короткое время по сравнению с другими возможными путями (в том числе и с путем прямой волны).

3. При падении волны на поверхность раздела происходит отражение, причем угол падения i_1 равен углу отражения i_1' (если падающие и отраженные волны одного типа), и отражение происходит от всяких границ раздела сред, имеющих разную акустическую жесткость. Под акустической жесткостью понимается произведение плотности среды на скорость распространения в ней упругих волн.

Легко видеть, что если $V_2 < V_1$, то преломленная волна отклонится в сторону нормали к поверхности раздела и из среды V_2 в среду V_1 , а следовательно, и на поверхность земли не выйдет. Таким образом метод преломленных волн может применяться лишь для обнаружения таких границ раздела, когда внизу залегает порода, обладающая большей скоростью распространения упругих волн, чем вышележащие породы. Это значительно сужает круг применимости метода преломленных волн. Метод же отраженных волн свободен от этого принципиального недостатка и, следовательно, имеет более широкие возможности применения.

Распространяющиеся волны в сейсморазведке улавливаются с помощью особых приборов, называемых сейсмографами, фиксирующими время прихода и характер пришедших к сейсмографу волн. Так как к сейсмографу, хотя и в несколько разное время, приходит большое количество колебаний, вызванных одним взрывом, то не всегда легко разобраться, какое из принятых колебаний принадлежит к тому или иному классу волн и

от какой поверхности раздела оно получено (если их несколько).

Если сейсмографы стояли последовательно или одновременно в ряде точек $1, 2 \dots 12 \dots$, а взрыв (или взрывы) был в точке 0 , то время, прошедшее с момента взрыва до момента приема волны в данной точке, будет различно: оно будет тем больше, чем дальше от точки взрыва расположен прибор. Если откладывать по оси абсцисс расстояние между взрывом и сейсмографом, а по оси ординат время, проходящее от момента взрыва до приема той или другой волны сейсмографом в разных точках, то получится кривая, носящая название годограф. Можно брать время от взрыва до момента прихода самой первой волны к данной точке и по этим «первым вступлениям» строить годограф — это будет годограф первых вступлений; чаще всего им пользуются в методе преломленных волн.

Легко видеть, что отраженные волны никогда не приходят первыми к сейсмографу, поэтому их надо выделять уже на фоне пришедших ранее волн, и, если это удастся, то можно построить годограф отраженных волн по тем же правилам, как строится годограф первых вступлений.

Рассмотрим вид годографа первых вступлений для той упрощенной геологической структуры, которую мы выше взяли. Вблизи точки взрыва первой будет приходиться прямая волна, время пробега которой равно частному от деления расстояния взрыв-прибор на скорость V_1 ; эта ветвь годографа будет прямой, практически всегда довольно круто расположенной по отношению к оси абсцисс. С некоторого расстояния r_e первой к сейсмографу будет приходиться волна преломления, а прямая и отраженная будут приходиться позднее.

Точка r_e определяется из равенства:

$$r_e = \frac{2h \cos \alpha}{1 - \sin \alpha} \quad (31)$$

Точка излома годографа будет тем дальше от точки взрыва, чем больше мощность верхнего пласта и чем больше отношение $\frac{V_1}{V_2} = \sin \alpha$, т. е. чем ближе между собою контактирующие породы по скоростям распространения упругих волн.

Следующая ветвь годографа первых вступлений будет прямой, наклоненной более полого к оси абсцисс, причем она тем положе, чем больше V_2 . Легко видеть, что скорости V_1 и V_2 можно найти из годографа:

$$V_1 = \frac{r_e}{t_e}, \quad (32)$$

$$V_2 = \frac{r_{10} - r_e}{t_{10} - t_e}. \quad (33)$$

Следовательно, имея годограф первых вступлений, мы находим r_e , V_1 , V_2 и по формуле (31) глубину залегания контактной поверхности.

Годограф отраженных волн имеет криволинейную форму, изображенную на рис. 93, причем глубина до поверхности кон-

такта может быть легко вычислена, если найдена точка t_0° — пересечения годографа с осью ординат:

$$h = \frac{t_0^\circ V_1}{2}. \quad (34)$$

После этих кратких общих замечаний перейдем к описанию методов преломленных и отраженных волн.

§ 14. МЕТОД ПРЕЛОМЛЕННЫХ ВОЛН

Метод преломленных волн является наиболее старым сейсморазведочным методом, он существует с самого начала жизни сейсморазведки, т. е. в СССР — с 1929—30 г. Применялся метод преломленных волн для решения различных задач структурной геологии: прослеживание кристаллического ложа, установление антиклинальных и синклиналиных складок, выявление конфигурации соляных куполов, прослеживание крупных тектонических нарушений, расчленение осадочной толщи на отдельные горизонты, прослеживание отдельных мощных круто падающих пластов, и т. д. В последнее время ставятся эксперименты по определению мощности наносов в пределах до 10—20 м; были эксперименты по поискам рудных объектов, и т. д.

Следует различать два вида работ по методу преломленных волн: маршрутная съемка и площадная или детальная съемка. Маршрутная съемка применяется для установления общего поведения каких-либо горизонтов в пределах больших территорий; так, например, в 1935 г. для выявления поведения докембрия и погруженного карбона в восточном секторе Большого Донбасса был задан профиль — маршрут от ст. Котельниково до ст. Тихорецкой, протяженностью 400—450 км. Маршрутная съемка может осуществляться непрерывно по всему профилю; это легче расшифровываемый и более достоверный материал, а иногда, когда нужны лишь весьма общие представления о районе и есть уверенность, что маркирующие горизонты ведут себя спокойно, съемка может быть разрывной, т. е. она ставится на отдельных участках маршрута, а на другие участки поведение интересующих горизонтов интерполируется. Указанный маршрут Котельниково — Тихорецкая был выполнен по второму способу работ.

Профили-маршруты задаются вкрест простирания складок и придерживаются хороших транспортных путей — железных и шоссейных дорог и т. д., где возможен легкий проезд автомобилей, так как маршрутную съемку рационально вести, пользуясь автотранспортом.

Качество выводов будет значительно выше, если представляется возможность провести два или более, примерно, параллельных маршрутных хода, расположенных на расстояниях, определяемых характером выясняемых структур.

Площадная съемка ставится для более детального исследования уже более или менее локализованного объекта: например,

антиклинальной или синклинальной складки, соляного купола, интрузивного тела и т. д.

В этом случае направления, по которым располагаются сейсмические профили, лучше ориентировать по оси прослеживаемой структуры, например так, как это показано на рис. 94; если же структуры очень пологи, то профили можно задавать также вкрест оси.

В случае разведки изомерных тел — соляных куполов, интрузий и т. д. — применяются радиальные профили, а на краях

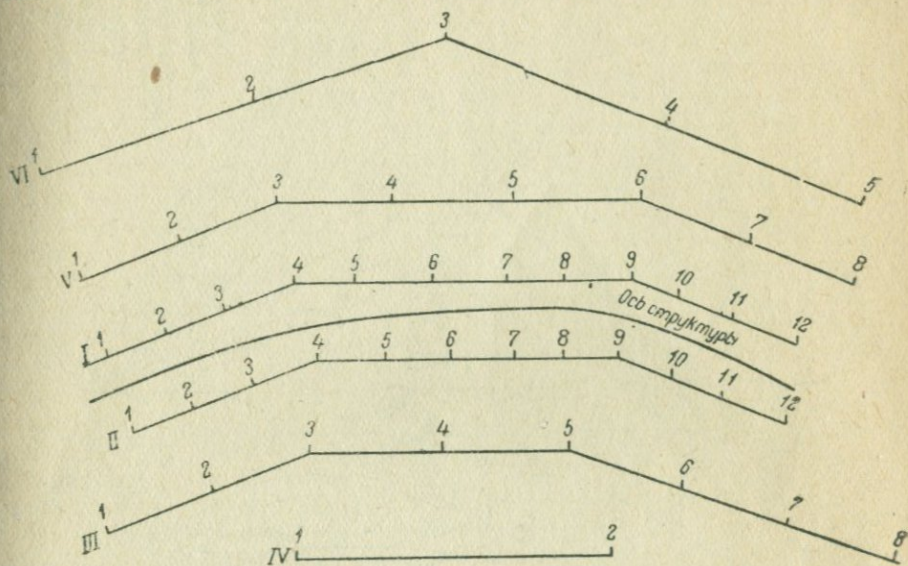


Рис. 94. Расположение сейсмических профилей при прослеживании вытянутых структур.

купола профили, направленные по крылу, — пример подобной съемки купола Шубаркудук дан на рис. 95; здесь профили № 1, 2, 13, 16, 17 и др. радиальные № 10, 14 идут по северо-западному крылу купола.

Длина отдельных сейсмических профилей определяется глубиной залегания искомого горизонта и отношением скоростей распространения волн в прослеживаемом горизонте и в вышележащих. Профиль тем длиннее, чем больше искомая глубина и чем ближе подходят друг к другу скорости распространения упругих волн.

В среднем, можно грубо считать, что длина сейсмического профиля в 3—4 раза больше глубины залегания маркирующего горизонта. При маршрутной съемке встречались профили длиной 12—15 км, при детальной съемке они, как правило, меньше.

Естественно, что при правильной организации работ профили имеют различную длину; в местах, где маркирующий горизонт подходит близко к поверхности, профили короткие —

(см. профили I и II рис. 94); по мере его погружения профили удлиняются (см. профили III и V и, наконец, IV и VI того же рисунка).

Расстояние между приборами на профиле определяется строением района работ и желаемой густотой точек, по кото-

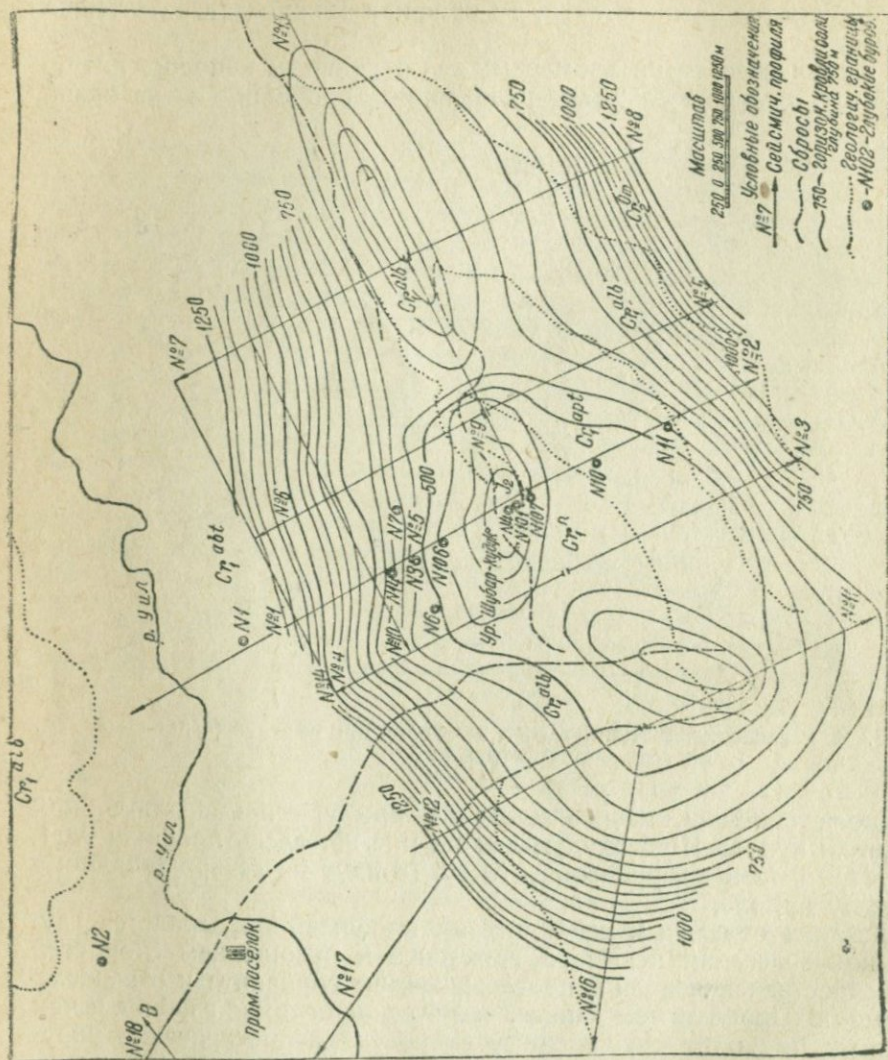


Рис. 95. Расположение сейсмических профилей на соляном куполе Шубаркудук (Эмба) С. Ф. Больших

рым строится годограф; во всяком случае оно должно быть таким, чтобы на отдельную ветвь годографа пришлось не менее трех точек.

При маршрутной съемке это расстояние доходит до 500 м (чаще 100—200—300 м), а при детальной спускается до 50—25 м, а иногда и еще меньше. В некоторых случаях расстояние между

приборами в начале профиля (вблизи взрыва) делается меньше, чем в конце того же профиля.

В комплекте аппаратуры чаще всего бывает шесть сейсмографов. Длину участка профиля, которую они занимают, называют длиной перестановки; она, очевидно, равна ушестеренному расстоянию между приборами. Тогда число перестановок на профиле, а следовательно, и взрывов в одной точке, опреде-

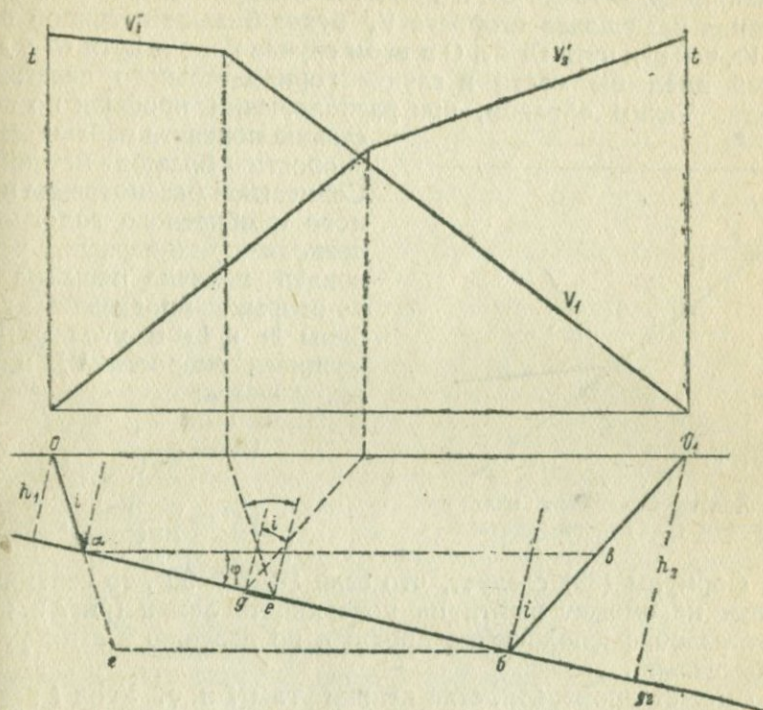


Рис. 96. Годографы прямого и обратного профиля на наклонном контакте.

ляется как частное от деления длины профиля на длину перестановки. Шаг равен длине перестановки.

Рассмотрим случай такой же простой геологической структуры, как и на рис. 93, только пусть поверхность раздела будет наклонена под углом φ к горизонту (рис. 96). Если в точке O произвести взрыв, то волна пойдет, например, по пути $O a b O_1$, который, конечно, длиннее пути $O a v O_1$; по этому последнему пошла бы волна, если бы контакт был горизонтален. Следовательно, время, затрачиваемое волной на пробег этого пути, будет больше, и 2-я ветвь годографа будет расположена более круто, чем это было бы при горизонтальном залегании. Тогда кажущаяся скорость, которая может быть найдена по этой ветви годографа — V_2' , будет меньше истинной скорости V_2 второго слоя. Получается, таким образом, что при расположении про-

филя по падению контакта мы наблюдаем кажущуюся скорость меньшую истинной. Однако, если бы мы ограничились только одним этим профилем (будем называть его прямым профилем), то не зная, что наблюдаемая скорость является кажущейся, а не истинной, мы, несомненно, допустили бы ошибку в интерпретации этого профиля. Чтобы избежать ошибки, нужно сделать измерения еще по обратному профилю, когда взрыв расположен, например, в точке O_1 , а приборы между O и O_1 . Тогда наблюдаемая кажущаяся скорость V_2'' будет больше истинной скорости V_2 , так как путь $O_1 b$ а O в этом случае короче пути $O_1 b$ г O , который имел бы место в случае горизонтального залегания контакта. Таким образом, при расположении профиля по вос-

стантию контакта наблюдаемая скорость больше истинной. Совместное рассмотрение прямого и обратного годографа позволяет, во-первых, установить наличие наклона и, во-вторых, определить глубины h_1 и h_2 и угол φ . Кажущиеся скорости V_2' и V_2'' выражаются:

$$V_2' = \frac{V_1}{\sin(i + \varphi)}, \quad (35)$$

$$V_2'' = \frac{V_1}{\sin(i - \varphi)}. \quad (36)$$

Рис. 97. Ход преломленных волн при крутом угле падения контакта.

Из формулы (35) следует, что если $i + \varphi > 90^\circ$, то сейсмический луч не сможет выйти на поверхность земли (рис. 97) и, следовательно, расположение профиля по падению в этих условиях бесцельно.

Это может произойти, если велики углы i и φ . Угол i велик тогда, когда близки V_1 и V_2 ; следовательно, если контактирующие породы имеют близкие скорости распространения упругих волн и контакт падает под большим углом, — не следует задавать профилей вкрест простирания, а нужно их располагать по простиранию контакта.

При всех съемках, когда нет уверенности в том, что контакт горизонтален, исследования должны вестись путем выполнения на обоих профилях — прямом и обратном.

Рассматривая рис. 96, мы видим, что вторая ветвь прямого годографа отражает наклон поверхности на участке db , а вторая ветвь обратного профиля — характеризует участок ea . Таким образом, общим участок контактной поверхности, отображаемом на обоих профилях, является участок de — сравнительно небольшой. Если есть уверенность, что наклон по всей длине ab одинаков, то такое положение еще не страшно, но если угол наклона может меняться, то наличие лишь маленького общего участка может привести к ошибкам в интерпрета-

ции такого профиля. Поэтому практически работают всегда раздвинутыми обратными профилями, понимая под этим, что расстояния между точками взрывов при прямом и обратном профиле увеличены для того, чтобы расширить общий участок *де*.

При детальной съемке нельзя также ограничиваться расположением профилей «впритык», как это показано на рис. 93. Легко видеть, что зона АВ при этом остается слепой, не освещенной, а это при детальной съемке далеко не всегда может быть допущено. Такие зоны следует освещать с помощью «нагоняющих» годографов; прямой «нагоняющий» годограф изображен на том же рисунке слева пунктиром.

Аппаратура, применяемая при работах по методу преломленных волн, состоит из следующих частей.

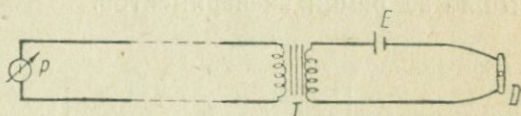


Рис. 98. Схема отметки момента взрыва.

1. Часть взрывная с отметкой момента взрыва. Взрывы динамита или аммонала, заложенных в наносах на глубину от 2—3 до 7 м, осуществляются с взрывного пункта с помощью электродетонаторов. Отметка момента взрыва производится, например, по схеме рис. 98. Электродетонатор *D* обмотан проволокой, составляющей часть цепи, по которой течет ток от элемента *E*. Вторичная обмотка трансформатора *T* с помощью двух проводов соединена с регистрирующим устройством сейсмографов. В момент взрыва цепь элемента *E* нарушается, ток в ней прекращается и это фиксируется регистрирующей частью установки на той же фотоленте, на которой записываются колебания почвы.

2. Сейсмографы, применяемые в методе преломленных волн, имеют различные конструкции, но в конечном счете все они приспособлены для того, чтобы, восприняв ничтожно малые смещения почвы, усилить их и трансформировать во вполне заметные колебания пучка света, могущего фиксироваться на фотографической бумаге-ленте.

3. Регистрирующая часть состоит из лентопротяжного механизма, протягивающего фотоленту со скоростью до 50 см в секунду, и приспособления (камертонного прерывателя), дающего на той же фотоленте марки (отметки) времени с интервалами до 0,01 сек. Это позволяет измерять время с точностью до 0,001 сек.

Мы уже говорили, что сейсмографы в комплекте обычно бывает 6, а регистраторов 2 или даже 1. 3 или все 6 сейсмографов пишут на одной и той же ленте, на которой, кроме того, отмечаются марки времени и момент взрыва. Такая лента (проявленная и зафиксированная в фотокомнате) носит название сейсмограммы — она является первичным полевым документом. Пример сейсмограммы приведен на рис. 99, где через *M. B.* обозначен момент взрыва, а через *П. В.* — первое вступление. Регистратор записывает показания трех сейсмографов, при-

чем верхняя кривая снята сейсмографом, ближе всего расположенным к точке взрыва, а нижняя — наиболее удаленным.

4. Для связи центрального пункта с отдельными сейсмографами и взрывным пунктом применяются телефоны (фонические или индукторные), причем один провод раскладывается по земле, рядом с проводами для отметки взрыва, а другим служит земля.

При очень длинных линиях раскладывание проводов для связи с взрывными пунктами и для отметки марок времени сопряжено с неудобствами, поэтому были попытки организовать радиосвязь и радиопередачу момента взрыва, но это еще не вышло за рамки экспериментов.

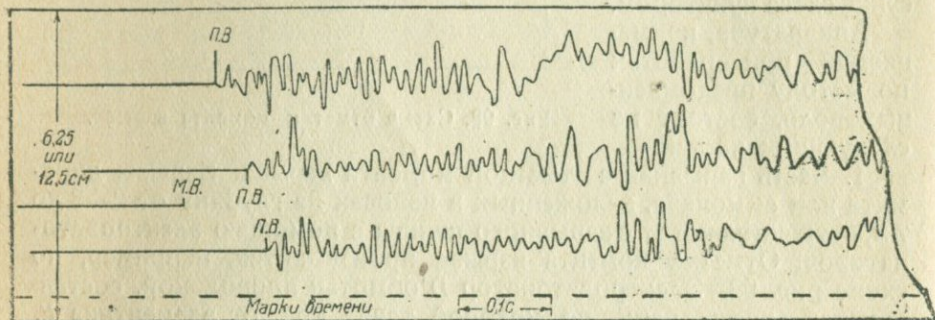


Рис. 99. Сейсмограмма.

Ведение полевых работ — принципиально простое — требует большой слаженности всех рабочих бригад (топографической, буровой, взрывной, организации связи, операторской) и хорошего руководства ими со стороны производителя работ, так как все бригады взаимосвязаны, и дефекты работы одной бригады сейчас же отзываются на производительности всех остальных.

Сначала топограф разбивает пикеты для взрывов и стоянки инструментов по профилю; параллельно или вслед за ним буровая бригада с помощью ручного бура или шурфов prepares должное количество скважин, ям для закладки взрывчатки, взрывники заряжают ямы, бригада организует линии связи и отметки момента взрыва — и только тогда на подготовленный профиль приезжает операторская бригада, расставляет приборы на некотором участке профиля и делает подводку от сейсмографов к одной или двум регистрирующим установкам. После осуществления и проверки всех включений — комплект готов к приемке взрыва. По соответствующей команде пускается регистр (регистры), через несколько секунд или долей секунды происходит взрыв и затем через некоторое время, зависящее от расстояния сейсмографов от места взрыва и средних скоростей упругих волн по району, регистр останавливается и приемка взрыва заканчивается.

Затем, не переставляя приборов, аналогичным образом принимается взрыв с другого конца профиля (обратный профиль). После этого приборы переставляются на новые пикеты, и опять принимаются взрывы с обоих концов профиля, и т. д. — пока не будет снят весь профиль. Этот метод работы носит название метода передвижных приборов. Иногда употребляется метод передвижных взрывов — тогда приборы стоят на месте, а передвигаются взрывы — это позволяет ускорить процесс работ, если заранее производить зарядку. Недостатком является усиленный расход взрывчатки. Может практиковаться и комбинированный метод: передвижных приборов и передвижных взрывов.

Для надежной расшифровки годографов необходимо до работ на данном участке или попутно во время работ производить определения истинных скоростей на выходах пород, беря маленькие сейсмические профили обычного типа (от 200 до 1500 м). Кроме того, если наносы литологически не выдержаны, нужно на каждом профиле брать еще несколько коротких (поверхностных) профилей для оценки средней скорости в наносах.

Обработка материалов по сейсморазведке преломленными волнами заключается в вычерчивании годографов, их расшифровке и затем построении разрезов и, если была площадная съемка, — построении гипсометрии маркирующих горизонтов. Иногда строят также карты изохрон. Интерпретация годографов является наиболее серьезной частью обработки; она облегчается, если промерены истинные скорости, если известна роль наносов, благодаря наличию поверхностных профилей, если имеются прямые и обратные профили. Само собой разумеется, что перед интерпретацией должен быть еще раз изучен весь геологический материал по району работ.

Расшифровка годографов и количественные подсчеты производятся на основе теоретических годографов и формул. Мы не будем приводить всех имеющихся теоретических данных, ограничимся лишь несколькими характерными примерами.

Легко видеть, что сброс будет характеризоваться годографом прямым и обратным, изображенным на рис. 100. Амплитуду сброса можно вычислить, исходя из величины разрыва веток годографа.

Рис. 101 демонстрирует годограф трехслойной структуры с наклонными контактными поверхностями.

Когда поверхность раздела не плоская, ветви годографа отклоняются от прямых; по этому отклонению можно качественно построить характер подземного рельефа — пример приведен на рис. 102.

Если не удовлетворяется основное неравенство метода преломленных волн и какой-либо пласт имеет скорость меньшую, чем вышележащий, — этот пласт не отразится на годографе; происходит, как говорят, «выпадение пласта» — пример приведен на рис. 103, где $V_1 < V_2 > V_3 < V_4$. Пласт V_3 не дает ветви, тогда как ветвь V_2 показывает увеличенную мощность пласта со скоро-

стью V_2 . Эффект выпадения пласта получается также и в том случае, когда скорость у последующего пласта незначительно больше, чем у предыдущего, и мощность его не велика. Так, на-

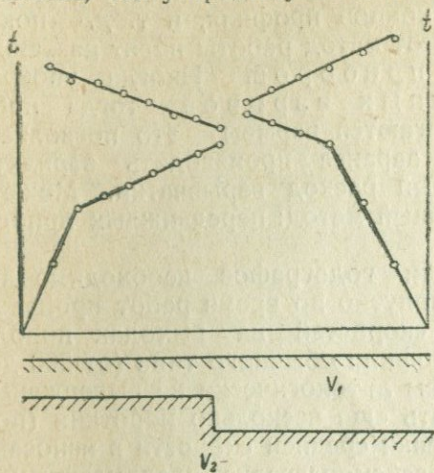


Рис. 100. Годографы прямого и обратного профилей над сбросом.

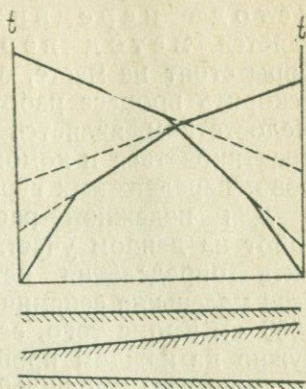


Рис. 101. Годографы в случае наклонной трехслойной структуры.

пример, может выпасть пласт V_2 мощностью до 180 м, если $V_2 = 2500$ м/сек, $V_1 = 2000$ м/сек, $h_1 = 100$ м, а $V_3 = 7000$ м/сек. Явление выпадения — очень серьезное осложнение в методе преломленных волн, но оно методом первых вступлений обнаружено быть не может. Тут нужно прибегать к обработке сейсмограмм по вторым вступлениям

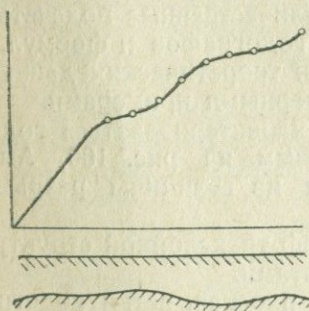


Рис. 102. Годограф при волнистом подземном рельефе.

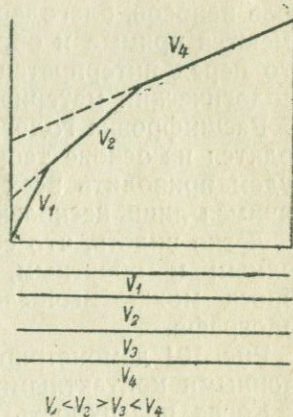


Рис. 103. Годограф с „выпадением пласта“.

или, что лучше, применять отраженные волны и исходить из геологических данных и упругих констант пород, составляющих разрез.

Примеры применения сейсморазведки преломленными волнами мы встретим еще в главе VII. Здесь же остается отметить

производительность метода: при маршрутной съемке можно снять до 50 км разреза в месяц, при детальной — больше. Стоимость 1 км разреза сильно варьирует в зависимости от местности геологических условий, вида съемки и т. д.; могут быть названы лишь средние, грубые цифры — от 400 до 1000 руб. Состав партии — 12—15 чел. техперсонала и 15—20 рабочих.

Как видим, метод преломленных волн имеет недостатки:

- 1) необходимо соблюдение неравенства $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$;
- 2) возможно выпадение пластов даже и при $V_1 < V_2 < V_3 < V_4$;
- 3) трудно вести разведку круто падающих маркирующих горизонтов;
- 4) метод для значительных глубин разведки требует постановки больших профилей, что осложняет технику их осуществления;
- 5) свыше 4—5 поверхностей раздела будет трудно установить;
- 6) метод громоздок и требует за сезон работ затрат порядка сотен тысяч рублей;
- 7) довольно большой расход взрывчатки, а в связи с этим — осложнения в ее хранении, транспортировке и т. д.

От ряда указанных недостатков свободен метод отраженных волн, поэтому в последние годы он начинает вытеснять метод преломленных волн, хотя не может его целиком заменить. Часто они употребляются в помощь друг другу и другим методам разведочной геофизики.

§ 15. МЕТОД ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН ¹

Мы уже имели возможность отметить, что отражение упругих волн может происходить, когда имеется разница в акустической жесткости контактирующих пород. При этом, если отражение происходит от среды акустически более жесткой, чем вышележащая, то амплитуда отраженной волны имеет знак, обратный амплитуде падающей волны. Учитывая, что отраженная волна направлена в сторону, обратную падающей, легко понять, что обратный знак амплитуды означает совпадение фаз падающей и отраженной волны, т. е. если к поверхности раздела подошла волна сжатия, то отразится также волна сжатия.

Если же отражение происходит от среды с меньшей акустической жесткостью, то при отражении фаза меняется. Поверхность раздела оказывает как бы «всасывающее» действие. При падении волны сжатия отражается волна разрежения.

Чем больше разность акустических жесткостей, тем большая часть энергии падающей волны переходит в энергию отраженной волны и тем меньшая доля этой энергии проходит во вторую среду.

Таким образом, границы раздела с резким изменением акустических жесткостей являются хорошими объектами разведки, но

¹ § 15 составлен П. Ф. Федотовым и Л. Я. Нестеровым совместно.

они зато в сильной степени экранируют нижележащие слои и затрудняют прием отраженных волн от их поверхностей.

Дело еще более осложняется, если промежуточные поверхности раздела наклонены по отношению к рассматриваемой отражающей поверхности.

Существование отражений от среды, акустически менее жесткой, позволяет методом отраженных волн исследовать те объекты, по отношению к которым был бессилён метод преломленных волн. На практике не редки случаи, когда метод отраженных волн устанавливает 5—10 отражающих горизонтов там, где метод преломленных волн обнаруживает одну-две границы раздела. Часто выделяемые отражающие горизонты имеют незначительные мощности и весьма незначительные различия акустических жесткостей, а тем более скоростей. Точность определения глубин при разведке методом отраженных волн может быть высокой, в особенности, если с помощью метода преломленных волн или скважинных сейсмографов определен закон изменения скорости продольных волн с глубиной. В ряде случаев ошибки в определении глубин не превосходят нескольких процентов. Даже при отсутствии знания закона изменения скоростей можно довольно точно определять относительный рельеф отражающего горизонта.

В некоторых случаях методика интерпретации данных отраженных волн отличается крайней простотой. Так, если в зоне между поверхностью земли и отражающей поверхностью скорость распространения упругих волн постоянна, то при малом расстоянии между источником и приемником сотрясений глубина отражающей поверхности определяется, как половина произведения времени пробега на скорость:

$$h = \frac{tV}{2}. \quad (37)$$

Для более сложных случаев (несколько границ раздела, большие расстояния между сейсмографами и точкой взрыва) разработаны также несложные вычислительные и графические способы расшифровки.

Метод отраженных волн позволяет достаточно легко проникать на большие глубины, причем для этого не требуется таких длинных профилей, как в методе преломленных волн. При работах по методу отражений расходуется меньше взрывчатки и т. д.

Однако, несмотря на эти и другие достоинства метода, не следует заключать, что метод отраженных волн — всемогущий, что иногда делают некоторые авторы. Метод отраженных волн, как и ряд других методов геофизики, на современном этапе развития может быть эффективно использован лишь при определенных физико-геологических и топографических условиях:

- 1) необходимо наличие сред с различной, практически осциллирующей акустической жесткостью;
- 2) отражающие поверхности должны иметь «зеркальную» по-

верхность, иначе говоря, переход на границе раздела от одной среды к другой должен быть резкий — скачком;

3) отражающая поверхность не должна иметь резких тектонических нарушений (разрывы, смятия, мелкая складчатость — гофрировка);

4) горизонты, подлежащие исследованию, должны выдерживаться как по мощности, так и по литологическому составу на всем исследуемом участке;

5) верхний — наносный — слой не должен иметь мощность более 40 м, так как большая мощность наносов ведет к резкому повышению стоимости работ и к понижению качества первичного материала;

6) наличие значительных заболоченных и затаеженных участков и резкого рельефа сильно мешает работе, так как весь участок должен быть проходимым для автомобильного транспорта в любых направлениях;

7) участок работ должен быть достаточно геологически освещен и должны быть известны скоростные характеристики пород (наличие опорных буровых скважин). Следует оговориться, что ни одно из отмеченных условий, кроме первых двух, не снимает полностью применения метода отраженных волн, но каждый из этих факторов может привести к нечетким результатам и многозначному решению, особенно в части количественных характеристик (глубина, углы падения, мощность пластов и т. д.).

Наибольшее развитие метод отраженных волн получил при детализации нефтеносно-соленосных структур, причем работа обычно производится после детальной геологической съемки и геофизических работ методами гравиразведки, а иногда магнито-разведки и электроразведки.

В настоящее время существуют два вида исследований методом отраженных волн — маршрутная съемка и площадная детальная разведка.

Первая производится с целью обнаружения геологических структур, вторая — для детального исследования структур, обнаруженных в результате геологической съемки или постановки других геофизических методов.

При маршрутной съемке там, где отражающие горизонты залегают горизонтально и выдерживаются по мощности и литологически на значительных расстояниях, принципиально можно разведку вести системой изолированных точек. Так как эта система не нашла широкого распространения, мы на ней подробно и не останавливаемся.

Чаще и при маршрутной и при детальной съемке работа ведется по профилям, причем они располагаются обычно вкрест простирания предполагаемой структуры.

При детальном изучении задается сеть параллельных и радиальных профилей различной густоты и длины, связанных между собою полигонными ходами.

В качестве примера расположения профилей при детальных работах приводим на рис. 104 схему ведения геофизических ис-

следований на соляном куполе Макат (Эмба). Метод отраженных волн ставился на основе карты изогамм (пунктирные линии) и предварительной карты изогипс (сплошные линии), построен-

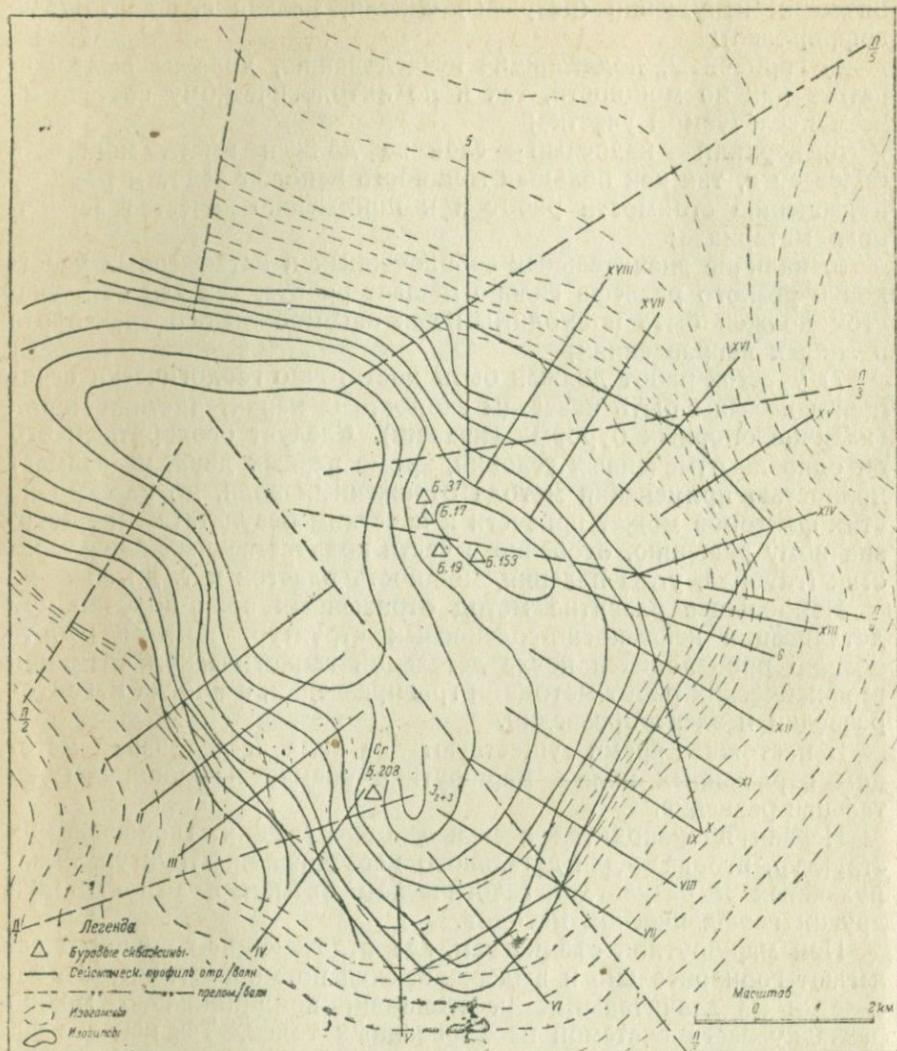


Рис. 104. Схема ведения работ по методу отраженных волн на соляном куполе Макат (Эмба).

ной по данным сейсморазведки методом преломленных волн. Профили метода отраженных волн нанесены на рисунке сплошными прямыми линиями.

Для обеспечения однозначной геологической интерпретации отражающих горизонтов сейсмические профили опираются на структурные механические буровые скважины.

По профилю размещаются пункты взрывов с расстояниями между ними 600—1500 м, определяемыми существом задачи, количеством сейсмографов, работающих одновременно на профиле, и расстоянием между ними. Необходимо, чтобы в интервал между пунктами взрывов поместилось целое число перестановок приборов.

Расстояния между приборами бывают от 10 до 100 м, но практика выработала наиболее часто встречающиеся оптимальные расстояния порядка 20—50 м. Общая схема профиля изображена на рис. 105.

При маршрутной съемке работа может ограничиться съемкой одного такого профиля достаточно большой длины, хотя для надежности и достоверности расшифровки желательно, чтобы было 2—3 примерно параллельных профиля.

При детальной съемке лучше, если работа идет не по отдельным разобленным профилям, а если профили между собою связаны непрерывными наблюдениями; с этой целью можно практиковать работу по замкнутым полигонам, связанным также и один с другим.

Расстояния между профилями при детальной съемке зависят от характера изучаемой структуры и глубины маркирующих горизонтов.

При каждой установке сейсмографов взрывы производятся с обоих ближайших пунктов взрыва для того, чтобы получить прямые и обратные годографы.

Полевые работы партии отраженных волн можно разбить на ряд этапов: топографические работы, включающие в себя разбивку, привязку и нивелировку профилей, бурение скважин для взрывов, заготовление бурок для сейсмографов, протягивание линии связи и установка станции отраженных волн.

Первые три вида работ должны значительно опережать остальные с тем, чтобы к приезду станции профиль был в полной готовности.

На буровые работы при этом следует обращать особое внимание потому, что они занимают значительный удельный вес в общем объеме работ и сильно влияют на качество получаемых отражений. Как показывает практика, наиболее эффективные ре-

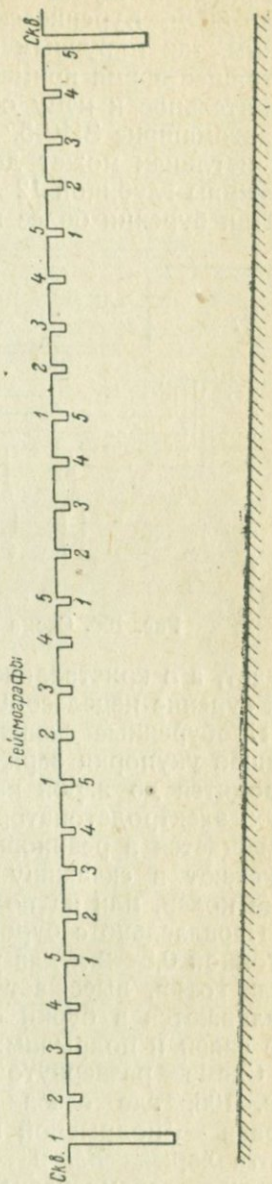


Рис. 105. Схема профиля отраженных волн.

зультаты получаются при ведении взрывов ниже зоны выветривания в пластичных или твердых породах. Глубина скважин в различных случаях колеблется в пределах 4—100 м, чаще от 15 до 30 м. Бурение скважин может производиться как механическим, так и ручным способом. Для механического бурения в настоящее время применяется станок типа АВ К-300. Станок, дополнительное к нему оборудование и инструмент смонтированы на автомашине ЗИС-5. Буровой агрегат за рабочий день в песках и глинах может дать: 3 скважины глубиной 8 м, или 1—2 скважины глубиной 12 м, или 1 скважину глубиной 15—30 м.

При бурении более плотных пород производительность резко

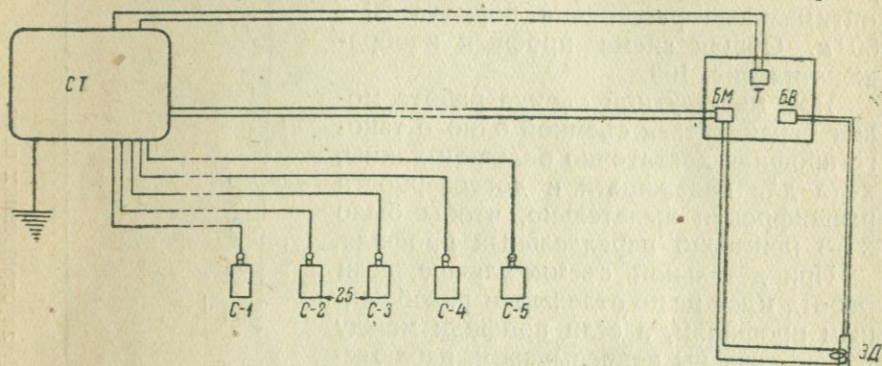


Рис. 106. Схема установки по методу отраженных волн.

падает, а в кристаллических и сильно метаморфизованных породах бурение нецелесообразно.

Пробуренные скважины обязательно заливаются водой (для лучшей укупорки зарядов) и обсаживаются трубами, которые не доводятся до забоя на 2—5 м. Заряд составляется из одного-двух электродетонаторов, динамита или другой взрывчатки и помещается в резиновые мешки, обернутые в пергамент. Заряд опускают в скважину на деревянных шестах, соединенных из ряда колен, или на полой штанге.

Параллельно с буровыми работами ведется подготовка бурок глубиной 0,5—2 м для установки в них сейсмографов. Когда профиль готов, выезжает сейсмическая лаборатория-станция, устанавливаются в бурки сейсмографы и производится развертывание связи и подрывных пунктов.

Схема развернутой полевой установки приводится на рис. 106, где слева изображена станция СТ (лаборатория), справа — подрывной пункт с телефоном Т, батареями для момента взрыва БМ и взрывной БВ, ЭД — электродетонатор, С-1 и т. д. — сейсмографы.

После включения всех элементов установки производится прием взрыва сначала с одной скважины, а затем с другой. Затем сейсмографы переставляются в новые точки профиля, причем шаг равен расстоянию между приборами, умноженному на число приборов.

В местах, где отражения недостаточно четки и не выдерживаются по профилю, для большей уверенности в корреляции при переходе от одной установки сейсмографов к другой — сейсмограф большого порядкового номера оставляют в прежнем положении, а остальные устанавливаются в обратном порядке; иначе говоря, взятие профиля осуществляется сплошными перестановками с перекрытиями (как на рис. 105).

Каждой сейсмограмме при получении сразу же дается оценка. Это позволяет, во-первых, установить качество отражений, во-вторых, дать оценку работы аппаратуры и, в-третьих, установить величину следующего заряда, который колеблется, как правило, в пределах 25—3000 г. При оценке сейсмограмм главное внимание обращается на четкость момента вступления, одинаковость направления первых вступлений, четкость записи марок времени, наличие паразитических колебаний, создаваемых электрическими цепями, и чувствительность сейсмосписывающих цепей. Замеченные ненормальности сразу же устраняются, и аппаратура настраивается на оптимальную чувствительность.

Аппаратура для приема колебаний состоит из трех основных узлов. Собственно приемная часть состоит из 6—9 электромагнитных сейсмографов с воздушным или масляным затуханием. Усилительная часть представлена 6—9 четырехкаскадными усилителями на сопротивлениях с коэффициентом усиления порядка 10 000. Регистрирующая часть состоит из лентопротяжного механизма, обладающего скоростью выброса ленты 20—60 см/сек, камертонного генератора, дающего марки времени (в одну секунду наносится 100 полосок на сейсмограмму), и 6—9-шлейфового блока гальванометров с чувствительностью порядка 10^{-6} А.

К четвертому узлу можно отнести вспомогательное оборудование: фониические телефоны полевого типа, отметчик момента взрыва, источник питания электрических цепей и соединительные провода различных марок.

Общая схема расположения усилительной и осциллографической (регистрирующей) частей показана на рис. 107. Эта часть монтируется внутри закрытой автомашины. С катушек в левой стороне рисунка идут провода к сейсмографам.

Оборудование взрывного пункта состоит из коммутатора взрывного пункта, батарей сухих элементов для цепи момента и «подрывной цепи», фониического телефона, гибкого медного провода с просмоленной изоляцией, шестов для опускания заряда в скважину и железных штанг для прочистки скважины. Связь взрывного пункта с лабораторией осуществляется посредством двухпроводных телефонных линий.

Все технические средства — сейсмическая лаборатория, буровой агрегат, цистерна для воды — монтируются на автомашинах. Для монтажа бурового агрегата и цистерны, как правило, используются трехтонные автомашины ЗИС-5, а для монтажа лаборатории — полутонные автомашины ГАЗ, хотя есть ряд станций, смонтированных также на автомашине ЗИС-5. Для обслуживания двух взрывных пунктов используют полутонную автома-

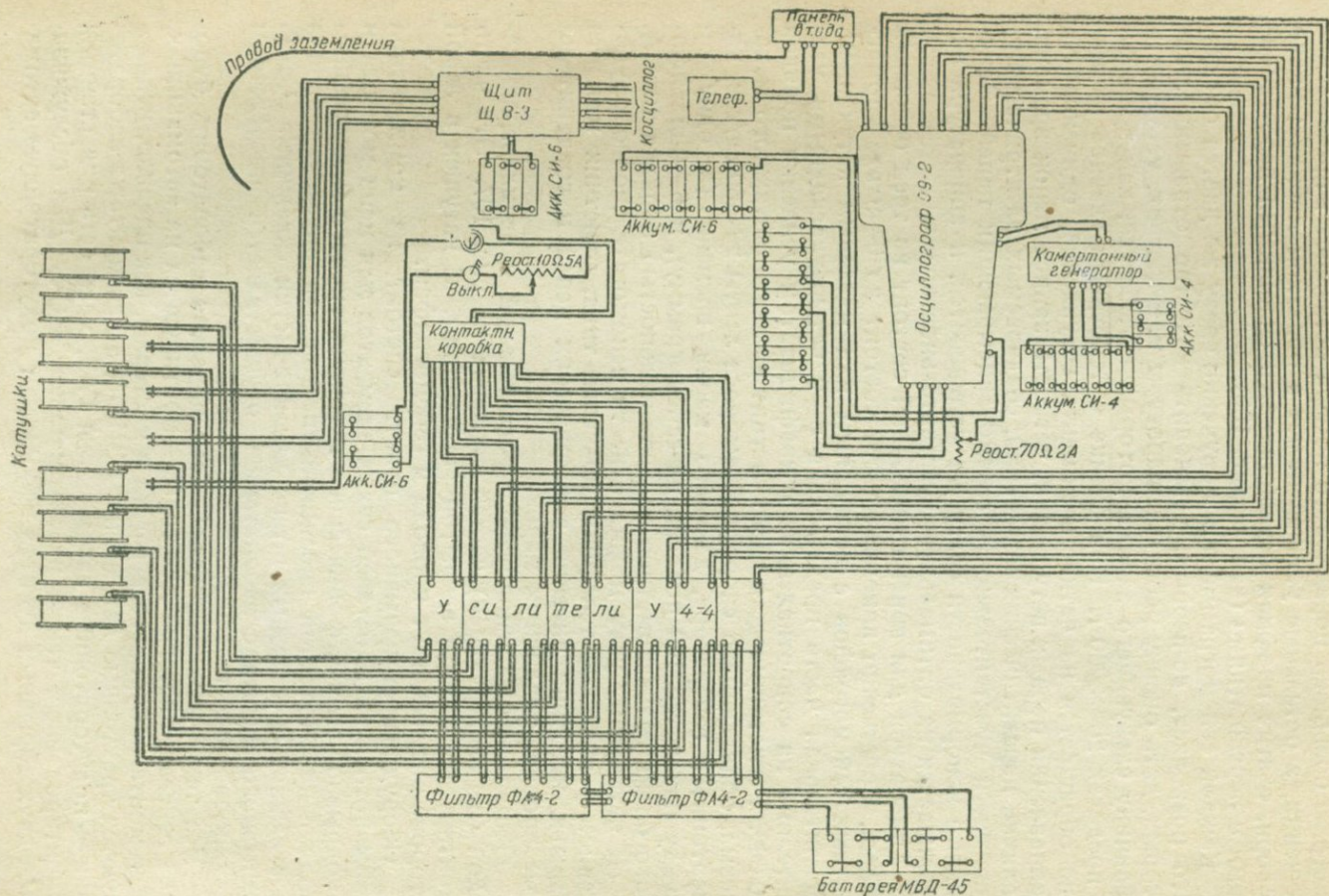


Рис. 107. Схема расположения усилителей и регистрирующей частей в автомобиле.

шину ГАЗ. Пятая автомашина ГАЗ обслуживает хозяйственные нужды партии в целом. Из сказанного следует, что для нормальной работы партии необходимо иметь пять автомашин.

Даже из беглого ознакомления с аппаратурой все же можно видеть значительную техническую насыщенность партии и, следовательно, большую сложность управления производственным процессом. Поэтому квалификация и организаторские способности инженера-сейсморазведчика должны быть на надлежащей высоте.

Первичным полевым материалом являются сейсмограммы, которые после соответствующей документации поступают в обработку и интерпретацию. Пример производственной сейсмограммы приведен на рис. 108. Момент взрыва показан в левой стороне внизу стрелкой. Марки времени — вертикальные темные полоски. В правой части пунктиром намечены моменты прихода отраженных волн — отмечается наличие трех отражающих горизонтов.

При установлении отражений на сейсмограммах обычно отмечают не моменты первых вступлений отраженной волны, которые чаще всего слабо заметны, а моменты, соответствующие ближайшему пику (рис. 108).

Сняв с сейсмограммы в результате обработки времена прихода отраженных волн, вносят в них поправки на рельеф и зону «выветривания» для того, чтобы избежать ошибок, которые возни-

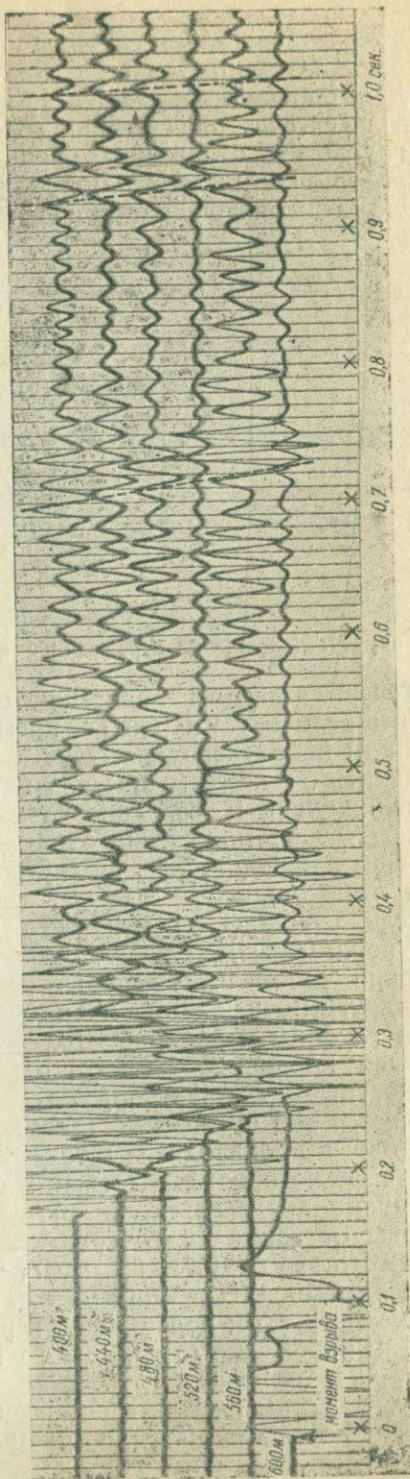


Рис. 108. Сейсмограммы, полученные при работе методом отраженных волн.

кают при определении глубины и наклона отражающей площадки в результате непостоянства этих элементов.

Для определения глубин и наклона отражающих поверхностей существует ряд способов аналитических и графических. Если на годографе отраженных волн на некотором небольшом его участке можно выделить прямолинейный отрезок, то тогда легко найти кажущуюся скорость (V_k) как частное от деления разности абсцисс на разность ординат концов этого участка. Если к тому же известна скорость (V_1) в слое до отражающего горизонта, то можно найти направление сейсмических лучей после отражения от поверхности раздела по формуле Бендорфа:

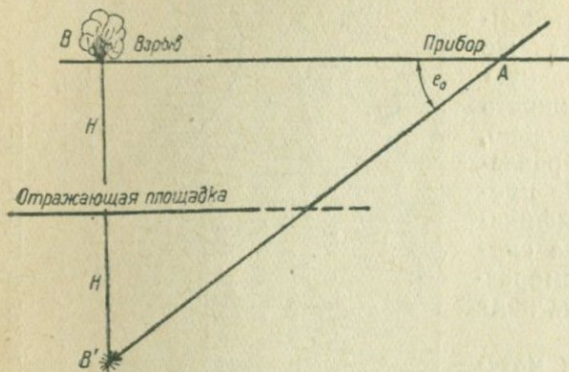


Рис. 109. Нахождение отражающей площадки.

$$\cos e_0 = \frac{V_1}{V_k}. \quad (38)$$

Теперь, если по направлению отраженного луча (рис. 109) отложить величину $V_1 t$ (где t — время пробега волны от взрыва до точки A) и полученную точку B' соединить с пунктом взрыва, то перпендикуляр к середине отрезка $B'B$ даст положение отражающей площадки, т. е. ее глубину и наклон.

Если с годографа отраженных волн нельзя получить достаточно точно V_k , то пользуются другими методами определения глубины и наклона отражающей площадки. Когда поверхность раздела плоская, употребляется метод засечек (рис. 110). Взрыв производится в точке B , а время прихода отраженных волн определяется по обе стороны от взрыва в точках A и C . Пусть это будут величины t_A и t_C ; тогда, сделав из точек A и C радиусами $V_1 t_A$ и $V_1 t_C$ засечки, найдем точку B' . Соединив ее с точкой взрыва и восстановив перпендикуляр к ее середине, мы получим положение отражающего горизонта, т. е. глубину его H и наклон к горизонту.

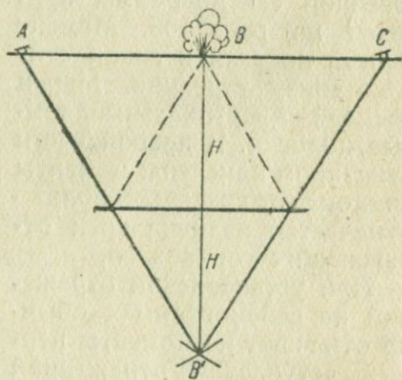


Рис. 110. Нахождение отражающей площадки методом засечек.

Более общим приемом нахождения отражающей поверхности является метод эллипсов, состоящий в следующем. Если известно

время пробега отраженной волны между двумя точками—взрыв—сейсмограф (t) и скорость ее распространения (V_1), то легко определить длину ее пути. Принимая эту длину пути, равную $V_1 t$, за сумму фокальных расстояний, а точки—взрыв и прибор—совпадающими с фокусами, можно построить эллипс (рис. 111).

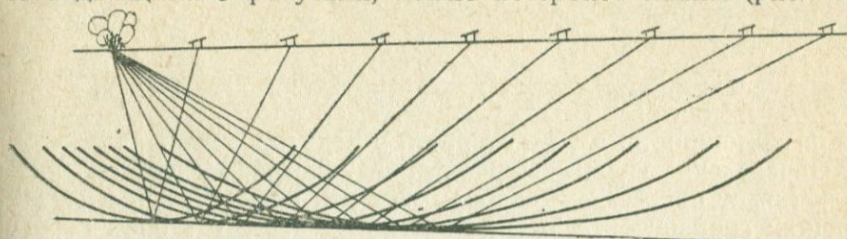


Рис. 111. Построение отражающей поверхности по методу эллипсов.

Так как одна из точек каждого эллипса, построенного для точек взрыва и сейсмографов, будет принадлежать отражающей поверхности, то последняя может быть определена как огибающая построенного семейства эллипсов.

Таким путем при сплошном профиле можно достаточно детально обрисовать поведение отражающего горизонта.

При всех указанных построениях, так же, как и в аналитические формулы, входит V_1 — скорость в слое, лежащем выше отражающего горизонта. Если этот слой однороден, тогда вычисления или построения дают правильное положение отражающей площадки. Однако весьма часто под V_1 надо понимать суммарную или, как говорят, среднюю скорость ряда слоев, перекрывающих отражающий горизонт, и от знания ее зависит правильность расшифровки наблюдений.

В районах, где имеются глубокие скважины, средние скорости до различных отражающих горизонтов определяются с помощью каротажного (скважинного) сейсмографа. При этом, если расстояние пункта взрыва от устья скважины равно x (рис. 112), глубина погружения сейсмографа — z , а время прихода к нему прямой волны — t , то, в простейшем случае, средняя скорость V_{cp} :

$$V_{cp} = \frac{1}{t} \sqrt{x^2 + z^2}. \quad (39)$$

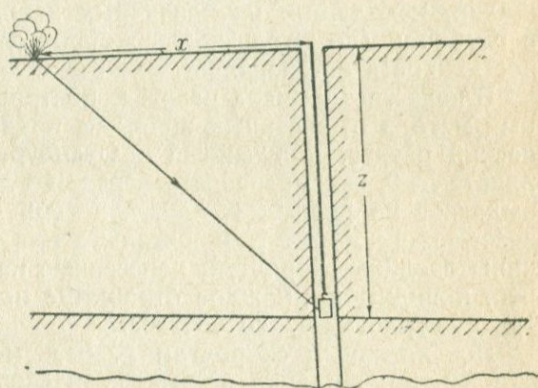


Рис. 112. Определение средних скоростей распространения упругих волн с помощью скважинных сейсмографов.

Другим методом определения средней скорости является определение по годографам преломленных волн. Если определены мощности слоев, заключенных между поверхностью земли и отражающим горизонтом, и скорости распространения в них упругих волн, то средняя скорость может быть вычислена по формуле:

$$V_{cp} = \frac{\sum h_i}{\sum \frac{h_i}{V_i}}, \quad (40)$$

где h_i — мощность, а V_i — скорость в некотором слое.

Определение средней скорости по годографам преломленных волн может привести к ошибкам, так как существование экранирующих горизонтов, эффекты выпадения и анизотропии горных пород могут сильно исказить результаты вычислений.

Наконец, третий способ определения средней скорости основан на использовании годографа отраженных волн, позволяющего графически или по методу наименьших квадратов найти V_{cp} .

Существует также ряд приемов нахождения отражающей площадки, исходящих из различных законов изменения скорости с глубиной (до отражающего горизонта); однако мы не имеем возможности останавливаться на них.

В качестве примера разреза, построенного на основании данных метода отраженных волн, мы приводим на рис. 113 сейсмический разрез, полученный в Оренбургской области. Взрыв на пикете № 8, сейсмографы — через 100 м. Метод отраженных волн выделяет на разных глубинах восемь отражающих горизонтов, залегающих почти горизонтально и согласно. Различные величины средних скоростей, нанесенные на рисунке, говорят о том, что, по видимому, каждое отражение получено от пород различного литологического состава.

По истинным скоростям разрез может быть разделен на 4 зоны, причем зона повышенных скоростей (4800—5000 м/сек) заключена внутри зон, имеющих меньшие скорости (2800—3500 м/сек).

Геологическая интерпретация отражающих горизонтов при работах в нефтяных районах, как правило, производится геологами; в этом случае построенный сейсмический разрез с указанием отражающих горизонтов и их скоростной характеристикой является окончательным продуктом сейсмических работ.¹ В тех случаях, где имеются достаточно глубокие механические буровые скважины и отражающие горизонты выдерживаются по простиранию, они привязываются к скважинам и, следовательно, каждый отражающий горизонт получает геологическую характеристику.

Производительность партии метода отраженных волн определяется количеством взятых точек за рабочий день и колеблется в довольно широких пределах. Она зависит от ряда факторов и, в первую очередь, от работы отдельных звеньев партии. Произ

¹ Такое положение нужно считать ненормальным.

водительность чаще всего снижается из-за отсутствия запаса скважин, траты времени на налаживание аппаратуры, сейсмолаборатории и нечеткой работы взрывных пунктов.

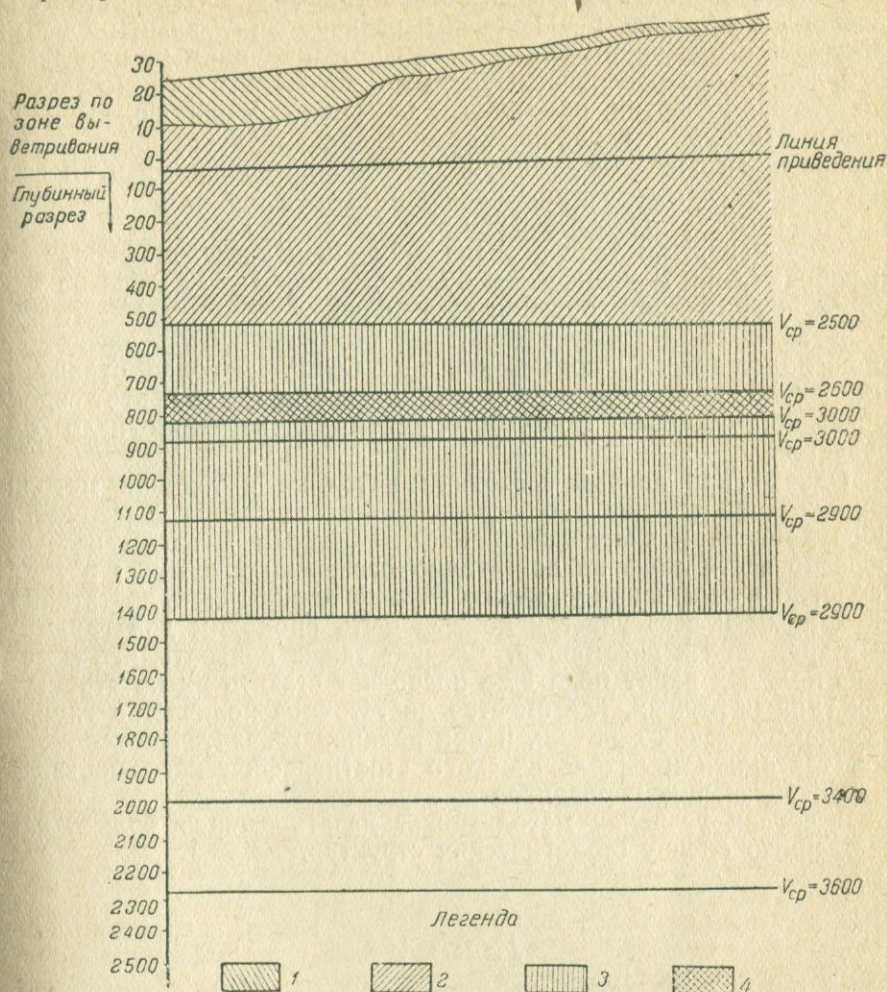


Рис. 113. Сейсмический разрез Красноярской структуры Оренбургской области.

- 1 — зона выветривания $V = 400-900$ м/сек;
 2 — зона со скоростью $V = 2000-2800$ м/сек;
 3 — зона со скоростью $V = 2800-3500$ м/сек;
 4 — зона со скоростью $V = 4800-5000$ м/сек.

Норма дневной производительности для каждого района определяется отдельно. Здесь учитывается геологическое строение района, рельеф, наличие дорог, населенность района, время года, климатические условия и ряд других факторов.

При работе методом отраженных волн под точкой принято понимать получение удобочитаемой сейсмограммы, характери-

зующей все интересующие отражающие границы раздела при одном положении приборов и производстве взрывов с одной скважины. Величина средней дневной производительности колеблется в пределах 5—11 точек и базируется, главным образом, на данных практики. Стоимость работ, проводимых в разных районах, также различна. Например, договорная стоимость одной точки в партии, работавшей в Роменском районе, выражалась в 170 руб., а в районе Красноярской структуры одна точка стоила не меньше 260—270 руб. Общие ассигнования партии при плсщадном детальном обследовании в течение сезона определяются суммой порядка 300 000 руб.

Состав партии: техперсонала — 12—13 человек, шоферов — 5 и рабочих, при механическом бурении скважин, — до 30—35 человек, а при ручном бурении еще больше.

В заключение следует отметить, что хотя двухлетний опыт производственного применения в СССР метода отраженных волн далеко недостаточен, но все же и за этот срок доказано, насколько мощным орудием для изучения недр он является.

Однако при данном состоянии методики и техники метода широкое применение его ограничено вследствие громоздкости оборудования и снаряжения. Работы данным методом целесообразно вести лишь на достаточно освещенных с точки зрения геологии и геофизики участках. Рельеф должен быть достаточно спокойным и весь участок должен быть проходим для груженых трехтонных автомашин. Следует также признать, что методика полевых работ пока еще позволяет ставить их на структурах типа нефтяных, где имеется достаточное количество глубоких механических скважин, и при наличии сравнительно спокойной тектоники и литологического стратиграфического постоянства отражающих горизонтов.

В других условиях метод может давать скорее только качественную оценку геологических структур.

Глава V

ДРУГИЕ МЕТОДЫ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Помимо основных четырех разделов разведочной геофизики — гравиразведки, магниторазведки, сейсморазведки и электроразведки, рассмотренных нами, — в настоящее время существует и имеет все тенденции дальнейшего развития ряд методов, объединяемых в четыре самостоятельные направления. Это физико-химические методы, радиоактивные методы разведки, геотермия и кароттаж скважин. Первые три категории методов излагаются в данной главе, кароттаж же скважин, получивший весьма широкое распространение, требует большего внимания и поэтому выделен нами в самостоятельную главу.

§ 16. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Разработка вопросов применения физико-химических методов анализа к разведке полезных ископаемых начинается с 1929 г., когда В. А. Соколовым был предложен метод газовой съемки. Полевое применение физико-химических методов начинается с 1932 г. как по линии газовой съемки, разрабатываемой нефтяниками, так и по линии методов поисков месторождений руд цветных металлов, разрабатываемых ЦНИГРИ. К настоящему времени физико-химические методы утилизируются при поисках значительного числа полезных ископаемых: нефти, Cu, Zn, Pb, Mo, Sn, W, Ni, Cr, В и др., иногда выступая в качестве ведущих методов поисков. Особенностью физико-химических методов надо считать то, что они, в отличие от других методов разведочной геофизики, являющихся методами косвенными, являются прямыми методами поисков в том смысле, что указывают на наличие или отсутствие определенного полезного ископаемого. Применимость методов физико-химического анализа ограничена случаями наличия так называемых «ореолов рассеяния» у месторождений, понимая под этим термином зону элювия-делювия, а иногда и аллювия, обогащенную элементами, попавшими сюда вследствие механических или химических процессов, претерпеваемых месторождением.

Можно различать три типа ореолов рассеяния: механические ореолы, химические или солевые ореолы и ореолы газовые. Механические ореолы могут образоваться в зоне выветривания месторождения, если оно представлено устойчивыми минералами, например, кварцем, касситеритом, хромитом, вольфрамитом, гюбнеритом, молибденитом, золотом и др. Доказательства существования механических ореолов рассеяния этих минералов общеизвестны, так как россыпи их встречаются достаточно часто. В упрощенном виде механический ореол можно представлять так, что непосредственно над головой месторождения в элювии-делювии содержится значительное число раздробленных частиц устойчивого минерала месторождения, а по мере удаления в стороны число частиц постепенно падает до предела, соответствующего содержанию данного минерала в пустых породах. Природные условия часто будут вносить поправки в эту упрощенную схему в смысле ее усложнения. Так, например, возможное сползание элювия-делювия по склону может нарушить положение как максимума концентрации устойчивого минерала, так и свала в целом. В местах с сильными и частыми ветрами также возможно значительное отклонение ореола от нарисованной упрощенной картины.

Химические или солевые ореолы образуются за счет диффузии из зоны окисления рудного тела минерализованных растворов в элювий-делювий. К числу неустойчивых в зоне выветривания минералов относятся, в первую очередь, главнейшие сульфидные рудные минералы как пирит, пирротин, халькопирит, борнит, халькозин, ковеллин, сфалерит, пентландит и др. Эти

минералы, окисляясь, дают свободную серную кислоту и сульфаты соответствующих металлов, легко растворимые в воде. Естественно допустить в упрощенном виде, что над головой рудного тела в элювии-делювии концентрация растворенных солей максимальна, а чем дальше от тела — тем она все меньше и меньше, пока не достигает предела, соответствующего содержанию данного элемента в пустых породах. Природные условия будут, конечно, действовать в сторону усложнения картины.

Так, например, движение подземных вод может явиться причиной смещения максимума концентрации в сторону; сильные и частые дожди могут повести к уменьшению интенсивности ореола, и т. д.

Газовые ореолы могут появиться вследствие диффузии из глубины к поверхности газов, возникающих в процессе реакций, происходящих в залежах того или иного полезного ископаемого. Так, нефть может выделять углеводородные газы, известны выделения газов на месторождениях серы и угля, наконец, гелий может также создать ореол рассеяния.

Естественно, что если среда над залежью в равной степени способна пропускать газ, то тогда максимум газового ореола будет над залежью, а по сторонам содержание будет падать до предела, соответствующего содержанию данного газа в пустых породах. Если же имеются облегченные пути проникновения газов (трещины, зоны разломов и т. д.), то там можно ожидать интенсивного газовыделения и, следовательно, это может сильно осложнить картину.

Физико-химические методы поисков месторождений сводятся, собственно, к поискам ореолов рассеяния этих месторождений в верхних слоях наносов и могут быть разделены на два этапа. Первый этап заключается в отборе пробы с легко доступной глубины и второй — в анализе этой пробы на содержание интересующего элемента с помощью того или иного физико-химического приема. Второй этап может осуществляться как в полевой лаборатории вблизи мест взятия проб, так и (при соблюдении некоторых правил обращения при транспортировке проб) в стационарной лаборатории вдали от месторождения. Полевая лаборатория, конечно, приемлемее, так как позволяет рационально направлять работу и осуществлять оперативное руководство ею.

Пробы элювия-делювия при поисках рудных объектов отбираются по квадратной или прямоугольной сетке, если съемка ведется в слабо освещенном районе или требуется систематически исследовать некоторую площадь. Часто, когда проверяются аномалии, полученные другими методами разведочной геофизики, и в некоторых других случаях пробы отбираются по профилям, задаваемым вкрест простирания (вкрест аномалии) оруденения. Так как ширина ореола много больше проекции рудного тела на дневную поверхность, то расстояние между точками отбора проб может быть в несколько раз больше ожидаемых мощностей искомым объектов.

Пробы отбираются с помощью закопашек, ручного бура или гидрогеологической ложки с некоторой постоянной для данного планшета глубины — от 25 см до 1 м. Проба берется в объеме 100—200 см³ или 0,250—0,500 кг наиболее измельченного материала, засыпается в специальные мешочки или конверты, заносится в журнал и получает свой порядковый номер.

Доставленная в полевую или стационарную лабораторию проба подвергается измельчению (истиранию) до 200 меш в фарфоровой ступке и сокращению по известным правилам. Приготовленная таким образом проба завертывается в бумажный капсоль с порядковым номером пробы и затем поступает для анализа.

Пробы из месторождений с механическим ореолом рассеяния подвергаются чаще спектрографическому анализу, а пробы, отбираемые при поисках солевых ореолов, — микрохимическому экспресс-анализу с помощью, например, капельных индикаций.

Спектрографические методы анализа

Спектральный анализ осуществляется с помощью спектрографов с кварцевой или силивиновой оптикой; в последнее время разрабатываются приемы анализа с помощью более простых и дешевых спектрографов со стеклянной оптикой. Спектрограф устанавливается в специальном помещении с хорошей вентиляцией. Проба, закладываемая в углубление (канал) в нижнем угле, сжигается затем в пламени вольтовой дуги. Для питания дуги необходим постоянный ток напряжением 110—120 В; сила тока — от 4 до 15 А. Время горения пробы (экспозиция) — 30 секунд. Свет от пламени дуги проектируется особой линзой на щель спектрографа, вырезающую тонкий пучок света, который попадает далее на преломляющую призму, являющуюся основной частью прибора. Световой луч призмой разлагается в спектр, который фотографируется на фотопластинку. После того, как на пластинку снята целая серия проб, а также спектр искомого элемента, она проявляется и фиксируется. Для проявления должна быть оборудована специальная затемняющаяся фотолаборатория.

Количественное определение содержания того или иного элемента в пробе производится по методу появления спектральных линий. Для определенных условий сжигания пробы должны быть составлены заранее таблицы, характеризующие последовательность появления тех или иных спектральных линий определяемого элемента в зависимости от процентного содержания его в пробе. Пример такой таблицы для олова приводится ниже (табл. 17).

Сличая спектр пробы со спектром чистого искомого элемента, устанавливают присутствие или отсутствие той или другой спектральной линии в спектре пробы и затем по таблице находят процентное содержание искомого элемента в пробе.

Появление линий олова при съемке проб на сильвиновом спектрографе
Государственного оптического института

Постоянные условия съемки. Угли Экстра \varnothing 10 мм. Диаметр канала в положительном электроде 2,7 мм, глубина канала 6 мм. Пластины Ортохром чувств. 200 по X и Д. Экспозиция 30 сек. при силе тока 6—7 А. Проявление „по акад. Рождественскому“.

Содержание в ‰	Линии (в ангстремах) и их характеристика
0,01	Появляется хорошо заметная линия 2429 и 2863. Линия 3034 заметно выделяется на фоне окружающей полосатой структуры.
0,05	Слабо выделяется линия 2286. Появляется слабая линия 2334. Появляется слабая, но отчетливая линия 2421.
0,1	Появляется „наек“ на линию 2317. Появляется слабо выделяющаяся линия 2546 и „наек“ на линию 2571.
0,2	Появляется „наек“ на линии 2495 и 2785.
0,3	Появляется слабая, но отчетливая линия 2850. Линии 2495 и 2785 становятся отчетливыми.
0,5	Появляется линия 2408. Появляется отчетливая линия 2913.
1,0	Появляется отчетливая линия 2232. Отчетливо выделяется линия 3142. Появляется „наек“ на линию 2268.
3,0	Линия 2268 выделяется резко. Линия 2455 хорошо заметна. Появляется линия 3218.
10,0	Появляется диффузная линия 2558.

При переходе к другим условиям работы таблицы появления линий должны быть составлены заново путем сжигания эталонных проб с известным содержанием искомого элемента.

Выявление линий в спектре может носить некоторый элемент субъективности, поэтому ответственные анализы следует повторять.

Оборудование полевой лаборатории стоит 20—25 тысяч рублей. Хорошо натренированный спектрографист может обработать за день от 80 до 150 проб, а иногда и больше при наличии трех человек рабочих. Стоимость анализа пробы—1,5—3 руб.

Результаты спектрометрических съемок представляются в виде профилей и карт. Профили строятся так: по оси абсцисс откладывается длина профиля в масштабе принятых для района карт, а по оси ординат процент содержания интересующего элемента в пробах профиля. Максимум кривой должен, в простейшем случае, приходиться над рудным телом, содержащим искомый элемент. Карты строятся при наличии площадной спектрометаллометрической съемки, точки с одинаковым процентным содержанием того или иного элемента соединяются плавными линиями; получается, например, карта изостаннат (когда определяется содержание олова в пробах) или изоплюмбат и т. д.,

оконтуривающая район распространения ореола рассеяния месторождения. С примерами таких профилей и карт мы встретимся в главе VIII.

Микрохимические методы анализа

При капельных индикациях полученные размельченные и отквартованные пробы в объеме 5—10 см³ засыпаются в фарфоровые тигли и заливаются 6—12% раствором азотной кислоты, взятой в объеме 10—20 см³. Тигли кипятятся в течение 5—10 мин. на песчаной бане в вытяжном шкафу, доливаются водой до одинакового уровня, затем, после некоторого отстаивания, поступают на производство капельного анализа тем или другим реактивом.

Рассмотрим некоторые, теперь уже довольно распространенные, приемы анализа.

Определение меди, серебра и цинка роданином. После отстаивания раствора вытяжки в тигле, капля этого раствора помещается на фарфоровую пластинку, в нее вносится кристаллик сульфата натрия величиной с булавочную головку и капля насыщенного раствора роданина в этиловом спирте. Красное окрашивание с образованием осадка указывает на присутствие меди, серебра и цинка.

Определение никеля, меди и кобальта рубановодородной кислотой. После кипячения раствора-вытяжки к нему прибавляется раствор аммиака и затем фильтрованием или отстаиванием отделяется жидкая часть смеси, поступающая на анализ. Капля раствора наносится на фильтровальную бумагу и впитывается ею, затем на это место наносится капля раствора рубановодородной кислоты в этиловом спирте. Появление серо-зеленой (оливково-зеленой) окраски указывает на присутствие меди в растворе, фиолетовой, синеющей по краям — никеля и бурой — кобальта.

Если для целей разведки не достаточен сам факт фиксации или отсутствия меди, серебра, цинка, никеля или кобальта в пробе, а требуется количественная характеристика содержания того или иного элемента, то поступают следующим образом.

Раствор, давший окрашивание — индикацию на содержание данного элемента, подвергается 10-кратному разбавлению водой, и полученный новый раствор вновь подвергается той же капельной реакции. Некоторые препараты теперь уже не дадут окрашивания, и тогда для них содержание искомого элемента в первоначальной пробе можно оценить баллом 10. Другие растворы вновь дадут окрашивание, и тогда они подлежат дальнейшему разведению еще в 10 раз. Если после этого часть растворов не будет давать окрашивания при той же капельной реакции, то содержание искомого элемента в первоначальной пробе можно оценить баллом 100 и т. д. Естественно, что если нужны более дробные градации, разведение может быть выполнено например в 5, 20, 400 и т. д. раз, и могут быть получены оценки в 5, 20, 400 и т. д. баллов.

Результаты этих съемок могут быть представлены в виде профилей и карт. На профилях по оси абсцисс откладываются длины, а по оси ординат количественная оценка содержания искомого элемента в баллах. В простейшем случае максимум кривой профиля будет находиться над рудным телом, содержащим анализируемый элемент. На картах точки с одинаковой балльной оценкой содержания элемента в пробах соединяются плавными линиями — получаются изобаллы, например, Си или Zn, оконтуривающие район распространения ореола рассеяния.

Нефелометрическое определение свинца. Порошкообразная проба весом 10 г кладется в колбочку, заливается 10 см³ децинормального раствора азотнокислого бария и нагревается на песчаной бане до 40—50°. Затем прибавляется 10 см³ двухнормального раствора азотной кислоты, смесь кипятится 5—10 мин. и подвергается фильтрации для получения раствора — вытяжки. К вытяжке добавляется равное количество пятинормального раствора едкого натра, затем опять фильтруется до полной прозрачности фильтрата. Этот фильтрат заливается в прозрачную колбочку и туда вносится капля крепкого водного раствора сернистого натра. При наличии в растворе свинца происходит выпадение взвешенного черного осадка сульфида свинца, наблюдаемое в виде различных градаций помутнения в зависимости от содержания свинца в испытуемом растворе. Едва заметное помутнение раствора наблюдается при содержании свинца около 0,001%. Количественная оценка содержания свинца в растворе осуществляется путем сравнения степени помутнения испытуемого раствора с эталонными растворами с известным содержанием свинца. Возможно разведение испытуемого раствора и эталонов в десять и более раз и уже затем сравнение степени получения и таким образом установление значительного содержания свинца в пробах.

Результаты анализов представляются, как и выше, в виде профилей и изоплюмбат.

Колориметрическое определение молибдена. Пробу весом 10 г засыпают в стаканчик, заливают концентрированной азотной кислотой, кипятят 10—20 мин. и остужают до комнатной температуры. Затем в смесь очень осторожно вливают 15 см³ 25% аммиака, вновь охлаждают, фильтруют, выливают в пробирки и добавляют туда концентрированной соляной кислоты в объеме $\frac{1}{6}$ аммиачного раствора. В полученный раствор добавляют кристаллы хлористого олова (восстановитель молибдата) и роданистого аммония или калия. Раствор, содержащий молибден, окрашивается в малиновый цвет. Интенсивность окрашивания для получения количественных данных сравнивается с заранее приготовленными растворами — эталонами какого-либо красителя с установленным соответствием степени окрашивания определенному процентному содержанию молибдена в пределах от 0,0001 до 0,03%. Если содержание молибдена в пробе выше 0,03%, то производится разведение испытуемого раствора водой (с учетом степени разведения) и последующее сравнение с эталонами.

Результаты анализа представляются, как и выше, в виде профилей и карт.

Производительность микрохимических методов при опытном операторе — от 40 до 80 проб за 8-часовой день, стоимость анализа — 1—3 руб. Стоимость оборудования полевой лаборатории — 1000—2000 руб.

С примерами карт и профилей, полученных по данным микрохимического анализа, мы встретимся в главе VIII.

На методе полярографического анализа и методе избирательных электродов, вообще говоря, возможных к применению при металлометрических съемках, мы не останавливаемся вследствие крайне ограниченного их применения в практике геолого-разведочного дела.

Газовая съемка

Точки для отбора проб газа задаются по прямым или ломаным профилям с таким расчетом, чтобы они покрывали более или менее равномерно подлежащую изучению площадь. Густота точек зависит от размеров предполагаемых нефтяных залежей и выбирается так, чтобы в пределы проекции залежи попало минимум несколько десятков точек. Отбор проб подпочвенного воздуха производится с глубины 2—3 м следующим образом: роется шурф глубиной 30—40 см, со дна бурится скважина глубиной 2—3 м и обсаживается трубкой, выходящей на поверхность. Конец обсадной трубки закрывается пробкой с идущей через нее газоотводной трубкой. Дно шурфа, а особенно место выхода обсадной трубки, замазываются глиной, чтобы воспрепятствовать утечке газа.

Через некоторое время после устройства скважины берется проба подпочвенного воздуха, что лучше осуществлять с помощью специального стеклянного баллона емкостью 0,5—1,0 л с высоким вакуумом, имеющего тонкий капиллярный запаиваемый конец. Конец баллона присоединяется к газоотводной трубке помощью короткого резинового шланга, затем капилляр обламывается и подпочвенный воздух медленно (регулируется зажимом) впускается в баллон. По заполнении баллона капилляр вновь запаивается и баллон отправляется в лабораторию для микроанализа.

Микроанализ осуществляется на приборах вакуумного типа специальной конструкции, основанных на разделении органических соединений, имеющих в газе, при помощи жидкого воздуха и других охлаждающих агентов. Эти довольно сложные и тонкие установки детально описаны В. А. Соколовым¹.

Приборы позволяют определить в пробе две составных части: легкую фракцию, содержащую по преимуществу метан и малое количество этана, и тяжелую фракцию, состоящую главным образом из углеводородов предельного ряда. На основании

¹ В. А. Соколов, Газовая съемка. ОНТИ. 1936.

анализа могут быть вычислены: углеродное число для тяжелой фракции и углеродное число для суммы всех органических соединений, имеющих в газе. Чем больше углеродное число, — тем более тяжелые соединения присутствуют в анализируемой пробе газа [под углеродным числом понимается отношение объема углекислоты, получающейся при сжигании тяжелой фракции (или обеих фракций), к объему самой тяжелой фракции (или обеих фракций)].

При интерпретации результатов газовой съемки пользуются абсолютным содержанием фракций и их качественным составом. Строятся профили и карты, характеризующие распределение горючих газов по профилю или по площади. При построении профилей по оси абсцисс откладывается длина, а по оси ординат — содержание той или иной фракции в пробах. При площадной съемке точки с одинаковым содержанием углеводородов соединяются плавными линиями, — получают изолинии газовой съемки, оконтуривающие места повышенного содержания углеводородов в подпочвенном воздухе. Пример такого рода карт приводится в главе VII. Качественный состав фракций дает указания о качестве газоотдающего источника. Так, В. А. Соколов говорит о том, что углеродное число для тяжелой фракции в районах нефтяных месторождений обычно выше, чем в районах чисто газовых и угольных месторождений.

Метод газовой съемки применялся на ряде нефтяных месторождений в СССР, хотя широкого использования он еще не получил вследствие малой производительности и большой стоимости метода, а также сложности аппаратуры и недостаточной разработанности вопросов интерпретации.

Однако как прямой метод поисков нефтяных и угольных месторождений, а также месторождений гелия, серы и т. д., он требует дальнейшего внимания и разработки.

§ 17. РАДИОАКТИВНЫЕ МЕТОДЫ

Вскоре же после открытия Беккерелем в 1896 г. явлений радиоактивности было установлено, что радиоактивные элементы повсеместно распространены в земной коре. Целый ряд исследователей занимался и занимается изучением радиоактивности земной коры, направляя свои усилия на разрешение вопросов большой геофизики, как, например, определение геологического возраста радиоактивных минералов и горных пород или установление роли тепла, выделяющегося при радиоактивном распаде пород, в термической жизни земли, и т. д.

Полагая, что решение подобных проблем чрезвычайно важно для геологии, мы все же в данном параграфе сосредоточим внимание на другом направлении изучения радиоактивности земной коры — направлении, имеющем целью использовать радиоактивные явления, происходящие в самых верхних слоях земной коры, для геологического картирования и поисков месторождений радиоактивных элементов или месторождений полез-

ных ископаемых, парагенетически связанных с радиоактивными элементами.

В этом аспекте мы разделим радиоактивные методы на две группы: методы, которые могут быть использованы при геологическом картировании и поисках полезных ископаемых, и методы, имеющие применение, главным образом, при детальной разведке или даже эксплуатации месторождений полезных ископаемых. Из последней группы методов мы выделим гамма-каротаж и рассмотрим его далее совместно с другими видами каротаж. К первой группе методов отнесем эманационные методы, ко второй — методы, использующие альфа-лучи (α), бета-лучи (β) и гамма-лучи (γ).

Эманационные методы

Эманация радия (радон) — инертный газ (атомный вес 222), образующийся при выбрасывании атомами радия α -частицы, — открыта в 1900 г. Полупериод распада радона $T=3,225$ дня. Использование эманации радия при решении геолого-разведочных задач начинается в СССР с 1922 г., когда на урано-радиевом месторождении Тюя-Муюн были проделаны первые эманационные измерения. Однако систематическая разработка метода начинается с 1929 г., и метод выступает как производственный с 1931—1932 гг.

Эманация тория (торон) — инертный газ (атомный вес 220) — образуется при распаде тория и имеет полупериод распада $T=54,5$ сек. Применение торонового метода в геолого-разведочном деле впервые в СССР было осуществлено в 1931 г. в Восточном Забайкалье при поисках ториевых месторождений.

Как радоновый, так и тороновый методы имеют много общего; поэтому они в значительной мере излагаются нами совместно.

Находящиеся в земной коре радиоактивные элементы, распадаясь, непрерывно выделяют эманации, которые в силу диффузии и влияния других факторов постепенно поднимаются к верхним частям земной коры и, участвуя в газовом обмене между почвой и атмосферой, выделяются в воздух.

Если на некоторой небольшой глубине под земной поверхностью расположен объект с повышенным содержанием радиоактивных минералов, то в упрощенном представлении над таким объектом в почвенном воздухе будет максимум концентрации эманаций, а по мере удаления от объекта концентрация будет падать, пока не достигнет предела, соответствующего содержанию эманаций в почвенном воздухе над пустыми породами. Мы видим, что эманационный метод является, по существу, методом изучения газовых ореолов рассеяния.

Для взятия пробы почвенного воздуха при эманационном методе, так же как и при газовой съемке, употребляются буры — зонды, позволяющие отбирать воздух с глубины 1—3 м, постоянной для всего планшета съемки. К верхней части зонда

с помощью резиновой трубки присоединяется через осушитель эманационная камера, имеющая объем 1 л, и насос Шинца, позволяющий просасывать через камеру осушенный почвенный воздух. При работе радоновым методом просасывание почвенного воздуха прекращается, когда воздух, находившийся в эманационной камере, практически будет весь замещен опробуемым газом. Иногда, когда нет возможности выносить эманационные камеры непосредственно в поле, проба воздуха сначала отбирается в стеклянный сосуд, тщательно закрываемый, а уже потом в полевой лаборатории переводится в эманационную камеру.

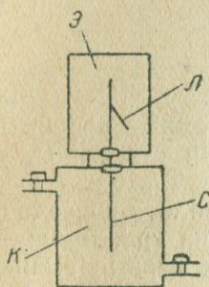


Рис. 114. Универсальный электрометр Г. К.

Эманационная камера с пробой воздуха привинчивается к измерительному прибору — электрометру. Часто употребляют универсальный электрометр системы Г. К. (Геологический комитет) (иногда пользуются двунитным электрометром Вульфа). На рис. 114 э — электрометр, к — эманационная камера, имеющая отводы для входа и выхода газов, л — листочек электрометра, с — металлический стержень, проходящий из электрометра внутрь эманационной камеры. Электрометр заряжают, а затем в течение 30 мин. следят за скоростью спадания листочков; эманация ионизирует воздух в камере и тем самым увеличивает скорость спадания.

Прибор эталонирован заранее, поэтому по скорости спадания листочков электрометра можно судить о процентном содержании эманации в пробах почвенного воздуха. Практически одним оператором работа ведется на нескольких (2—3) электрометрах сразу, что позволяет за 8-часовой рабочий день опробовать 13—19 точек.

При работе тороновым методом, вследствие быстрого распада эманации тория, измерения ведутся в непрерывной струе почвенного воздуха, пропускаемой через эманационную камеру. Опять, как и в радоновом методе, по скорости спадания листочков электрометра можно судить о процентном содержании, только в этом случае обеих эманаций — радона и торона. Чтобы разделить действие эманаций, после измерения суммарного эффекта, прокачивание воздуха прекращают и через 10 мин. после этого начинают измерять действие только одного радона, так как торон за это время успеет весь распасться. Разность эффектов, полученных в непрерывной струе воздуха и без нее (с учетом натурального фона) можно относить за счет действия торона. Производительность торонного метода такая же, как и радонового.

Полевая съемка ведется как по отдельным профилям (когда проверяются аномалии других методов, прослеживается сильно вытянутый объект или ведется предварительная съемка), так и площадная. Расстояние между точками зависит от размеров ис-

когого объекта, степени детальности работы, мощности наносов и т. д. и обычно бывает по профилям порядка 2—5—10, а иногда и более метров. При работах по профилю или на площади, для возможности сравнения между собой результатов, по-

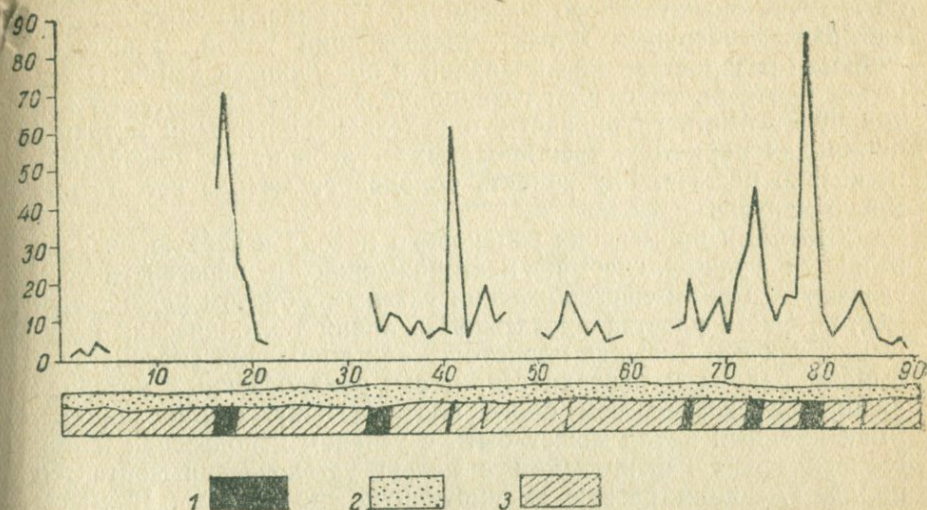


Рис. 115. Кривая распределения торона над пегматитовыми жилами в Забайкальи (по Б. С. Айдаркину).

1 — пегматитовые жилы; 2 — наносы; 3 — кристаллические сланцы.

лученных в разные дни, так как концентрация эманации изменяется от метеорологических факторов, необходимо производить систематические контрольные наблюдения.

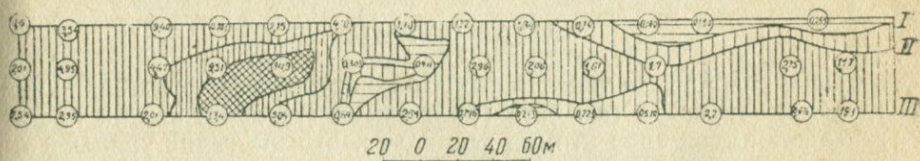


Рис. 116. Эманационная съемка на урановом месторождении.

I — концентрация эманаций в условных единицах.

Результаты эманационной съемки представляются в виде профилей и карт. По оси ординат профилей откладываются в некотором масштабе концентрации эманации в почвенном воздухе, а по оси абсцисс — расстояния между точками профиля. Пример такого профиля дан на рис. 115, где приведена кривая распределения торона над пегматитовыми жилами в Забайкальи. Мощность жил от 1 до 130 см, мощность наносов до 1 м. Большинство жил рельефно выделяется максимумами содержания торона в почвенном воздухе. При построении карт изоконцентрат эманаций точки площадной съемки с одинаковыми значениями концентрации эманаций соединяются плавными кривыми,

оконтуривая места повышенных или, наоборот, пониженных концентраций. В качестве примера карты изоконцентрат приводятся на рис. 116 данные эманационной съемки на одном урановом месторождении, указывающие в средней части планшета на наличие значительного максимума. Глубина, на которой может быть обнаружен объект, выделяющий радон, зависит от скорости распространения эманации к поверхности земли. В породах плотных, со слабой газопроницаемостью, радоновый метод будет иметь глубинность, определяемую первыми метрами, в породах пористых, трещиноватых — глубинность может быть несколько больше. Глубинность торонового метода естественно много меньше.

Объектами применения радонового метода в первую очередь являются урано-радиевые месторождения и парагенетически связанные с ними месторождения главным образом редких элементов. Часто удается проследивать линии тектонических нарушений, так как большая пористость зон дробления способствует выходу радона к поверхности, и сам раздробленный материал эманурует сильнее, чем более плотные окружающие породы. Эманационный метод может быть с успехом использован и при геологическом картировании с целью установления контактов пород, имеющих разную эманующую способность. Примеры подобных работ эманационным методом приводятся в главе VIII. Значительными недостатками метода, снижающими его практическую применимость, являются медленность работы и сравнительно малая глубина, доступная разведке.

Объектами применения торонового метода являются неглубоко залегающие жильные и россыпные месторождения тория (монацит) и связанные с ним россыпи, например, Sn, W, Bi, Au и др.

Альфа (α)-метод

При распаде радиоактивных элементов испускаются лучи трех родов: альфа (α), бета (β) и гамма (γ) лучи. α -лучи представляют поток ядер атомов гелия, т. е. атомов гелия, лишенных своих периферических электронов. α -частицы вылетают из ядра атома с очень большими скоростями ($1,39 \cdot 10^9$ — $2,05 \cdot 10^9$ см/сек), но быстро их теряют вследствие непрерывных столкновений с молекулами вещества окружающей среды — например, воздуха. В результате столкновения с молекулами газа образуются ионы — воздух ионизируется. Определение радиоактивности породы по α -излучению сводится к определению интенсивности ионизационного эффекта (силы ионизационного тока). Так как дальность пробега α -частиц не велика — в воздухе от 2,5 до 11,5 см, а в более плотных средах еще меньше, — то при работе α -методом необходимо иметь обнажения тех пород, которые подлежат исследованию.

При полевой работе дно D ионизационной камеры I (рис. 117) отнимается, и прибор (например, универсальный прибор Г. К.) ставится на расчищенное обнажение породы. Электрометр E

заряжается с помощью зарядника *S*, при зарядке листочек *b* отойдет на некоторый угол от стержня *a*. Стержень *a*, проходящий через янтарную пробку (изолятор) *p* в ионизационную камеру, находится в ионизированном воздухе, вследствие чего заряд с него усиленно стекает, и листочек быстро спадает. Спадание листочка наблюдается в микроскоп; по скорости спадания судят об интенсивности α -излучения в данном месте.

Для исследования участка задаются профили вкрест простиранья пород, точки располагаются достаточно густо, так как исследование в данной точке происходит лишь для небольшой площадки, расположенной непосредственно под прибором. В каждой точке коренная порода тщательно очищается. Результаты представляются в виде α -профилей и карт изолиний α -активности.

Ввиду простоты аппаратуры и относительной быстроты (до 25—35 точек в день) работ, α -метод применяется довольно часто для первой сравнительной оценки радиоактивности района. Крупным недостатком метода является то, что он не дает возможности устанавливать природу и количество активного начала в веществе. Легко видеть, что на прибор помимо α -лучей действуют также и эманации радия и тория и измеряется их суммарный эффект.

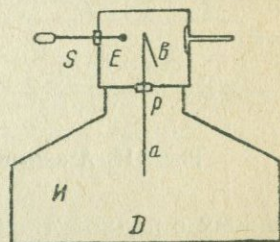


Рис. 117. Электрометр для наблюдения α -излучения.

На полевую работу по α -методу оказывает также сильное влияние влажность и изменчивость климатических условий. Надежные результаты получаются в районах сухих с постоянным климатом.

Некоторые из этих осложняющих моментов могут быть устранены, если измерения производить не непосредственно в поле, а в полевой лаборатории на образцах, взятых или с поверхности или с некоторой глубины. Образцы могут быть взяты по профилям и по площади, и после изучения их активности также могут быть построены профили и карты α -активности, относимые к той глубине, с которой взяты образцы. Можно сделать исследования на образцах, взятых с разных глубин (например, по стенкам канав или шурфов), и тогда можно строить α -разрезы. Измерения α -активности при этом не отличаются от того, что было выше кратко описано; образец надлежащего размера кладется на дно *D* ионизационной камеры, притом так, чтобы он не касался стержня *a*.

На этом же приборе можно опробовать радиоактивность горных пород в шлихах и порошках. Для этого порошок насыпается тонким слоем на латунную тарелочку и ставится на дно ионизационной камеры. Для количественных заключений необходимо сравнение с ионизационным эффектом эталонированных проб.

Наконец, можно организовать массовое опробование геологи-

ческих коллекций того или иного учреждения с целью «поисков в них месторождений» с повышенной концентрацией радиоактивных элементов. Для этого лоток с образцами ставится под колпак аспирационного прибора (рис. 118). С помощью насоса воздух просасывается внутрь колпака и, увлекая за собой образовавшиеся там ионы, проходит мимо заряженного стержня электроскопа э. Листочки электроскопа будут спадать тем быстрее, чем больше ионизационный эффект. Если в образцах какого-либо лотка обнаружится повышенная активность, то образцы подвергаются изучению порознь, и затем устанавливается природа активного начала.

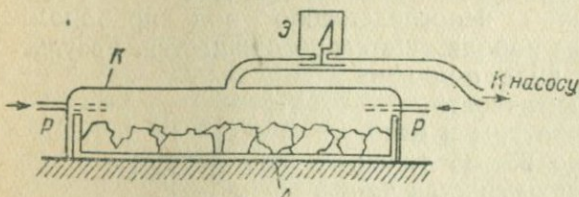


Рис. 118. Аспирационный прибор.

α-метод может быть с успехом использован при разведке месторождений радиевых или ториевых руд или руд, парагенетически связанных с радиоактивными.

Работы сводятся к быстрому опробованию штуфов, порошков, кернов, шлама буровых скважин, средних валовых проб, средних секционных проб — с целью выявления мест повышенной активности и направления туда внимания разведочной организации. Следует при этом помнить, что данные α-метода имеют в значительной мере качественный характер; для разного рода количественных заключений и для подсчета запасов необходимы измерения по бета или гамма-лучам и контрольные анализы с переводением проб в раствор.

Бета (β)-метод

β-метод начал применяться в геолого-разведочном деле позднее α-метода; лишь в последние годы ведутся работы в этом направлении.

β-лучи представляют собою поток электронов, вылетающих или из ядра атома радиоактивных элементов или из внутренних электронных слоев атома со скоростью, близкой к скорости света. При прохождении β-лучей через вещество их интенсивность быстро уменьшается, но все же проникающая способность β-лучей гораздо больше, чем α-лучей.

β-лучи, так же как и α-лучи, при прохождении через газ его ионизируют; однако ионизация β-лучами слабее ионизации α-лучами, так как громадная скорость β-лучей неблагоприятствует образованию ионов.

Для определения активности руд и пород по β-излучению можно пользоваться теми же приборами, что и при утилизации α-лучей; следует только дно ионизационной камеры закрыть (заклеить) фильтром (например, из провощенной бумаги), пре-

пятствующим проникновению внутрь камеры эманаций и поглощающим α -частицы, но пропускающим β -лучи. Так как величина ионизационного эффекта по β -лучам зависит от площади, с которой происходит излучение, и от расстояния до ионизационной камеры, то для возможности сравнения отдельных данных и с эталонами (для количественных подсчетов) следует брать одинаковые площади излучения и приближать их на одинаковое расстояние к фильтру.

Таким образом, при соблюдении ряда предосторожностей, β -метод может давать более достоверные, количественные сведения о содержании радиоактивных элементов в породах. Однако глубинность метода не превышает первых десяти сантиметров. Производительность при определениях в порошках и шлихах — 12—20 образцов в день.

Гамма (γ)-метод

γ -лучи представляют собою кванты лучистой энергии, испусканием которой сопровождаются процессы выделения α - и β -лучей. Длина волны γ -лучей $5 \cdot 10^{-11} - 4 \cdot 10^{-8}$ см. При прохождении через материю γ -лучи ослабляются, однако их проникающая способность гораздо больше, чем у α - и β -лучей. Так, если β -лучи поглощаются нацело в пластинке свинца толщиной 5 мм, то для поглощения γ -лучей необходимо более 10 см свинца. Сами по себе γ -лучи не являются ионизаторами газа, но при их прохождении ионизация происходит от тех электронов, которые γ -лучи вырывают из среды, через которую проходят. Следовательно, исследование γ -излучений может вестись такими же ионизационными приборами, какие выше описывались. Следует лишь для устранения α - и β -лучей, а также эманаций, делать камеру прибора достаточно герметичной и толстостенной. К числу таких приборов принадлежат: прибор Гесса (Вульфа), нитяной и петельный электрометры Кольгерстера.

С другой стороны, в последнее время начинают все шире внедряться в практику счетчики γ -импульсов, общая схема которых изображена на рис. 119. Проводящий цилиндр Ц закрыт с обеих сторон янтарными изолирующими пробками П. По оси

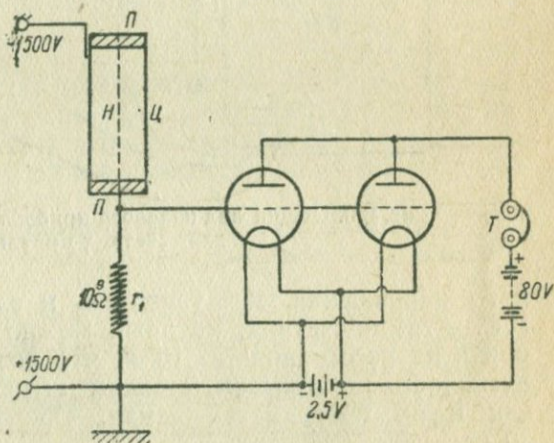


Рис. 119. Схема счетчика γ -импульсов.

цилиндра натянута проволока — нить *H*. Цилиндр заключен в стеклянную трубку, внутри которой создано давление 20—30 мм. На цилиндр и нить подано высокое напряжение (1000—1500 В), т. е. внутри цилиндра создано сильное электрическое поле. Часть попадающих внутрь цилиндра γ -импульсов вызывает быстрый разряд между электродами (нить-цилиндр), проявляющийся в виде импульса тока, создающего на концах сопротивления r некоторую разность потенциалов, усиливаемую ламповым усилителем и регистрируемую в наушниках *T* (щелчок телефона) или особым электромагнитным счетчиком. По количеству γ -импульсов, регистрируемому счетчиком, можно судить о радиоактивности пород. Общий вид полевого прибора для счета γ -импульсов приведен на рис. 120. Здесь *B. H.* — источник высо-

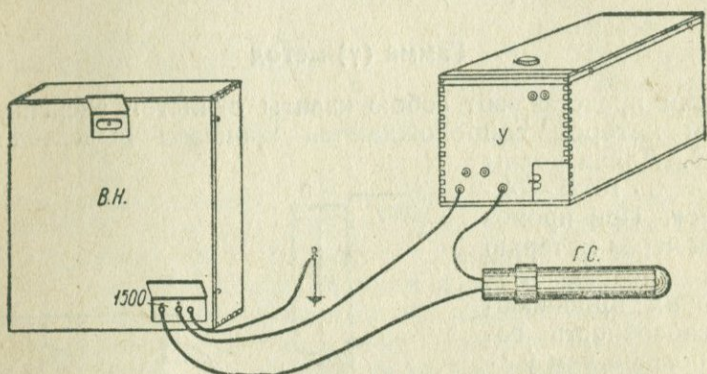


Рис. 120. Общий вид полевого прибора с выносным счетчиком для счета γ -импульсов.

кого напряжения, *У* — усилитель и электромагнитный счетчик, *Г.С.* — гамма-счетчик, который можно относить от всей установки на расстояния до 10 м, что позволяет промерять радиоактивность по обрывам, стенкам шурфов, дудок и т. д., равно как и по поверхности земли. Общий вес установки около 30 кг.

В 1937 г. сконструирован более чувствительный счетчик β -излучений или, как его называют, электронный счетчик. Он устроен так же, как и γ -счетчик, только γ -счетчик довольно толстостенный (1—2 мм) и не пропускает β -лучей, а электронный счетчик тонкостенный (до десятых долей миллиметра), и β -лучи через него проходят. Таким образом, когда приходится иметь дело с очень слабо-активными породами, можно применять электронный счетчик; при более активных породах — γ -счетчик.

Методика полевых работ по γ -методу такова же, как и по α -методу. Способ выражения результатов тоже подобный — профили, где по оси ординат откладывается интенсивность γ -излучения, и карты изолиний интенсивности γ -излучений. При расшифровке данных следует помнить, что глубина, с которой проникают γ -импульсы, не превышает 30 см (от дневной поверх-

ности, если съемка ведется *in situ*, или от того места, откуда взят образец — при лабораторных определениях).

Преимущество γ -съемки перед α -съемкой, помимо несколько большей глубинности, заключается также в том, что при γ -съемке отмечается только радий или мезоторий, тогда как α -лучи отражают суммарный эффект всех радиоэлементов уранового и ториевого ряда.

Производительность γ -приборов Гесса и Кольгерстера — от 16 до 33 точек в день на 1 оператора при работе на поверхности и от 10 до 20 точек — при работе в канавах, шурфах, дудках и других горных выработках.

γ -метод может применяться на те объекты, что и α -метод, т. е. преимущественно при детальной разведке и эксплуатации месторождений радиоактивных элементов и элементов, с ними парагенетически связанных. Применение полевых приборов с выносным γ -счетчиком может несколько увеличить глубинность метода, если счетчик опускать в скважину подобную тем, которые осуществляются при взятии проб по газовой съемке или по эманационным методам.

Примеры применения радиоактивных методов мы найдем в главах VII и VIII.

§ 18. ГЕОТЕРМИЯ

Термические наблюдения в горных выработках начали производиться с начала XVIII в., а в буровой скважине впервые температура измерялась в 1831 г. Эрманом.

В России первые измерения в шахтах были сделаны в 1828 г. (на Урале), а в 1877 г. температура измерялась в скважине (в Крыму).

Известно, что температура с глубиной возрастает. Если взять средние цифры, то температура возрастает на 1° , примерно, на каждые 33 м глубины; говорят, что средняя геотермическая ступень равна 33 м/град. Однако уже в половине прошлого столетия были установлены весьма сильные отклонения от этой средней величины геотермической ступени. Так, Мандельсло в Неуфене, у подножья Швабского Альба установил наличие геотермической ступени 10,5 м/град; с другой стороны, например, в рудниках Каламет и Гекла у Верхнего озера обнаружена величина ступени 65,5 м/град.

Кенигсбергер, пересмотрев весь имеющийся к 1912 г. материал по геотермии, пришел к заключению, что колебания геотермической ступени зависят от геологических особенностей района измерений и от термических свойств пород. В частности, он указывает, что нормальная величина геотермической ступени для плоско залегающих пластов равна 34 м/град, для сильно влажных или крутопадающих — 34—39 м/град, для рыхлых и сухих — 29—34 м/град. Им же подмечается, что измерения вблизи молодых изверженных пород дают ступень от 7 до 24 м/град. Ненормально малая ступень наблюдается также

в районах нефтяных месторождений — от 8,6 до 28,4 м/град. Вблизи крупных водных бассейнов ступень 39,8—70 м/град, в толще гор при проходке тоннелей установлена ступень от 29 до 60 м/град.

В настоящее время термические измерения в скважинах осуществляются с помощью ртутных термометров или электротермометров. Оборудование комплекта для работы с ртутными термометрами весьма простое и легкое. Оно состоит из портативной лебедки, на которую наматывается тонкий трос для опускания термометров в скважину, гильз для термометров, позволяющих закреплять их в любом месте троса, и самих термометров. Термометр инертный или ленивый употребляется при термических измерениях в неглубоких скважинах и в горных выработках, а для измерений в глубоких скважинах нужен максимум-термометр. Установка для измерений электротермометром сложнее и тяжелее; она будет описана в главе о кароттаже скважин. Учи-

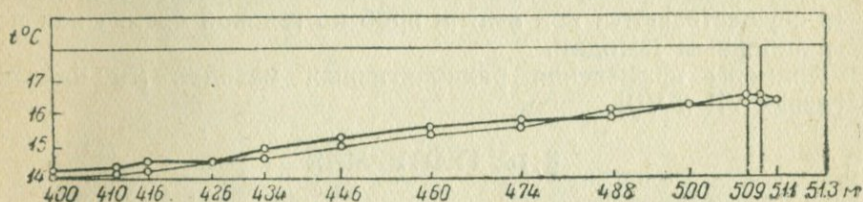


Рис. 121. Температурные кривые в обсадных трубах (толстая линия) и без труб (тонкая линия).

тывая преимущества установки с ртутными термометрами (легкость, портативность, дешевизна), следует рекомендовать ее везде, где не организован как следует кароттаж скважин. Преимущества электротермометров — быстрота работы, аппаратура почти целиком та же, что и при других видах кароттажа, — заставляют рекомендовать их утилизирование для геотермических наблюдений в тех районах, где систематически ведется кароттаж скважин.

Техника работ на скважине с ртутными термометрами не сложна. Лебедка устанавливается над устьем скважины, на трос надевается гильза с термометрами, и трос плавно опускается в скважину. В надлежащих местах на трос надеваются другие гильзы с термометрами и все это опускается на нужную глубину. Выждав минут 40—60, пока термометры примут температуру окружающей среды, трос начинают плавно выкручивать лебедкой, снимают с него, по мере выхода из скважины, гильзы, вынимают из них термометры и записывают показания температуры. Точность ртутных максимум-термометров $\pm 0,2^\circ$.

Обсадные трубы не влияют на правильность показаний термических измерений; это видно из рис. 121, который в то же время дает ясное представление о характере обработки наблюдений.

По данным измерений легко вычислить геотермическую ступень для скважины в целом или для отдельных ее участков.

Если имеется серия скважин, в которых измерена температура, можно построить геоизотермы, соединяя плавными линиями точки, хотя и расположенные на разной глубине, но имеющие одинаковые температуры. Пример хода геоизотерм над соляным куполом приведен на рис. 122. Геоизотермы показывают, что над куполом геотермическая ступень значительно меньше, чем в стороне от него. Отсюда можно сделать вывод, что в некоторых случаях местонахождение и общие контуры соляного купола могут быть установлены по термическим измерениям в скважинах, не дошедших до соли.

Если геотермические наблюдения сделаны в скважинах, более или менее равномерно покрывающих некоторую площадь, то можно построить ряд карт геоизотерм для различных, но постоянных для данной карты, значений температуры. Пример такой карты для температуры $26,7^{\circ}$ приведен на рис. 123, где черные кружки — буровые скважины, в которых измерялась температура, цифры около них — глубина в футах, на которой температура равна $26,7^{\circ}$, сплошные линии — линии равных глубин (от поверхности), на которых температура равна $26,7^{\circ}$, пунктирные линии — изогипсы нефтеносного песка (в футах над уровнем моря). Общие очертания купола хорошо обрисовываются ходом геоизотерм, хотя от изотермической поверхности до поверхности нефтеносных песков еще 1000—1200 фут.

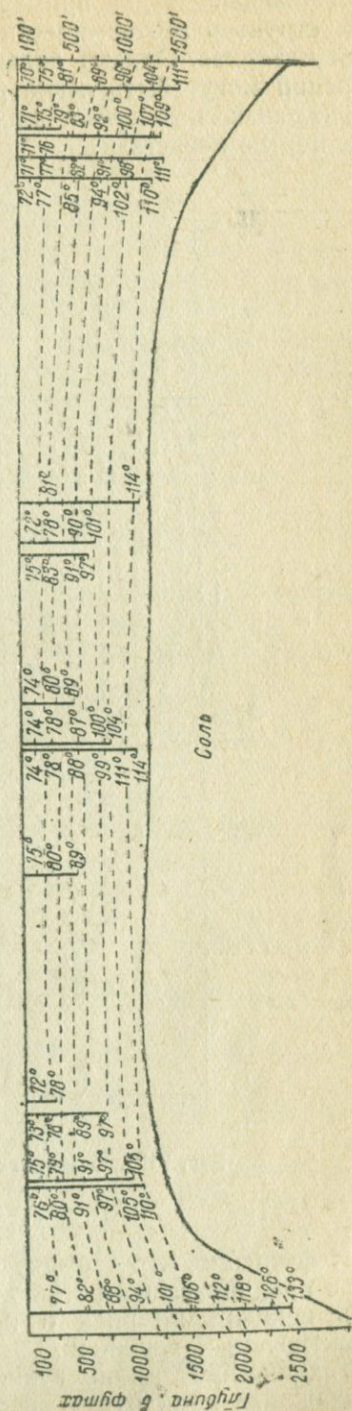


Рис. 122. Ход геоизотерм над соляным куполом (Humble oil field, Texas).

Приведенные два примера показывают, что на подобных типах структур геотермические наблюдения дают весьма интересный материал. Однако далеко не везде данные термических измерений могут быть легко расшифрованы, так как причины региональных и местных колебаний геотермической ступени до сих пор не известны.

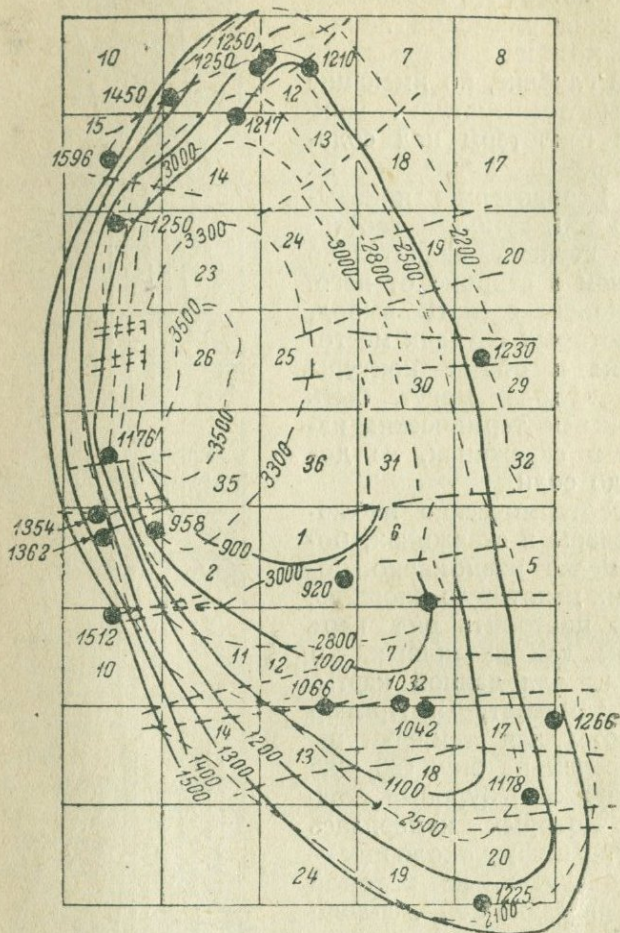


Рис. 123. Карта геозотерм купола Солт-Крик для $t = 26,7^{\circ}$.

Несомненно, что термические измерения в скважинах в районах с предполагаемым глубоким шахтным строительством могут дать ценный материал о характере термического режима на проектируемых глубинах.

Технические применения термометрических измерений в скважинах нами будут рассмотрены в главе о кароттаже.

КАРОТТАЖ СКВАЖИН

Под общим термином кароттаж скважин в настоящее время понимается большое количество операций, выполняемых в скважине. Все эти операции можно разделить на две части: измерение физических констант пород, пересеченных скважиной, — эту часть можно назвать кароттажем физических свойств пород, и другие операции в скважинах, имеющие целью помочь нормальной эксплуатации скважин. Кароттаж физических свойств имеет конечной целью, вместе с другими приемами исследования, установление литологического и стратиграфического разрезов скважин (при бурении без керна) или уточнение и исправление разреза (при кернавом бурении).

Под кароттажем физических свойств мы будем понимать следующие виды кароттажа:

- 1) электрический кароттаж — измерение удельного сопротивления пород, пересеченных скважиной;
- 2) кароттаж P. S. — измерение естественного поля в скважине;
- 3) гамма-кароттаж — измерение радиоактивности пород;
- 4) магнитный кароттаж — измерение магнитной восприимчивости пород.

В этот же раздел в будущем будут отнесены кароттаж диэлектрической постоянной и сейсмокароттаж — измерения упругих констант, разработка которых в настоящее время находится еще в зачаточном состоянии.

Другие операции в скважинах, рассматриваемые нами ниже, следующие:

- 1) работа с резистивиметром — определение сопротивления бурового раствора;
- 2) работа с электротермометром — определение температуры по скважине;
- 3) работа с инклинометром — определение искривления скважин;
- 4) работа с пандажметром — измерение угла падения пород по одной скважине;
- 5) работа с грунтоносом — взятие пробы со стенки скважины, торпедирование, перфорирование и т. д.

Кароттаж в СССР начал применяться с 1929 г. и быстро охватил все нефтяные районы, частично угольные и эпизодически применяется в скважинах, пробуренных в связи с поисками руд цветных металлов. Быстрое и планомерное внедрение кароттажа в нефтяную практику обеспечило в значительной мере переход на бескернавое бурение в этой отрасли народного хозяйства.

Ниже, попутно с изложением принципов отдельных приемов кароттажа, будут излагаться задачи, стоящие перед каждым из них, и примеры их решения.

§ 19. КАРОТТАЖ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Все виды кароттажа, излагаемые в этом параграфе, имеют непосредственной целью дифференциацию пород, пересеченных скважиной, по тому или другому физическому свойству, что, как уже отмечалось, нужно для уточнения или построения разреза по скважине.

Электрический кароттаж

Принцип действия электрического кароттажа (будем называть его кратко — кароттаж ρ) будет понятен из рассмотрения рис. 124. Трехжильный кабель, со тщательно изолированными друг от друга и от бурового раствора жилами, опускается

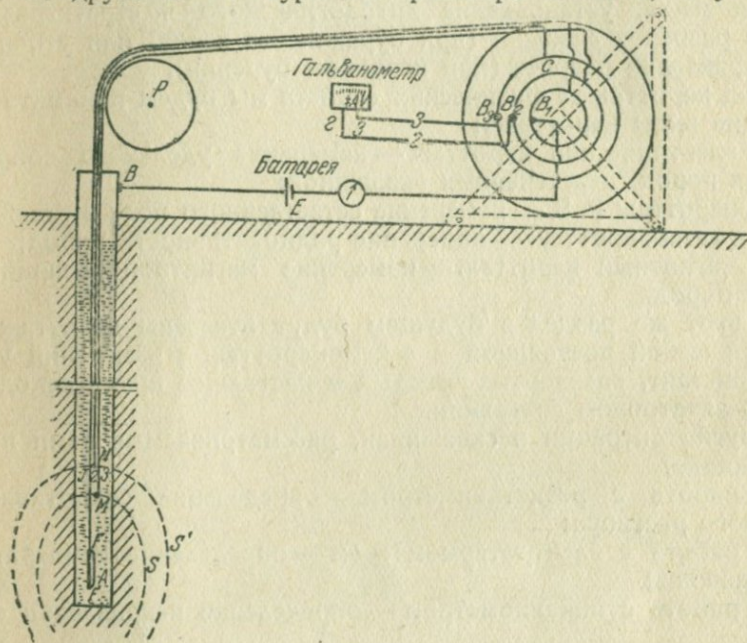


Рис. 124. Схема кароттажной установки.

в скважину. Через электрод А, являющийся одновременно и грузом, увлекающим кабель в скважину, и через электрод В, обычно прикрепляемый к обсадной трубе, вводится в землю постоянный электрический ток от батареи E , протекающий далее по земле от одного электрода к другому. Вследствие прохождения тока между двумя заземлениями M и N создается разность потенциалов, зависящая от размеров установки AMN , силы тока в питающей цепи AB и сопротивления пород, находящихся вблизи от приемных электродов MN . Так как размеры установки постоянны, сила тока или постоянна или может быть измерена амперметром, и разность потенциалов между MN тоже может быть измерена, например потенциометром, то, следовательно, может быть уста-

новлено удельное сопротивление ρ пород вблизи приемных электродов.

Если установку AMN (перевернутый обратный зонд) постепенно опускать или, наоборот, поднимать, то можно измерить ρ вдоль по всей скважине. Для опускания и подъема кабеля служит кароттажная лебедка, вращаемая вручную (при неглубоких скважинах) или от мотора. Над устьем скважины установлен блок-баланс P , направляющий кабель в скважину и позволяющий по счетчику оборотов определять глубину погружения установки. Результат измерения ρ по скважине представляется в виде кароттажной диаграммы. По оси абсцисс откладываются значения полученных ρ , а по оси ординат — соответствующие этим значе-

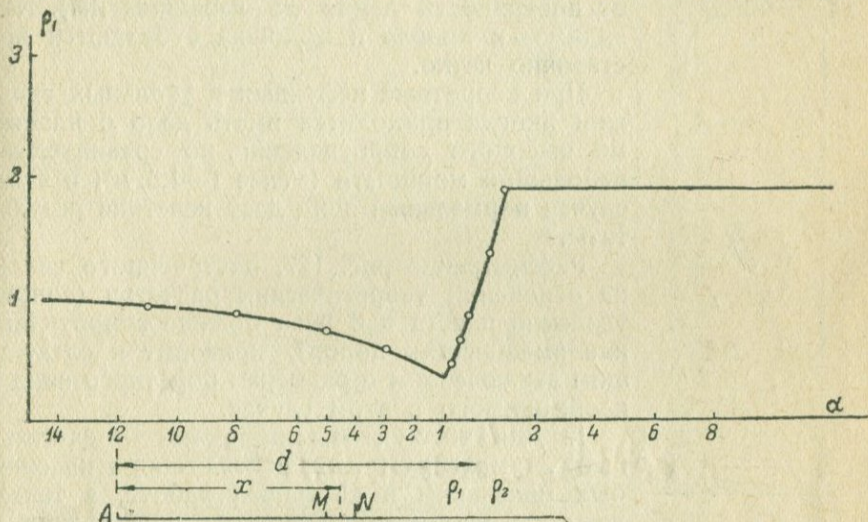


Рис. 125. Кароттаж мощного пласта установкой $AMN (B \rightarrow \infty)$.

ниям глубины от поверхности земли до середины между электродами MN (для обратного зонда). Так как в данной установке в скважину опускается три электрода — она называется трехэлектродной.

При замерах вблизи контактов пород трехэлектродная установка, как, впрочем, и все другие, дает не истинное сопротивление пород, а кажущееся — с этим явлением мы уже сталкивались при профилировании и зондировании. Изменение кажущегося сопротивления при кароттаже достаточно мощного пласта перевернутым обратным зондом, теоретически рассчитанное, приводится на рис. 125, где показана также и установка AMN . Мы видим, что при такой установке кровля пласта отбивается довольно четко, а подошва расплывчато, и если бы отбивать контакты по тому месту кривых, где происходит быстрое изменение кажущегося сопротивления, мы получили бы мощность пласта меньше истинной. Наоборот, подошву пласта можно было бы отбить четко, а кровлю — расплывчато, если опускать в скважину

обычный обратный зонд, — A наверху, а M и N внизу. Это занижение мощности на величину установки следует учитывать при трехэлектродном кароттаже мощных пластов обратным зондом.

Этого можно избежать, употребляя для кароттажа таких пластов нормальный зонд, представляющий установку, у которой один приемный электрод M находится в скважине — внизу, а другой — N — у устья скважины, а оба питающих — в скважине выше M . Это, собственно, та же установка, которая изображена на рис. 124, но электроды AB и MN сменены местами. Теоретическая кароттажная диаграмма пласта в этом случае приведена на рис. 126 (глубина отсчитывается от поверхности земли до середины AM). Как видим — и кровля и подошва отбиваются достаточно четко.

При кароттаже нефтяных и угольных скважин иногда приходится иметь дело с пластами высокого сопротивления, но сравнительно небольшой мощности (менее 1—1,5 м); в этом случае нормальный зонд дает нечеткие результаты.

Рассмотрение рис. 127, построенного также на основании теоретических расчетов (сопротивление пласта в 3 раза больше сопротивления вмещающих пород), приводит к следующим заключениям о размерах обратного зонда, необходимого в этом случае.

1. Для того чтобы побочный — фиктивный — максимум кажущегося сопротивления был маленьким и не мешал работе, а также для того, чтобы измеряемое кажущееся сопротивление было ближе к истинному сопротивлению пласта, — необходимо AM делать как можно больше, насколько позволяет чувствительность аппаратуры.

2. Чтобы мощность пласта отбивалась возможно четче и точнее, необходимо MN делать меньше мощности пласта в 2—4 раза.

На практике пользуются в этих случаях, например, такими установками: $MN = 0,5—0,25 h$ (h — мощность пласта), а $AM = 20—30 h$.

Иногда при кароттаже неглубоких скважин при отсутствии специального кароттажного кабеля можно пользоваться четырехэлектродной установкой. В этом случае все четыре электрода, расположенные симметрично, опускаются в скважину; при этом желательно иметь AB большое, а MN малое — меньше мощности подлежащих обнаружению пластов. Пример кароттажной диаграммы четырехэлектродной установки, снятой в одной из скважин в Кузбассе, дан на рис. 128, пласты угля четко отбиваются повышением сопротивления.

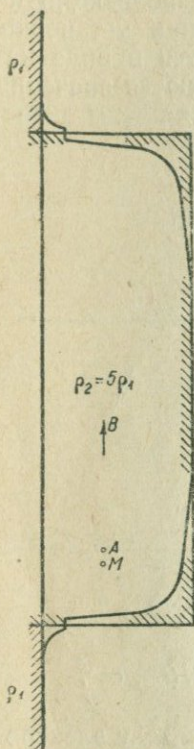


Рис. 126. Кароттаж мощного пласта нормальным зондом.

Для установления наличия и определения мощности пластов в неглубоких скважинах можно применять наиболее простой способ кароттажа — одноэлектродный кароттаж тока. Его схема дана на рис. 129, где G — самопишущий или обычный милли-

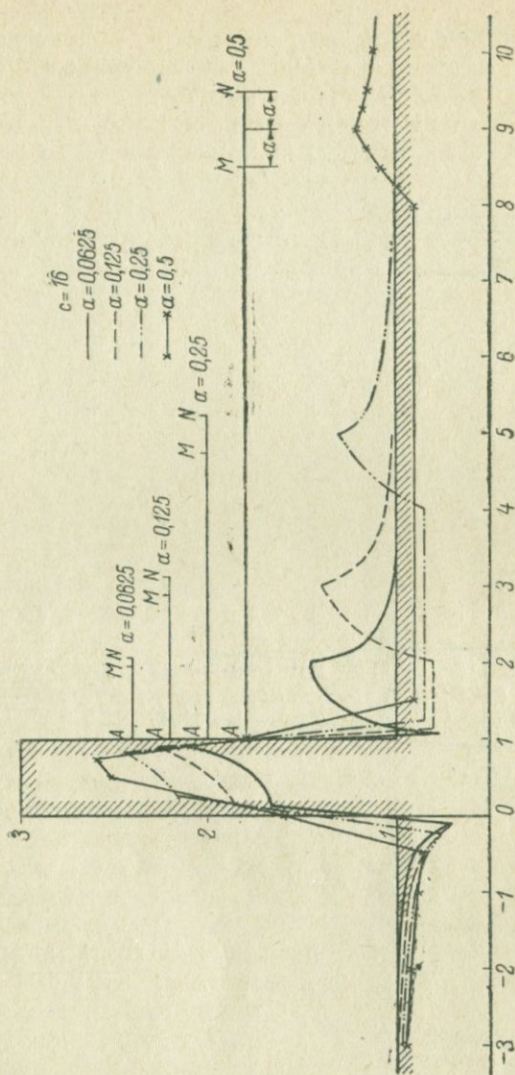


Рис. 127. Кароттаж маломощных пластов обратным зондом при сдинаковом l/a .

амперметр, а A — электрод из свинца, покрытый сверху и снизу толстой резиной. Электрод A может удерживаться на оси скважины с помощью эластичных направляющих (фонарей).

При прохождении электрода A мимо пластов высокого сопротивления ток резко уменьшается, точность установления мощности пласта в узких скважинах может быть доведена до $\pm 2-3$ см. В качестве примера кароттажной диаграммы тока

приводим на рис. 130 диаграмму, снятую на скважине № 482 в Карпушинском районе (Урал). Сульфидная руда на глубине

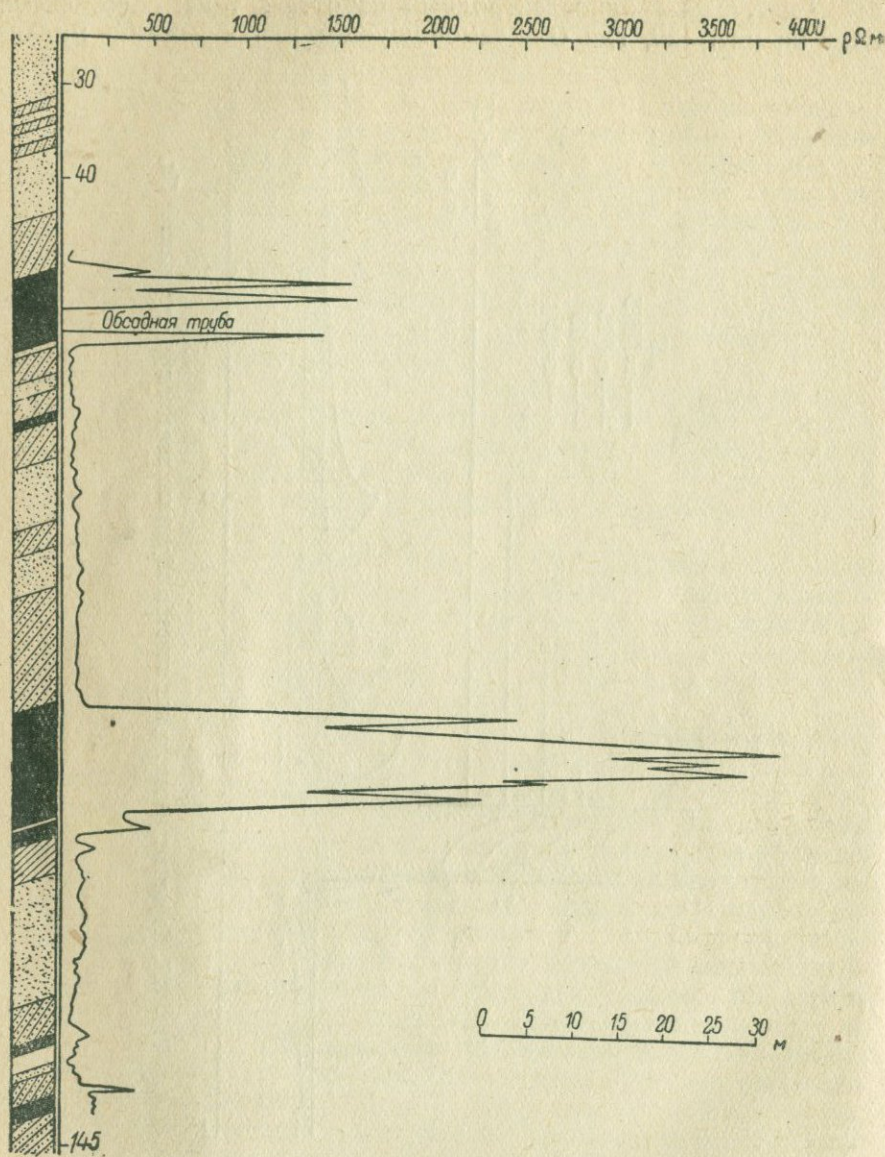


Рис. 128. Каротажная диаграмма скв. 199 — Прокопьевск (Кузбасс) (по Л. Я. Нестерову).

около 45 м весьма четко отбивается резким повышением силы тока.

В силу простоты, одноэлектродный каротаж должен найти применение особенно в рудных районах, где перед ним можно

ставить задачи определения мощности руды, пересеченной скважиной, с точностью до $\pm 1-2$ см.

Задачи электрического кароттажа в нефтяных и угольных районах мы разберем ниже после изложения кароттажа Р. С.

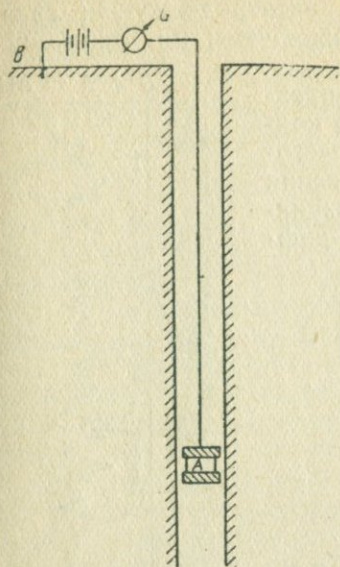
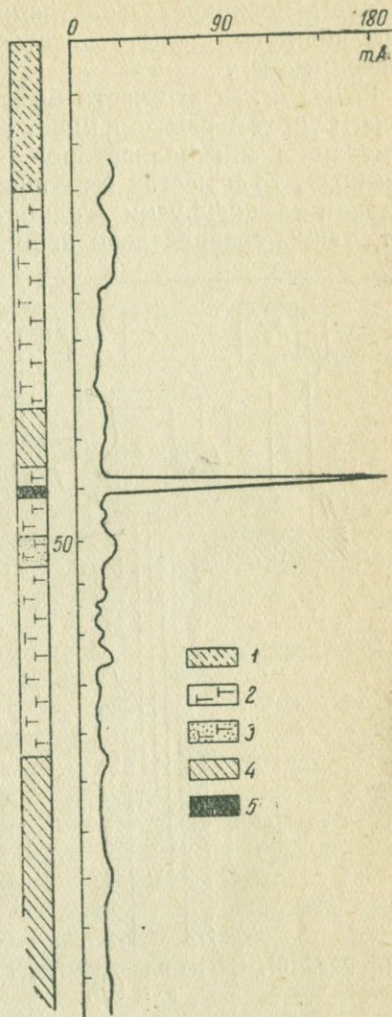


Рис. 129. Схема одноэлектродного кароттажа.

Кароттаж Р. С.

Кароттаж Р. С. (polarisation spontanée) производится, обычно, параллельно с кароттажем ρ , причем используется, как правило, нормальный зонд. Оба приемных электрода M и N делаются неполяризующимися для того, чтобы устранить их поляризацию, так как она была бы непостоянна по величине и больше подлежащих измерению электродвижущих сил естественного поля в скважине.

Наибольшее значение имеет измерение Р. С. в нефтяных и угольных скважинах, где отсутствуют причины возникновения естественных полей в связи с процессом окисления руд, о которых говорилось при изложении метода измерения естественных полей. Однако в этих скважинах все же Р. С. наблюдается; причин ее возникновения две.



- 1 — наносы
- 2 — альбитофилы
- 3 — альбитофилы с вкрапленностью сульфидов
- 4 — кварцесерпичитовые сланцы
- 5 — руда

Рис. 130. Кароттаж скважины № 482 в Карпушинском районе (Урал) (по П. Ф. Родионову).

1 — наносы; 2 — альбитофилы; 3 — альбитофилы с вкрапленностью сульфидов; 4 — кварцесерпичитовые сланцы; 5 — руда.

1. Если, благодаря наличию разности давлений, жидкость фильтрует через пористые породы, то при этом возникают сравнительно небольшие фильтрационные электродвижущие силы. Так, например, если буровой раствор уходит в пористый пласт, то здесь возникает фильтрационная электродвижущая сила, и этот пористый пласт может быть обнаружен по минимуму на диаграмме P. S.

2. Если, как это часто бывает на практике, буровой раствор имеет другую концентрацию минерализаторов, чем пластовая вода, то в местах их соприкосновения вследствие диффузии жидкостей возникнут, также сравнительно небольшие, диф-

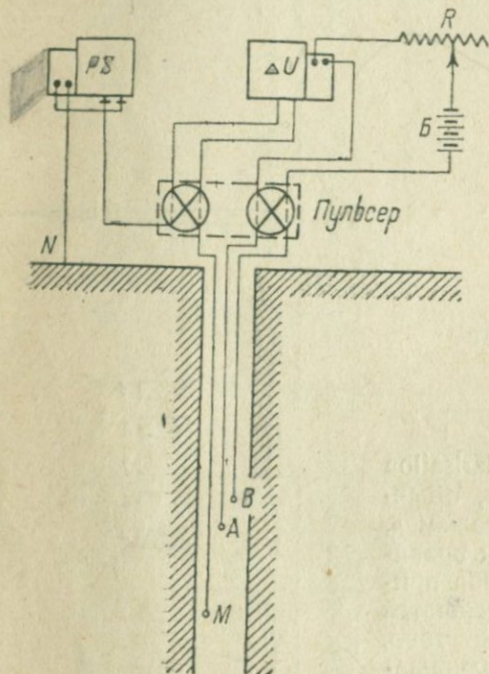


Рис. 131. Схема одновременного замера ρ и P.S.



Рис. 132. Диаграмма ρ и P.S. нефтяной скважины.
1 — водные пески; 2 — глины;
3 — нефтяные пески.

фузионные разности потенциалов (электрохимическое объяснение P. S.). Так как наличие воды в пластах обусловлено их пористостью, то, следовательно, измеряя диффузионные электродвижущие силы, можно устанавливать местоположение пористых пластов.

Вероятнее всего, что обе причины возникновения P. S. в большинстве случаев действуют совместно. Измеряя P. S. по скважине с помощью потенциометра, мы можем установить этот суммарный эффект, а по нему выделить пористые или трещиноватые пласты. Измерение ρ и P. S. ведется одновременно на

двух разных потенциометрах (рис. 131 — P. S. и ΔU) двумя различными операторами. Постоянный ток от батареи B через регулировочный реостат R подается на пульсер — прибор, который превращает постоянный ток в переменный. Переменный ток далее вводится в землю в скважине с помощью электродов AB. Возникающее при этом переменное электрическое поле создает переменную разность потенциалов между приемными электродами M и N, накладывающуюся на постоянную разность потенциалов, возникающую на этих же электродах под действием P. S. Оба эти тока попадают непосредственно в потенциометр для измерения P. S.; гальванометр, стоящий в потенциометре, не реагирует на переменную часть тока, а лишь только на постоянную — это позволяет на потенциометре P. S. измерять одно естественное поле. Параллельно оба эти тока попадают на приемную часть пульсера и последним преобразуются: постоянная часть от P. S. — в переменную, не действующую на гальванометр потенциометра ΔU , а переменная часть — в постоянную, отмечаемую прибором ΔU (рис. 131). Таким образом на приборе ΔU измеряется одно только ρ , а на приборе P. S. одна только P. S. — совершенно одновременно. Измерение обеих величин ведется с помощью полуавтоматических регистраторов, что позволяет получать кароттажные диаграммы ρ и P. S. непрерывно по всей скважине со скоростью до 500—600 м в час. В последнее время в опытном порядке начинают применять полные автоматы для одновременного замера ρ и P. S., устраняющие возможности субъективных ошибок при замерах и ускоряющие работу до 2000—3000 м в час.

Первичным материалом кароттажных наблюдений являются кароттажные диаграммы, в данном случае диаграммы ρ и P. S., начерченные на бумажной ленте, на которой по ширине отложены ρ и P. S. в некоторых масштабах, а по длине — глубина погружения установки в скважину — в масштабе чаще всего 1 : 500, но возможно 1 : 200 и даже крупнее. Пример кароттажной диаграммы ρ и P. S., снятой в нефтяной скважине, приведен на рис. 132. Здесь совершенно наглядно видно, что нефтеносные пески характеризуются максимумом ρ и минимумом P. S., водоносные пески — по удельному сопротивлению не выделяются, а P. S. дает минимум. Если бы скважина встретила плотные породы, например, известняки, то они выделились бы максимумом ρ , а по P. S. не выделились бы. Таким образом, одновременное изучение диаграмм ρ и P. S. значительно облегчает задачу построения разреза по скважине, являющуюся основной задачей кароттажа в нефтяных и угольных районах. Пример кароттажной диаграммы, снятой в скважине № 661 уч. Макеевско-Заводской на курных углях, приведен на рис. 133. Здесь P. S. не отмечает пластов, а ρ дает ясные максимумы, позволившие уточнить положение и мощность ряда пластов угля и обнаружить пропущенные при бурении пласты (размеры установки были $AO = 3,65$ м, $MN = 0,1$ м; сопротивление бурового раствора 3,8 Ω м).

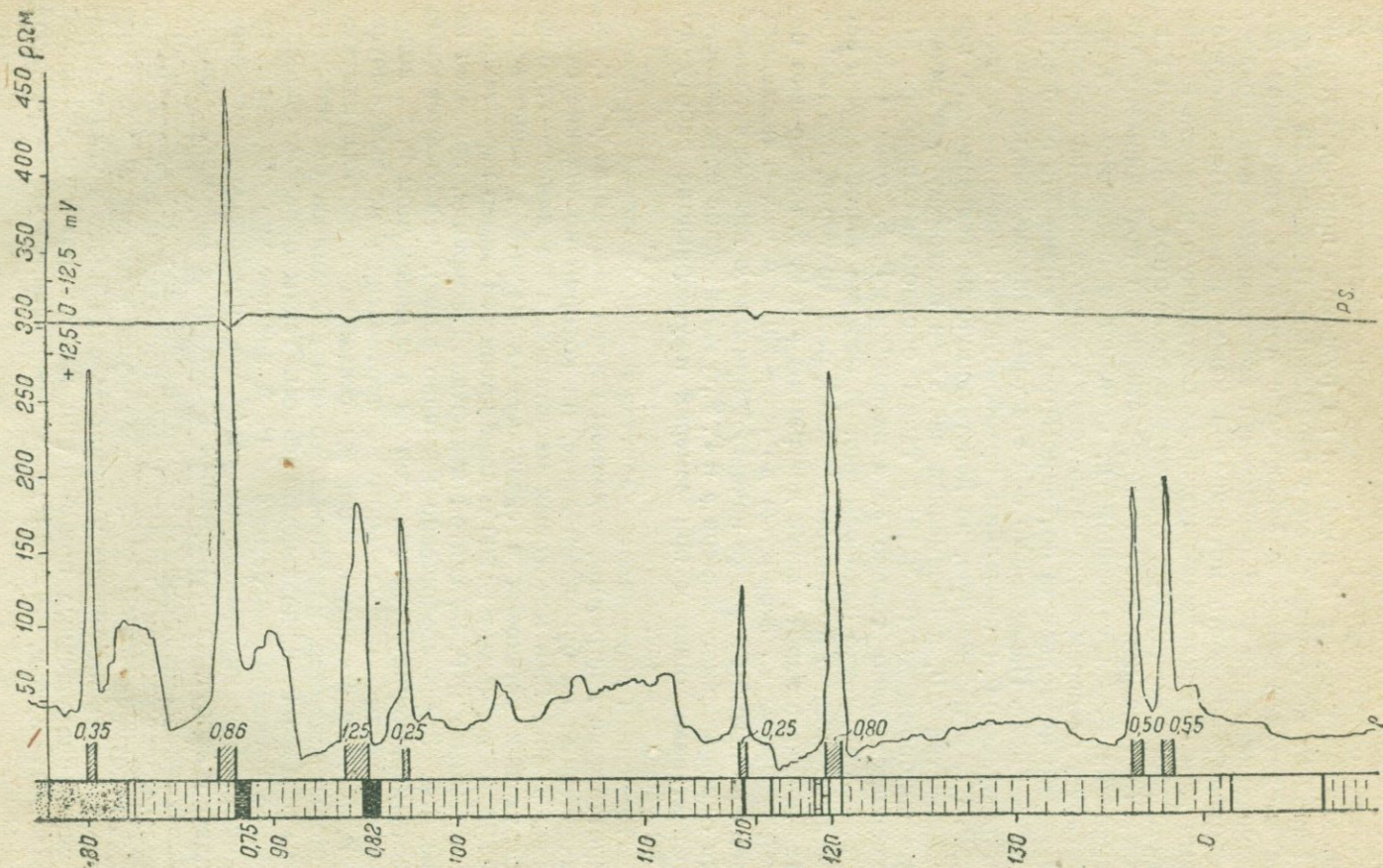


Рис. 133. Каротажная диаграмма скв. № 661 уч. Макеевско-Заводской (Донбасс),

При кароттаже антрацитовых углей диаграмма ρ дает расплывчатый слабый минимум ρ , а диаграмма P. S. четко отбивает уголь — пример можно видеть на рис. 134, где приведена часть диаграммы ρ и P. S. скважины № 520 Чистяковского участка (установка $AM=0,1$ м, $MN=3,6$ м).

Кароттаж позволяет не только устанавливать наличие и уточнять положение и мощность нефтяных и угольных пластов. По

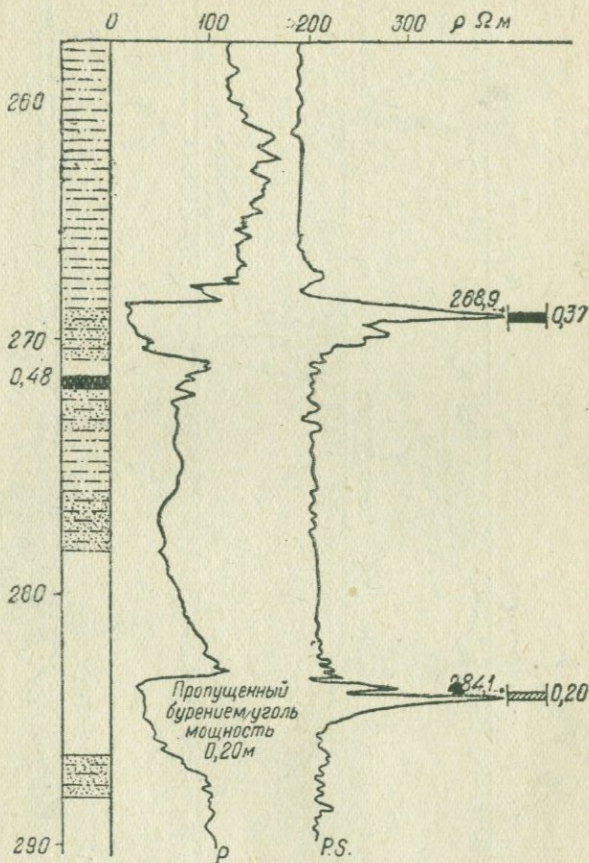


Рис. 134. Диаграмма ρ и P.S. скв. № 520 Чистяковского участка (Донбасс).

данным кароттажа ряда скважин можно легко проводить корреляцию скважин, так как осадочные породы сохраняют свой литологический состав на значительных площадях и поэтому диаграммы ρ дают весьма сходные по характеру профили. Диаграммы на рис. 135 сняты в районе Грозного — сверху идут однородные глины сармата с малым электрическим сопротивлением, горизонт мергелей очень четко отбивается на всех диаграммах (см. $A_1, A_2 \dots A_6$); ниже идет толща перемежающихся песков и глин, а еще ниже легко видеть два слоя (J_1 и J_2), являю-

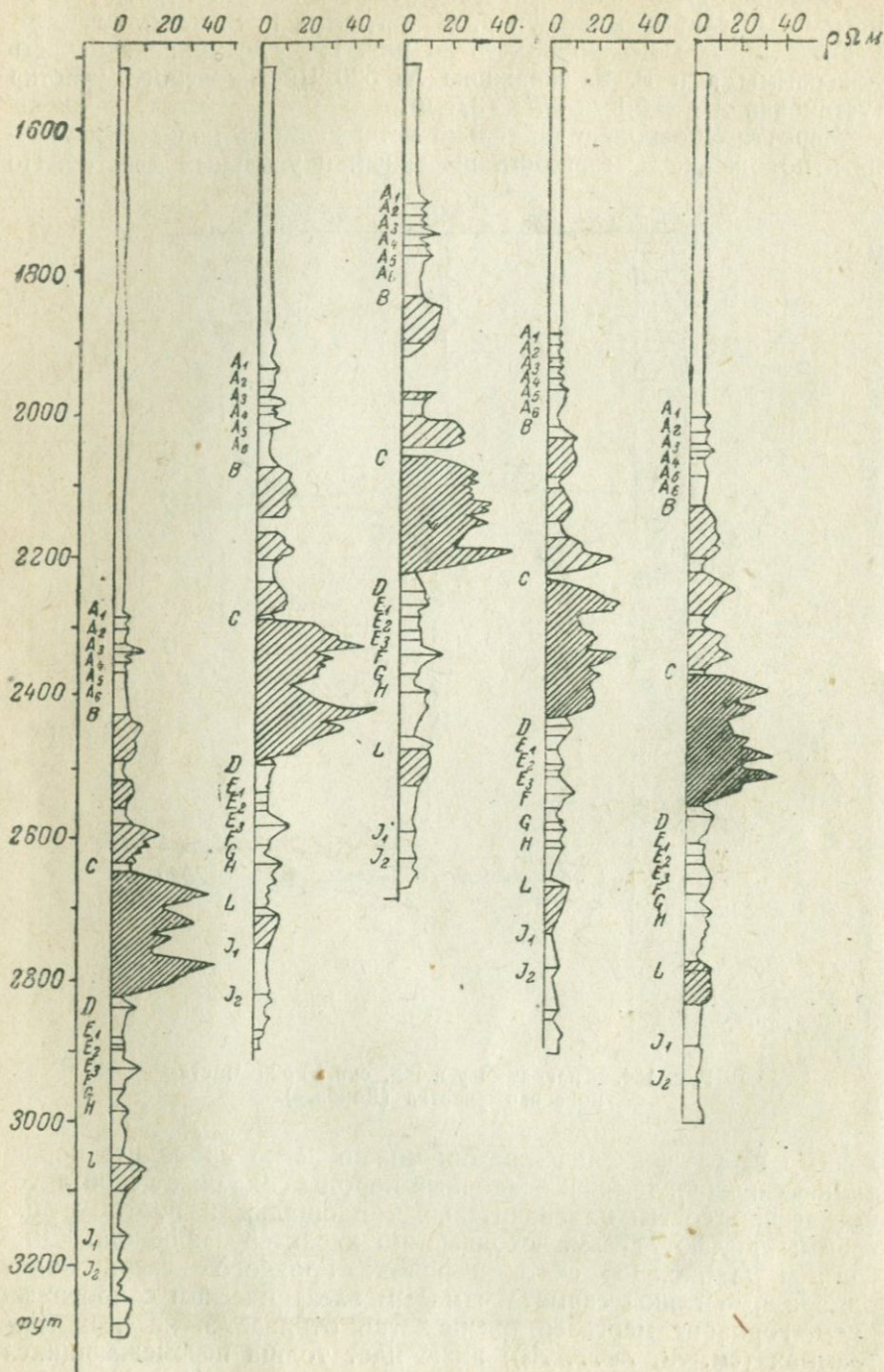


Рис. 135. Корреляция скважин — район Грозного.

щихся также надежными маркирующими горизонтами для кароттажа.

Возможность надежной корреляции приводит к тому, что по

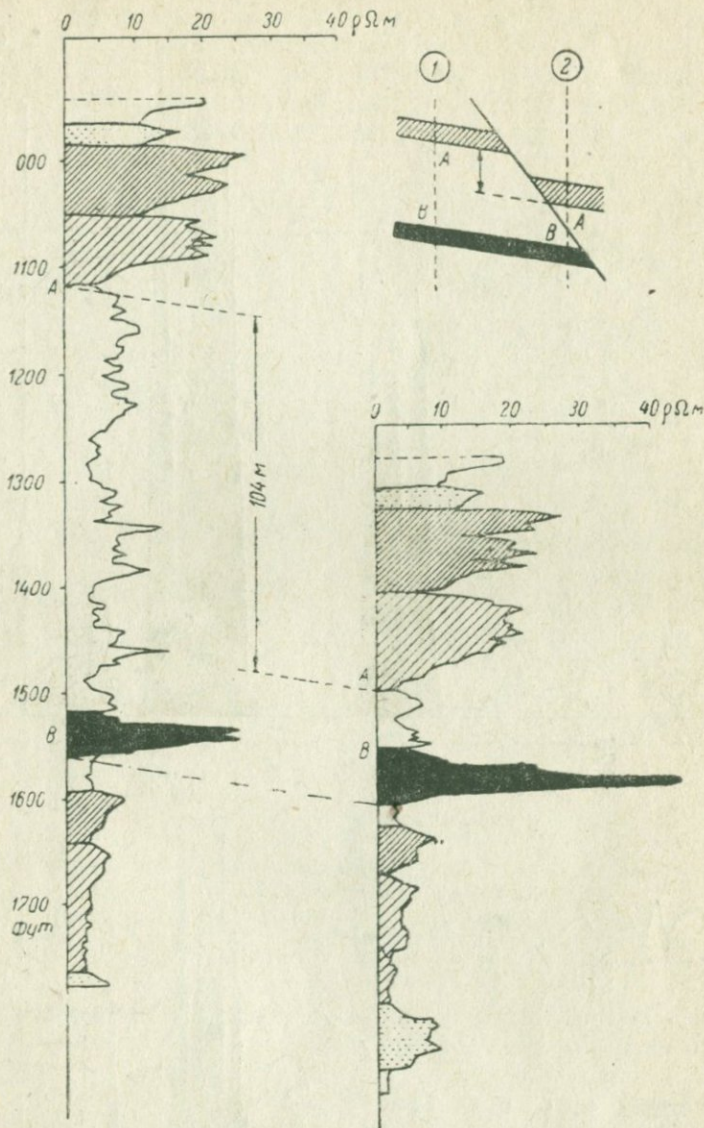


Рис. 136. Установление сброса по данным кароттажа на месторождении Маракайбо в Венесуэле.

данным кароттажа часто устанавливаются нарушения, проходящие между скважинами. Так, на рис. 136 приведен пример установления плоскости сброса и его амплитуды на месторождении

Маракайбо в Венецуэле. Расстояние между скважинами 200 м, амплитуда сброса 104 м.

Данные кароттажа позволяют делать заключения о степени

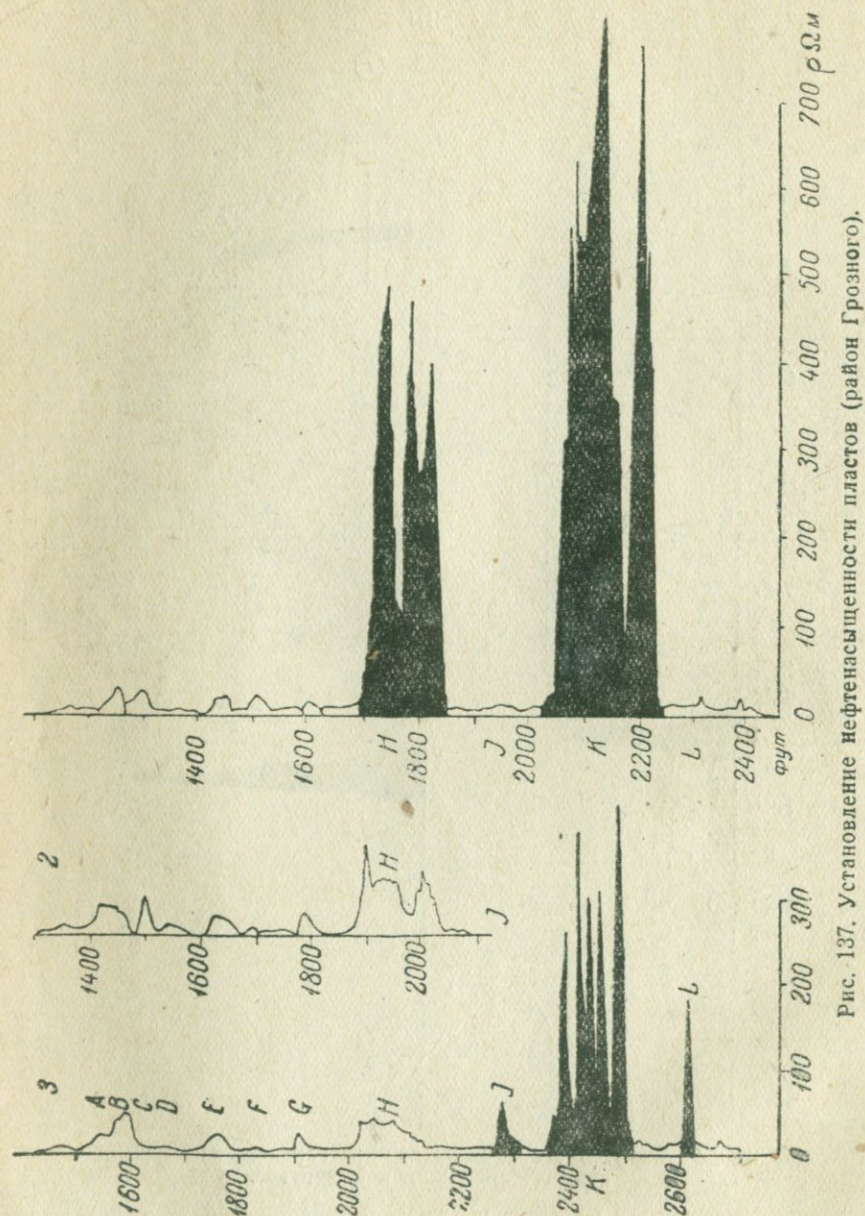


Рис. 137. Установление нефтенасыщенности пластов (район Грозного).

нефтенасыщенности пластов. Так, на рис. 137 приведены три кароттажных диаграммы близлежащих скважин в районе Грозного. Участок H в скважине 1 — нефтеносный, в скважине 2 — водо-

носный со следами нефти и в скважине 3 — без нефти. Тонкий пласт *J* в скважинах 1 и 2 — пустой, в скважине 3 — нефтеносный. Зона *K* в скважине 1 — фонтанирующая нефть — в скважине 3 — совместно с нефтью дает и воду. Пласт *L* в скважине 1 пустой, в скважине 3 — нефтеносный.

В нефтяных районах по кароттажу ряда скважин строят карты равных сопротивлений интересующего нефтяного горизонта. Зоны высоких сопротивлений будут качественно отражать

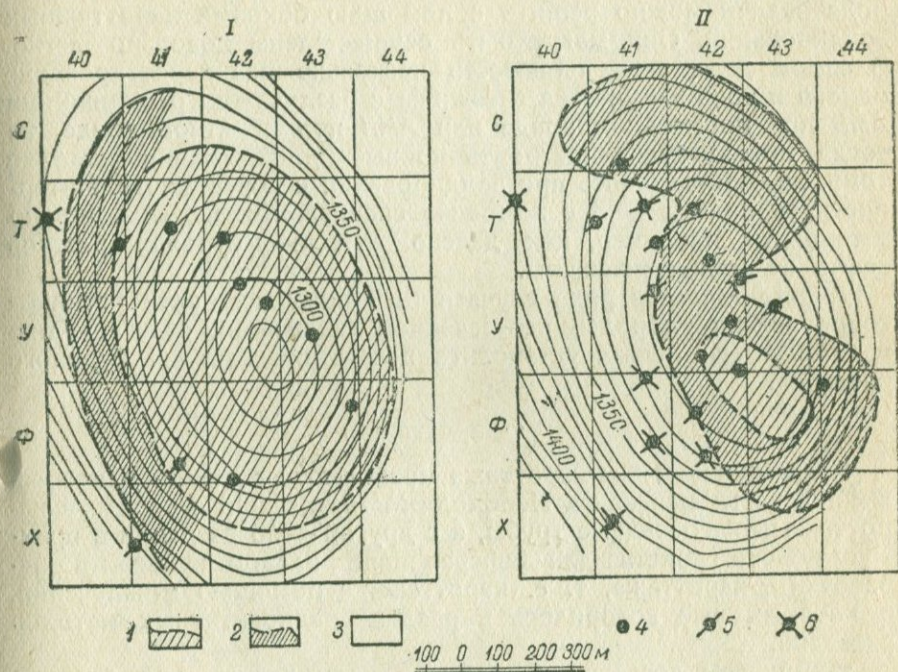


Рис. 138. Карты равных сопротивлений по данным кароттажа — промысел им. Орджоникидзе (Азнефть).

I — получена в октябре 1933 г.; *II* — получена в октябре 1934 г.
 1 — ρ больше 30 Ω м; 2 — $\rho = 10-30 \Omega$ м; 3 — ρ меньше 10 Ω м; 4 — скважины безводные; 5 — скважины, дающие нефть с водой; 6 — скважины, обводнившиеся полностью.

нефтенасыщенность района. Если такие карты строить для разного времени, то их сличение позволит ориентироваться в правильности эксплуатационного режима и в направлении дальнейшей эксплуатации горизонта. Пример таких карт дан для промысла им. Орджоникидзе на рис. 138. Карты сняты одна в октябре 1933 г., другая в октябре 1934 г. Рассмотрение карт приводит к заключению о характере наступления контурных вод.

Кароттаж ρ дает возможность легко устанавливать в любом месте скважины наличие обсадных труб, что может быть полезно при аварии, проверке правильности установки колонны для перекрытия нарушенных зон и т. д.

При кароттаже ρ ввиду небольших размеров установки зона, в которой измеряется кажущееся сопротивление, обычно не велика. В ряде случаев практики есть нужда эту зону увеличить. Так, например, при работе в нефтяных скважинах может потребоваться выяснить вопрос — не оттеснил ли буровой раствор нефть от скважины, или в рудной скважине установить — не прошла ли скважина вблизи руды и т. д. В ряде случаев такого рода задачи можно решить с помощью боковых кароттажных зондирований. Они могут быть осуществлены довольно легко. В самом деле, если произвести несколько раз кароттирование одного и того же участка скважины с различными расстояниями АМВ при нормальном зонде или АМН при обратном зонде, то тогда можно будет построить кривые зондирования подобно тому, как это делалось при зондировании с поверхности. Интерпретируя кривые БКЗ с помощью специальных палеток, можно установить, например, как далеко оттеснил буровой раствор нефть от стенок скважины.

Вместе с тем, в ряде случаев БКЗ позволит найти истинное сопротивление породы, пересеченной скважиной, если по диаграмме ρ его нельзя установить вследствие влияния бурового раствора.

γ-кароттаж

Преыдушие виды кароттажа позволяют его вести в необсаженной части скважины. Необходимость, с одной стороны, в кароттаже через обсадные трубы, а с другой — во введении в практику нового свойства для дифференциации пластов привели к разработке γ-кароттажа, т. е. кароттажа с помощью γ-излучений, о которых уже говорилось в разделе радиоактивных методов разведки.

γ-импульсы достаточно свободно проходят через обсадные трубы и попадают на счетчик радиоактивных импульсов С (рис. 139), также описанный выше.

Нить счетчика соединена с сеткой первой усилительной лампы L , помещенной в γ-снаряд и опускаемой вместе с ним в скважину. Высокое напряжение от батареи B подается на цилиндр — нить счетчика через лампу L , играющую также роль большого буферного сопротивления. Импульс тока, возникший в счетчике при прохождении γ-импульса, действует на величину анодного тока в лампе L , эти колебания анодного тока передаются на поверхность земли, где усиливаются, например с помощью двух- или трехлампового усилителя и поступают в электромагнитный счетчик D , подсчитывающий число импульсов.

γ-снаряд представляет собою металлическую гильзу, внутри которой с герметической изоляцией от окружающего раствора помещен счетчик C и лампа L . При работе утилизируется трехжильный кароттажный кабель, употребляемый при кароттаже ρ и $P. S.$

Пример диаграммы γ -кароттажа приведен на рис. 140. Диаграмма получена В. А. Шпак в скважине № 411 Сызранского нефтяного месторождения и указывает на наличие 6 пластов пород с повышенной радиоактивностью на глубинах 195—230 м.

γ -кароттаж только еще внедряется в производство; основным его недостатком является медленность в работе.

В последнее время получена возможность стоять на месте около 1 мин. для того, чтобы счетчик успел сосчитать достаточное для практических целей количество импульсов, а раньше это время доходило до 5 и даже 10 мин. Надо полагать, что в ближайшее время будет получена возможность непрерывной регистрации γ -импульсов, хотя бы и при медленном спуске снаряда.

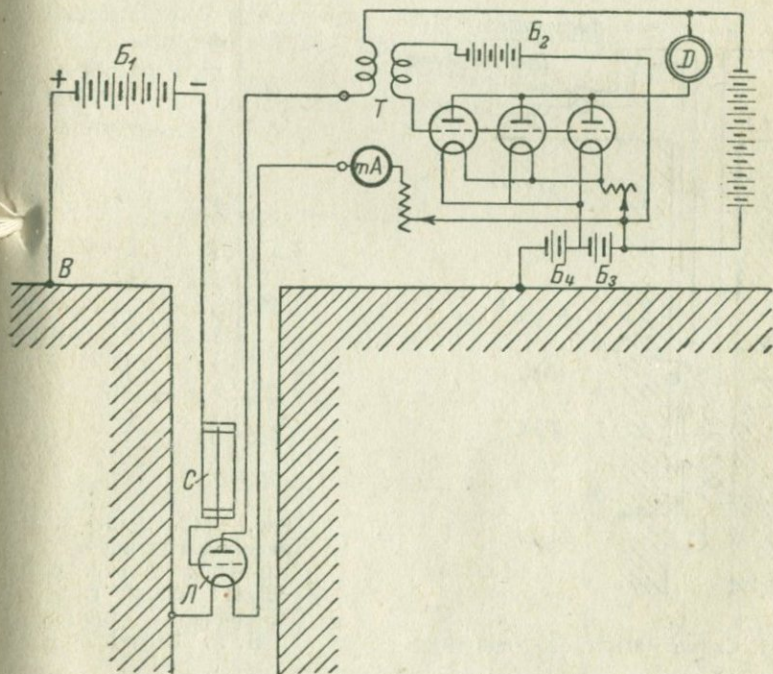
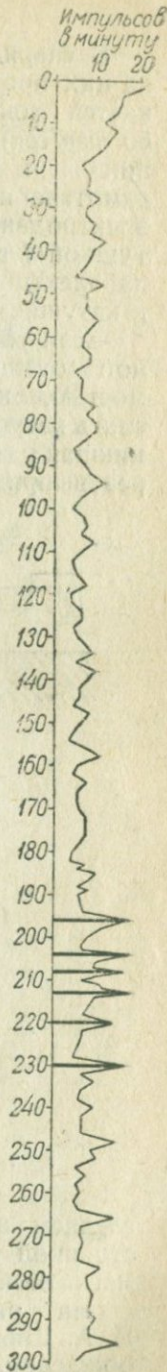


Рис. 139. Схема γ -кароттажа.

Магнитный кароттаж

Есть несколько схем изучения магнитных свойств пород в открытой части скважины. Мы остановимся на более разработанном индуктивном методе определения магнитной восприимчивости пород, пересеченных скважиной.

Рис. 140. Диаграмма γ -кароттажа.



В снаряд из эбонита помещены две катушки с намотанной на них проволокой: первичная 1 (рис. 141), по которой пропускается ток от источника А постоянной частоты (например 50 пер/сек), и вторичная, состоящая из трех катушек; две из них — 2 и 4 — помещены в торец первичной катушки и одна 3 намотана на ее середине. Витки подобраны так, что в воздухе электродвижущая сила, возбуждаемая катушкой 1 в катушках 2 и 4, равна и обратна электродвижущей силе, возникающей в катушке 3.

Если снаряд попадает в среду с отличной от воздуха магнитной проницаемостью, компенсация электродвижущих сил в катушках 2, 3 и 4 нарушается, и возникающая разность потенциалов, попадая через выпрямитель в потенциометр, на по-

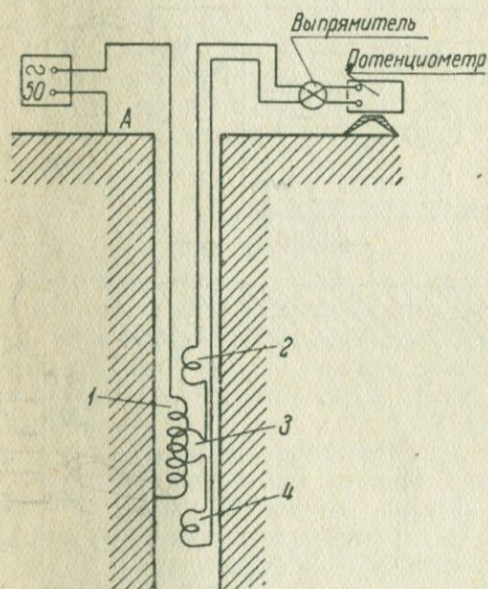


Рис. 141. Схема магнитного кароттажа.

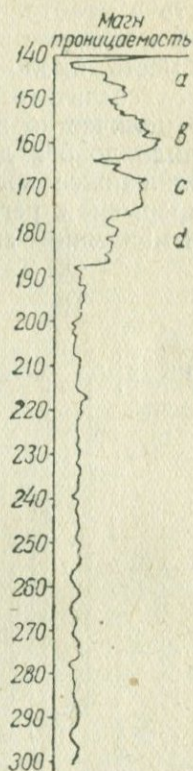


Рис. 142. Диаграмма магнитного кароттажа скв. № 414 около г. Сызрани (по В. А. Шпак).

следнем измеряется. Величина разности потенциалов при постоянной силе и частоте питающего тока зависит от величины магнитной проницаемости среды.

На рис. 142 приведена магнитная диаграмма, снятая В. А. Шпак в одной из скважин Сызранского нефтяного месторождения. Диаграмма показывает наличие характерных максимумов и минимумов, отражающих магнитные свойства пород, пересеченных скважиной.

Быстрота работы по магнитному кароттажу может быть

такой же, как и по электрическому. Метод работы еще только начинает внедряться.

§ 20. РАЗЛИЧНЫЕ ОПЕРАЦИИ В СКВАЖИНАХ

Помимо кароттажа физических свойств пород по скважине широкое применение, особенно в нефтяных скважинах, получили другие операции, имеющие целью решение ряда технических вопросов и использующие в значительной мере оборудование, применяющееся при кароттаже ρ и P. S.

Работы с резистивиметром

Прибор для измерения сопротивления бурового раствора — резистивиметр — представляет собою такую же установку, как и для кароттажа ρ , только расстояния $AM = 1,5$ см для нормального зонда и $AM = 3$ см и $MN = 1,5$ см для обратного зонда. Вся остальная часть — кабель, лебедка, блок-баланс, потенциометр с регистратором и т. д. — совершенно идентична. Маленькие расстояния AM и MN позволяют измерять ρ бурового раствора и не захватывать стенок скважины.

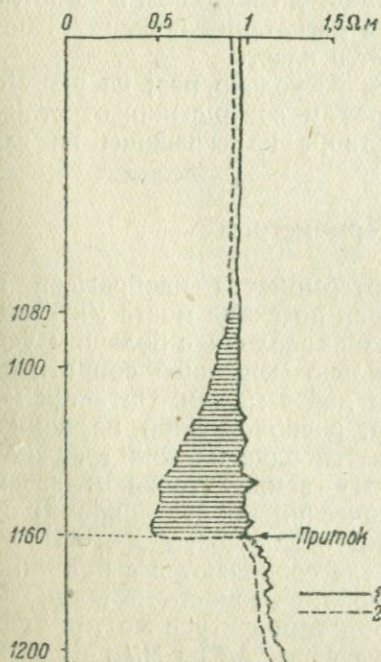


Рис. 143. Определение места притока воды в скважину с помощью резистивиметра — метод отгартывания.

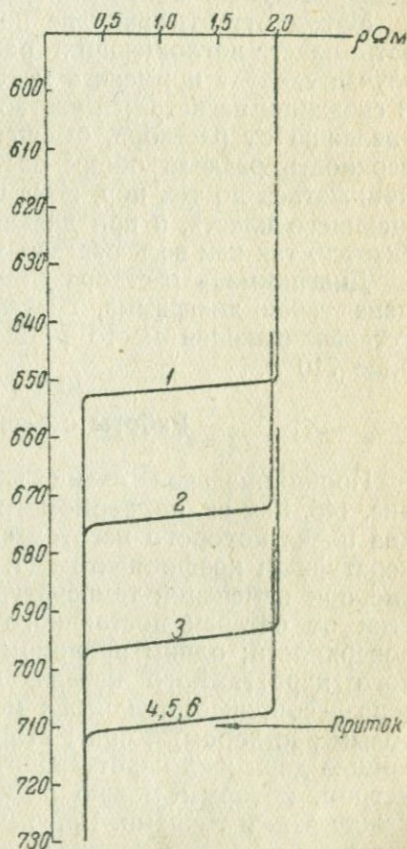


Рис. 144. Определение места притока воды с помощью резистивиметра — метод продавливания.

Измерение сопротивления бурового раствора производится главным образом для того, чтобы установить места водных притоков. Второе назначение — знание ρ бурового раствора — важно для учета степени влияния его на величину кажущегося сопротивления при кароттаже ρ пластов, пересеченных скважиной.

Методов определения сопротивления бурового раствора с помощью резистивиметра два — метод оттартывания и метод нагнетания.

Метод оттартывания состоит в следующем: скважину тщательно промывают раствором, соленость которого сильно отличается от солености воды в пласте, затем делают контрольный замер ρ раствора по скважине. После этого понижают уровень раствора путем оттартывания метров на 30 и вновь измеряют ρ раствора. Сопоставление диаграмм ρ раствора до и после оттартывания укажет место притока (см. рис. 143), где в скважину поступает более минерализованная вода.

Метод оттартывания не подходит, если требуется локализовать пласт, поглощающий раствор из скважины. В последнем случае следует применять метод продавливания или нагнетания. В скважину нагнетается раствор, резко отличающийся по сопротивлению от раствора, бывшего до нагнетания в скважине. Поверхность раздела обоих растворов при нагнетании будет все понижаться до тех пор, пока не дойдет до подошвы водопоглощающего пласта, и при дальнейшем нагнетании больше не опускается, так как весь раствор уходит в пласт.

Диаграмма ρ раствора снимается несколько раз; на рис. 144 дана такая диаграмма, снятая 6 раз и совершенно отчетливо устанавливающая место ухода раствора из скважины на глубине 710 м.

Работы с электротермометром

Принципиальная схема электротермометра изображена на рис. 145. Как видно, термометр собран по схеме моста Уитстона, два плеча которого изготовлены из проволоки с большим температурным коэффициентом (т. е. сильно меняющей сопротивление при изменении температуры), а два с малым. Питается мостик от батареи постоянного тока, расположенной на земной поверхности; одним проводом является одна из жил трехжильного кароттажного кабеля, другим — земля (точка B заземлена — соприкасается через металлический корпус прибора с буровым раствором). Концы второй диагонали моста (M и N) с помощью двух жил кароттажного кабеля соединяются с потенциометром, которым можно регистрировать разность потенциалов между этими точками. При некоторой температуре мостик уравновешен; т. е. при пропускании тока через AB на MN не наблюдается разности потенциалов. Если же мостик попадает в другие температурные условия, то ввиду разных температурных коэффициентов плеч между MN появится разность потенциалов, про-

порциональная разности температур (между измеряемой t и той, при которой он уравновешен).

Таким образом, регистрируя на регистраторе разность потенциалов, можно получить изменение температуры вдоль по скважине. Точность замеров температуры $\pm 0,1^\circ$, инерция существующих типов термометров около 10 сек., что позволяет вести непрерывные изменения при медленном опускании снаряда в скважину (порядка 70—100 м в час).

Употребляется электротермометр для определения мест притока воды, для определения циркуляции жидкости в затрубном пространстве, для определения высоты поднятия цемента при цементации скважин и т. д. Как видно по характеру задач, наличие обсадных труб не является препятствием для измерения температур.

Для определения мест притока воды электротермометром существует два метода — метод оттаргивания и метод продавливания. Мы их не будем описывать, так как они аналогичны таким же методам при измерении резистивиметром, если только нагнетать

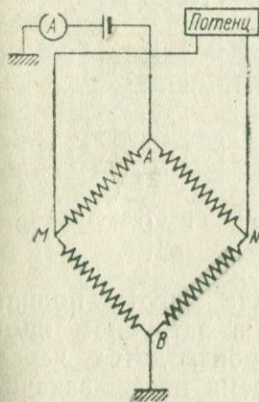


Рис. 145. Схема электротермометра.

или оттаргивать раствор другой температуры, чем вода в пласте. Пример диаграммы температуры t , полученной при оттаргивании, дан на рис. 146; притекает в скважину более горячая вода, чем раствор; пунктиром нанесена диаграмма t до оттаргивания.

Для того чтобы выяснить — нет ли в затрубном пространстве циркуляции воды из водоносных пластов в нефтеносные, что может плохо отозваться на эксплуатации пластов, поступают следующим образом. Скважину прокачивают, например, более холодным раствором и делают измерения электротермометром; получается почти прямая линия. Если через некоторое время вновь сделать замеры температуры, то в случае отсутствия циркуляции вод в затрубном пространстве диаграмма t (рис. 147, в) будет отражать лишь влияние нормального геотермического градиента. Если же из пласта l вытекает в затрубное пространство более теплая вода, то диаграмма t будет иметь вид рис. 147, с. Снимая вновь через некоторое время диаграмму t , мы получим последовательно рис. 147, d и e, наглядно показывающие направление течения жидкости в затрубном простран-

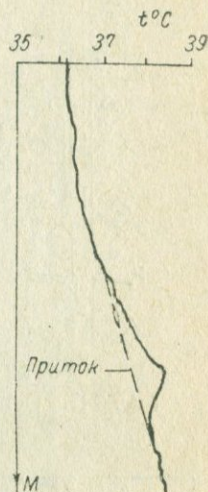


Рис. 146. Определение водного притока в скважину с помощью электротермометра.

стве и место ее ухода в пористый пласт 2, имеющий меньшее давление. Если упустить время и снять диаграмму очень поздно, то естественно, что этот эффект будет затушеван.

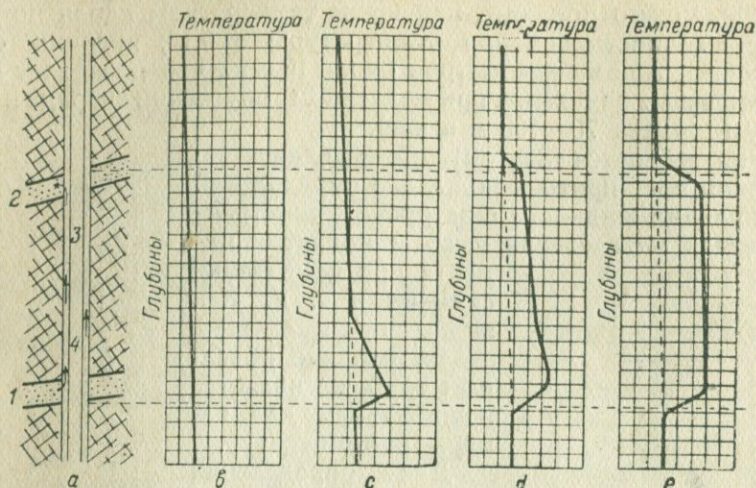


Рис. 147. Определение циркуляции вод в затрубном пространстве электротермометром.

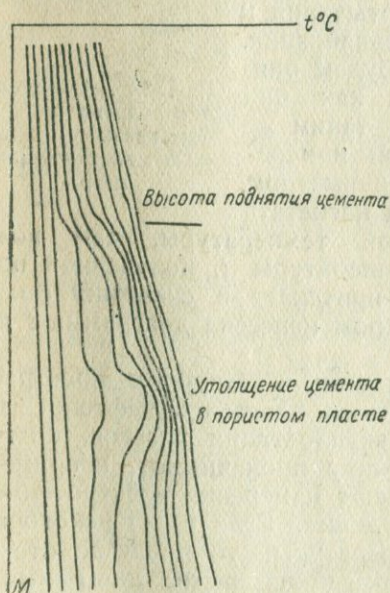


Рис. 148. Определение высоты поднятия цемента в затрубном пространстве электротермометром.

Определение высоты поднятия цемента в затрубном пространстве производится через некоторое время после закачивания цемента и основано на том, что при схватывании цемента развивается тепло — температура доходит до 100° . Если произвести последовательно ряд измерений t по скважине (рис. 148), то первое время, пока температура еще не повысилась, мы не получим заметных изменений ее против нормы; затем по изменениям температуры можно видеть — где находится цемент и насколько велика его масса и, наконец, после выравнивания температуры вновь получатся нормальные кривые t .

Работа с инклинометром

Стремление ввести в комплект кароттажа прибор, который позволял бы, используя в основном кароттажное оборудование, находить с достаточной для практики точностью угол

наклона и азимут скважин, привело к созданию электромагнитного прибора, называемого инклинометром, а иногда телеклинометром. Этот прибор позволяет быстро устанавливать во многих точках по оси некрепленной скважины угол наклона с точностью до $0,5^\circ$ и азимут отклонения с точностью до 10° . Максимальные углы наклона, которые может измерять инклинометр, около 30° от вертикали, диаметр инклинометра 104 мм, хотя в последнее время сконструирован инклинометр, имеющий диаметр 40 мм.

С принципиальной стороны инклинометр состоит из двух частей (рис. 149 — нижняя половина). Индукционная катушка (индукционный компас) 6 может вращаться при помощи электрического моторчика 7 вокруг оси, проходящей по оси всего снаряда, т. е. по оси скважины. В индукционной катушке, имеющей большое число витков тонкой проволоки и вращающейся со скоростью до 2000 об/мин, возбуждается электродвижущая сила вследствие перерезания катушкой силовых линий земного магнитного поля. Над катушкой висит на кордоновом подвесе электромагнит 5, железо которого не обладает гистерезисом. Электромагнит висит всегда вертикально независимо от наклона скважины, электрически он соединен последовательно с индукционным компасом.

Если ось скважины вертикальна, — поле электромагнита не создает в рамке индукционных электродвижущих сил; если скважина отклонена от вертикали, — в рамке под влиянием поля электромагнита возникает электродвижущая сила, накладываемая на электродвижущую силу, вызванную земным полем. Сумма обеих электродвижущих сил снимается с коллектора катушки 8 и 9 с помощью двух пар щеток, расположенных взаимно-перпендикулярно (конечно поочередно — сначала с одной пары щеток, а затем с другой), и подается по двум жилам кароттажного кабеля на поверхность земли, где измеряется на потенцио-

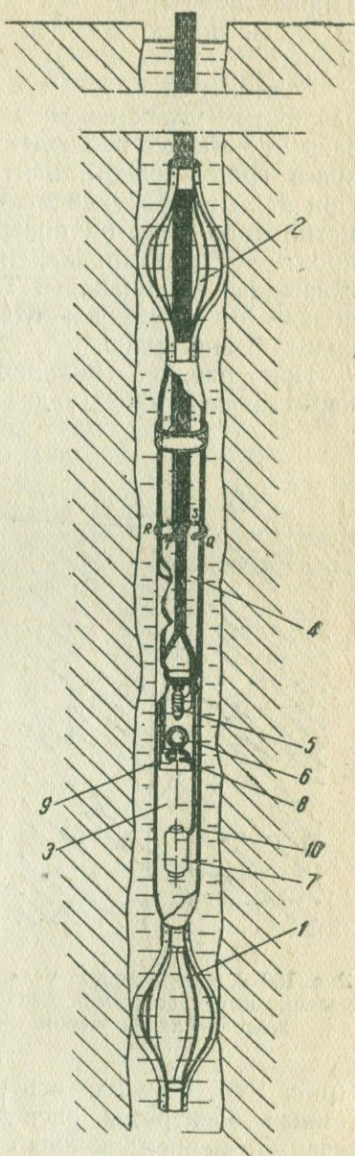


Рис. 149. Пандажметр.

метре. Этой пары наблюдений не достаточно для вычисления интересующих величин; чтобы дополнить наблюдения, меняют направление тока, текущего по электромагниту и буссоли, и вновь измеряют две разности потенциалов с обеих пар щеток.

Если перед спуском в скважину прибор отградуирован при различных углах наклона и различных азимутах, то тогда указанных четырех наблюдений достаточно для того, чтобы, пользуясь градуировкой, найти угол наклона и азимут скважины. При этом подразумевается, что величина и направление земного магнитного поля на поверхности земли, у устья скважины, где проходит градуировка, и во всех точках измерения по оси скважины — одинаковы. Так и бывает в действительности, если вблизи от скважины отсутствуют объекты, могущие вызвать сильную аномалию.

При работе инклинометром используется трехжильный каротажный кабель, два провода для измерения электродвижущих сил со щеток (переключение с одной пары на другую осуществляется с помощью особого реле) и один для питания мотора; роль второго провода для питания мотора играет земля. Весь прибор заключен в герметический кожух 10.

Практически измерения углов ведутся в отдельных точках скважины метров через 25, иногда реже; время, потребное на замер в одной точке, около 1 мин.

Работа с пандажметром

Пандажметром называется прибор, позволяющий определять угол падения пластов по одной скважине на любой глубине. Если среда анизотропна, то вокруг точечного источника *A*, расположенного в том месте скважины, где надо замерять угол падения, эквипотенциальные поверхности будут эллипсоидами

(рис. 150), большая ось которых направлена по падению. Примемные электроды расположим поперек скважины на концах взаимно-перпендикулярных диаметров на расстоянии нескольких сантиметров друг от друга (электроды *MN* и не изображенные на рис. *M₁N₁*, расположенные по линии, перпендикулярной плоскости чертежа). Если бы среда была однородна или напластования горизонтальны, то обе пары электродов лежали бы на одной изопотенциальной поверхности и между ними никакой разности потенциалов не наблюдалось бы. Но если напластования не горизонтальны, электроды *MN* (а также и *M₁N₁*)

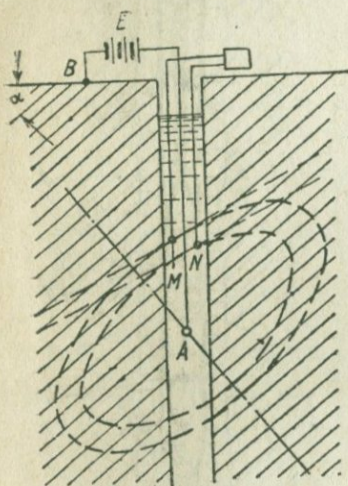


Рис. 150. К определению угла падения пород по одной скважине — пандажметром.

будут находиться на разных изопотенциальных поверхностях, т. е. между ними возникнет разность потенциалов, которую можно измерить потенциометром на поверхности земли. По замеренной паре разностей потенциалов (между MN и M_1N_1) можно найти угол падения пластов по отношению к оси скважины. Если еще в этой же точке измерить угол наклона и азимут скважины, то тогда легко найти истинный угол падения пластов.

Практически пандажметром называют комбинацию инклинометра с собственно пандажметром (рис. 149); общая длина этого прибора около 5 м, диаметр 110 мм.

Для более достоверного определения угла падения пластов надо производить несколько определений в близко расположенных (через 10—15 см) точках по оси скважины и иметь керн, по которому можно измерить угол кажущегося падения пород.

Другие операции в скважине

К числу таких операций относятся: взятие проб со стенки скважины — грунтонос, устройство взрыва в скважине для обрыва труб или их пробоя в заданном месте и т. д. Поскольку они имеют к разведочной геофизике весьма малое отношение, — мы их рассматривать не будем; они связаны с каротажными партиями, главным образом, тем, что при выполнении этих работ утилизируются каротажный кабель и лебедка.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГЕОЛОГО-РАЗВЕДОЧНОЙ ПРАКТИКЕ

ВВЕДЕНИЕ

Развитие геофизических методов исследований за тот, сравнительно небольшой, период времени, в течение которого они привлекаются к разрешению вопросов геологического строения земной коры, шло, в основном, по двум направлениям:

1) совершенствование отдельных способов геофизических исследований, расширение круга используемых геофизикой физических свойств горных пород и создание новых технических приемов разведочной геофизики;

2) разработка с помощью геофизики методики изучения широкого круга геологических задач как в области региональной и структурной геологии, так и при поисках и разведке различных типов месторождений полезных ископаемых, а также в ряде других вопросов геологии.

Геофизические методы исследований, особенно в СССР, все шире внедряются во все стадии изучения геологического строения отдельных участков земной коры и накапливают опыт работы, который и направляет дальнейшее развитие разведочной геофизики.

Несмотря на то, что накопленный опыт исследований пока еще не столь велик, уже и сейчас, основываясь на проведенных до сих пор работах, можно наметить основные пути и схемы применения геофизических методов при решении ряда типичных геологических задач. В частности, можно выделить некоторые вопросы изучения региональной и структурной геологии, детального геологического картирования, исследования месторождений главнейших полезных ископаемых, вопросы гидрогеологии, инженерной геологии и ряд других.

Изложению основных черт комплексной методики применения геофизики при решении этих вопросов и посвящена II часть настоящего курса.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ РЕГИОНАЛЬНОЙ И СТРУКТУРНОЙ ГЕОЛОГИИ

§ 21. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ МЕТОДАМИ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ, И ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАБОТ

В настоящее время геофизические методы разведки применяются при решении весьма разнообразных задач, в самых различных сочетаниях как в пределах только геофизических методов, так и в комплексе с другими геолого-разведочными методами исследования. Практикой неоднократно была подтверждена возможность успешного использования геофизических методов разведки при решении следующих геолого-разведочных задач.

1. Определение мощности наносов, т. е. выявление глубины залегания и характера погребенного рельефа коренных пород; эта задача особенно легко решается, когда коренные породы представлены кристаллическими породами.

2. Расчленение толщи осадочных пород на отдельные стратиграфические и литологические горизонты, хотя не всегда толщи пород, выделяющиеся по какому-либо физическому свойству, соответствуют стратиграфическим горизонтам.

3. Определение погребенного рельефа, а иногда и структуры кристаллического фундамента (ложа), подстилающего, например, в Европейской части СССР часто на относительно небольшой глубине осадочные отложения.

Задача расчленения толщи осадочных отложений решается геофизическими методами разведки, главным образом при решении региональных структурно-геологических вопросов, связанных, например: 1) с обнаружением действительных границ угольных бассейнов (Б. Донбасс, Караганда), когда продуктивные отложения вне пределов обнаженной части покрыты плащом более молодых отложений, иногда значительной мощности; 2) с изучением общей структуры возможных нефтеносных полей (Б. Донбасс, Калмыцко-Сальские степи, новые районы к северу от Грозненского нефтяного месторождения и т. д.).

Обычно успешное и уверенное решение этой задачи именно для районов нефтяных и угольных, где весьма важно знание мощности осадочных отложений, бывает возможно при одновременном решении вопроса о глубине залегания кристаллического ложа, на котором располагаются осадочные отложения. Примерами могут служить работы по проблеме Б. Донбасса, работы в Ленинградской области, в пределах так называемого Тургайского пролива и т. д.

4. Определение местоположения и амплитуды сброса и других тектонических и иных нарушений в горных породах, имею-

щих региональное или локальное распространение, а также исследование контактов горных пород.

Типичным примером исследования регионального нарушения сбросового или грабеноподобного характера может служить изучение так называемого маньчжурского нарушения на территории Б. Донбасса, начинающегося от с. Лысогорская на западе и проходящего через Персияновку — Сальск до Каспийского моря на востоке.

5. Изучение структурных форм залегания горных пород:

- а) антиклинали и синклинали,
- б) купольные структуры (соляные купола).

Примерами этого типа задач, которые подробно рассматриваются в следующих параграфах, являются задачи структурной геологии и так называемой соляной тектоники в районах главнейших нефтяных месторождений СССР (Эмба, Грозный, Апшеронский полуостров и др.).

6. Картирование кристаллических и метаморфических пород. Задача геологического картирования массивов кристаллических и метаморфических пород решалась в пределах относительно небольших площадей, например в пределах хромитоносных массивов типербазитов на Урале, на Кольском полуострове, но еще не получила широкого распространения.

7. Локализация не вскрытых эрозией интрузий изверженных пород, как возможных материнских пород, с которыми связано искомое оруденение.

Задача обнаружения погребенных интрузий в настоящее время более или менее полно поставлена и имеются первые опыты в решении этой задачи.

Первым этапом в решении формулированных выше геологических задач геофизическими методами разведки является проектирование последних. Проект геофизических исследований, как и других видов геолого-разведочных работ, является основным организующим началом работ как в полевых условиях, так и в период камеральной обработки.

Исходными при составлении проекта являются следующие три элемента.

1. Задача поисков или разведки, точно и конкретно формулированная и вытекающая: 1) из народно-хозяйственного плана СССР или из местных экономических особенностей исследуемой территории, 2) из результатов предшествующих геолого-разведочных работ на исследуемой или соседней с ней территории.

2. Степень геологической изученности подлежащей исследованию территории, определяющая как постановку геофизических работ, так и их практическое осуществление.

3. Уровень развития методики и техники геофизических методов разведки.

Имея в виду эти три исходные положения, ниже мы приводим схему проекта геофизических работ, которая, разумеется, в каждом отдельном случае может изменяться в деталях, в за-

висимости от условий проектирования (объект поисков или разведки, региональные задачи и т. д.).

Общая схема проекта геофизических работ

Общая схема проекта геофизических работ состоит в следующем.

1. Формулировка задач геофизического исследования.

2. Краткий очерк геологического строения района работ, включающий:

а) описание орографии, гидрографии и климатических особенностей района работ;

б) стратиграфию;

в) детальную литологическую и петрографическую характеристику главных типов пород, главным образом, с точки зрения выявления тех факторов, которые определяют физические свойства этих пород;

г) тектонику района работ, понимая под нею не только описание морфологии складок, типы имеющихся в районе работ нарушений, их элементы залегания, но и другие факторы, определяющие тектонические условия района работ (изменение мощностей пород и т. д.);

3. Анализ методики предшествующих геолого-разведочных работ и в особенности геофизических в районе предполагаемых работ или в соседнем с ним районе.

В том разделе, на основе использования всего имеющегося материала или о районе, подлежащем исследованию, или об аналогичном месторождении, или о близких по своему геологическому строению районах, критически анализируется опыт предыдущих работ и вскрываются их основные недостатки. Эта часть проекта, в особенности, если после ранее выполненных геофизических работ была организована проверка данных геофизики, требует от составителя проекта тщательных сопоставлений, сопровождающихся в простейших случаях необходимыми расчетами, направленными на выяснение возможности объяснения выявленных геофизикой изменений физических полей результатами проверки аномалий горно-буровыми работами.

4. Характеристика физических свойств горных пород района на основе данных лабораторных и полевых (если таковые были) определений физических свойств. Анализ данных о физических свойствах по результатам предыдущих геофизических работ. В этом разделе важно не только лишь установление существующих различий в физических свойствах пород, но и выяснение в условиях данной конкретной обстановки тех факторов, которые определили эти различия. Решение этого вопроса позволит в дальнейших работах предвидеть характер изменения свойств горных пород на исследуемой территории.

5. Анализ возможностей частных геофизических методик (электроразведка, магниторазведка и др.) в решении поставленной геолого-разведочной задачи:

а) принципиальное решение о возможности применения того или другого частного метода;

б) решение так называемой прямой задачи геофизики для каждой методики в зависимости от полноты необходимых данных;

в) расчет сети и длины профилей.

6. Выбор системы разведки:

а) выбор комплекса геофизических методов;

б) выяснение возможностей и конкретных форм комплексирования геофизических и горно-буровых работ;

в) определение последовательности отдельных видов работ как в отношении участков работ, так и в отношении последовательности постановки отдельных методик.

7. Расчет общего объема работ.

8. Выбор технических средств разведки (аппаратура и вспомогательное оборудование).

9. Организационный план (оперативный) геофизических работ в сочетании с другими видами разведки.

10. Расчет штата технического и подсобного персонала.

11. Составление сметы.

12. Календарный план работ и финансирования.

Такова общая схема проекта. От этой схемы могут быть отклонения в сторону детализации отдельных пунктов в связи со специфическими задачами, подлежащими решению. В частности, некоторые различия в содержании проекта выступают при проектировании геофизических работ для поисков и разведки рудных месторождений и применения геофизики для изучения вопросов региональной глубинной геологии. При проектировании геофизических работ для решения этих последних вопросов необходимо учитывать главную особенность этих работ, с которой приходится встречаться исследователю, а именно — закономерное пространственное изменение физических свойств пород, слагающих данную территорию, не только в вертикальном разрезе, но, что очень важно, и в горизонтальном направлении в пределах одной и той же формации.

Эти закономерные изменения представляют отображение геологических процессов прошлого и настоящего, а поэтому именно при региональных исследованиях необходимо особенно тщательно изучить уже известные данные из региональной геологии подлежащего исследованию района с тем, чтобы предвидеть эти изменения как при проектировании работ, так и при интерпретации результатов.

К сожалению, до сих пор в области исследования региональных закономерностей изменения физических свойств пород сделано очень мало и, в частности, у нас в Союзе мы знаем единичные примеры, где такие закономерности выявлены. Такими районами являются территория Б. Донбасса и частично Карелия.

Для территории Б. Донбасса можно считать выявленными закономерные изменения физических свойств (плотность, упругость, электрическое сопротивление) каменноугольных пород.

Ниже дается изложение этих закономерностей и делается попытка выяснения связи их с особенностями геологического строения Донбасса. Хотя этот вопрос нельзя считать решенным всесторонне, тем не менее его приходится обсуждать даже на страницах учебника, так как этим самым к решению этих вопросов можно будет привлечь внимание специалистов геологов и геофизиков.

§ 22. ОСОБЕННОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ РЕГИОНАЛЬНОГО МАСШТАБА. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОРОД, КАК СПЕЦИФИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Известно, что предвидение характера распределения горных пород по их физическим свойствам в пределах какого-либо района является одним из главных условий эффективного использования геофизических методов разведки для решения геолого-разведочных задач.

Если исследования ограничиваются сравнительно небольшими площадями для разведки «изолированных залежей» (хромиты, жильные месторождения полиметаллов и т. д.), то для предвидения характера распределения пород по их физическим свойствам достаточно установить различия между физическими свойствами искомого полезного ископаемого и вмещающих пород, которые с достаточным приближением можно считать постоянными для исследуемой территории. Это обеспечивает правильную постановку геофизических работ и однозначное решение обратной задачи геофизики, если речь идет о нарушениях в структуре физического поля на небольших площадях, т. е. о нарушениях локализованных, отражающих, главным образом, неоднородности в верхней, незначительной по мощности (до 100 м), зоне отложений.

В том случае, когда исследования геофизическими методами ведутся на значительных площадях, охватывающих отдельные геологические провинции (угольные бассейны, нефтяные поля и т. д.) и когда эти исследования связаны с решением структурно-геологических задач регионального характера, — геолог и геофизик имеют дело с иным типом нарушений физического поля, — с нарушениями регионального типа, для однозначного геологического истолкования которых уже не может быть принята постоянная разница в физических свойствах искомого объекта и вмещающих пород.

Для использования подобных нарушений физического поля, в которых изменения проявляются преимущественно по какому-то закону в смысле изменяемости в пространстве и во времени, необходимо предвидение закономерностей изменения физических свойств в региональном масштабе. Этот фактор в истолковании региональных полей является ведущим, тогда как, например,

влияние формы исследуемого объекта здесь уже сказывается меньше, чем в случае локальных аномалий.

Выявление законов пространственно-временного изменения физических свойств горных пород как специфического проявления геологических процессов представляется, таким образом, решающим в использовании региональных физических полей для геолого-разведочных целей. Поэтому весьма важным представляется изучение этих закономерностей в пределах относительно хорошо геологически изученных районов. В качестве такого примера мы изложим ниже закономерности регионального изменения физических свойств, установленные на территории Б. Донбасса как в отношении вмещающих пород, так и в отношении углей.

Плотность

В Донецком бассейне выполнено около 5000 определений плотностей по кернам 77 скважин, пересекших средний и верхний карбон.

Распределение этих скважин на всей площади в общем равномерное. Некоторым сгущением наблюдений отличается Лисичанский район. Все результаты наблюдений, начиная с 1929 г., А. Т. Донабедовым при участии З. С. Толстиковой были подвергнуты обработке для получения средних плотностей вдоль разреза скважин независимо от литологического характера породы; вычислены также были средние значения плотностей для отдельных литологических разностей, встреченных скважинами (песчаники, сланцы, известняки).

Анализ данных по средним плотностям показывает, что они от скважины к скважине меняются настолько, что естественно было составить карту изменения плотностей для территории Б. Донбасса.

Однако без предварительного анализа некоторых особенностей изменения плотностей вдоль колонок скважин такого построения делать нельзя. Прежде чем составить карту горизонтального изменения плотностей, нужно было рассмотреть следующие вопросы: 1) изменяется ли плотность каменноугольных отложений с глубиной их залегания в настоящее время; 2) изменяется ли плотность в зависимости от стратиграфического положения, т. е. возраста. Эти вопросы можно разрешить лишь анализируя данные по наиболее глубоким скважинам. Наиболее глубокой скважиной, в которой была изучена плотность пород, является скважина № 1 района Сталино (участок «сто»), имеющая глубину 1169 м и начинающаяся в каменноугольных отложениях. Скважина пересекла три свиты: C_2^5 , C_2^6 и C_3^1 . Всего вдоль колонки этой скважины выполнено 261 определение, т. е. в среднем и притом равномерно через каждые 4 м. Распределение плотностей по этой скважине представлено на рис. 151¹, где по вертикальной оси отложены глубины зале-

¹ Верхняя половина разреза.

гания определенного на плотность образца, а по горизонтальной оси — соответствующая действительная плотность. Если отвлечься от случайных единичных «выскоков», то кривая показывает постоянство плотности вдоль всей скважины, независимо от глубины залегания, смены свит и литологического состава. Две другие скважины в этом же районе с глубинами 537 и 1011 м, пересекающие соответственно свиты $C_2^6 - C_3^1$ и C_2^3, C_2^4, C_2^5 (если не считать с незначительными изменениями в самой поверхностной зоне), также не показывают изменений плотностей с глубиной залегания и стратиграфическим положением породы. Наконец, распределяя разрезы по двум скважинам Сталинского района по возрасту, мы получаем нормальный стратиграфический разрез и соответственно ему распределение плотности; видно, что вдоль колонки в 2200 м мощности, сложенной из песчано-глинистых отложений с пропластками известняка и представленной свитами $C_2^3, C_2^4, C_2^5, C_2^6$ и C_3^1 , средняя плотность с глубиной остается постоянной и составляет 2,63.

Другим типичным примером с рассматриваемой точки зрения представляется кривая плотностей вдоль Каныгинской скважины № 2,

расположенной на противоположной окраине Донбасса (на вос-

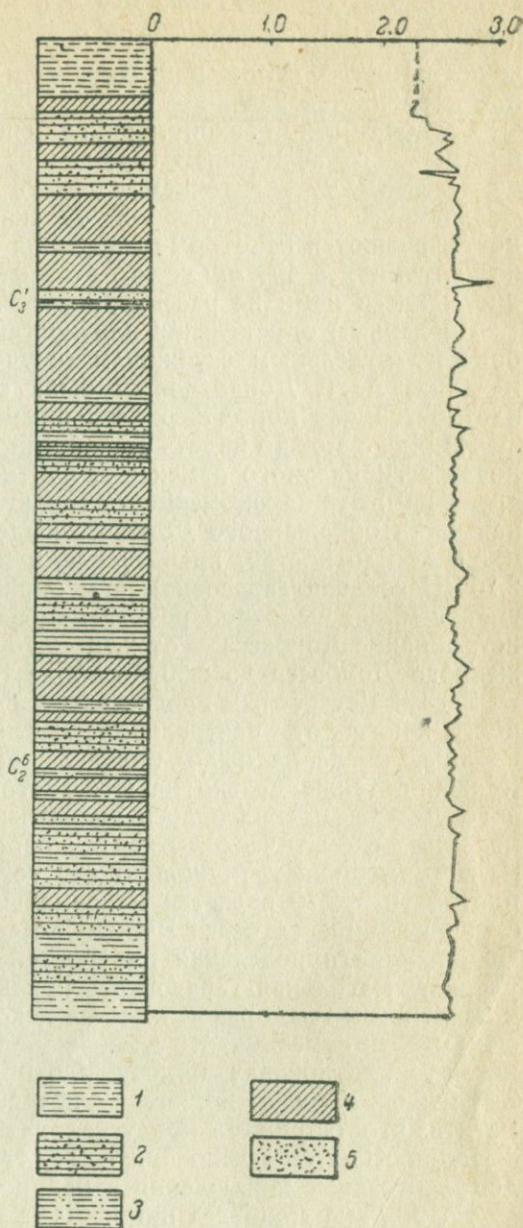


Рис. 152. Кривая плотности по Каныгинской скважине № 2 (Донбасс).

1 — глины; 2 — песчаники; 3 — песчанистый сланец; 4 — сланец; 5 — пески.

точной), имеющей глубину 690 м и пересекающей две свиты — C_2^6 и C_3^1 (рис. 152). Начиная с 90 м, т. е. вдоль 600 м колонки песчано-глинистых отложений, средняя плотность остается постоянной и равняется 2,69.

Следовательно, закономерного систематического увеличения плотности с увеличением глубины залегания породы в настоящее время и с увеличением возраста породы — не наблюдается. Единственным исключением из 77 скважин, изученных на плотность, являются некоторые скважины в Лисичанске с максимальной глубиной в 400 м. Однако этот факт имеет локальное значение и здесь нами не рассматривается.

По данным определения плотностей среднего и верхнего карбона по отдельным скважинам (с учетом сделанного выше замечания) А. Т. Донабедовым была составлена карта средних плотностей для пород верхнего палеозоя (рис. 3).

Из рис. 3 можно видеть совершенно определенную закономерность регионального изменения плотности в горизонтальном направлении. Эта закономерность заключается в том, что центральная часть обнаженного Донбасса выделяется как область максимальных плотностей, превышающих 2,70 и достигающих 2,73—2,76 (Нагольная-Тарасовка), а к окраинам Донбасса плотность уменьшается. Особенно резкое изменение происходит на северной окраине Донбасса — от 2,73—2,76 в центральной части обнаженного Донбасса до 2,30 в районе Ворошиловграда.

Весьма интересным представляется вопрос об изменении плотности к югу от центральной части обнаженного Донбасса. Раньше, когда не было определений в пределах Нагольного Кряжа, а также далеко на юго-востоке и востоке от обнаженного Донбасса, создавалось впечатление (и это нашло отражение на схематической карте изоплотностей, составленной Н. Н. Самсоновым несколько лет тому назад¹), что изолиния плотности в 2,70 является максимальной и проходит по южной окраине Донбасса через Шахтную-Каныгино и далее на восток. Позднейшие определения плотностей в Нагольном Кряже (Есауловка, Нагольная-Тарасовка) показали, что в направлении к Шахтной и Раздорской имеется некоторое уменьшение плотности; чтобы отметить это уменьшение А. Т. Донабедов, в виде исключения, показал полосу плотностей, заключенную между 2,65 и 2,60, вопреки принятому интервалу через 0,10. Нужно заметить, что окончательное установление уменьшения плотности к юго-востоку еще дело будущего, так как надлежит выполнить дополнительные наблюдения в районе Шахтной.

На востоке Донбасса происходит уменьшение плотности; это установлено с несомненностью по данным определений в Топилино, Мартыновке, Баклановской и Семичной.

Характер изменения плотностей на западе и северо-западе Донбасса чрезвычайно сложный и не может считаться оконча-

¹ Карта эта приведена в работе Е. О. Погрёбницкого, Контур проблемы Б. Донбасса.

тельно установленным. В направлении к Алмазной, Никитовке и к Сталино-Макеевке наблюдается падение плотностей, достигающих в этих районах 2,60. Таким образом градиент изменения плотностей аналогичен в общем наблюдаемому на востоке и на севере в полосе шириной 40 км. Зоны равных плотностей, имеющие в центральной части Донбасса и на севере вытянутый, почти широтный характер, на западе и северо-западе пересекают простирание складчатой структуры Донбасса и протягиваются далеко на запад в область погребенного карбона.

Можно с большой долей вероятности предположить, что на запад происходит дальнейшее уменьшение плотности, величина которой приближается к наблюдаемой на северной окраине. Ниже будет показано, что такое предположение весьма доказательно подкрепляется характером изменения упругих свойств этих же пород — скоростью распространения продольных упругих волн.

Таковы главнейшие особенности изменения средней плотности пород верхнего палеозоя на территории Б. Донбасса.

У читателя может возникнуть сомнение, заключающееся в том, что не является ли описанное выше закономерное изменение средней плотности кажущимся вследствие того, что взяты именно средние плотности вдоль всего разреза по скважине, а не средние плотности по отдельным литологическим разностям пород (песчаники, сланцы, известняки). Сомнение законное, но не оправдывающееся в действительности, как показывает детальный анализ этого вопроса.

Итак, в чем же состоит основной вывод из анализа изменения плотностей пород на территории Б. Донбасса? Вывод этот заключается в том, что устанавливается региональное, закономерное изменение плотности средне- и верхнекаменноугольных отложений со следующими характерными особенностями.

1. Центральная часть обнаженного Донбасса является областью, где породы карбона имеют максимальную плотность, достигающую 2,76, т. е. почти на 0,10 больше величины плотности наиболее основных кристаллических пород из палеозойских интрузий юго-запада Донбасса.

2. Во всех направлениях от центра Донбасса (концентрически) плотности пород карбона уменьшаются. По абсолютной величине и градиенту наименьшее падение происходит на востоке и юго-востоке, а наибольшее — на севере и северо-западе. Промежуточное положение, но близкое к последнему, занимают западная и юго-западная окраины.

3. Не установлено закономерного увеличения плотности с глубиной в пределах максимальной изученной толщи разреза в 1100 м. Также не установлено изменения плотности в зависимости от возраста свит.

4. Среди вмещающих пород наибольшему региональному изменению подвержены сланцы, а наименьшему — известняки. Промежуточное положение занимают песчаники. Характер же регионального изменения для всех пород одинаковый.

5. В общем случае наибольшей плотностью характеризуются известняки, наименьшей сланцы; промежуточное положение занимают песчаники. Эти различия постепенно стираются по мере движения от периферии Донбасса к центру, т. е. к области с максимальной средней плотностью пород.

6. Плотность пород каменноугольного возраста в любой точке Донбасса определяется, главным образом, их географическим положением в регионе.

Упругие свойства

Из аналитического выражения скорости распространения продольных упругих волн с очевидностью следует, что изменение скорости в основном зависит от модуля Юнга, т. е. от одного из существенных параметров упругой среды. Исходя из этого, а также имея в виду проведенные на территории Б. Донбасса сейсморазведочные работы регионального характера, эти данные были использованы, аналогично каротажным, для выяснения региональных изменений упругих свойств.

Как известно, на годографе мы получаем так называемые кажущиеся скорости, по которым с большим приближением к действительности можно вычислить так называемую истинную скорость для некоторого объема горных пород. Эта скорость и будет являться в дальнейшем характеристикой упругих свойств горных пород.

Но чтобы перейти к анализу карты зон равных средних истинных скоростей аналогично тому, как это было сделано для плотности, вначале необходимо выяснить: изменяется ли скорость с глубиной в толще пород среднего и верхнего карбона и зависит ли это изменение от тех или других свит карбона.

Аналогично плотности рассмотрим изменение скорости V в нескольких пунктах.

В районе хут. Благовещенска имеется сейсмический профиль длиной в 7,5 км. Эта длина профиля с избытком достаточна, чтобы проникнуть на глубину, значительно превышающую 600 м.

До этой глубины скважина пересекла четыре свиты: $C_2^{4(3)}$, C_2^5 , C_2^6 , C_3^1 . Несмотря на это, средняя истинная скорость по ближайшему профилю и большому количеству соседних профилей составляет 3100 м/сек. Нет сомнения в том, что эта скорость сохраняется и глубже, так как на это указывает большая длина профиля. Таким образом, в этом случае не выявляется изменения скорости с глубиной и со сменой различных свит карбона.

Другой крайний случай представляет годограф, полученный на 13-километровом профиле в районе Грабово на выходах C^1 (рис. 153). Из разреза, представленного на этом рисунке, видно, что непосредственно за поверхностным слоем в несколько десятков метров с истинной скоростью 1500—3300 м/сек следует слой 100—125 м карбона с $V = 4600$ м/сек, а еще ниже следует горизонт с $V = 5200$ м/сек, причем ветви прямого и обратного годо-

графа не дают излома на расстоянии 13 км¹. Глубину проникновения профиля такой длины можно оценить минимум в 2 км. Следовательно, исходя из геологических представлений, с несомненностью можно утверждать, что в этом случае были также пересечены различные свиты карбона (от С₂¹ до С₁¹ или даже до кристаллического ложа) и никакой дифференциации в средних истинных скоростях не наблюдается.

Среда настолько однородна в отношении упругих свойств, что даже горизонт известняков нижнего карбона, обладающий $V = 5000 - 5500$ м/сек, не фиксируется на годографе. Следова-

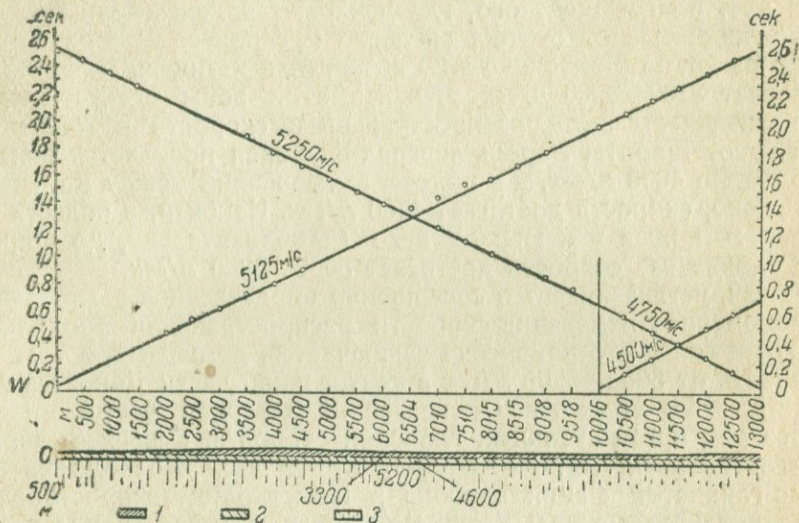


Рис. 153. Сейсмопрофиль в районе Грабово (Донбасс).

1 — наносы; 2 — карбон в поверхностной зоне; 3 — карбон.

тельно, и в этом случае мы не наблюдаем увеличения скорости продольных упругих волн с глубиной залегания, а также, вероятно, и с возрастом пород.

Эти примеры можно было бы продолжить не только для той узкой полосы Б. Донбасса, которая показана на рис. 15, но также и для восточного сектора Б. Донбасса (сейсмический маршрут Сальск — Сталинград) и для западного сектора (Днепропетровск — Красноград).

С учетом сделанных выше замечаний А. Т. Донабедовым была составлена карта зон равных средних истинных скоростей продольных упругих волн для средне- и верхнекаменноугольных отложений Донбасса. На рис. 15 представлена лишь часть этой карты.

На этом же рисунке показано расположение сейсморазведочных профилей, выполненных в 1931—1936 гг., по данным кото-

¹ К сожалению профиль не мог быть продлен из-за близости населенных пунктов (сс. Грабово и Новопавловска).

рых построена карта, причем зоны (полосы) равных скоростей проведены с интервалом в 500 м/сек. Этот интервал значительно превышает ошибку, которую можно допустить при расчете истинной скорости по годографу. Рассмотрение этой карты показывает определенную закономерность в изменении средних истинных скоростей продольных упругих волн.

Закономерность эта заключается в том, что начиная от широты ст. Журавка и до широты с. Баранниковка скорость в известняковых породах равна 5000 м/сек, что соответствует известняковой фации нижнего карбона. С широты несколько северней хут. Благовещенского, где начинаются известковистые песчано-глинистые отложения среднего и верхнего карбона, и далеко на юг на расстояние в 30 км средняя истинная скорость составляет 3100—3200 м/сек. Южнее этой зоны следует другая с преимущественным распространением скорости в 3500 м/сек. К югу от широты Ворошиловград-Глубокая появляется зона со скоростью 4000 м/сек, а в полосе, заключенной между Каменской и Гуково, скорость достигает 4500 м/сек. Наконец, в области Нагольного кряжа и к югу от него (приблизительно, до широты с. Голодаевка) скорость достигает 5000—5200 м/сек.

Итак, устанавливается совершенно определенное региональное закономерное изменение скорости распространения продольных упругих волн. Это изменение заключается, во-первых, в том, что скорость от 5000—5200 м/сек в центральной части Донбасса убывает до 3100 м/сек в его погребенной северной части, проходя через ряд промежуточных значений скорости. Севернее широты Благовещенской (ст. Миллерово), вследствие перехода из песчано-глинистой фации карбона в известковую, скорость вновь увеличивается до 5000 м/сек. Во-вторых, средняя скорость продольных упругих волн не зависит от литологического состава свит, за исключением известняков нижнего карбона, которые в областях с малой скоростью волн в песчано-глинистых отложениях (северная окраина) выделяются в самостоятельный горизонт. В районе Нагольного кряжа это расчленение невозможно. В-третьих, не установлено систематического изменения средней скорости с глубиной в пределах песчано-глинистой толщи карбона. Однако для окончательного решения этого вопроса необходимы исследования в глубоких скважинах с специальным (скважинным) сейсмографом.

Необходимо заметить, что судя по большому количеству сейсмических работ на востоке Б. Донбасса вдоль железнодорожной линии Сальск — Сталинград, скорость распространения упругих волн также убывает с юго-запада на северо-восток; это хорошо согласуется с приведенной картой. Как и в случае плотности, изменение скорости при переходе от центральной части обнаженного Донбасса к востоку едва достигает 500—700 м/сек в сторону уменьшения. Другое мы наблюдаем в западном секторе. По маршруту Днепропетровск — Краснодар, а также в районах ст. Лозовая, Варваровка и др. сейсморазведочные данные, проверенные бурением, указывают на скорость упругих волн в кар-

боне, достигающую всего лишь 3100—3500 м/сек. Создается такое впечатление, что зона пониженных скоростей северной окраины продолжается на запад и таким образом опоясывает весь северный, может быть северо-западный и западный секторы Б. Донбасса. Это совпадает с характером изменения плотности.

Электрическое сопротивление пород среднего и верхнего карбона

В результате обработки 240 кароттажных диаграмм были получены средние удельные электрические сопротивления для глинистых сланцев, песчаных сланцев и песчаников свит C_2^2 — C_3^1 .

На основании полученных средних значений удельных электрических сопротивлений А. Т. Донабедовым были составлены карты изоом для глинистых сланцев, песчаных сланцев и песчаников. Интервал, через который проводились изоомы, выбирался различный в зависимости от абсолютных значений электрических сопротивлений для литологически различных пород.

Рассмотрим эти карты изоом. Карта для глинистых сланцев совершенно отчетливо показывает закономерное изменение среднего удельного электрического сопротивления глинистых сланцев для территории Донбасса. Закономерность эта состоит в том, что сопротивление убывает от центральной части Донбасса на север, северо-запад и запад.

Выявленные изменения настолько значительны и систематичны, что не оставляют сомнения в их существовании. В самом деле, в центральной части бассейна (Гуково, Должанская, Ровеньки, Боково, Чистяково) максимальное среднее кажущееся удельное сопротивление составляет 150 Ω м, тогда как в районах Гундоровском и Лисичанском сопротивление достигает лишь 30 Ω м. К западу от Чистяково наблюдается резкое изменение — на небольшом пространстве сопротивление изменяется от 120 до 30 Ω м; последняя изоома уходит далеко на северо-запад в Гришинский район. На пространстве между Чистяково, Боково и Никитовкой изоомы проведены проблематично, в результате интерполяции.

Основные особенности карты изоом для песчаных сланцев аналогичны описанным выше с той лишь разницей, что по абсолютной величине сопротивление возрастает до 300 Ω м в центральной части Донбасса, а на севере и западе достигает 50 Ω м.

Изоомы для песчаников даются на рис. 12 в главе I. На этой карте также совершенно отчетливо выявляются закономерные изменения электрического сопротивления, аналогичные рассмотренным выше. Различие состоит лишь в том, что абсолютное значение сопротивления в центральной части теперь уже достигает 500 Ω м с уменьшением на север, северо-запад и запад до 100 Ω м. На этой карте особенно отчетливо выражен большой градиент изменения на северной, северо-западной и западной окраинах Донбасса по сравнению с центральной частью.

Итак, описанные карты изоом с несомненностью устанавливают наличие в Донецком бассейне региональных закономерных изменений электрического сопротивления пород независимо от их литологического характера: закономерность остается по типу одинаковой для песчаников и сланцев, меняются лишь абсолютные значения сопротивлений, которые, как и следовало ожидать, наибольшие у песчаников, наименьшие у глинистых сланцев. Песчанистые сланцы занимают среднее положение.

Естественно возникает вопрос: не связаны ли описанные выше изменения электрических сопротивлений, главным образом, с какими-нибудь факторами технического порядка и не обусловлены ли они принятой методикой обработки, будучи в меньшей степени обусловлены изменяемостью электрического сопротивления горных пород в региональном масштабе?

Анализ этого вопроса показывает, что перечисленные факторы не могут обусловить выявленные закономерности.

Таким образом мы можем сделать следующие выводы.

1. На территории Донецкого бассейна установлено закономерное изменение электрического сопротивления пород среднего и верхнего карбона, заключающееся в том, что от центра обнаженного Донбасса сопротивление убывает концентрически к северной, северо-западной и западной окраинам.

2. Тип изменения один и тот же для песчаников, песчаных сланцев и глинистых сланцев, так как для них характерно убывание сопротивления на север, запад и северо-запад в среднем в пять раз.

3. Наибольшим сопротивлением, как и следовало ожидать, обладают песчаники (до $500 \Omega \cdot м$), наименьшим — глинистые сланцы ($50 \Omega \cdot м$); промежуточное положение занимают песчанистые сланцы.

4. Электрическое сопротивление пород не зависит от принадлежности их к той или иной свите карбона, но исключительно от расположения их на территории региона. Изменение сопротивления с глубиной не установлено.

5. Решающим фактором в характеристике выявленной закономерности является сопротивление пород; факторы, связанные с условиями карротирования и методики обработки, играют совершенно второстепенную роль.

Физические свойства углей

Плотность угля в общем случае зависит по меньшей мере от пяти факторов, как это подробно показано в работе проф. Ю. А. Жемчужникова¹.

Для конкретных условий Донбасса зависимость плотности от отдельных инградиентов полосчатых углей и от природы органической массы угля, можно полагать, весьма ничтожна, так как

¹ Ю. А. Жемчужников, Общая геология каустобиолитов, 1936, стр. 122—123.

угли Донбасса преимущественно клареновые и принадлежат к гумусовым углям. Что касается изменения плотности угля от его зольности и влажности, то влияние этих последних факторов в пределах всего бассейна не может быть закономерным.

Поэтому естественно было ожидать возможности выявления в условиях Донбасса зависимости изменения плотности угля от содержания в нем летучих, т. е. от «зрелости» или степени углефикации. Все определения с этой точки зрения распределяются следующим образом (табл. 18).

Таблица 18

Количество образцов	Марка углей	Средняя плотность
16	А	1,53
3	Т	1,31
6	ПС	1,28
10	К	1,25
15	ПЖ	1,25
3	Г	1,28
2	Д	1,16

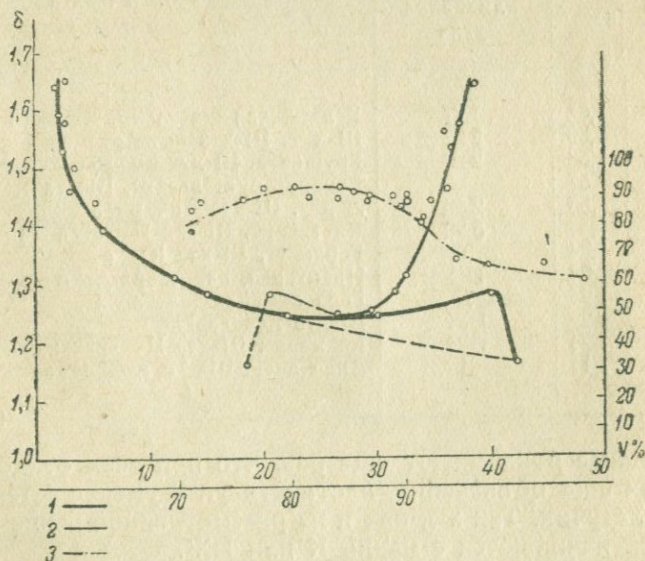


Рис. 154. Диаграмма соотношения между плотностью углей Донбасса и содержанием в них летучих и углерода (по А. Т. Донабедову).

1 — кривая зависимости плотности углей от содержания летучих; 2 — кривая зависимости плотности от содержания углерода; 3 — кривая зависимости хрупкости углей от содержания летучих, по Быкову.

Из рассмотрения табл. 18 следует, что от антрацитов к углям марки ПС происходит довольно быстрое уменьшение плотности;

затем это уменьшение становится весьма незначительным и лишь к длиннопламенным углям вновь становится достаточно резким.

Если данные этой таблицы представить в виде кривой, откладывая на оси ординат плотность, а на оси абсцисс содержание летучих в процентах, то получим кривую, показанную на рис. 154 (слева).

Аналогичная кривая получается, если построить графически зависимость плотности угля от содержания в нем углерода. Могло показаться, что полученные кривые, как построенные по средним значениям плотностей, а частью и летучих, дают случайную картину. Для того, чтобы не оставалось сомнения, мы приводим таблицу изменения плотности в зависимости от летучих для углей свиты C_2^5 (пласты $K_2 - K_8$) (табл. 19). Рассматриваемые угли в вертикальном разрезе отстоят друг от друга на небольшом расстоянии; поэтому, сопоставляя их плотности, без большой погрешности можно считать, что взят один и тот же угольный пласт в различных частях бассейна.

Таблица 19

№ п. п.	Угольный пласт	Плотность	Содержание летучих в % или марка угля	Район и шахта
1	K_5	1,64	1,77	Делжанская шахта им. Войкова
2	K_5	1,59	2,27	Шахты. Шахта им. Артема
3	K_5	1,58	2,68	Грушеви а. Шахта им. Воровского
4	K_5	1,57	—	Боксво-Хрустальская. Шахта 1. Боксовая
5	K_5	1,53	2,66	Лихая. Шахта чичерина
6	K_5	1,44	5,29	Чистяково. Шахта Первомайка
7	K_4	1,34	Т	Горловка. Шахта Юнгом
8	K_7^1	1,28	ПС	Никитовка, пл. Андреевский
9	K_2	1,26	К	Горловка, пл. Золотарка
10	K_7^4	1,29	ПЖ	Шахта Кочегарга
11	K_3	1,24	ПЖ	Кадиевка. Шахта Центральная Ирмино
12	K_8	1,14	Д	Лисичанск. Шахта Кременная

Эти данные показывают еще раз, что при всех отклонениях, требующих еще объяснения, плотность угля уменьшается с увеличением летучих. Так же, как и на рассмотренной выше кривой, отклонения начинаются с марки К или ПЖ.

Вместе с тем данные табл. 19 показывают, что, как общее правило, районам с высокой плотностью вмещающих пород (рис. 3) соответствуют угли также высокой плотности, т. е. угли с низким содержанием летучих.

Чтобы подойти к выяснению некоторых количественных соотношений между плотностью вмещающих пород и содержанием летучих в углях, в них заключенных, мы приводим диаграмму соотношений между средней плотностью вмещающих пород

и содержанием летучих в углях (рис. 155). Из этой диаграммы совершенно определено следует, что в условиях Донбасса угли марок Г и Д преимущественно встречаются в тех областях, где средняя плотность вмещающих каменноугольных пород колеблется от 2,3 до 2,4—2,45. С другой стороны, угли марок Т и А встречаются преимущественно в областях со средней плотностью вмещающих каменноугольных пород от 2,6 до 2,75. Таковы крайние пределы рассматриваемых соотношений. Что же касается промежуточных марок угля, то установить более или менее резких границ еще не удалось. Несомненно, что в действительности резкого перехода, аналогичного тому, который показан на представленной диаграмме, нет, и при дальнейших исследованиях можно будет эту диаграмму значительно уточнить. В настоящий момент можно лишь заметить, что угли марок ПЖ, К и ПС могут быть встречены в таких вмещающих породах карбона, плотность которых изменяется в относительно значительных пределах, а именно от 2,45 до 2,6—2,65.

Упругие свойства углей. Определение упругих свойств углей — дело чрезвычайно сложное прежде всего потому, что при современной методике определения этих свойств приходится иметь дело с призмами, которые чрезвычайно трудно выточить из угля так, чтобы они удовлетворяли всем необходимым условиям.

В лаборатории ЦНИГРИ в 1934 г. изучалось изменение упругих свойств кузбасских углей в зависимости от содержания в них летучих и была как будто установлена зависимость между E и $V^0\%$, аналогичная зависимости δ и $V^0\%$. Однако эти наблюдения нуждаются в проверке.

Не имея данных об упругих свойствах углей, можно тем не менее путем сравнения карты зон равных плотностей и карты зон равных скоростей пород Донбасса, с одной стороны, и использования диаграммы зависимости между содержанием летучих в углях и средней плотностью вмещающих пород, с другой, установить, что угли с наибольшим содержанием летучих вероятнее встретятся в условиях пониженной скорости распространения продольных упругих волн (3100—3500 м/сек), а угли с меньшим содержанием летучих (т. е. за исключением марок Д и Г) — в областях с повышенной скоростью распространения продольных упругих волн во вмещающих породах (4000—5000 м/сек).

В качестве примера достаточно указать, что в Благовещенской скважине, в районе которой $V = 3100$ м/сек, был встречен

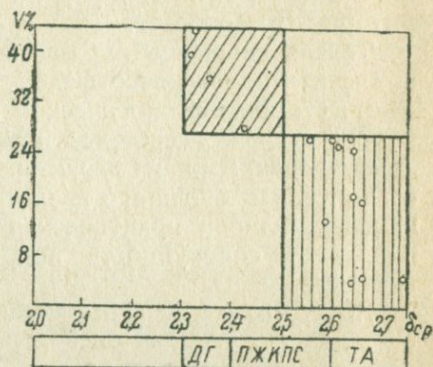


Рис. 155. Диаграмма соотношений между средней плотностью вмещающих пород и содержанием летучих в углях (Донбасс) (по А. Т. Донабедову).

уголь с содержанием летучих в 44%, а в Ворошиловграде, где $V = 3500$ м/сек, уголь по своему химическому составу относится к переходным от длиннопламенных углей (марка Д) к газовым (марка Г).

Первоначальные выводы об основных факторах, которые обусловили закономерные изменения физических свойств в Донбассе

Выше были изложены главнейшие закономерности современного распределения пород по их физическим свойствам на территории Б. Донбасса.

Теперь своевременно поставить ряд вопросов, а именно: как объяснить изложенные факты, какова взаимосвязь этих фактов, какие стороны геологической истории Донбасса они отражают, какова степень всеобщности этих явлений — не являются ли они локализованными и характерными лишь для такого, хотя и сравнительно большого геологического региона, как Донбасс, и, наконец, какова практическая значимость изучения этих явлений — вот совокупность вопросов, которые возникают перед исследователем.

Ясно, что от исчерпывающего ответа на все эти вопросы мы еще далеки, так как рассматриваемая проблема, насколько нам известно, почти не разрабатывалась. Тем не менее, нужно пытаться дать хотя бы самые первоначальные ответы на сформулированные выше вопросы.

Сравнивая карту зон равных плотностей, карту зон равных скоростей распространения продольных упругих волн и, наконец, карты изоом, нельзя не заметить полной тождественности закономерностей изменения этих свойств.

В самом деле, область с повышенной плотностью каменно-угольных отложений совпадает с областью повышенной средней скорости распространения продольных упругих волн в тех же отложениях, а так же с областью относительно высокого электрического сопротивления пород.

Можно предположить, что эти изменения связаны с изменением минералогического состава пород в одном и том же направлении. Однако, хотя вопрос о закономерных изменениях состава пород Донбасса еще не изучался всесторонне, тем не менее, сравнивая петрографо-литологические данные, например для песчаников северной окраины Донбасса, с такими же данными для этих пород обнаженного Донбасса, подробно изученными донецкими литологами, мы приходим к выводу, что эти породы, столь далеко территориально отстоящие друг от друга, не отличаются ничем существенным, чтобы можно было объяснить наблюдаемые закономерности изменения физических свойств пород изменением их минералогического состава. Действительно, если рассматривать, например, упругие свойства, то надо заметить, что этот параметр для геологического тела вообще лишь в некоторой степени зависит от упругих свойств составляющих породу минералов. Проф. Райх указывает, что «упругие свойства

осадочных пород еще больше отличаются от упругих свойств отдельных минералов, чем это имеет место в изверженных породах. Поэтому, — пишет он, — модуль упругости E для геологических тел составляет примерно 0,41 от модуля упругости минералов, из которых сложена порода». Таким образом в отношении скорости упругих волн можно совершенно определенно утверждать, что ее региональное изменение не может объясняться изменениями минералогического состава пород. Еще в большей степени это относится к электропроводности пород, так как электрическое сопротивление зависит в основном от двух факторов: влагоемкости и удельного сопротивления воды, заполняющей поры пород.

Если закономерные изменения не зависят в данном конкретном случае от минералогического состава породы, то тогда вероятно, что изменение физических свойств происходит в зависимости от изменения общей структуры породы и, прежде всего, от того, насколько пориста порода. Хотя и нет еще достаточных данных о региональных изменениях пористости пород в Донбассе, но даже те немногие, которые имеются по двум районам (Никитовскому и Каменскому), показывают, что пористость в Никитовке в 3 раза меньше пористости в Каменской, в которой плотность составляет 2,5. Принимая во внимание, что плотность карбона в Никитовке равна 2,60, а пористость около 4,5%, нужно допустить, что в центральной части Донбасса, где плотность равна 2,73—2,76, пористость меньше, чем в Никитовке.

Действительно, что касается различия в плотности пород центральной части Донбасса и его периферии, то весьма вероятно, что оно почти полностью определяется пористостью. Чтобы иллюстрировать, насколько пористы и мало связаны частицы пород карбона северной окраины Донбасса по сравнению с типичными донецкими породами, достаточно напомнить опыт, который производил П. В. Кумпан: он брал образец песчаника или глинистого сланца, имеющего типичный донецкий габитус, и песчаник или глинистый сланец, например, из Каменского района, и помещал их в воду. Порода, взятая на северной окраине Донбасса, в течение нескольких минут превращалась в муť, тогда как порода из центрального Донбасса в течение нескольких часов и даже суток не распадалась, настолько породы из центрального Донбасса оказывались спрессованными, уплотненными.

Повышенной пористостью пород объясняется также уменьшение электрического сопротивления на северной окраине Донбасса, поскольку породы с пониженной плотностью и повышенной пористостью заключают в порах значительное количество воды несколько повышенной минерализации, о чем можно судить по карте жесткости шахтных вод, составленной Д. И. Щеголевым.

Весьма вероятно, что и скорость распространения продольных упругих волн также зависит в итоге от пористости, так как, с одной стороны, на это указывает уменьшение модуля Юнга и, соответственно, скорости с увеличением плотности, а с другой,

как это отметил еще Reich, «насыщенность пород влагой заметно понижает модуль упругости».

Итак, есть все основания утверждать, что региональные изменения плотности, скорости распространения продольных упругих волн и электропроводности каменноугольных пород зависят главным образом от регионального изменения пористости. Что такие явления регионального изменения пористости вообще имеют место, можно заключить по недавно опубликованной работе Brannera, который для палеозойской области Арканзаса установил закономерное уменьшение средней пористости с севера на юг.

Такова вероятная непосредственная причина закономерностей изменения физических свойств пород Донбасса. Однако нужно поставить другой вопрос: от каких более общих геологических закономерностей зависит это изменение пористости, а следовательно, и изменение других свойств? Для решения этого вопроса обратимся к сопоставлению описанных выше закономерностей с другими закономерностями, характерными для Донбасса.

Сравнение пространственного изменения углей по содержанию летучих с изменениями физических свойств вмещающих пород. Выше мы показали, что плотность углей Донбасса в общем увеличивается с уменьшением в них содержания летучих. Кроме того было установлено, что для областей с пониженными плотностью и скоростью распространения продольных упругих волн вмещающих пород характерно распространение углей с высоким содержанием летучих и, наоборот, для областей распространения углей с низким содержанием летучих характерны высокая плотность и скорость продольных волн вмещающих пород.

Поэтому можно сравнить карты изменений физических свойств вмещающих пород с картой линий одинакового содержания летучих в углях, составленной Е. О. Погребицким (рис. 156). Сравнение не оставляет сомнения в том, что площадь, занятая в настоящее время углями с пониженным содержанием летучих, соответствует, в общем, областям, где вмещающие породы обладают пониженной плотностью, пониженной скоростью распространения продольных упругих волн и большей проводимостью электрического тока. Наоборот, площадь, занятая углями с низким содержанием летучих и прежде всего антрацитами, характеризуется как область с повышенными значениями физических свойств вмещающих пород. Трудно себе представить, чтобы закономерности, столь хорошо совпадающие, являлись случайно совпадающими. Естественно предположить обратное, а именно, что закономерности изменения физических свойств вмещающих пород и закономерности изменения физических и химических свойств углей представляют различное выражение единого геологического процесса.

Такова первая линия связи закономерностей изменения физических свойств с другими закономерностями.

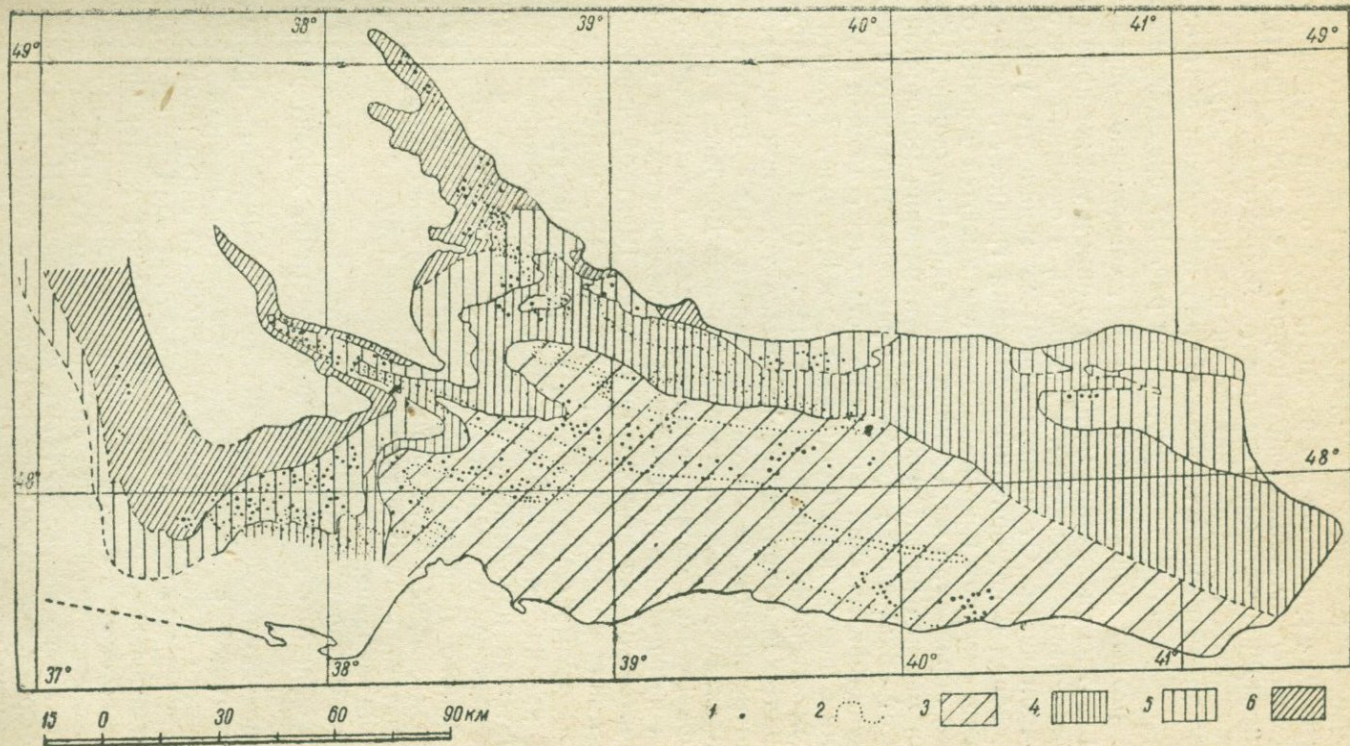


Рис. 156. Схема распределения углей по содержанию летучих в Донбассе.

1 — шахты; 2 — граница не продуктивного карбона; 3 — антрацит; 4 — полуантрациты и тощие угли; 5 — спекающиеся угли; 6 — газовые и длиннопламенные угли (по Е. О. Погребницкому).

Сравнение закономерностей изменения мощности каменноугольных отложений с закономерностями изменения физических свойств. Для сравнения мы рассмотрим, с одной стороны, карты изменения физических свойств пород, а с другой, карты линий равных мощностей, составленные А. Широковым.

Результаты изучения изменения мощностей, выраженные на картах линий равных мощностей для нескольких свит карбона (C_2^3 , C_2^4 , C_2^5 , C_2^6 , C_3^1), из которых на рис. 157 представлена карта линий равных мощностей свиты C_2^5 , совершенно определенно указывают на увеличение мощности одних и тех же пород в центральной части обнаженного Донбасса, а особенно в его юго-восточной части. От центра Донбасса мощности убывают на север, запад и юг, причем наибольший градиент падения имеет место на северной и южной (там, где имеются данные о мощностях) окраинах, а наименьший — на западной окраине. К сожалению, мы еще не знаем характера изменения мощностей к востоку от обнаженного Донбасса. Сравнение этих карт с картами изменения физических свойств не оставляет сомнения в том, что областям наибольших мощностей соответствуют области повышенных значений физических свойств (плотность, упругость, электрическое сопротивление). Больше того, при внимательном рассмотрении этих карт нельзя не заметить их соответствия даже в деталях. В самом деле, северная окраина Донбасса в отношении всех физических свойств является областью максимального градиента изменения их; аналогичное наблюдается и в отношении мощностей. Кроме этого, к югу от ст. Шахтной, например, на карте линий равных мощностей свиты C_2^5 , намечается новое уменьшение мощностей; в этом же районе на карте плотностей также намечается незначительное падение плотности.

Учитывая изложенное, можно пойти дальше и высказать весьма вероятную мысль о том, что так как далеко на восток от обнаженного Донбасса выявлено падение плотности каменноугольных отложений, то мощность этих отложений должна здесь уменьшаться, причем градиент изменения будет меньше, чем на западной окраине.

Такова вторая линия связи закономерностей изменения физических свойств с иными закономерностями, характерными для Донбасса.

Сопоставление закономерностей изменения физических свойств пород с морфологией складчатой области Донбасса. Естественно возникает мысль о возможной связи изменения физических свойств пород с тектоническими элементами Донбасса.

Для выяснения этого вопроса сравним карты физических свойств со схематической картой главнейших тектонических элементов бассейна, приложенной к изданиям XVII Международного геологического конгресса (21) и составленной П. И. Степановым и др. Сравнение этих карт не оставляет сомнения в том, что область так называемой «интенсивной мелкой складчатости» на северной окраине Донбасса с сравнительно большими углами

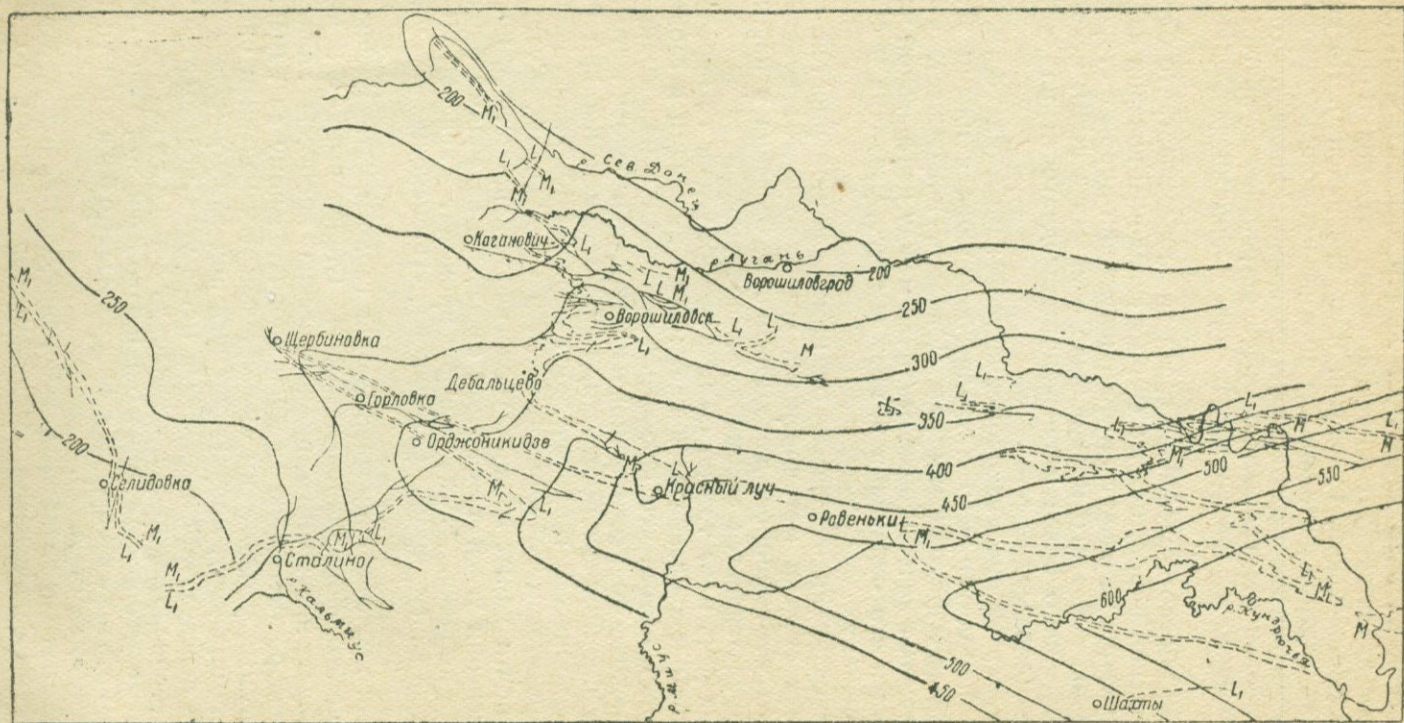


Рис. 157. Карта линий равных мощностей для свиты S_2 (по А. Широкову).

падения пород является областью пониженных значений физических свойств, в то время как область относительно пологих залеганий характеризуется повышенными значениями физических свойств (Должанский, Гуковский и другие районы). Но восточная часть главной антиклинали Донбасса и сопряженные с ней синклинали все же характеризуются значительным уплотнением пород, большой скоростью распространения упругих волн в них, а также малой проводимостью породами электрического тока.

Таким образом, сделанное сравнение показывает, что большие углы падения пород, острые формы складок и явления надвиговой структуры не влекут за собой изменений пород в сторону их уплотнения, как этого можно было ожидать а priori, исходя из представления о более интенсивной складчатости на северной окраине Донбасса.

Итак, сравнение закономерностей изменения физических свойств пород верхнего и среднего карбона с иными закономерностями, характерными для Донбасса, показывает, что все они выражают качественные различия между центральной частью Донбасса и его окраинами и, прежде всего, различия в степени метаморфизма.

Если на время отвлечься от иных закономерностей кроме изменения степени метаморфизма углей, то нужно констатировать, что этот вопрос для Донецкого бассейна в настоящее время представляется весьма дискуссионным.

Когда речь идет только об изменениях углей, то первое значительное расхождение возникает между химиками и геологами по вопросу о том, что являлось решающим в изменении угля: состав исходного растительного материала и условия его изменения в биохимической стадии, или же изменения при последующих процессах геологического порядка. Крайняя точка зрения, выразителем которой является в СССР проф. Стадников, сводит почти на-нет влияние геологических процессов, полагая, что изменения углей в основном связаны с явлениями биохимического порядка. Эта мысль проходит красной нитью через всю книгу проф. Стадникова «Происхождение угля и нефти».

Другого мнения придерживаются геологи. Это мнение особенно четко формулировано П. И. Степановым. Он пишет: «существует мнение, что биохимические процессы лишь подготавливают растительную массу к окончательному ее изменению в ископаемый уголь. Этим окончательным изменением она обязана метаморфизму, проявляющемуся под влиянием давления и теплоты, в результате чего легкая масса угля переходит в твердое состояние. При таком взгляде угли являются метаморфической осадочной породой, отвечающей метаморфизованным осадочным образованиям» (подчеркнуто нами. А. Д.).

Но если уголь является метаморфической породой, отвечающей метаморфизованным осадочным образованиям, то совер-

шенно естественно рассматривать изменения физических и химических свойств углей в связи, точнее, на фоне тех всеобщих изменений горных пород, которым (изменениям) подвергались осадочные породы Донбасса в целом, т. е., следовательно, в совокупности с физическими свойствами вмещающих пород.

При таком подходе к решению весь вопрос заключается в том, чтобы определить — какие процессы происходят при метаморфизме, как всеобщей форме изменения пород, и каковы основные факторы метаморфизма.

В литературе различают влияние следующих четырех факторов:

- 1) времени или, другими словами, возраста пород;
- 2) интенсивности тектонических процессов или так называемого дислокационного (динамо) метаморфизма;
- 3) влияния нагрузки вышележащих пластов на нижележащие, а также температуры внутренних частей земли, т. е. статического или регионального метаморфизма;
- 4) влияния изверженных пород, т. е. контактового метаморфизма.

Попытаемся выяснить, какие из перечисленных выше факторов метаморфизма углей и вмещающих пород могли обусловить выявленные закономерные изменения физических свойств пород Донбасса.

Влияние времени или возраста пород на их физические свойства. Для ответа на этот вопрос мы рассмотрим лишь два свойства, а именно плотность и упругость.

Плотность песчаников, начиная от девона и до мела включительно, характеризуется следующими цифрами:

Возраст	Плотность
Девон	2,58
Карбон нижний	2,54
Карбон средний	2,32—2,74
Пермь	2,41
Триас	2,34—2,46
Юра	1,80
Мел (верхний)	1,52—1,64

Из этих данных с несомненностью устанавливается сравнительно резкое уменьшение плотности, начиная с юрских песчаников. Что же касается более древних пород, то для них прежде всего оказывается решающим не возраст, а географическое положение породы в бассейне.

В самом деле, если сравнить плотности песчаников среднего карбона и песчаников девона, то можно выделить громадные площади в Донбассе, где песчаники карбона будут иметь значительно большую плотность, чем таковые девонского возраста. Это происходит потому, что мы сравниваем породы из различных частей бассейна, а если бы это сравнение сделать в одной точке, то плотности были бы или равны или плотность девонских

песчаников была бы несколько выше, чем плотность, которая имеет место для девонских песчаников на юго-западе Донбасса.

Другим примером для выяснения влияния возраста на плотность может служить соотношение плотности пород верхнего карбона и триаса. Плотность триасовых отложений не отличается от плотности карбоновых отложений на северной окраине Донбасса, как это установлено, например, вдоль разреза Ворошиловградской скважины.

Таким образом возраст как таковой не определяет еще плотность породы. Решающим является положение породы в регионе.

Обратимся теперь к анализу изменения средней скорости продольных упругих волн.

Возраст	Скорость в м/сек	Возраст	Скорость в м/сек
Девон	3800	Триас	2000—2800
Нижний карбон:		Юра	2000—2800
а) известняки	5500	Верхний мел	1900—2200
б) песчаники	3900	Третичные	900—1500
Верхний и средн. карбон	3100—5200	Четвертичные	400—900
Пермь	3100—3500		

Из этих данных видно, что скорость продольных упругих волн начинает убывать на границе триаса и юры. Что же касается более древних пород, то скорости в них часто «перекрываются». Кроме того, более древние породы как будто бы оказываются с меньшей скоростью продольных волн (девон), чем более молодые (верхний карбон — $V=5200$ м/сек). Это опять происходит потому, что мы сравниваем скорости для пород, занимающих различное положение в едином регионе.

Поэтому данные некоторых авторов относительно увеличения скорости продольных упругих волн с увеличением возраста породы нуждаются в весьма критической оценке, так как часто не приводится данных о взаимном расположении внутри единого региона площадей с выходами пород различного возраста, для которых изучалась скорость.

Перейдем к рассмотрению влияния на физические свойства пород различных форм метаморфизма. При попытке рассматривать изолированно влияние перечисленных выше форм метаморфизма на изменение физических свойств пород мы сразу же встречаемся с значительными трудностями, связанными с тем, что в Донецком бассейне область наибольших мощностей совпадает территориально с областью возможной магматической деятельности (Нагольный Кряж), так что уже эти две формы нельзя рассматривать отдельно. Что касается динамометаморфизма, то его влияние можно как будто рассматривать отдельно, исходя из концепции, что в областях максимальных мощностей имеется пологое залегание, а следовательно, здесь влияние тектоники было незначительным.

Сторонники регионального метаморфизма, когда они обсуждают вопросы метаморфизма угля, считают, что роль складко-

образовательных процессов сводилась лишь к механическому перемещению угля без его внутреннего изменения, а главные изменения происходили под влиянием веса вышележащих пород и температуры.

Однако, когда речь идет о вмещающих породах, то мы не знаем подтверждений этой концепции. В самом деле, если рассмотреть данные по наиболее глубоким скважинам, то мы не наблюдаем систематического изменения физических свойств пород с глубиной (Подмосковный бассейн, Апшеронский полуостров, Калифорния, нефтяное месторождение к западу от Васко). Наконец, в самом Донбассе, правда до глубины только 1200 м, не установлено изменения физических свойств пород в зависимости от глубины их залегания.

Если к этому вопросу подойти с точки зрения метаморфизма угля, то, как показал Е. О. Погребицкий в противоположность своим предшествовавшим взглядам, «трудно представить, чтобы различия в давлении и тепловых воздействиях за счет внутренней теплоты земли от опускания на глубину могли произвести столь значительную разницу в степени метаморфизма углей, какую мы наблюдаем в Донбассе». Это свое утверждение Погребицкий подкрепляет цифрами, указывая, что дополнительная мощность покрывающих пород на востоке Донбасса в 3 км может дать добавочное давление лишь в 100 ат, а опускание на 3 км при современном геотермическом градиенте дает температуру 90—100°, чего явно недостаточно.

Все это в еще большей степени относится к изменению физических свойств вмещающих пород, а поэтому нужно считать, что этот тип метаморфизма, как он понимается в настоящее время, не мог быть причиной выявленных закономерностей изменения физических свойств.

В последнее время В. С. Шехунов весьма энергично выдвинул положение о том, что причиной метаморфизации углей Донбасса является термальный метаморфизм (23).

В защиту своего положения автор приводит следующие главные доводы:

- 1) неравномерность изменения угля в пространстве и концентрическое расположение зон равной метаморфизации, что обусловливается различным положением отдельных участков по отношению к телу интрузии;
- 2) метаморфизм вмещающих пород больше в антрацитовых районах, что связывается с иной циркуляцией вод вокруг интрузии;
- 3) отсутствие связи между степенью метаморфизации углей и напряжением тектонических процессов (!).

Разумеется, нет никаких оснований отрицать влияние интрузии на метаморфизм как угля, так и вмещающих пород, поскольку, как будет показано дальше, наличие невоскрытых эрозией интрузий устанавливается и по данным магниторазведки. Однако, этот ли фактор является решающим? — вот в чем заключается вопрос.

В действительности получается такая картина: область повышенных значений физических свойств совпадает с областью проявления процессов складкообразования, с областью максимальных мощностей и с областью проявления интрузий. Все эти признаки, исключая пока закономерности физических свойств, характерны для складчатой зоны или части складчатой зоны в противоположность платформе, где такие явления отсутствуют почти совершенно.

Спрашивается, взаимосвязаны ли эти процессы и какова их последовательность во времени? Наиболее полное и всестороннее решение этого вопроса, нам представляется, можно получить, если принять точку зрения генетической взаимосвязанности этих процессов, свойственных лишь складчатой зоне, т. е. принять представление М. М. Тетяева на генезис складкообразования.

М. М. Тетяев писал, что «общая противоположность складчатой зоны своей платформе, выражающаяся в различии их структур, тесно связывается с резким различием в обеих частях мощностей осадочных свит, характерных для данной складчатости» (24).

Это явление «может происходить только в условиях преобладающего опускания данного участка земной коры». Несомненно, что область наибольших мощностей карбона в Донбассе была также областью наибольшего опускания, а следовательно, и возможное влияние статического давлѐния и температуры могло произойти в эпоху геотектонических колебательных движений, т. е. в эволюционный период жизни бассейна. Несомненно также, что изменения физических свойств вмещающих пород и углей имели место в эту эпоху, однако в условиях непрерывной пульсации на фоне общего опускания геосинклинальной области эти изменения были весьма незначительны. Другое можно ожидать в следующую фазу жизни донецкой геосинклинали, когда с началом революционного периода (в герцинскую фазу), под влиянием восходящего движения масс и соответственно наибольшему сопротивлению геосинклинальных частей бассейна этому восходящему движению, происходило, под влиянием преобразования вертикального движения в горизонтальное, образование складчатой структуры — в противоположность геоантиклинальной области (северная окраина Донбасса), где такие процессы не имели места (рис. 158). Весьма вероятно, что именно в этот период возникла в основных чертах та картина пространственного изменения физических свойств, которую мы в настоящее время наблюдаем.

В самом деле, где могло произойти наибольшее уплотнение пород и, следовательно, где мы можем ожидать породы с наименьшей пористостью? Несомненно там, где происходило наибольшее уменьшение объема слоистых пород, т. е. там, где было наибольшее сопротивление восходящему движению масс со стороны вышележащих масс земной коры.

Показателем же сопротивления восходящему движению, мерой этого сопротивления, согласно Тетяеву, является «мощ-

ность стратиграфического разреза толщ, впервые участвующих в складчатости» (24).

Из этого можно сделать тот основной вывод, что региональное изменение физических свойств горных пород в Донбассе отражает различия в интенсивности складкообразования (здесь не имеются в виду внешние формы складок) — поскольку в центральной части Донбасса имеет место наиболее интенсивное его проявление, тогда как на севере и западе интенсивность складко-

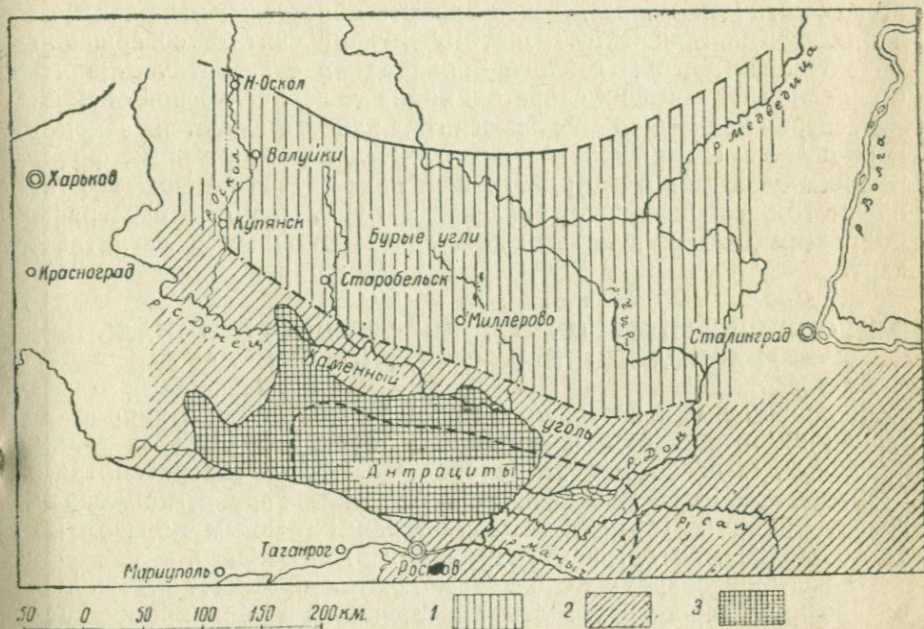


Рис. 158. Структурная схема Б. Донбасса и распределение углей по степени метаморфизма.

1 — область распространения недислоцированного карбона (фация Кантемировка — Н. Оскол);
2 — область распространения дислоцированного карбона (Донецкая фация); 3 — видимый Донбасс (по Е. О. Погребицкому).

образовательного процесса затухает. Следовательно, различие в мощностях само по себе не оказывает решающего влияния на изменения физических свойств, а является лишь фоном, на котором возникают различия в интенсивности складкообразования, которые и создают региональное изменение физических свойств.

Интрузии магматических пород проявляются в моменты складкообразования и преимущественно в антиклинальных структурах. Следовательно, влияние этих интрузий и связанных с ним рудопроявлений несомненно играет немаловажную роль, но не решающую.

Из изложенного выше можно сделать следующие выводы.

1. Закономерности пространственного изменения физических свойств пород являются одной из характеристик складчатых об-

ластей и платформ, поскольку от центральной складчатой области к платформе мощность осадков и интенсивность процессов складкообразования убывает, а следовательно там менее интенсивны или полностью отсутствуют процессы метаморфизма. Поэтому, переходя от складчатой области к платформе, мы устанавливаем убывание плотности, скорости распространения упругих волн и т. д.

2. При районировании складчатых зон (или даже областей) характер регионального изменения физических свойств и прежде всего плотности пород должен входить обязательным признаком в ряд других признаков. Поэтому нужно считать совершенно обязательным, чтобы геологи производили систематические исследования физических свойств в процессе геологической съемки.

Теперь надлежало бы выяснить, как отражаются закономерности изменения физических свойств в региональных физических полях Донбасса, но это в данном случае не может быть предметом специального анализа, а будет дано в параграфе об общих данных использования гравитационных и магнитных карт.

§ 23. ОБЩИЕ ДАННЫЕ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ГРАВИТАЦИОННЫХ И МАГНИТНЫХ КАРТ

В первой части настоящего курса был рассмотрен вопрос об общей гравитационной и магнитной съемках в СССР и об их значении для геолого-разведочного дела. Здесь мы рассмотрим некоторые общие данные об использовании карт региональных гравитационно-магнитных полей, опираясь главным образом на те обобщения, которые уже сделаны в этой области.

В настоящее время использование этих карт идет в двух направлениях: первое направление заключается в широких обобщениях для всей изученной в гравитационном и магнитном отношении территории СССР для выяснения общей геологической структуры, особенно Европейской части СССР, где мы имеем более густую и собственно к настоящему времени почти полностью заснятую территорию; второе направление заключается в относительно менее широких обобщениях для отдельных геологических регионов (провинций), как, например, территория Б. Донбасса, Ленинградская область, Урал и др.

В первом направлении у нас в СССР систематически работает акад. А. Д. Архангельский, который вместе со своими сотрудниками дал карту силы тяжести СССР как в редукции Фая, так и редукции Буге (25), а также карту магнитных аномалий вертикальной составляющей (26) земного магнитного поля.

Общие данные об использовании региональной магнитной карты

Не останавливаясь здесь на способе построения карты аномалии Z , а также на методе исключения так называемого нормального или «базисного» поля, о чем читатель найдет подробные

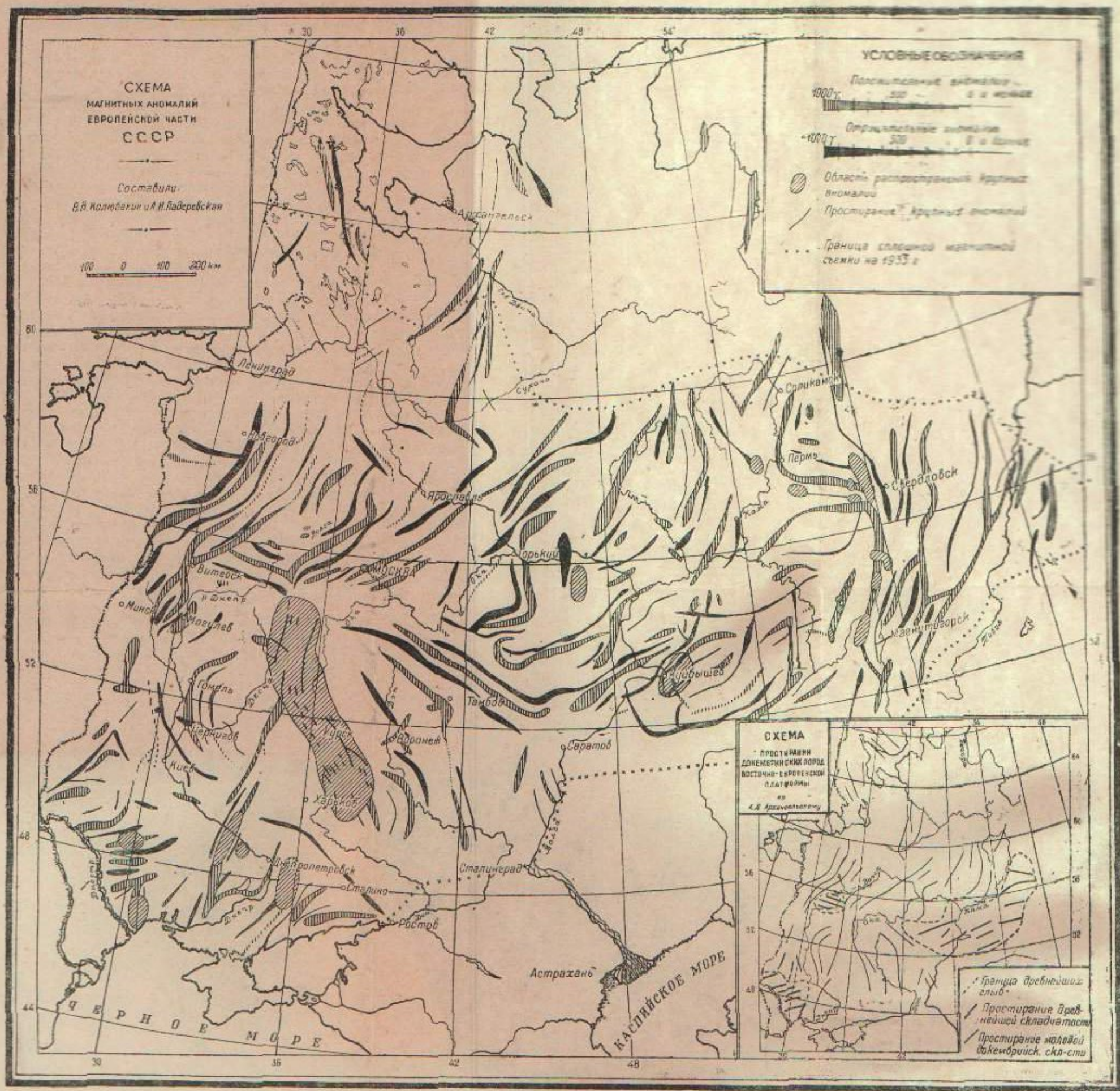


Рис. 159. Схема магнитных аномалий Европейской части СССР по данным генеральной магнитной съемки Института земного магнетизма на 1935 год (составили В. В. Коллюбакин и А. И. Падеревская).

указания в упомянутой выше статье (26), заметим, что на карте магнитных аномалий (рис. 159), составленной вышеупомянутыми авторами, совершенно отчетливо выделяется полосовое расположение аномалий различного знака и различной интенсивности.

Авторы отмечают, что «вытянутость магнитных аномалий и складчатых сооружений докембрия должна найти отражение в подходе к анализу магнитной карты и определить методику этого анализа».

Мы покажем дальше, что это общее утверждение вообще говоря справедливо для значительной части территории СССР, где в настоящее время имеется небольшая глубина залегания докембрийского основания и где мы имеем платформенные области более молодого возраста (герцинского, альпийского и т.д.), т. е. справедливо для тех областей, где последующие фазы складчатости не изменили или почти не изменили структуру кристаллического основания. В тех же районах, где произошло наложение различных этапов складчатости, там система простирающихся магнитных аномалий весьма усложняется и общее положение ободнотипной вытянутости магнитных аномалий и складчатых сооружений докембрия становится несправедливым.

Типичными примерами связи регионального магнитного поля с простирающимся докембрийского кристаллического основания являются магнитные аномалии КМА и Кривого Рога (рис. 159). На этой карте «полоса сильных аномалий, связанных с криво-рожскими железистыми кварцитами, совпадает со средними частями очень длинной полосы более слабых и положительных аномалий, которые начинаются на севере в пределах Днепровско-Донецкой впадины фундамента, а на юг прослеживаются почти до устья Днепра» (26). «Из этого, — пишет А. Д. Архангельский, — мы можем заключить, что направление рассматриваемой полосы совпадает с простирающимся Саксаганской свиты Украинского докембрия». Аналогичное явление нетрудно видеть и в области курских магнитных аномалий, где совпадение простирающихся железистых кварцитов с простирающимся положительных магнитных «хребтов» выступает еще более отчетливо.

Итак, эти и аналогичные примеры показывают, что в настоящее время надо считать бесспорно установленным, что в тех условиях неглубокого залегания докембрийского ложа, которые были охарактеризованы выше и которые в значительной мере типичны для юго-западной и средней частей Европейской части СССР, протяжение магнитных аномалий отображает на земной поверхности простирающиеся пород докембрийского ложа. Заметим, что это утверждение справедливо при условии, что покрывающие осадочные породы немагнитны. Это явление действительно имеет место почти повсеместно в пределах достаточно изученной Европейской части СССР.

Другое явление наблюдается в областях, где имеет место наложение относительно интенсивных явлений более молодых фаз складчатости, сопровождавшихся интрузиями магматических пород и иногда связанных с значительными разломами, которое

в конечном счете ведет к тому, что размытая поверхность кристаллического ложа оказывается представленной породами разнообразного петрографического и химического состава — от наиболее основных до наиболее кислых разностей.

В этих участках земной коры мы также наблюдаем полосовое расположение аномалий; однако в этом случае простираение магнитных аномалий совпадает с простираением более молодой складчатости. Типичным примером с этой точки зрения является магнитное поле Донбасса, представленное на рис. 160.

Здесь нетрудно заметить, что южная часть Донбасса, а не весь Донбасс, как это иногда отмечается в литературе, характеризуется пониженными аномалиями, что подтверждается не только данными общей магнитной съемки, но также и наблюдениями с весами Шмидта.

Больше того, полоса пониженных аномалий, достигающих максимум — 400 γ , заключает, как это показал А. Т. Донабедов, районы с наиболее поднятыми участками докембрийского ложа, как, например, так называемые главная и южная антиклинали, а также Амвросиевский купол, где на поверхность выходят древние свиты нижнего карбона C_1^{2-4} (см. геологическую карту Донбасса масштаба 1 : 420 000).

Таким образом в этом случае не подлежит сомнению, что не изменением рельефа докембрийского ложа, т. е. не погружением этого ложа объясняется изменение поля, а появлением пород, отличных по своим магнитным свойствам от окружающих их докембрийских, поскольку покрывающие их осадочные породы немагнитны.

Имея в виду, что в пределах приазовского кристаллического массива наиболее молодые (конец палеозоя и начало мезозоя, по В. И. Лучицкому) интрузии характеризуются пониженным магнитным полем, учитывая также, что в пределах полосы минимума Z мы находим известные в настоящее время рудные месторождения Донбасса (Никитовка, Нагольный Кряж) и благоприятные для появления интрузий структурные формы (главная и южная антиклинали), а также все известные до настоящего времени изверженные породы, мы должны, вопреки преобладающему в литературе мнению о нормальном поле в Донбассе, утверждать, что эта область соответствует области погребенных интрузий кислого или переходных от кислого к основному состава, образовавшихся в период герцинской складчатости.

Итак, на примере Донбасса видно, что нельзя изменения магнитного поля всегда относить за счет простираения складчатых сооружений докембрия. Аномальное магнитное поле, как и гравитационное, в различные геологические эпохи было неодинаковым как по интенсивности, так и по расположению, причем эти изменения зависят, главным образом, от характера накладывающихся различных фаз складчатости.

Таким образом, общая магнитная съемка позволяет нам: 1) определять направление простираения складчатых сооружений докембрия, а иногда (приближенно) и их глубину залегания под

ском строении погребенных частей земной коры, что уже само по себе может быть использовано для построения различных гипотез относительно этого строения, а кроме того является часто первоначальным материалом для проектирования других (в том числе и магниторазведочных) исследований геофизическими методами.

Общие данные об использовании региональной гравитационной карты

Не останавливаясь здесь на способах построения общей гравитационной карты, мы в основу дальнейшего изложения положим карты гравитационных аномалий в редукции Фая и Буге, составленные и описанные коллективом авторов под руководством А. Д. Архангельского и опубликованные в статье «Геологическое значение аномалий силы тяжести СССР».

Рассматривая гравитационную карту в редукции Фая, можно видеть, что в пределах Восточноевропейской равнины и Западно-сибирской низменности аномалии в основном характеризуются величиной $+25$ миллигал, хотя в пределах Восточноевропейской равнины имеются значительные участки с аномалиями от $+25$ до $+50$ миллигал. Аномалии более интенсивного порядка на этой территории имеют в общем локальное выражение и известны пока в трех пунктах: в устье р. Мезени ($+72$ миллигал), в Подмосковном районе ($+69$ миллигал) и на Черниговщине (так называемая черниговская гравитационная аномалия, достигающая максимум $+102$ миллигал).

Полные аномалии противоположного знака имеют относительно меньшее площадное распространение и часто достигают -25 миллигал, но встречаются аномалии от -25 до -50 миллигал: на Кольском полуострове, в Прикаспийской низменности, в Днепровско-Донецкой впадине.

Такова в общем характеристика равнинных областей СССР. Горные области характеризуются резко повышенными положительными аномалиями $+200$ — $+230$ миллигал (Крымские горы, Главный Кавказский хребет и т. д.). В предгорных районах мы имеем пониженные аномалии, достигающие -130 миллигал (остров Артема на Каспийском море). Эти данные свидетельствуют о различной амплитуде изменения силы тяжести в равнинных и горных областях, на что справедливо указывают авторы этой статьи, так как различие в амплитуде изменений достигает почти 3 раз.

На карте аномалий силы тяжести в редукции Буге область отрицательных аномалий значительно возрастает, как возрастает и абсолютное значение этих аномалий. На карте аномалий Буге горные области характеризуются повышенными отрицательными аномалиями, достигающими на Кавказе -100 и -150 миллигал, а, например, на Памире -400 и -500 миллигал.

Здесь мы ограничимся приведенной характеристикой поля. Желающих более детально изучить этот вопрос мы отсылаем к упомянутой статье.

Переходя теперь к вопросу о причинах описанных выше аномальных изменений силы тяжести на территории СССР и, следовательно, к вопросу об использовании этих карт в геолого-разведочном производстве, необходимо отметить, что вопрос этот чрезвычайно сложный и к настоящему времени сделаны лишь первые попытки в геологической расшифровке аномалий силы тяжести. Особенно сложным является загадка больших отрицательных аномалий Буге, которыми характеризуются горные области. В настоящее время большинство исследователей склонно объяснять эти факты наличием на больших глубинах земной коры под горными областями пород с меньшей плотностью, чем в соседних впадинах, где наблюдается, как, например, во впадинах типа Черноморской, аномально высокая плотность глубоких частей земной коры. Эти соотношения плотностей в настоящее время известны в науке под именем принципа изостазии в том виде, как его формулировали Эри, Космат, Борн. У нас в СССР эти идеи подвергались резкой критике (П. М. Никифоров, А. Д. Архангельский), главным образом, в отношении самого принципа изостазии, хотя и не всегда эта критика может быть признана достаточно удовлетворительной, поскольку она идет лишь по линии отрицания принципа без того, чтобы вскрыть рациональное зерно под оболочкой принципа изостазий, который несомненно в одностороннем, а следовательно, и в извращенном виде отображает объективные явления распределения плотностей в земной коре.

Вопрос о природе гравитационных аномалий можно считать более детально и с большим успехом разработанным для случая относительно небольших глубин (до 10 км) на тех участках земной коры, геологическое строение которых частично выяснено по данным других исследований методами геологического картирования и горно-буровых работ.

Кроме того, как совершенно правильно заметил А. Д. Архангельский, поставленный вопрос необходимо начинать решать «на равнинных областях и низких горных краях» для того, чтобы исключить влияние как рельефа горных областей, так и неоднородностей в распределении плотности на больших глубинах.

Если попытаться наметить основные факторы, из которых складываются наблюдаемые нами изменения аномалий силы тяжести, то можно наметить следующие:

1) глубина залегания докембрийского кристаллического основания, сложенного в общем случае метаморфизованными и, следовательно, более плотными породами и покрытого нормальными осадочными отложениями;

2) неоднородности в отношении плотности пород кристаллического основания, сложенного как докембрийскими, так и более молодыми породами;

3) неоднородности в отношении плотности осадочных пород, покрывающих кристаллическое ложе.

В общем случае можно, конечно, ожидать одновременное влияние этих факторов. Однако практика СССР показывает, что

влияние одних из этих факторов в различных геологических районах является преобладающим, тогда как влияние других либо относительно незначительно, либо совершенно отсутствует. Чтобы решить этот вопрос в каждом отдельном случае, имея результаты наблюдения силы тяжести, необходимо выяснять, во-первых, некоторые встречающиеся в природе наиболее типичные случаи закономерностей изменения плотностей пород на материале тех районов, для которых уже известны основные черты геологического строения, а, во-вторых, предвидеть предварительно в какую более общую геологическую единицу (провинцию) входит рассматриваемая территория, исходя из более общих геологических закономерностей этого региона.

В обычной постановке этого вопроса решающими считаются выступы и впадины докембрия, а в гравиметрической характеристике особое внимание обращается на абсолютную величину и знак гравитационной аномалии.

Но если, например, наличие впадины указывает на удаление от поверхности кристаллического ложа и, следовательно, на возможное уменьшение силы тяжести, то, с другой стороны, различия в мощностях, как это мы показали в предыдущем разделе на примере Донбасса, ведут, как общий закон, к изменению плотности осадочных отложений в горизонтальном направлении. В случае больших мощностей (порядка 2—3 км) и разницы в плотностях, достигающей нескольких десятичных знаков, это может вызвать значительные аномалии и тем самым весьма осложнить влияние рельефа кристаллического ложа. Следовательно, только конкретный анализ возможных условий изменения плотности пород на данной территории, как отражение определенных сторон его геологической истории, гарантирует успех использования общей гравитационной карты.

После этих общих положений рассмотрим несколько конкретных примеров того, как используются и могут быть использованы карты региональных гравитационных аномалий. Имея в виду, что в отношении полноты геологической изученности и покрытия гравиметрической съемкой на первом месте оказывается Европейская часть СССР, целесообразно примеры взять именно из этой области.

Гравитационная аномалия территории Б. Донбасса. На рис. 161 приведена карта гравитационных аномалий в редукции Фая для значительной части территории Б. Донбасса, составленная нами на основании данных ряда исследователей (А. Я. Орлова, С. Е. Александрова и др.).

Главная особенность распределения аномалий силы тяжести в Донбассе заключается в том, что центральная часть обнаженного Донбасса характеризуется максимумом силы тяжести, достигающим 50—60 миллигал, а во всех направлениях от этой области максимума сила тяжести убывает, причем особенно резко на северной окраине Донбасса, где минимум, например на станции Глубокой, составляет —16 миллигал. Эта региональная закономерная изменчивость аномалий силы тяжести давно

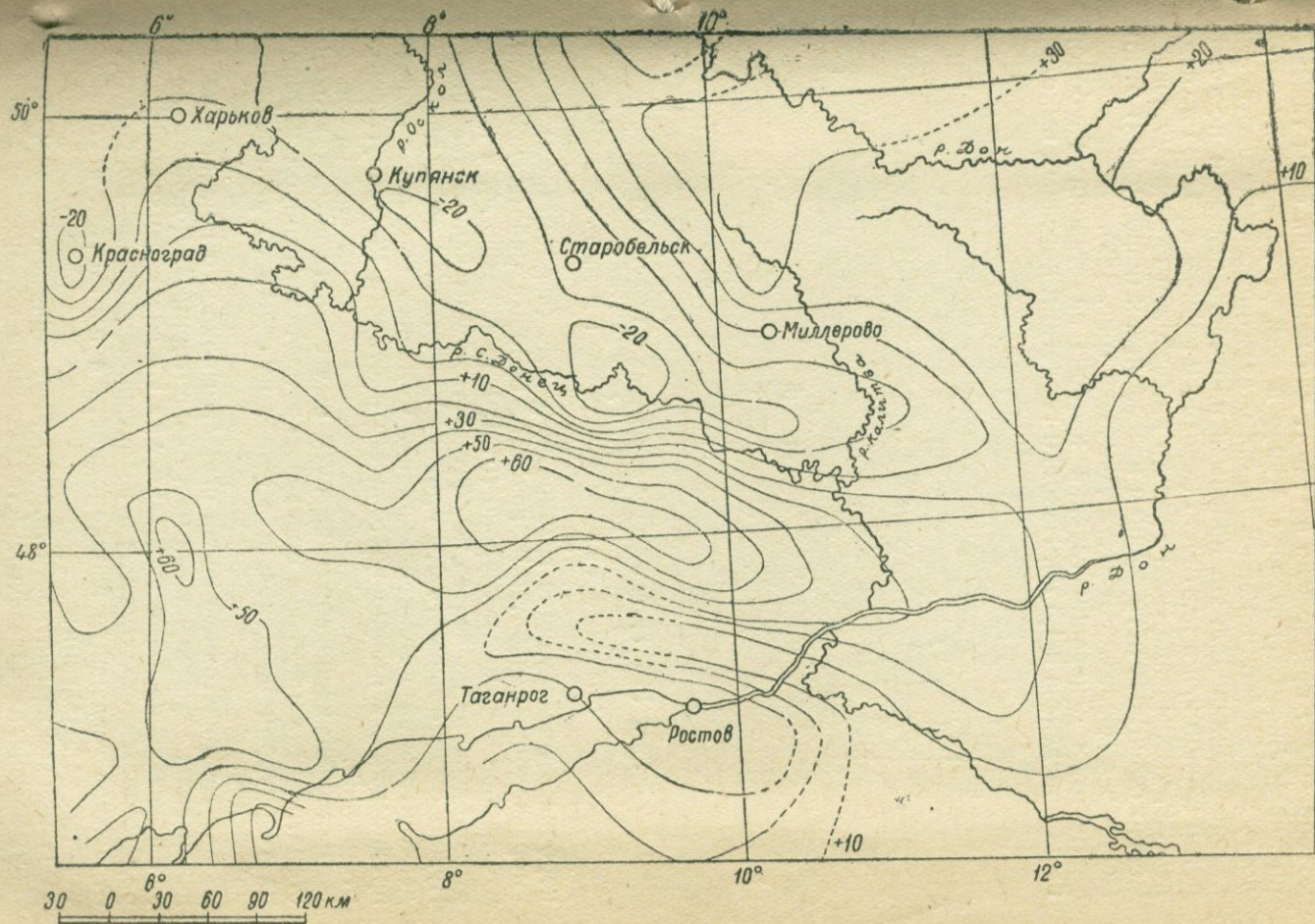


Рис. 161. Карта аномалий силы тяжести Б. Донбасса ($g_0 - \gamma_0$) (составил А. Т. Донабедов).

привлекает внимание исследователей, и в разное время, начиная с 1929 г., ей давались разные объяснения. Первое объяснение, которое было предложено в 1929 г. для изменения силы тяжести по линии Лиски — Ростов, состояло в том, что, поскольку плотность мезозойских и кайнозойских отложений меньше плотности палеозойских пород, то, принимая плотность палеозоя постоянной и равной 2,6, а плотность мезозоя и кайнозоя равной в среднем 2,0, уменьшение силы тяжести на северной окраине Донбасса можно объяснить погружением палеозойских (карбонных) отложений вне обнаженной части Донбасса (рис. 162).

На этом основании глубина карбона на станции Глубокая была определена в 1,5 км. Находки геологами коренных выходов

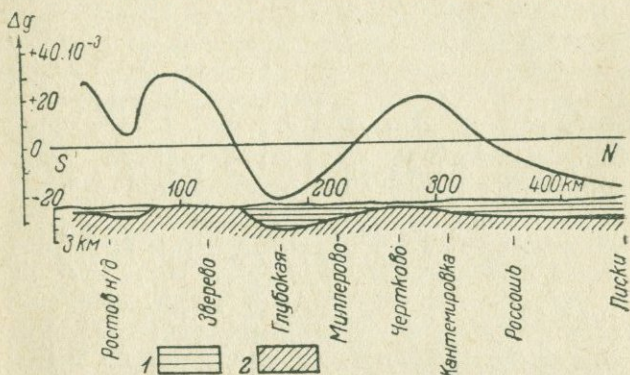


Рис. 162. Гравитационный профиль и геологический разрез через Донбасс по данным 1929 г.

1—кайнозойские и мезозойские отложения; 2—карбон.

карбона и последующие гравиразведочные (вариометром) и сейсморазведочные работы и, наконец, буровые работы доказали, что карбон залегает неглубоко (от 120 до 400—600 м), и поэтому это объяснение оказалось не соответствующим действительности. Нужно было объяснить это противоречие между вычисленной и действительной глубиной карбона. Сомнение вызвала основная предпосылка, а именно постоянство плотности каменноугольных отложений.

Для разрешения сомнения путь был единственный — это систематическое массовое определение плотности пород карбона на территории Б. Донбасса с целью выяснить ее региональные изменения.

Как же в настоящее время решается вопрос о причинах изменения силы тяжести на той части территории Б. Донбасса, которая показана на карте аномалий Δg ? Из анализа плотности пород Донбасса следует, что в гравитационном поле могут найти отражение следующие неоднородности в плотностях в горизонтальном направлении:

- 1) изменение плотности пород кристаллического ложа;
- 2) изменение рельефа кристаллического ложа;
- 3) изменение плотности каменноугольных отложений;

4) изменение рельефа палеозойских отложений под покровом мезозоя и кайнозоя.

Эти частные формы изменения плотности в разной степени отражаются в гравитационном поле Б. Донбасса для разных частей его территории.

Действительно, сравнивая карту силы тяжести с картой средних плотностей (рис. 3), нельзя не заметить, что область максимума соответствует области повышенной плотности каменноугольных отложений. Это качественное решение можно иллюстрировать и некоторыми количественными расчетами. Так, если мы желаем объяснить разницу в Δg , например в Ровеньках и Ворошиловграде, только изменением плотности пород в карбоне, то можно проделать следующие расчеты.¹

Сила тяжести в Ровеньках равна +37 миллигал (Буге), а в Ворошиловграде — 27 миллигал (Буге). Разность плотностей в этих пунктах составляет 0,44. Так как по формуле для бесконечно простирающегося слоя $\Delta g = 2\pi k \sigma h$, где h — вертикальная мощность слоя, а σ — избыточная плотность, то, подставляя в эту формулу приведенные выше данные, получим:

$$h = \frac{\Delta g}{2\pi k \sigma} = \frac{64 \cdot 10^{-3}}{2\pi \cdot 0,44 \cdot 66 \cdot 7 \cdot 10^{-9}} = 3,5 \text{ км.}$$

Оказывается, таким образом, что достаточно в толще мощностью в 3,5 км иметь горизонтальное изменение плотности в 0,44, чтобы объяснить изменения Δg в рассматриваемых пунктах. Мощность в 3,5 км не противоречит ни данным геологии, ни данным сейсморазведки.

Такие сравнения можно проделать для значительного количества пунктов, но здесь воспроизводить их нет надобности. Несомненно, что рельеф палеозоя в той части Б. Донбасса, где глубина его залегания достигает нескольких сот метров, отражается в изменении силы тяжести. Однако при средней мощности мезозоя в 500 м и разности плотностей в 0,4 это может вызвать эффект около 8 миллигал, что в рассматриваемом выше случае может объяснить лишь около 12% разницы в силе тяжести.

Что касается влияния неоднородностей в плотности пород кристаллического ложа, то они имеют место и, например, для гранитного ряда пород Украинского кристаллического массива разности плотностей достигают 0,2. Из петрогенетической карты Украины, составленной Безбородько, видно, что различного типа граниты занимают (исключая так называемый днепровский тип) довольно ограниченное пространство; поэтому, если учесть также значительную глубину их залегания в пределах Донбасса (если там эти неоднородности имеют место), их влияние не может быть

¹ Сравнивать необходимо аномалии Буге, так как в Ворошиловграде превышение над уровнем моря 60 м, а в Ровеньках 286 м. Ошибки при вычислении поправок Буге мы не допускаем, так как знаем действительные плотности пород, залегающих над уровнем моря.

таким, чтобы обусловить региональное изменение силы тяжести.

Влияние рельефа кристаллического ложа в пределах центральной части складчатого Донбасса не может сказаться на изменении силы тяжести, так как плотности пород, слагающих ложе, и залегающих над ними осадочных — одинаковы. Другие соотношения имеют место в пределах платформы. Там вследствие невысокой плотности каменноугольных отложений (2,3) рельеф кристаллического ложа влияет весьма заметно, так как разность в плотности достигает 0,3—0,4 аналогично тому, что мы имеем при сравнении плотностей каменноугольных отложений центральной и периферийной частей Донбасса.

Для иллюстрации приведем следующий расчет: сила тяжести в Ворошиловграде равна — 27 миллгал, а плотность карбона 2,3. Глубина кристаллического ложа 3—3,5 км. В Миллерово сила тяжести равна — 3 миллигалам (Буге), а плотность карбона по Благовещенской скважине практически одинакова с плотностью карбона в Ворошиловграде. Глубина кристаллического ложа в Миллерово около 1,8 км (согласно достаточно надежным данным сейсморазведки). Принимая разницу в глубине кристаллического ложа в 1,5 км и разность плотностей между породами кристаллического ложа и карбона в 0,4, по формуле для бесконечного слоя можем подсчитать

$$\Delta g = 2\pi \cdot k \cdot \sigma h = 2\pi \cdot 419 \cdot 10^{-9} \cdot 0,4 \cdot 1 \cdot 510^5 = 25 \text{ миллигал,}$$

т. е. разница в силе тяжести полностью объясняется рельефом кристаллического ложа.

Итак, совершенно определенно можно утверждать, что изменение силы тяжести от центральной части складчатого Донбасса к северной окраине объясняется изменением плотности карбона, а еще далее на север изменение тяжести зависит от рельефа кристаллического ложа.

Относительно объяснения максимума силы тяжести в Донбассе противоположного мнения держится акад. А. Д. Архангельский. Он пишет: «чем объясняются эти крупные положительные аномалии, сказать в настоящий момент трудно; связывать их непосредственно с каменноугольными породами едва ли возможно, и наиболее вероятным представляется нам предположение, что в недрах бассейна существуют какие-то тяжелые интрузивные породы: на наличие интрузий указывают между прочим и рудные месторождения, которые известны в пределах главного антиклиналя» (25).

Как видит читатель, здесь высказывается противоположная мысль тому, что мы приводили выше. Чтобы выяснить, насколько вероятно предположение А. Д. Архангельского, поставим такой вопрос: а какого состава эти интрузии? Если они тяжелее окружающих осадочных пород, а последние имеют в Нагольном Кряже плотность 2,74—2,76, то какая это может быть интрузивная порода? Ведь даже мариуполиты, как это нами теперь выяснено, имеют плотность 2,64. Следовательно нужно предположить, что в недрах Нагольного Кряжа имеются интрузии еще

более основного характера, чем мариуполиты. Насколько это вероятно? Обратимся к предположениям геологов и прежде всего самого А. Д. Архангельского.

Он пишет «в Донецком бассейне в мезозойское время не только имела место достаточно ярко выраженная правильная складчатость, но происходили, повидимому, и кислые интрузии (подчеркнуто мною, А. Д.). Как известно, В. И. Лучицкий принимает, что щелочные сиениты восточной части Азовско-Подольского щита являются достаточно молодыми породами и образовались в мезозое. С другой стороны, месторождения цветных металлов Никитовки и Нагольного Кряжа несомненно возникли в момент, когда основные черты тектоники Донецкого бассейна уже наметились, т. е. в мезозое; представляется вполне возможным, что в недрах Донецкого бассейна залегают не вскрытые еще эрозией массивы гранитов, с которыми и связаны упомянутые рудные месторождения» (29).

Читателю теперь совершенно ясно, насколько вероятно объяснение А. Д. Архангельского для полосы повышенных гравитационных аномалий в Донбассе. Мы полагаем, что рассмотренный случай является типичным примером того, как пренебрежение закономерностями регионального изменения физических свойств пород может привести к неверным выводам из наблюдений силы тяжести.

Таким образом в объяснении аномалий силы тяжести Донбасса решающую роль играют первый и третий факторы, указанные выше, а следовательно данные гравитационной карты для различных частей геологической провинции Б. Донбасса могут быть использованы:

- 1) в области платформенной — для определения рельефа кристаллического основания;
- 2) в области складчатой, вне пределов обнаженной части, для прослеживания по простиранию складчатого Донбасса.

Эти две возможности используются в настоящее время в практике решения проблемы Б. Донбасса, причем данные общей маятниковой съемки, наряду с другими геолого-разведочными данными, являются исходными при проектировании других геофизических работ и последующего бурения.

Заметим, что неоднородности кристаллического ложа в отношении плотности отражаются в изменении силы тяжести преимущественно в областях неглубокого залегания ложа, например в пределах так называемого Полесского вала, Воронежского кристаллического массива; кроме того они характеризуются своей относительной ограниченностью в пространстве (Черниговская аномалия), когда залегают относительно глубоко.

Гравитационная карта Урала. Рассмотрение карт гравитационных аномалий СССР, составленных под руководством А. Д. Архангельского (25), показывает, что Урал характеризуется полосовым расположением аномалий силы тяжести, вытянутых в меридиональном направлении, т. е. параллельно простиранию его складча-

той структуры. В центральной части, вдоль 60 меридиана располагается полоса в +110 миллигал (полные аномалии) и +85 миллигал (аномалии Буге). Согласно А. Д. Архангельскому, максимум силы тяжести «соответствует выходам на поверхность характерных для Урала зеленокаменных пород, которые по своему относительно высокому удельному весу значительно отличаются от развитых по соседству осадочных и кислых изверженных пород». Наиболее интенсивные аномалии в районе нижнего Тагила и Кушвы соответствуют наиболее основным изверженным породам группы габро.

На восточном склоне Урала, параллельно полосе максимума Δg , протягивается полоса пониженных аномалий (отрицательных по Буге и малых положительных по Фаю), которая «в Южном Урале отвечает выходам на поверхность гранитных массивов». Еще восточнее вновь появляется полоса повышенных аномалий, соответствующая «в общем выходам палеозоя, в том числе и зеленокаменных пород». На западном склоне Урала, где мы имеем нормально залегающие осадочные породы, такой полосовой смены аномалий не наблюдается и неизвестно, чем объясняется изменение аномалий, поскольку не наблюдается той простой картины, когда аномалии резко очерчивают предгорную впадину.

Из изложенного ясно, что в общем случае полосовое расположение гравитационных аномалий Урала соответствует простиранию пород, а изменение силы тяжести вкрест простиранию отвечает смене различных по плотности пород (смена плотных зеленокаменных пород гранитами и нормально осадочными породами).

Надо отметить, что, к сожалению, до сих пор, несмотря на достаточно подробную изученность в геологическом и гравитационном отношениях, на Урале не проделано систематических исследований закономерностей изменения плотности пород, знание которых позволило бы подойти к количественной оценке правильности вышеприведенного объяснения, так как иногда простое совпадение пониженных аномалий и областей распространения выходов пород с пониженной плотностью может оказаться кажущимся. Кроме этого, знание плотностей осадочных отложений западного склона Урала позволило бы подойти к однозначному объяснению этих аномалий.

Нужно ожидать, что в ближайшее время эта весьма интересная работа по выявлению закономерностей изменения плотностей будет выполнена и тогда эти закономерности, будучи поставлены в связь с особенностями геологического строения Урала и с картой силы тяжести, позволят более уверенно расшифровать природу гравитационных аномалий Западносибирской низменности и западного склона Урала. Но и теперь уже можно высказать, вслед за А. Д. Архангельским, положение, что полосовое изменение силы тяжести в пределах Западносибирской низменности, о природе которого так много и долго спорили геофизики, объясняется полосовым изменением пород различной плотности

на глубине в пределах этой изменности, а не рельефом основания, как думали некоторые геофизики.

На примере Урала, как впрочем и на значительной территории Фенно-Скандинавского щита, решающим фактором является изменение плотности изверженных пород, слагающих эти участки земной коры. Таким образом карта силы тяжести в рассматриваемых условиях в конечном счете может дать представление о тектонике складчатого фундамента, а следовательно может быть использована и при проектировании геофизических и других геолого-разведочных работ, связанных с изучением тектоники погребенных частей Уральского складчатого массива и связанных с ним полезных ископаемых.

Этими примерами мы ограничим свое изложение этого раздела курса, отсылая интересующихся этим вопросом к сводной работе акад. А. Д. Архангельского «Геологическое значение аномалий силы тяжести в СССР».

§ 24. КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ГЛУБИННО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

К настоящему времени в практике еще очень мало было работ для решения глубинно-геологических задач комплексом геофизических методов и бурения. Целый ряд вопросов нефтяной геологии решается комплексом геофизических методов разведки и бурения и излагается ниже в специальных разделах. Здесь мы рассмотрим пример решения этих задач, связанных в конечном счете с поисками не одного полезного ископаемого, а их комплекса, что влечет за собой всестороннее изучение глубинно-геологической структуры.

Типичной с этой точки зрения является проблема Б. Донбасса. Проблема эта, возникшая в 1929 г. как проблема отыскания истинных границ Донецкого бассейна с целью последующих поисков каменного угля, в настоящее время представляет собою комплексную проблему в отношении угля, нефти, газов, полиметаллов и других полезных ископаемых. Для своего решения она требует применения геофизических методов, так как познание глубинной структуры возможно только этими методами в комплексе с бурением.

Первая задача в этой проблеме заключается в изучении рельефа каменноугольных отложений для того, чтобы выделить области неглубокого (до 500 м) залегания карбона, т. е. районы, представляющие практический интерес. Эта задача в настоящее время разрешается комплексом трех методов: гравиразведки, электроразведки и сейсморазведки.

Впервые конкретное применение геофизических методов разведки было осуществлено в 1929 г., когда необходимо было установить границу неглубокого залегания карбона на юго-востоке Донбасса, так как скв. № 1 в Персияновке (рис. 164) на глубине 804 м не вошла в каменноугольные отложения и была остановлена в мезозое. Поставленные гравиразведочные работы в виде

трех параллельных маршрутов, направленных вкостростираания и начинавшихся на севере от выходов каменноугольных отложений, дали весьма интересные и важные в практическом отношении результаты.

Гравиразведочные работы к югу от ст. Каменоломни выявили крупные аномалии градиента, указывающие область резкого падения силы тяжести к северу на юг.

На рис. 163 показана типичная кривая Δg , полученная в результате интегрирования градиентов по так называемому пер-

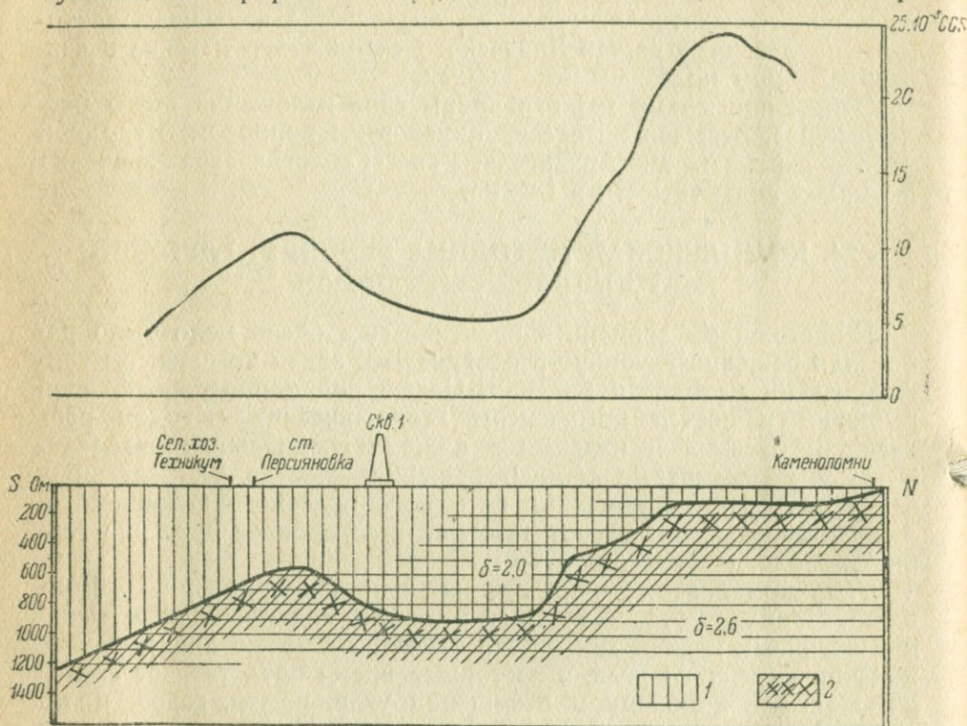


Рис. 163. Кривая Δg по профилю Каменоломни — Персияновка и геологический разрез по данным гравиразведки (по Н. Н. Самсонову).

1—кайнозой, мезозой. 2—карбон.

сияновскому профилю, и соответствующий погребенный рельеф каменноугольных отложений, построенный Н. Н. Самсоновым.

Принимая разность плотностей в 0,6 (плотность карбона 2,6, а вышележащих мезозойских и кайнозойских отложений — 2,0) установили, что на расстоянии около 8 км от выходов карбона начинается постепенное, местами уступообразное, погружение каменноугольных отложений, превышающее 800 м. Далее на юг к ст. Персияновка устанавливается некоторый подъем в рельефе карбона, с новым погружением до 1200 м при дальнейшем движении на юг. Таким образом была установлена область неглубокого залегания карбона. Последующий вариометрический ход по маршруту Крымская — Мелеховская установил, что

область резкого погружения имеет региональный характер с направлением, изображенным на рис. 164.

Скважины, заданные по данным гравirazведки в ст. Каньгино (№ 2) и Раздорской (№ 3 и 4), подтвердили действительное неглубокое залегание каменноугольных отложений, залегающих на глубинах от 42 до 120 м и представленных свитами C_2^4 , C_2^5 , C_2^6 и C_3 , причем первые две свиты заключали рабочие пласты антрацита мощностью до 1,3 м. Последующие разведки и подсчет за-

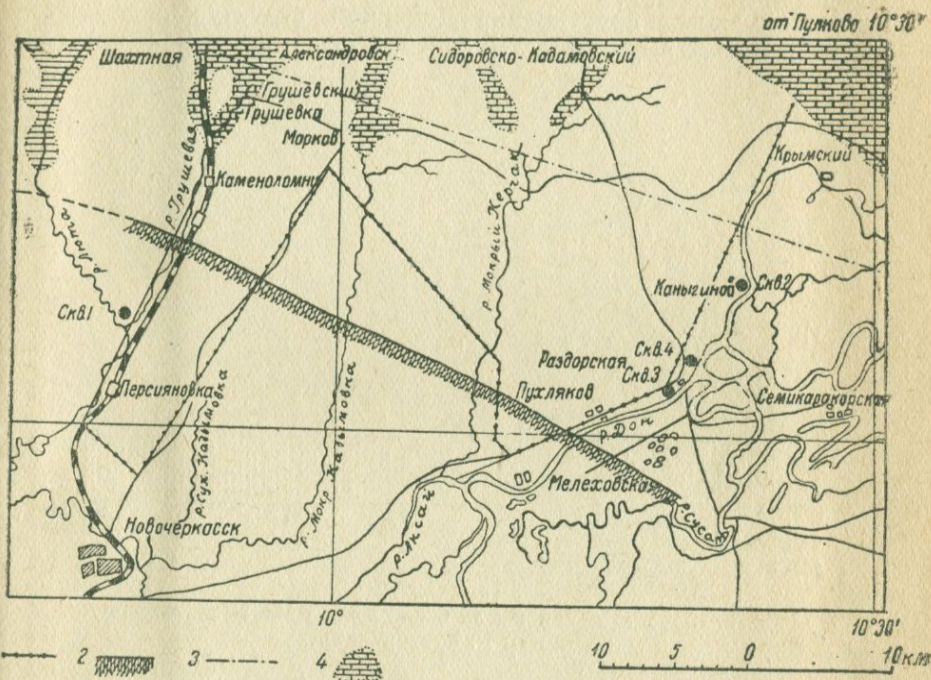


Рис. 164. Схема простирания так называемого Персияновского сброса по данным гравirazведки (по Н. Н. Самсонову).

1 — гравirazведочные маршруты; 2 — линия нарушений (сбросов); 3 — ось мульды; 4 — выхода карбона.

пасов показали наличие геологических запасов угля до 2 млрд. т; в настоящее время ведутся промышленные разведки для заложения шахт.

В этом случае вследствие благоприятных условий для гравirazведки (достаточная разность плотностей и ее постоянство, относительно резкие формы рельефа, а также то, что к этому времени еще не были разработаны другие методы, позволяющие определять абсолютные глубины) комплекс ограничивался применением гравirazведки с последующим за ним непосредственно бурением. В последующие годы, в условиях более сложных, решение задачи определения рельефа каменноугольных отложений выполнялось комплексом сперва гравirazведки и

сейсморазведки с последующим бурением; затем в комплекс была включена и электроразведка постоянным током, как метод по сравнению с сейсморазведкой более дешевый и способствующий уменьшению объема сейсморазведочных работ.

Поэтому, например, в 1935 г. при комплексных геофизических исследованиях, связанных с изучением восточного продолжения Донбасса до железнодорожной линии Сальск — Сталинград, был применен именно этот комплекс. Форма комплексирования состояла в следующем. В начале задавались гравиразведочные маршруты вкрест простирания Донецкой структуры. В местах локальных максимумов Δg и соответствующих изменений гра-

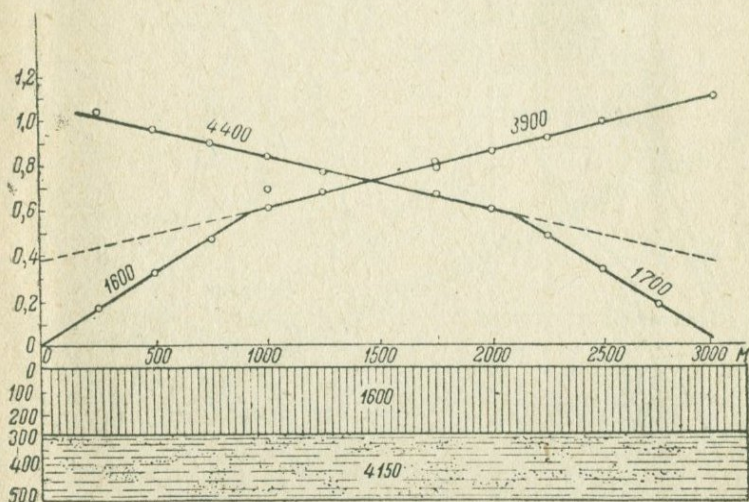


Рис. 165. Сейсмопрофиль около хутора Мартыновка (по Н. П. Кузнецовой).

диента вычислялись глубины залегания карбона по данным гравиразведки. В местах поднятий и погружений ставилась в начале электроразведка, а затем сейсморазведка. На рис. 165 представлен сейсмопрофиль, выполненный у хут. Мартыновки на р. Сал, который показал глубину залегания горизонта с $V=4200$ м/сек в 300 м. Кривые ρ_k , представленные на рис. 166, выполненные на месте вероятного поднятия, также показали глубину залегания горизонта с высоким сопротивлением (карбон) в 300 м. Последующее механическое бурение в Мартыновке установило на глубине в 277 м карбон Донецкого типа. Таким образом соответствие данных геофизических исследований и бурения в этом случае оказалось весьма удовлетворительным. В основном такой методикой решается в последнее время задача отыскания истинных границ Донбасса под покровом мезозойских и кайнозойских отложений.

В настоящее время по данным геофизических исследований и бурения, которое, как правило, производилось по результатам

геофизических исследований, установлен не только сам факт значительного продолжения карбона Донбасса на восток, на север, запад, но и дан его рельеф в изогипсах. Больше того, в результате обобщения всех региональных геофизических исследований по проблеме Б. Донбасса удалось наметить в совокупности с данными бурения области не метаморфизованного карбона, к которым приурочены газопроявления (Ворошиловград, Благовещенск, Лисичанск) и возможное нефтепроявление.

Другим немаловажным вопросом в проблеме Б. Донбасса является вопрос изучения рельефа кристаллического ложа. Как было показано в предыдущих разделах, некоторые указания об относительных изменениях рельефа кристаллического ложа в областях, где оно представлено породами магнитными, дают карта региональных магнитных аномалий и данные магниторазведки.

То же относится к гравиразведке, которая в условиях, описанных выше, позволяет определить приблизительно подземный рельеф. Решающим методом для изучения рельефа кристаллического ложа до сих пор являлась сейморазведка, а именно (в условиях Б. Донбасса) — сейморазведка методом преломленных волн. На рис. 167 представлен сеймопрофиль в районе ст. Батайск. В этом случае годограф представляет двухслойную структуру с глубиной залегания кристаллического ложа в 550 м. Выше залегают третичные отложения с $V=1750$ м/сек. Не исключена возможность, что в разрезе имеются также и меловые отложения, которые в данном случае «выпадают» на годографе. Подобный случай имел место в районе Таганрога, где ветвь годографа, соответствующая меловым отложениям, была установлена по вторым вступлениям.

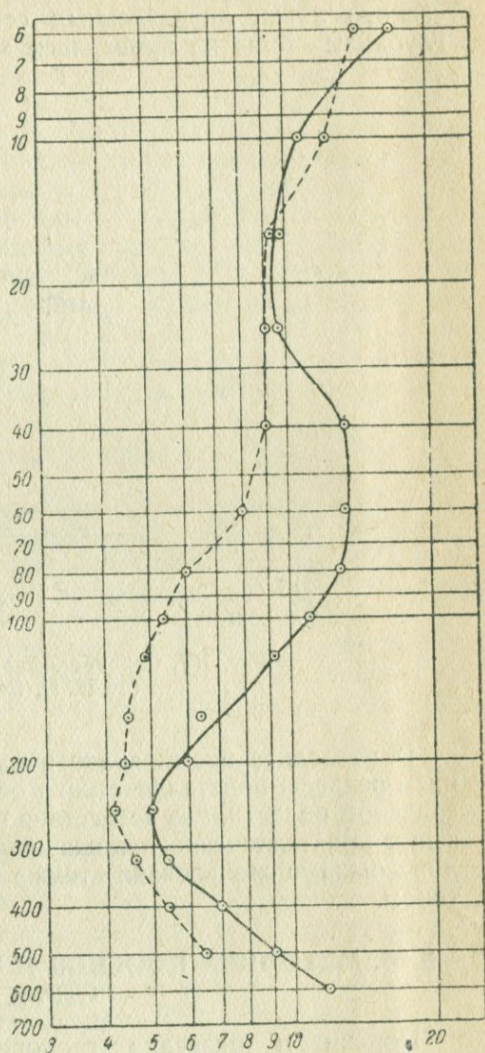


Рис. 166. Кривые вертикального зондирования у хут. Мартыновка.

В большинстве случаев в практике приходится иметь дело с большими глубинами порядка нескольких километров, и, следовательно, расшифровка сейсморазведочных данных оказывается делом более сложным, а данные о глубинах менее надежными. До сих пор вопрос о соответствии глубин залегания кристаллического ложа, определенных сейсморазведкой, действительным глубинам — еще не проверялся механическим бурением.

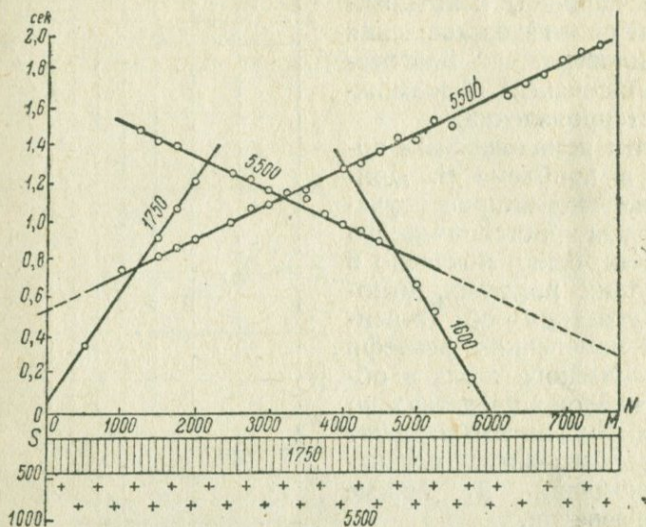


Рис. 167. Сейсмопрофиль у станции Батайск (по Н. Н. Самсонову).

В последнее время аналогичные работы, связанные с изучением рельефа кристаллического основания, проводились в Ленинградской области, где вследствие относительно неглубокого залегания кристаллического ложа в комплексе геофизических методов была использована также электроразведка постоянным током.

§ 25. МЕТОДИКА ПОИСКОВ И РАЗВЕДКИ НЕФТЕНОСНЫХ СТРУКТУР

Поиски и разведка геологических структур, связанных с нефтью, являются в настоящее время такой отраслью, в которой геофизические методы играют самую существенную роль. Поиски нефтеносных структур связаны с исследованием больших площадей и значительных глубин, что кроме большого срока, необходимого для проведения работ, требует огромной затраты средств и оборудования. Применение геофизических методов в значительной степени удешевляет стоимость разведки и ускоряет производство ее. В настоящее время при разведке нефтяных место-

рождений в любой стране имеет место применение геофизики. имеет огромное народно-хозяйственное значение. Поиски новых У нас в СССР при бурном росте нашего строительства нефть месторождений, а также разведка известных должны производиться в объеме, обеспечивающем быстрое введение в эксплуатацию новых площадей, увеличивающих общую добычу. В силу таких условий применение геофизических методов для поисков и разведки нефтяных месторождений у нас в СССР получило большое развитие и значение.

Нефтяные месторождения обычно приурочены к таким геологическим структурам, которые дают возможность концентрироваться нефти при тех или иных условиях ее образования. Главными формами таких структур являются антиклинальные поднятия, куполовидные складки, соляные купола, диапировые складки, надвиги и пр. В настоящем параграфе мы рассмотрим применение геофизических методов к поискам и разведке наиболее распространенных структур (соляные купола и антиклинали), так как прочие формы имеют небольшое развитие, а кроме того, на этих структурах геофизические методы почти не применялись.

Соляные купола

Возможность применения геофизики к поискам и разведке соляных куполов известна давно (с 1922 г.). Методами, служащими для этого, являлись преимущественно гравirazведка и сейсморазведка и только недавно стала применяться электроразведка на некоторых типах соляных куполов. При рассмотрении вопроса о применении того или иного метода необходимо различать поисковые работы и детальную разведку, вследствие различной методики работ, интерпретации и пр.

Поисковая геофизическая разведка соляных куполов обычно производится гравитационным или сейсмическим методами. Достаточная разность плотностей и скорости распространения упругих колебаний в соли и в окружающих ее породах, большая масса купола и т. д. создают достаточно благоприятные условия для применения этих методов.

В США поиски соляных куполов производятся преимущественно сейсморазведкой — гравirazведка имеет меньшее развитие. У нас в СССР, наоборот, поиски производятся исключительно гравirazведкой. Происходит это, главным образом, в силу того, что гравirazведка может быть применена лишь в местах с ровным рельефом. В местах со сложным рельефом применение гравirazведки затруднено и приходится применять более дорогой сейсмический метод.

У нас в СССР имеется огромный район, на площади которого расположено большое количество соляных куполов — это Урало-Эмбенский район с прилегающими к нему другими участками. Урало-Эмбенский район имеет исключительно благоприятные условия для применения гравirazведки.

По плотности породы района распределяются следующим образом:

Cr — песчано-глинистая толща	2,05
I — пески, глины	2,00
P — T — песчаники, глины	2,30—2,40
Соль	2,10—2,15

Таким образом, породы Урало-Эмбенского района можно подразделить на три серии:

- 1) верхнюю (Cr и I), с плотностью 2,00—2,05,
- 2) среднюю (P—T), с плотностью 2,30—2,40,
- 3) нижнюю (соль), с плотностью 2,10—2,15.

Это подразделение можно еще больше упростить и привести к двум группам пород:

- 1) породы Cr, I и соль с плотностью 2,00—2,15,
- 2) породы P—T с плотностью 2,30—2,40.

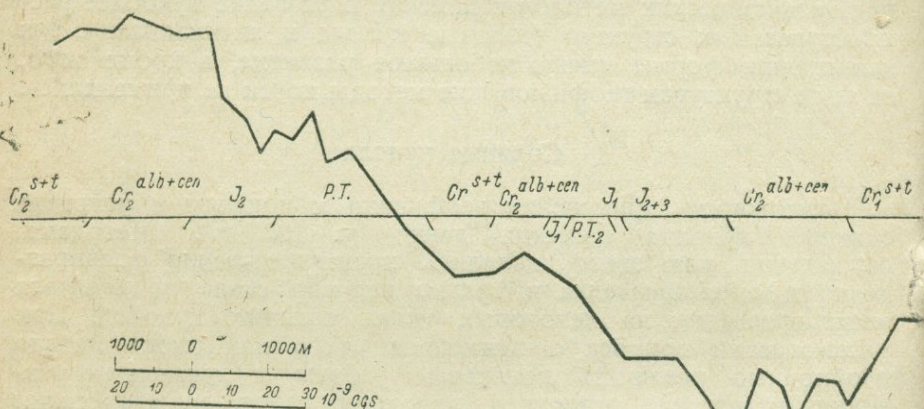


Рис. 168. График градиента силы тяжести над соляным куполом.

Действительно, различие плотностей пород на 0,10—0,15 существенного изменения в нормальное распределение силы тяжести, определяемой на поверхности, не внесет. Различие же на 0,3—0,4 при большой массе купола дает уже такую гравитационную аномалию, которую легко можно обнаружить существующими приборами.

Таким образом те места, где пермотриас прорывается соляным штоком или же где уменьшается мощность его за счет поднятия соляного массива, должны отмечаться пониженными значениями силы тяжести.

Для установления сети наблюдений при площадной поисковой съемке необходимо взять половинное расстояние между максимумом и минимумом изменения силы тяжести вдоль какого-либо профиля, проходящего через соляной купол.

На рис. 168 приведен такой профиль, снятый над соляным куполом в районе Северного и Южного Искине. Расстояние между максимумом и минимумом градиента силы тяжести, при-

мерно, составляет 8 км; следовательно, для обнаружения куполов такого типа расстояния между пунктами гравиметрических наблюдений не должны превышать 4 км. Направление маршрутов поисковой съемки определяются в начале работ ориентировочно, исходя из геологических наблюдений; в дальнейшем направление маршрута определяется результатами предыдущих данных: стремятся оконтурить области с минимумами.

В силу этого необходимо в поле вести предварительную обработку, иначе в дальнейшем придется вернуться к исследованию участков с аномальными значениями силы тяжести для детализации. В тех местах, где маршрутная съемка выявила сложную гравитационную картину, производят учащение пунктов наблюдений или приступают к площадной съемке участка (детальная съемка). Наблюдения при поисковой разведке ведут с помощью вариометров, производя маятниковые наблюдения лишь в небольшом количестве для получения опорных пунктов и для определения абсолютных значений силы тяжести. В результате такой съемки получается гравитационная карта района, по данным которой судят о наличии соляных куполов. Примером такой съемки может служить гравитационная карта Эмбенского района, приведенная на рис. 169.

Детальное изучение этой карты дает не только возможность обнаруживать соляные купола, но позволяет сделать вывод о геологическом строении района в целом и тем самым определить направление поисковых работ в дальнейшем. По карте можно выделить участки, где аномалии силы тяжести имеют отрицательные и положительные значения. Амплитуда колебаний аномалий в среднем по району одного порядка, что объясняется, очевидно, одинаковой средней величиной соляных ядер куполов, находящихся в зонах с отрицательными и положительными аномалиями. Кроме того, это указывает еще на одинаковую мощность соли по всему району, находящемуся севернее реки Эмбы. Южнее линии Косчагыл — среднее течение реки Эмбы — отмечается резкое уменьшение диапазона колебаний между соседними максимумами и минимумами силы тяжести, что, очевидно, следует приписать резкому уменьшению мощности соли.

Произведенные гравиметрические работы в районе ст. Озинки (не помещенной на карте) дают основание считать, что севернее железной дороги Саратов — Уральск также начинается выклинивание соли. Здесь, аналогично южной Эмбе, наблюдается «гравиметрический склон», на фоне которого отмечаются отдельные купола и поднятия, которые часто при маршрутной съемке не оконтуриваются изогаммами, а отмечаются лишь расхождением изогамм. На этих участках наблюдается увеличение мощности покрывающих соль пород, что создало благоприятные условия для образования соляных ядер, небольших по размеру, но с резко выраженным характером протыкания, приближающихся по форме к сахарной голове (Карачунгул, Сакрамбас и др.). Кроме таких куполов в этих условиях могут существовать купола с очень глубоко залегающей солью (Каратон).

Таким образом, мы видим, что гравиразведка дает достаточно ясные указания на присутствие соляных куполов и, кроме того, дает возможность делать заключения об общегеологическом строении всего района.

Для целей поисков соляных куполов может быть применена также и сейсморазведка. Действительно, скорость распространения упругих колебаний в соли обычно резко отличается от скорости в осадочных породах. Так, в Урало-Эмбенском районе скорости распределяются следующим образом:

Поверхностный слой	500—1000	м/сек
Меловые и юрские отложения	2000—2400	"
Пермтриас	2800—3200	"
Соль	4500—4800	"

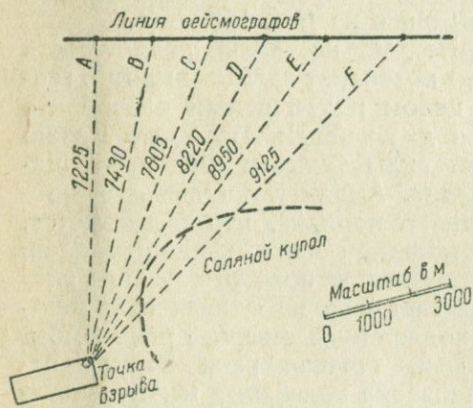
Если к этому мы прибавим, что исследуемый объект (купол) имеет достаточную протяженность, и если величина угла наклона крыльев купола невелика (что не всегда наблюдается), — то будет иметься возможность применения сейсмического метода.

Можно применять весьма различные способы расположения сейсмических профилей. Самым простым способом является ра-

диальный, заключающийся в том, что определяют скорости распространения упругих колебаний от точки взрыва до сейсмографов, расположенных вокруг или вдоль какой-либо линии (рис. 170). При наличии соляного купола в зоне действия взрыва, скорость распространения упругих колебаний будет отлична от нормальной для данного района. Расстояния от точки взрыва до сейсмографов берут, исходя из геологических данных (глубина

возможного расположения

Рис. 170. Расположение сейсмических профилей при разведке по вееру.



куполов). Можно произвести несколько взрывов в одной точке при разных расстояниях или расположениях сейсмографов.

Кроме того, можно применять способ непрерывного исследования участка обычными профилями или задавать их по сетке. Во всех этих способах на основании полученных скоростей и границ раздела можно определить наличие купола или поведение какого-либо геологического горизонта, которое иногда может определить направление дальнейшей разведки. С успехом может быть применен метод отраженных волн, фиксирующий отражающие горизонты, хотя и без качественной их характеристики. Вследствие этого методом отраженных волн пользуются для прослеживания поведения какого-либо опорного горизонта,

могущего доставить данные о наличии вблизи исследуемой точки соляных куполов. Несмотря на большое развитие этого метода в США для поисковых работ, у нас в СССР он применяется более для детальной разведки, так как задачу поисков с успехом разрешает более дешевая гравиразведка.

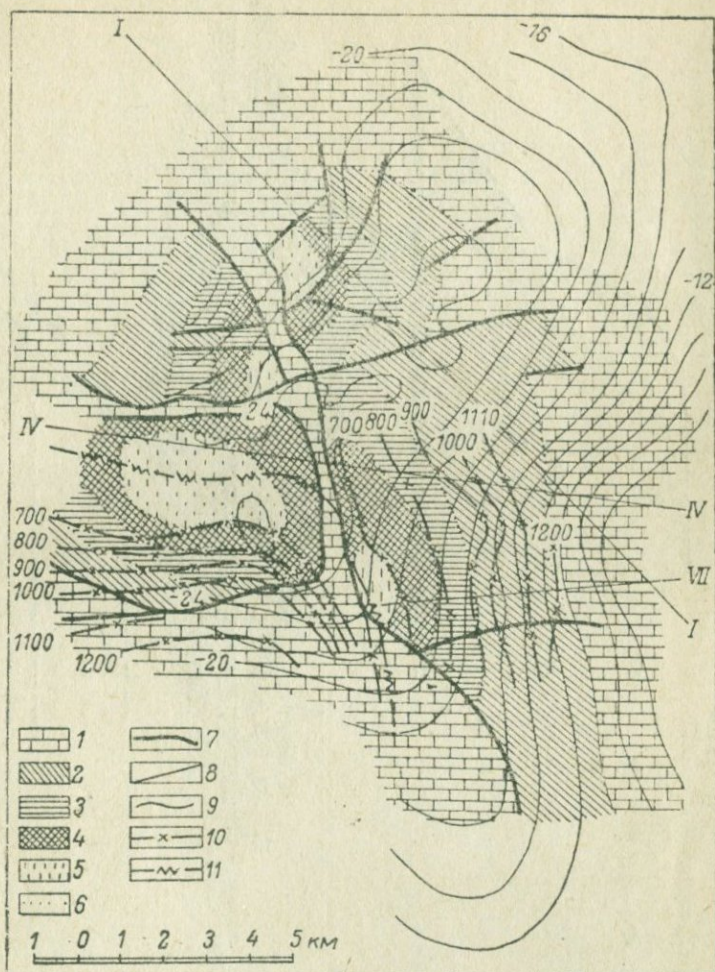
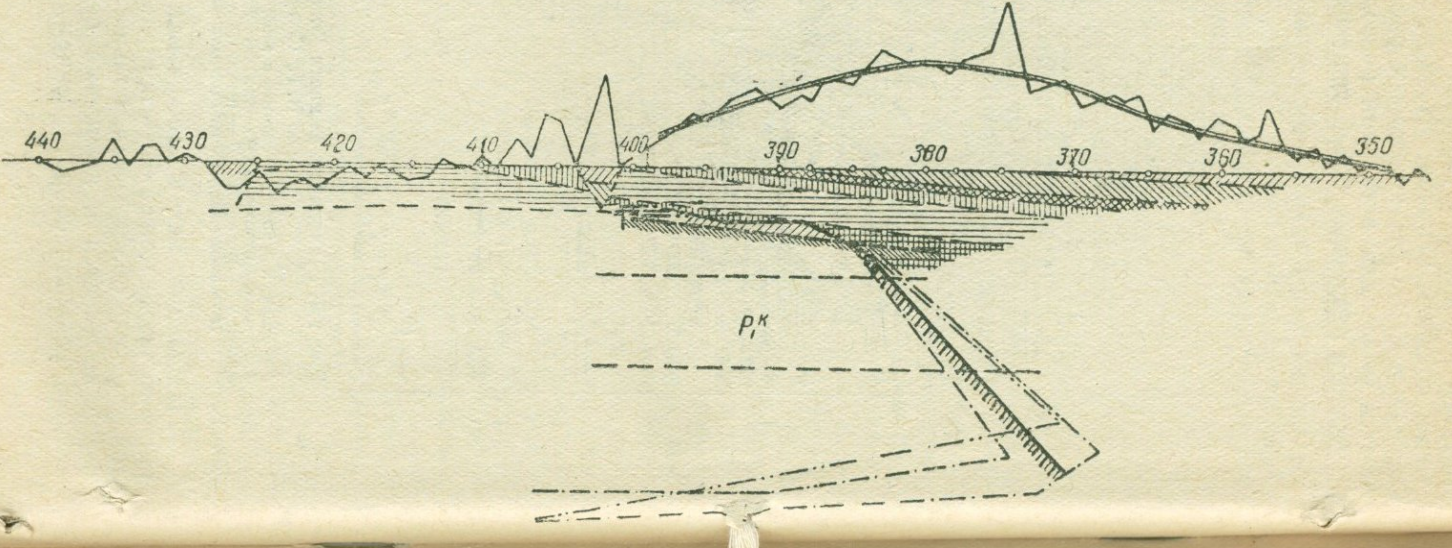
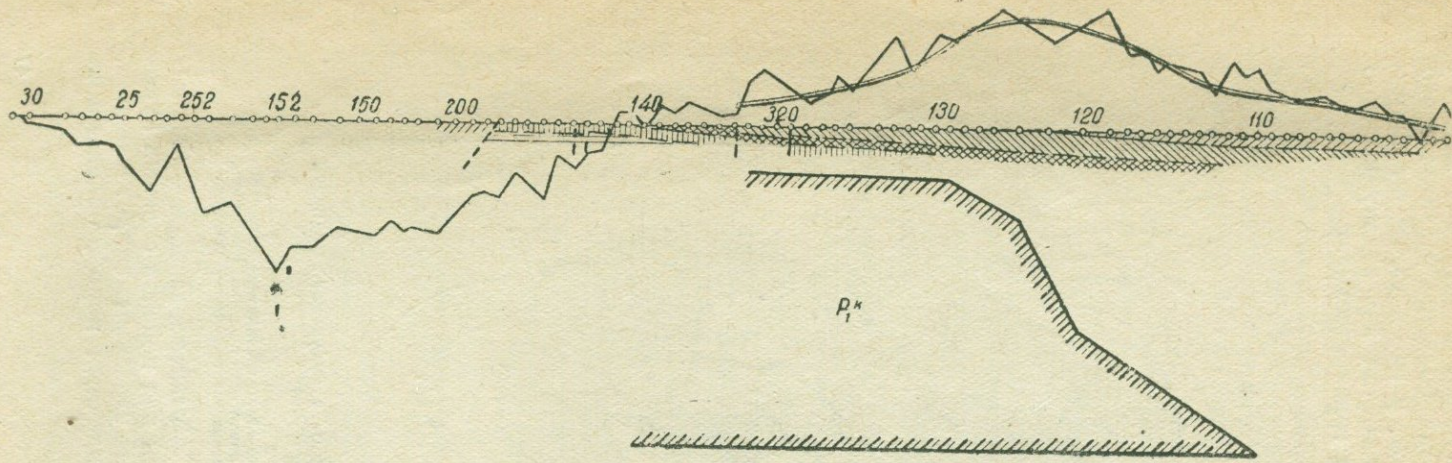


Рис. 171. Геологическая карта Доссор-Таскудукского поднятия (по В. П. Скворцову).

1 — сенон и турон; 2 — сеноман и альб; 3 — апт; 4 — неоком; 5 — юра; 6 — границы отложений; 7 — сбросы; 8 — линии гравиметрических профилей; 9 — изогаммы; 10 — изогипсы кровли соли по данным сейсмки; 11 — линии наибольшего сопротивления электрическому току.

Следующий метод геофизики — электроразведка — принципиально также может быть применен для поисков соляных куполов. Соль, обладающая большим удельным сопротивлением, резко выделяется в комплексе осадочных пород, обладающих обычно меньшим сопротивлением.



- 1 [diagonal lines]
- 2 [diagonal lines]
- 3 [cross-hatch]
- 4 [horizontal lines]
- 5 [horizontal lines]
- 6 [vertical lines]
- 7 [diagonal lines]
- 8 [vertical line with arrow]
- 9 [solid line]
- 10 [wavy line]
- 11 [dot]
- 12 [dashed line]
- 13 [dashed line]
- 14 [dashed line]
- 15 [dashed line]
- 16 [dashed line]

Варианты плотностей

	I	II	III
0,3	0,3	0,2	0,1
0,3	0,3	0,3	0,3
0,3	0,4	0,5	

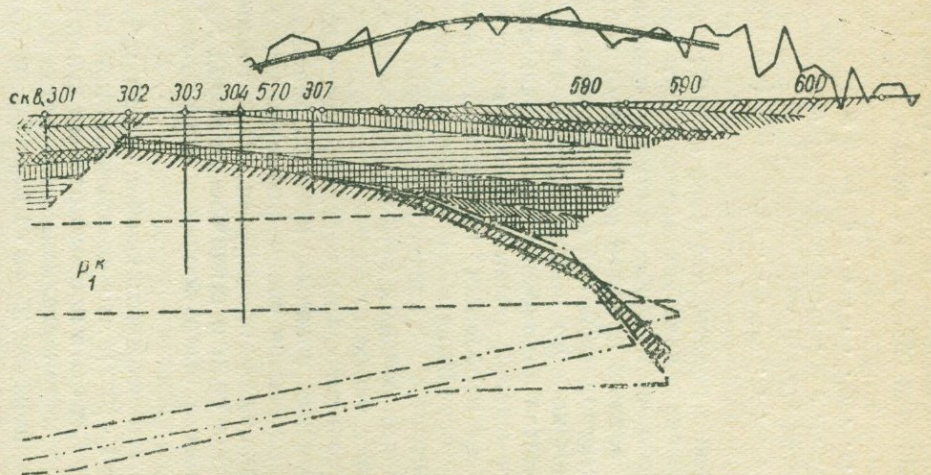
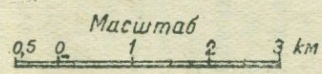


Рис. 172. Геологические разрезы месторождений Доссор-Таскудук, построенные на основании детальной гравиметрической съемки 1932 г. Профили I, IV и VII.

1 — сенон и турон; 2 — сеноман и альб; 3 — апт; 4 — неом; 5 — юра; 6 — пермо-триас; 7 — перм. (соль); 8 — разведочные скважины; 9 — кривая градиентов сглаженная; 10 — то же, наблюдаемая; 11 — вариометрическая точка; 12 — контур соли по сейсмике; 13 — то же, по гравитации; 14 — контур соли по гравитации, I вариант; 15 — то же, II вариант; 16 — то же, III вариант.

Так, для Урало-Эмбенского района удельные сопротивления пород распределяются следующим образом:

Наносы	5—10	$\Omega \cdot м$
Глины	1—6	$\Omega \cdot м$
Песчано-глинистые отложения	0,6—1	$\Omega \cdot м$
Соль	до 10^{15}	$\Omega \cdot м$ (практически ∞)

Из этого можно видеть, что соль является хорошим объектом для обнаружения электроразведкой, но применение этого метода затруднено чисто техническими условиями. При глубоком залегании соляных куполов необходимо применять и большие разности электродов (метод сопротивлений); это, в совокупности с наличием хорошо проводящего поверхностного слоя и большого количества водоносных и минерализованных горизонтов, требует применения очень сложной методики работ. При этом сравнительно небольшая производительность и большая стоимость работ ограничивают применение электроразведки для поисковых целей. Что же касается детальной разведки и в особенности неглубоких соляных куполов, то здесь электроразведку можно применять с успехом.

Последним геофизическим методом, который мог бы быть применен при поисках соляных куполов, является магниторазведка. Купола, благодаря своей форме, создают весьма благоприятные условия для применения магниторазведки; однако магнитные свойства соли и вмещающих пород не настолько отличны, чтобы можно было получить сколько-нибудь убедительные результаты.

Соль обладает ничтожным коэффициентом магнитной восприимчивости ($\kappa = 1 \cdot 10^{-6}$), что практически при подсчете магнитных аномалий может быть принято равным нулю. Коэффициенты κ осадочных пород не определялись, но есть данные, что эти породы имеют κ порядка $2—5 \cdot 10^{-5}$. Таким образом, соляной купол представляет собой диамагнитную массу, залегающую в слабомагнитной среде. На поверхности можно ожидать лишь слабые магнитные аномалии с понижением магнитного поля над соляным куполом. Эти выводы доказаны многими примерами: Шу в 1920, 1923 гг. в Мекленбурге, И. М. Бахуриным в Илецкой защите, Н. Н. Трубяччинским в Темирском районе и др. Что же касается глубины соляных куполов, при которой может еще быть заметна на поверхности земли магнитная аномалия, определяемая современными приборами (чувствительностью в $20—30 \gamma$), то расчеты показывают, что при глубине в 1000 м и больше купола не отражаются в магнитном поле и могут быть пропущены вовсе. Таким образом, магниторазведка, если и может быть применена к поискам соляных куполов, то только при неглубоком их расположении; при этом величины магнитных аномалий будут весьма незначительны.

Переходя к общему выводу о применимости того или иного геофизического метода к поискам соляных куполов, можно сде-

лать заключение, что с успехом могут быть применены гравиразведка и сейсморазведка, причем выбор одной из них зависит от топографии местности, условия залегания куполов, густоты распространения их и т. д. В частности, для Урало-Эмбенского района вполне оправдывает себя гравиразведка, которой и пользуются при поисковых работах в настоящее время.

Обратимся теперь к детальной разведке соляных куполов. Перед разведкой ставятся следующие задачи: 1) определение конфигурации купола, 2) определение характера падения крыльев его, 3) глубина залегания вершины купола и отдельных его частей, 4) прослеживание сбросов и др. Современному положению в выборе геофизического метода для детальной разведки предшествовало достаточное количество опытных и производственных работ. На основании их можно сделать вывод, что разрешить вопросы, стоящие перед геофизикой, ни один геофизический метод самостоятельно не может. Необходимо применение комплекса методов, определение которого устанавливается из анализа задач, стоящих перед геофизикой, и из геологического строения участка. Обратимся поэтому к рассмотрению тех результатов, которые можно получить, применяя тот или другой метод для детального исследования купола, иллюстрируя это примерами из практики работы в Урало-Эмбенском районе.

После обнаружения соляного купола каким-либо способом (гравиразведкой при маршрутной съемке или другим методом) необходимо точно определить расположение его. Для этого можно применить детальную гравитационную съемку участка с достаточно густым расположением пунктов наблюдений. Практически установлено, что точки по профилю надо брать через 500—1000 м с учащением в местах сбросов и нарушений до 150—250 м. Расположение профилей и их количество зависят от формы купола, величины его, наличия сбросов и пр.

В результате съемки строится карта изогамм, по которой судят о форме купола. Такая карта приводится на рис. 171 для месторождения Доссор. На ней можно заметить, что в общем изогаммы совпадают с геологической картой и лишь в отдельных местах расходятся с геологическими данными. Последнее происходит, очевидно, из-за несоответствия тектоники, проявляющейся на поверхности, с глубинной тектоникой, которой именно и соответствуют данные гравиразведки. С другой стороны, на результаты гравиразведки может действовать неравномерность значений плотностей в перекрывающих соль породах. Во всяком случае, в общем виде форма купола получена с той или иной степенью совпадения с истинной.

Чрезвычайно важную роль играет знание плотностей пород, слагающих данный участок. К сожалению, они не сохраняют своего постоянства с глубиной, почему к определению разрезов по гравитационным данным можно подойти лишь приближенно. Так, для трех профилей на месторождении Доссор-Таскудук (I, IV и VII — рис. 172) приведены геологические разрезы, причем при построении исходили из тех соображений, что у соли

(остающейся с глубиной постоянной) с примыкающими к ней породами наблюдается изменение разности плотностей с глубиной. Вычисления производились для трех вариантов:

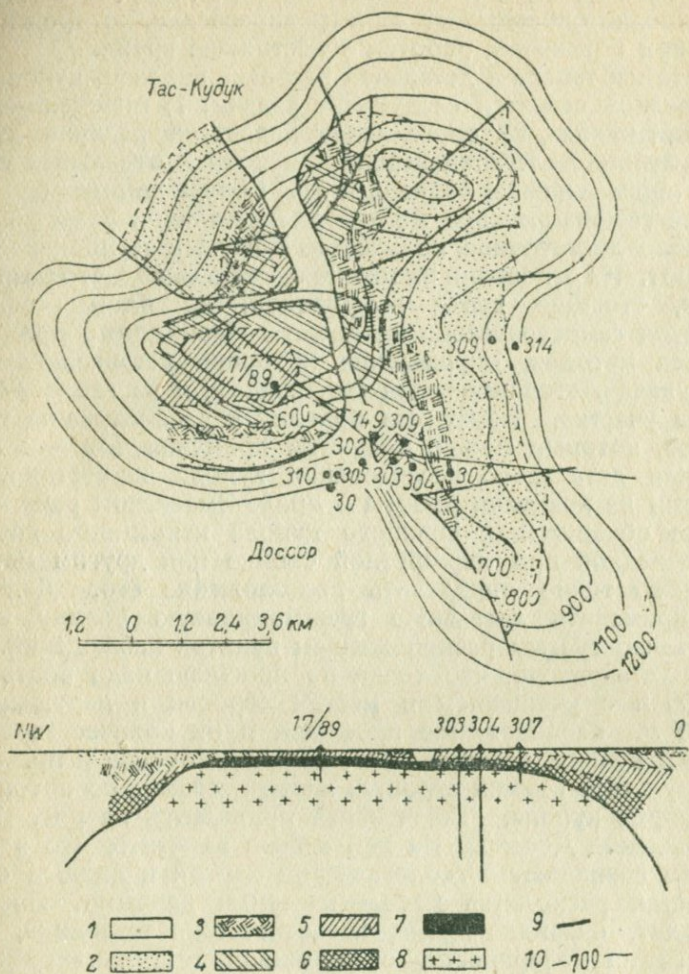


Рис. 173. Карта изогипс кровли соляного купола Доссор по данным гравиразведки.

1 — сенон и турон; 2 — сеноман и альб; 3 — апт; 4 — неоком; 5 — юра; 6 — пермо-триас; 7 — каменная шляпа; 8 — каменная соль; 9 — тектонические нарушения; 10 — кровля соли по гравиметрии.

1) разность плотностей соли и окружающих пород с глубиной одинакова,

2) разность плотностей медленно возрастает по зонам (указанным на рисунке пунктиром), начиная с 0,2 и доходя до 0,4,

3) то же, что во втором варианте, но при разности плотностей от 0,1 до 0,5.

Можно заметить, что расхождения имеются как в определении мощности соляного массива, так и в характере крыльев купола, формы их и т. д. Такие же данные можно привести и по другим месторождениям; таким образом, использовав данные гравirazведки, определить отдельные элементы купола можно лишь с некоторой степенью точности. Основываясь на таких данных, можно построить карту рельефа кровли соляного купола, которая может служить основой для дальнейших работ по исследованию его бурением (например, по месторождению Доссор — рис. 173). Разрешением этих вопросов применение гравirazведки при детальной разведке и ограничивается.

Как мы упоминали выше, сейсморазведка также применяется при детальной разведке куполов. Но для сейсморазведки ограничивающим фактором для применения являются небольшие углы наклона пластов, почему соляные купола с крутыми углами падения крыльев представляют довольно сложный объект исследования. Однако во многих случаях сейсморазведка достигла хороших результатов, а введение в производство с 1936 г. метода отраженных волн еще больше утвердило этот метод разведки в Урало-Эмбенском районе.

Так, для месторождения Доссор построена карта изогипс кровли соляного ядра (рис. 174), достаточно точно соответствующая тем данным, которые в настоящее время имеются по этому месторождению. Другим примером могут служить работы на месторождении Шубар-Кудук (рис. 175) и т. д.

Однако чрезвычайно важный вопрос расчленения осадочных пород и, главным образом, юрских и меловых отложений не может быть разрешен сейсмическим методом преломленных волн (по скорости упругих колебаний юрские и меловые отложения не отличаются друг от друга). Так, например, по годографам, полученным на месторождении Шубар-Кудук (рис. 175) можно отметить лишь следующие горизонты: 1) верхние пески и глины со скоростью 500—1800 м/сек, 2) осадочные породы юрского и мелового возраста — пески и глины со скоростью 1800—2000 м/сек, 3) пестроцветная толща, состоящая из песчаников, мергелей и плотных глин (скорость 2400—2800 м/сек) и 4) соль со скоростью 4500—5000 м/сек.

Тут на помощь приходит метод отраженных волн, с успехом разграничивающий почти каждый пласт независимо от соотношения скоростей. Главная задача, стоящая перед разведчиками, — выделение песков нижней толщи юрских пород, являющихся эксплуатационным пластом, из комплекса других отложений юры и мела, — решается, главным образом, с помощью отраженных волн. Кроме того, этот метод дает большинство тех же данных, что и метод преломленных волн, при меньшей стоимости разведки. Совокупность этих данных заставляет отдавать предпочтение методу отраженных волн перед методом преломленных волн, а также и перед другими геофизическими методами.

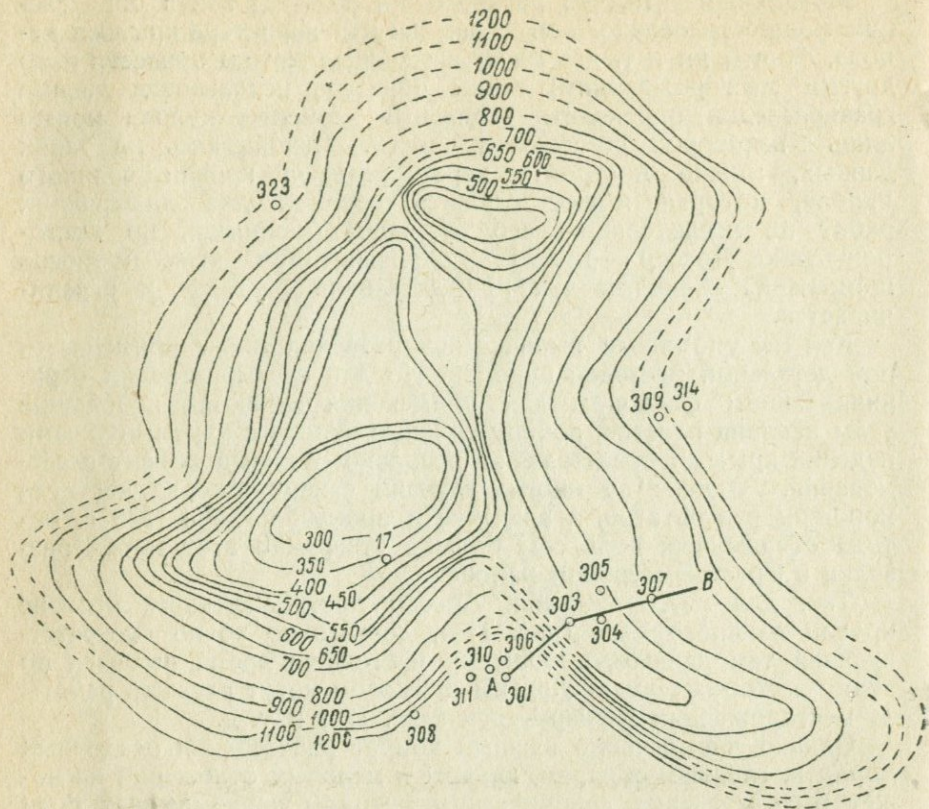


Рис. 174. Форма соляного ядра месторождения Доссор по данным сейсмо-разведки.

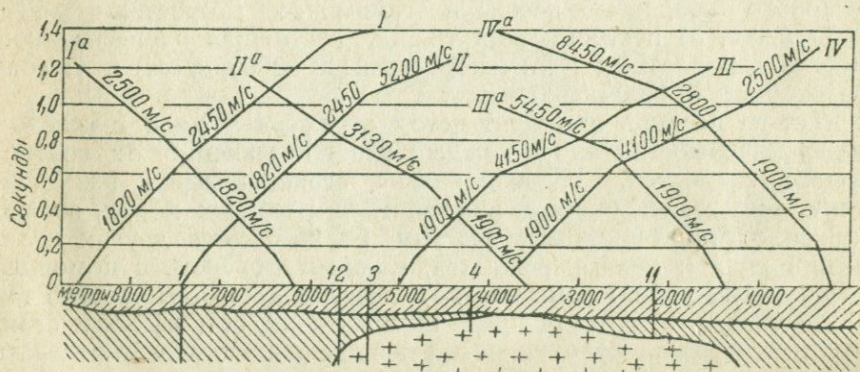


Рис. 175. Годографы и геологический разрез месторождения Шубар-Кудук (по С. Ф. Больших).

Что касается электрических методов, то они большого развития при детальной разведке куполов не получили. Специфические особенности района, о которых мы указывали выше, заставляют применять достаточно сложную методику работ, удорожающую стоимость разведки и дающую те же результаты, что и ранее рассмотренные методы. Электроразведка была поставлена на месторождениях Черная Речка, Южное Искине, Тюлюс

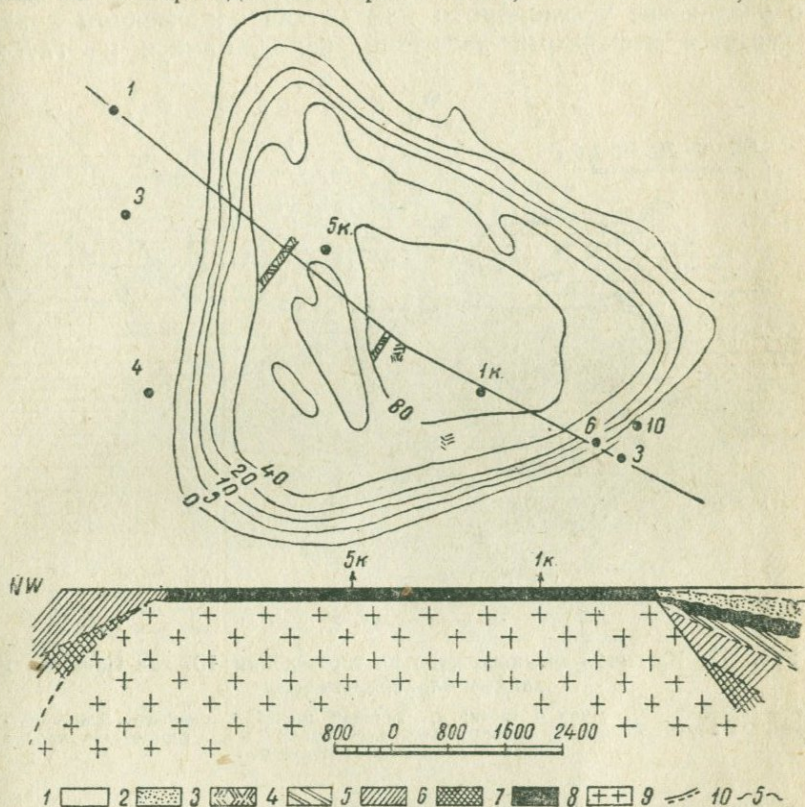


Рис. 176. Карта изоом на месторождении Черная Речка.

1 — сенон и турон; 2 — сеноман и альб; 3 — апт; 4 — неоком; 5 — юра; 6 — перм-триас; 7 — каменная шляпа (гипсо-ангидридовая шляпа); 8 — соль; 9 — тектонические нарушения; 10 — изоомы.

и др. На основании этих работ можно сделать заключение, что электроразведку можно применять на куполах, залегающих на глубине 300—400 м. Результаты могут быть представлены в виде карты изоом или в виде изогипс кровли соляного купола.

На рис. 176 приведена карта изоом месторождения Черная Речка; купол оконтуривается достаточно точно изоомами повышенного сопротивления.

На рис. 177 приведена карта изогипс месторождения Южного Искине; последующими буровыми работами глубина залегания и форма соляного купола подтвердились полностью.

Есть основание рассчитывать на возможность расчленения надсолевых толщ электроразведкой, но этот вопрос требует дополнительных исследований и опытной проверки на известных объектах.

В заключение необходимо остановиться на методе газовой съемки, получающей в настоящее время развитие при детальной разведке отдельных месторождений. Исследования показывают, что увеличение углеводорода или метана в почвенном воздухе вызывается нефтяными залежами, находящимися на глубине.

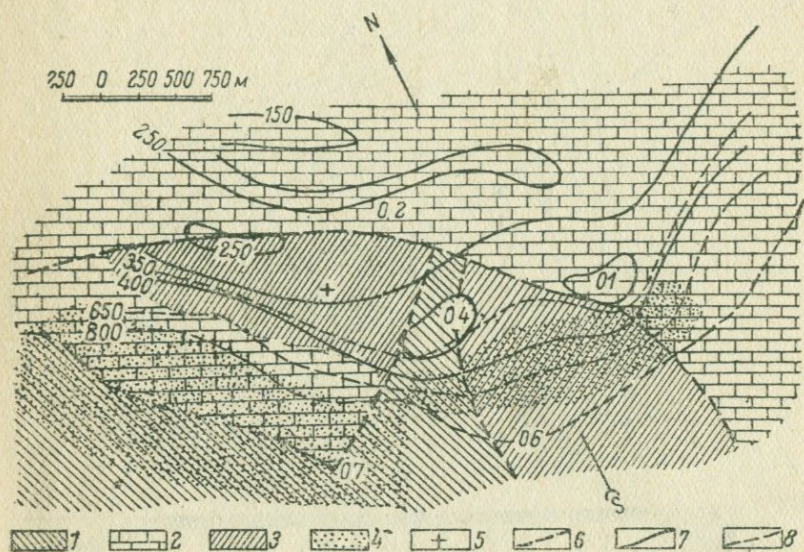


Рис. 177. Изгибсы соляного ядра месторождения Южное Искине по данным электроразведки.

1 — палеоген; 2 — сенон и турон; 3 — сеноман и альб; 4 — наиболее благоприятный для нефти район; 5 — выходы нефти; 6 — сбросы; 7 и 8 — горизонталы кровли купола по данным электроразведки.

Если это так и такая закономерность будет замечаться во всех условиях, то газовая съемка должна получить исключительное значение как единственный метод, определяющий с поверхности нефтеносность того или иного участка. Те немногочисленные работы, которые проведены сейчас на различных месторождениях нашего Союза (в том числе и Урало-Эмбенского района), пока говорят за правильность данной теории. Однако обобщать это заключение на все месторождения нефти пока преждевременно и еще требуется дальнейшее накопление фактического материала, проверенного последующими геолого-разведочными работами. Для иллюстрации на рис. 178 приводим результаты газовой съемки на месторождении Шубар-Кудук; здесь все продуктивные скважины расположены на площади с увеличенным содержанием углеводородов в почвенном воздухе (заштрихованное пространство).

Из приведенного выше рассмотрения результатов, которые получаются в процессе применения того или другого метода к детальной разведке соляных куполов, можно сделать следующий вывод: для производства детальной съемки зон минимума силы тяжести, соответствующих соляным куполам, необходимо

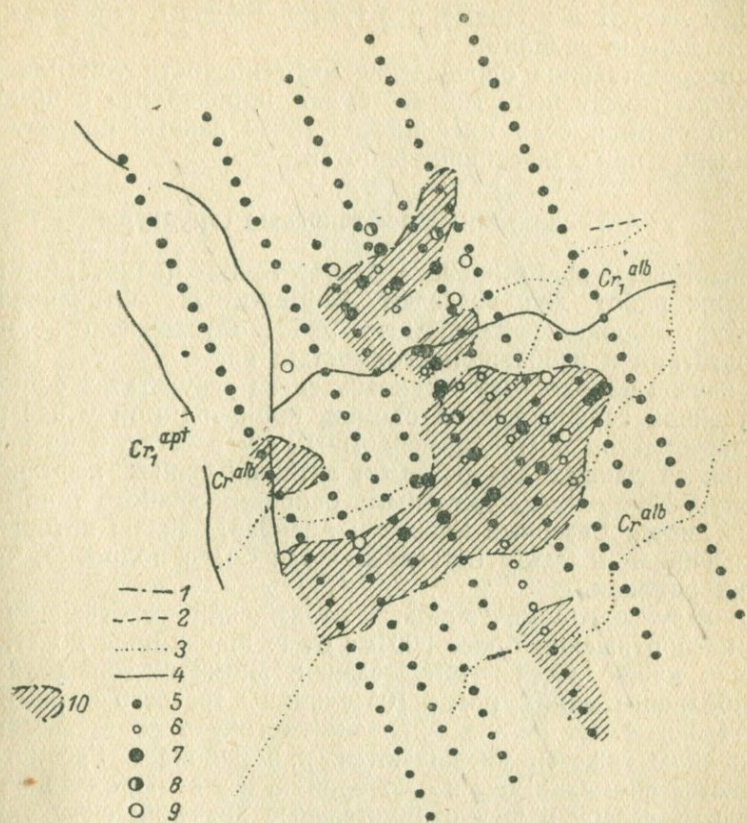


Рис. 178. Результаты опытной газовой съемки 1934 г. на месторождении Шубар-Кудук.

1 — геологические границы; 2 — граница повышенных содержаний углеводородов; 3 — сомнительные места сброса; 4 — сбросы; 5 — проанализированные точки отбора газовых проб; 6 — то же, непроанализированные; 7 — продуктивные глубокие скважины; 8 — глубокие скважины с признаками нефти; 9 — пустые глубокие скважины; 10 — участки максимального содержания углеводородов.

применять вариометрическую съемку, в результате которой определяется форма купола, его общий характер, тектонические нарушения в покрывающих соль породах, а при достаточно известных плотностях вмещающих пород — и глубина свода, угол падения крыльев и т. д.

Сейсморазведка преломленными волнами может установить местоположение, характер кровли купола, глубину сводовой его части. Но оба эти метода не пригодны для освещения боковых частей соляного штока и строения нарушенных частей осадочной

толщи, столь важных для выявления возможного нефтенакпления. Эта задача может разрешаться методом отраженных волн, для которого в этом отношении имеются большие возможности.

Что же касается электроразведки, то она может применяться лишь на куполах, неглубоко залегающих от дневной поверхности, и дает те же данные, что гравиразведка и сейсморазведка преломленными волнами.

Непосредственное определение нефтеносности той или иной структуры может быть можно будет производить с помощью газовой съемки, если имеющиеся сейчас данные получат подтверждение при дальнейших работах.

Антиклинальные нефтеносные структуры

В настоящее время проведено достаточное количество геофизических работ для разведки нефтеносных антиклинальных структур; широкое развитие этих работ обусловлено хорошими результатами и небольшой стоимостью их.

В начале необходимо остановиться на результатах общегосударственной геофизической съемки, производимой у нас в Союзе повсеместно по определенному плану и сетке, и на использовании ее данных для разведки антиклинальных нефтеносных структур. Наиболее характерными районами данного типа разведок являются Северный Кавказ и Азербайджан, на которых мы в дальнейшем и будем останавливаться более подробно, чем на других районах.

По результатам маятниковых наблюдений на Северном Кавказе на протяжении более 300 км от г. Махач-Кала до ст. Прохладная наблюдается отрицательная аномалия силы тяжести с наибольшим минимумом в 104 единицы третьего знака в районе Темиргой. От него к западу и востоку отрицательные значения силы тяжести уменьшаются, и в районе г. Грозного наблюдается аномалия уже в —57 единиц, а у ст. Прохладная —55 единиц. К северу и югу отрицательные значения силы тяжести уменьшаются, причем в южной части быстрее, чем в северной. Таким образом, вся площадь, на которой наблюдаются нефтепроявления в этом районе, находится в зоне отрицательных значений силы тяжести.

Такая же картина наблюдается и в районе г. Баку, где гравиметрическая депрессия охватывает не только Бакинский район и Апшеронский полуостров, но и низовья реки Куры, Кабристан и др. Здесь амплитуда аномалии достигает 200 единиц (+ 76 у Белясувар и —127 на о. Жилом), причем в южной части наблюдаются наибольшие изменения силы тяжести (до 0,003 на 1 км, рис. 179).

Аналогичные отрицательные аномалии наблюдаются и в других районах Советского Союза — Кубань, Ферганская долина, западный склон Урала (полоса Стерлитамак — Чусовские горки — район Ухты) и др., а также в районах нефтяных месторождений Тексаса, берега Мексиканского залива и т. д. При

существующем толковании гравитационных данных, отрицательные аномалии силы тяжести необходимо связывать с глубоким погружением кристаллических пород в месте аномалии и с обильным накоплением здесь осадочных рыхлых образований. Последние факторы являются благоприятными для скопления органических остатков, а также и для образования повторной

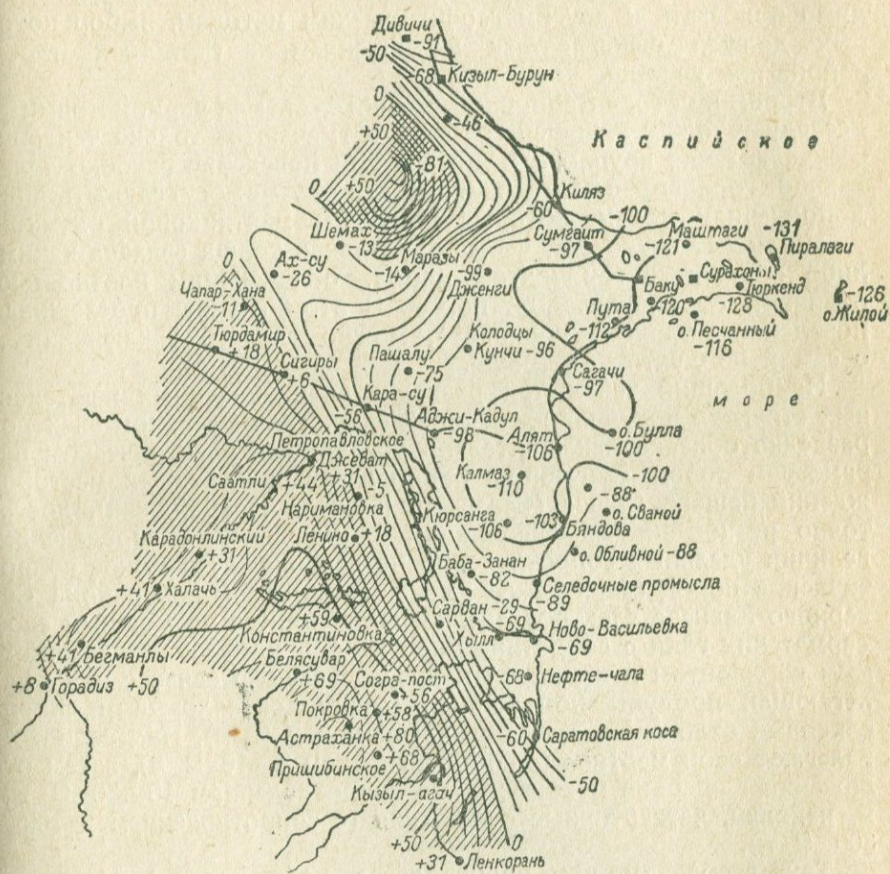


Рис. 179. Маятниковая съемка восточного Азербайджана (по данным НГРИ).

складчатости, что в совокупности друг с другом дает предпосылки для нефтеобразования. Такое толкование не подвергалось еще детальному изучению, но уже и сейчас можно заметить, что имеющиеся примеры совпадения районов с отрицательными значениями аномалии силы тяжести и участков с выявленными нефтепроявлениями не случайны и могут быть использованы для направления дальнейшей разведки в этих районах. Более подробное изучение карт маятниковой съемки указывает, что поверхностные и местные геологические влияния не сказываются на

данных маятниковых наблюдений. Так, на Апшеронском полуострове (рис. 179) складки, пересекающие полуостров, совершенно не отображаются. Это указывает на то, что результаты маятниковых наблюдений необходимо расценивать как отображение глубинных горизонтов, но отнюдь не поверхностных и местных структур. В связи с этим маятниковой съемкой невозможно пользоваться для детальной разведки района, а необходимо прибегать к другим геофизическим методам, выбор которых должен основываться на физических свойствах пород района или участка.

Второй вид гравитационной съемки — съемка вариометрами — исследует толщу меньшей глубины. Отмечаются только тектонические явления крупного масштаба или поведение глубоко залегающих горизонтов плотных пород; эти данные могут служить лишь дополнением к тем, которые получены маятниковой съемкой.

Но может случиться, что продуктивная толща связана каким-либо образом с горизонтом пород, обладающим плотностью, отличной от окружающих пород. В этом случае, прослеживая поведение опорного горизонта, можно сделать заключения и о самой продуктивной толще.

Наибольший успех при разведке антиклинальных нефтеносных структур получила электроразведка. Таким успехом электроразведка обязана исключительно устойчивым электрическим параметрам пород, слагающих район главных нефтяных месторождений нашего Союза (Северный Кавказ, Азербайджан), достаточно резкой их дифференциации и удачному распределению величин удельных сопротивлений по вертикали (удельное сопротивление пород сверху вниз уменьшается). Так, для района Северного Кавказа электроразведка производится на мощный слой сарматских глин с сопротивлением 2—4 Ω м, являющийся опорным горизонтом и имеющий непосредственную связь с ниже залегающей продуктивной толщей (спаниодонтелловые и спириталисовые отложения с сопротивлением в 2 Ω м). Над сарматом залегают слои меотиса (с сопротивлением 5—10 Ω м), затем отложения апшерона и акчагыла (с сопротивлением 10—30 Ω м), и, наконец, четвертичные отложения (с сопротивлением в 100—300 Ω м).

Таким образом, при производстве работ электроразведкой методом сопротивлений на основе получаемой карты изом можно судить о наличии и расположении антиклинальных поднятий, к которым и приурочены месторождения нефти этого района: места антиклинальных поднятий отмечаются уменьшением сопротивлений, синклинали же увеличением. На рис. 180 приведена электрическая карта района Грозный — Орджоникидзе, на которой с достаточной четкостью можно обнаружить места приближения лучше проводящих пород к поверхности и, наоборот, места удаления их на большую глубину. Зная вышеуказанную закономерность в сопротивлениях пород, по полученной карте можно сделать следующие заключения.

1. Старые и новые нефтепромыслы связаны тектонически

между собой, но к западу и востоку антиклиналь, на которой расположены эти нефтепромыслы, не имеет продолжения. Предполагаемое поднятие оси складки в районе горы Таш-Ка (между старыми и новыми промыслами) не наблюдается, а даже, наоборот, по ходу кривых сопротивлений можно говорить скорее о сбросе.

2. Оконтурены Сунженская и Гудермеская антиклинали.

3. Отвергнуто предположение о наличии на равнине Назман какой-либо складки.

4. Долина реки Сунжи представлена зоной высокого сопротивления, соответствующими синклиналиям Аргунской, Слепцовой, Владикавказской и т. д.

Все эти заключения получили достаточное подтверждение во время дальнейших работ и в производимой буровой разведке. Методика работ заключалась в производстве электропрофилеирования двумя разносами (АА¹М В¹В) вдоль заранее намеченных линий с необходимой густотой наблюдений на профиле. Выбор разносов проводился по обычным правилам, применяемым при разведке глубоких структур, для чего необходимо было производство ряда электроразведочных работ (последние делались иногда и для освещения вертикального разреза участка).

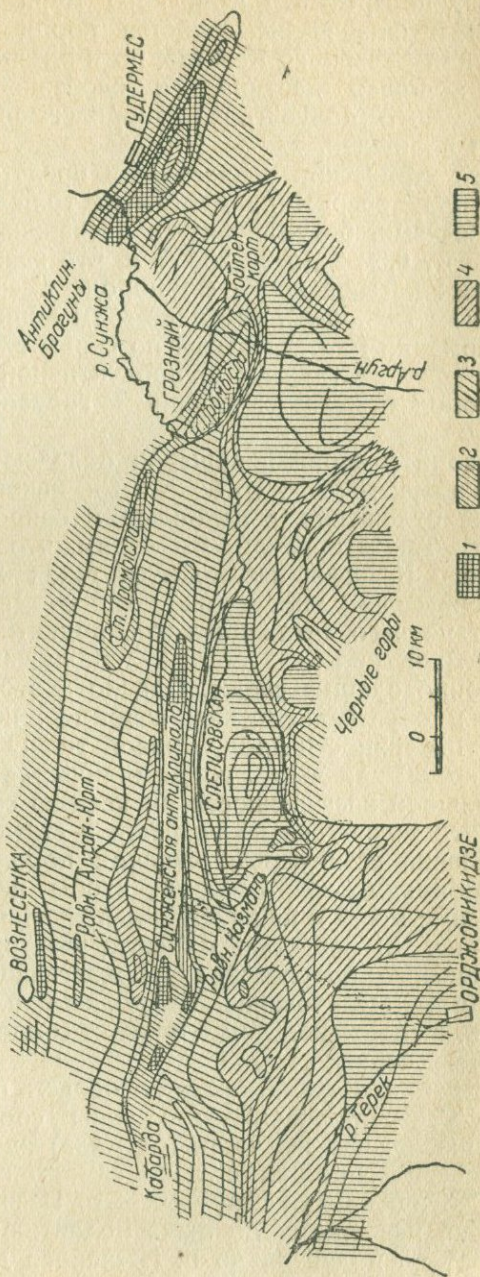


Рис. 180. Электрическая карта района Грозный — Орджоникидзе.

1 — сопротивления до 5 э. м.; 2 — то же, 5 — 10 э. м.; 3 — то же, до 30 э. м.; 4 — то же, 30 — 100 э. м.; 5 — выше 100 э. м.

Исследование нефтеносности в Азербайджане велось также на весьма большой площади: Апшеронский полуостров, равнина р. Куры, побережье Каспийского моря и т. д. Геологические условия и физические свойства пород несколько отличаются от условий Северного Кавказа, но и здесь также получена достаточно хорошая картина, — в особенности по исследованию Апшеронского полуострова и прилегающих к нему непосредственно площадей.

Геоэлектрический разрез здесь представляется в следующем виде (снизу вверх): продуктивная толща, представленная глинами, песками, битуминозными песчаниками, обладает сопротивлением от 0,5—2 до 3—200 Ω м, что зависит от наличия нефти и степени насыщенности ею пород. Сверху она перекрывается акчагылом (плиоцен), затем нижним апшероном. Эти последние две формации не отличаются по своим электрическим свойствам друг от друга, а также и от продуктивной толщи; комплекс всех этих пород и является опорным горизонтом для электроразведки.

Средний и верхний апшерон обладают несколько большим сопротивлением (от 3 до 30 Ω м) и, наконец, следуют постплиоценовые отложения, с наибольшим сопротивлением (20 Ω м и больше). Таким образом, мы видим, что здесь, как и в районе Северного Кавказа, наблюдается такая же благоприятная для электроразведки последовательность сопротивлений пород, вследствие чего антиклинальные поднятия должны сказываться на электрической карте как приближающиеся к поверхности электропроводящие среды. Однако в этом районе может получиться и обратная картина, например, при неглубоком залегании от поверхности продуктивной толщи или при выходе ее на поверхность; при достаточном количестве нефтеносных песков и при большой насыщенности их нефтью сопротивление опорного горизонта может сильно возрасти и стать даже больше, чем сопротивление всех перекрывающих пород. При интерпретации это необходимо иметь в виду, чтобы не пропустить наиболее интересные места и не впасть в неправильное толкование данных.

На рис. 181 представлена карта электрических сопротивлений Апшеронского полуострова с прилегающими к нему морскими участками. Исследование ее должно заключаться, в первую очередь, в отыскании зон с малыми сопротивлениями. Таких зон на карте несколько.

1. В районе Кала—Тюркенд — область с сопротивлением менее 1 Ω м. Северная часть этой зоны соответствует известному поднятию, южная же часть (от Кала) является либо продолжением северного поднятия, либо самостоятельным поднятием.

2. Сабунчи—Сураханы—Зых — о. Песчаный. Зона, соответствующая известному до Зыха поднятию; дальнейшего продолжения этого поднятия до о. Песчаного до постановки электроразведки известно не было.

3. Район к северу от Мардакяны, соответствующий лишь предполагавшемуся поднятию.

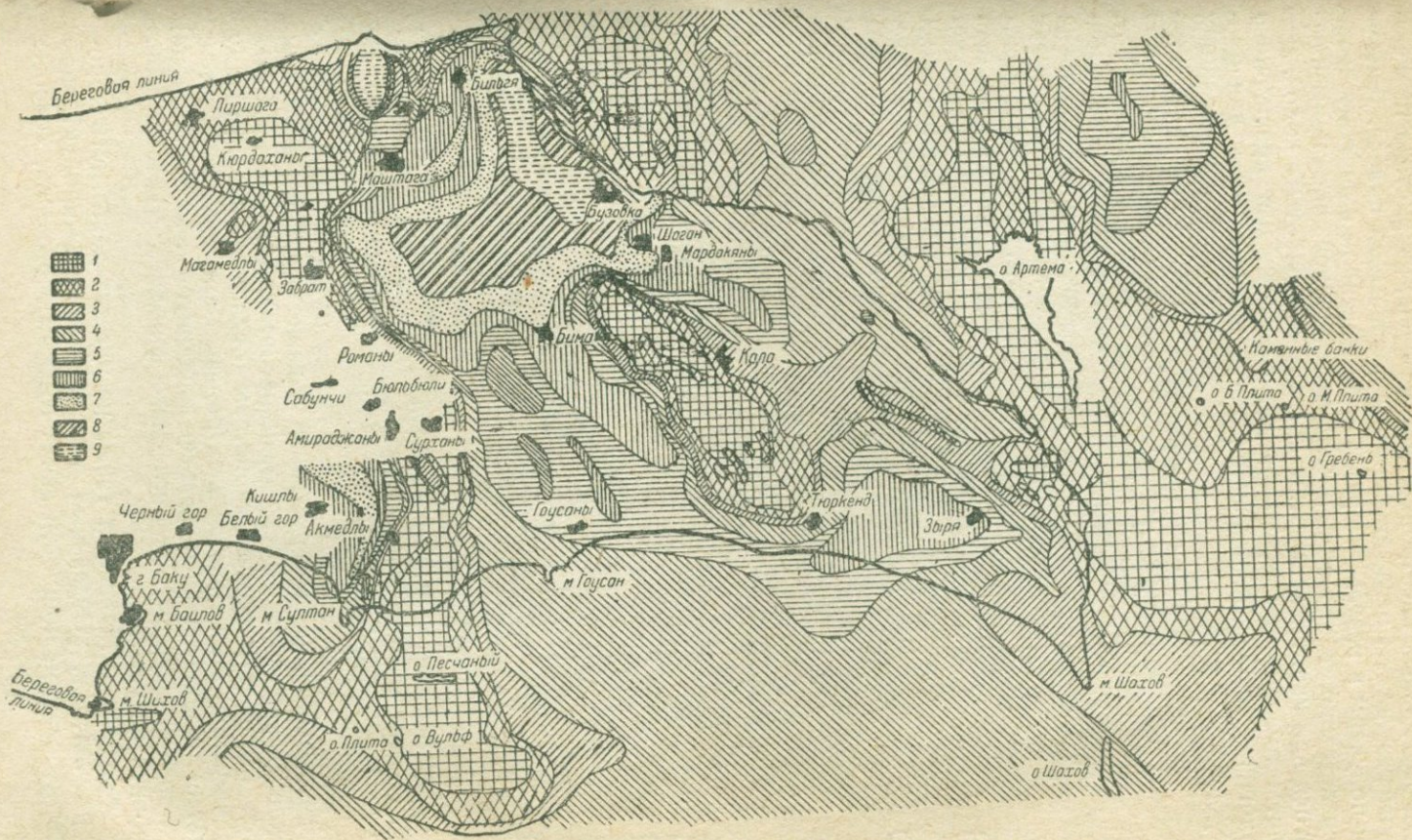


Рис. 181. Карта электрического сопротивления Апшеронского полуострова.

1 — до 1 Ω м; 2 — 1—1,5 Ω м; 3 — 1,5—2 Ω м; 4 — 2—3,5 Ω м; 5 — 3,5—5 Ω м; 6 — 5—10 Ω м; 7 — 10—25 Ω м; 8 — 25—50 Ω м; 9 — выше 50 Ω м.

Кроме данных электроразведки на суше, на рисунке представлены результаты исследования и в прибрежной полосе. Данные эти получены в результате работы, проведенной с берега или непосредственно в море с помощью оборудования, применяющегося при кароттаже, или же посредством работы с лодок. Эти работы имеют исключительное значение как для правильного геологического освещения прибрежной полосы, так и для прослеживания уходящих под море нефтеносных структур.

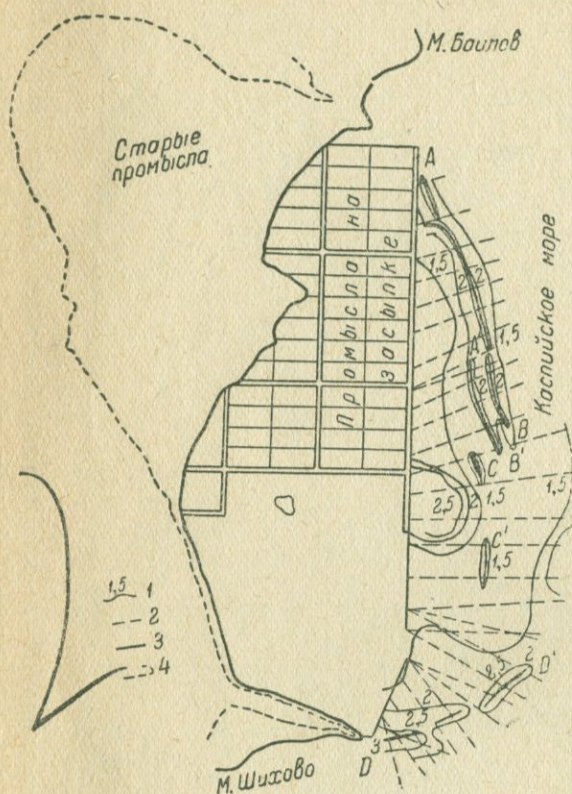


Рис. 182. Карта изомм бухты Биби-Эйбат.

1 — кривые равного сопротивления; 2 — электропрофили в море; 3 — расположение известняков в море; 4 — граница известняков на суше.

Однако имеется ряд районов, где применение электроразведки не дает таких хороших результатов. Так, в районе Чусовских Гордовок нефтепроявления связываются с поднятиями брахиоподовых известняков, которые служат в данном районе объектом поисков и разведок. Перекрывающие их ангидриты не отличаются по электрическим свойствам от известняков, почему и расчленение этих пород электроразведкой не достигается. Может быть получен лишь рельеф ангидритов и места подъема этой породы; соответствие последнего с подъемом известняков установить не удается.

На территории Майнефти также не удается достигнуть хороших результатов. Отдельные перемежающиеся продуктивные пласты небольшой мощности заключены в отложениях, которые

под море нефтеносных структур. Как пример таких работ, мы укажем на разведку поднятия в районе бухты Биби-Эйбат (рис. 182), где необходимо было проследить выходы известняков, ограничивающих складку под морем. Этим самым определялись направление и размеры площади засыпки бухты для производства разведки и эксплуатации месторождения. Работы были выполнены удачно; дана ясная и четкая картина расположения данного месторождения.

Однако имеется ряд районов, где применение электроразведки не дает таких хороших результатов. Так, в районе Чусовских Гордовок нефтепроявления связываются с поднятиями брахиоподовых известняков, которые служат в данном районе объектом поисков и разведок. Перекрывающие их ангидриты не отличаются по электрическим свойствам от известняков, почему и расчленение этих пород электроразведкой не достигается. Может быть получен лишь рельеф ангидритов и места подъема этой породы; соответствие последнего с подъемом известняков установить не удается.

не отличаются друг от друга по своим электрическим свойствам; косвенных признаков, которые можно было бы увязать с поведением продуктивной толщи, также не замечено.

Из других методов, применяющихся для разведки нефтеносных антиклинальных структур, необходимо остановиться на магниторазведке.

Вследствие незначительной разности магнитной восприимчивости пород, слагающих антиклинальные структуры, и окружающей их среды наблюдаются лишь незначительные аномалии, весьма трудно улавливаемые. Поэтому магниторазведка не везде дала хорошие результаты и применение ее чаще всего ограничивается решением частных задач (прослеживание тектонических нарушений, сбросов и т. д.). Из немногих магниторазведочных работ хорошие результаты достигнуты в районе Алятской гряды (Азербайджан), где отмечается приближение к поверхности продуктивной толщи, в районе Нефт-Чала, Ахзервира и немногих других (также в Азербайджане).

Из других районов необходимо отметить наличие магнитных аномалий в районе Краснокамска, где долгое время они оставались без внимания и достаточного объяснения. Лишь вследствие случайных причин (при бурении на воду) на месте магнитной аномалии была встречена нефть. Разведка аномалии указала, что последняя обязана своим происхождением складке кристаллических пород, вызвавшей, очевидно,

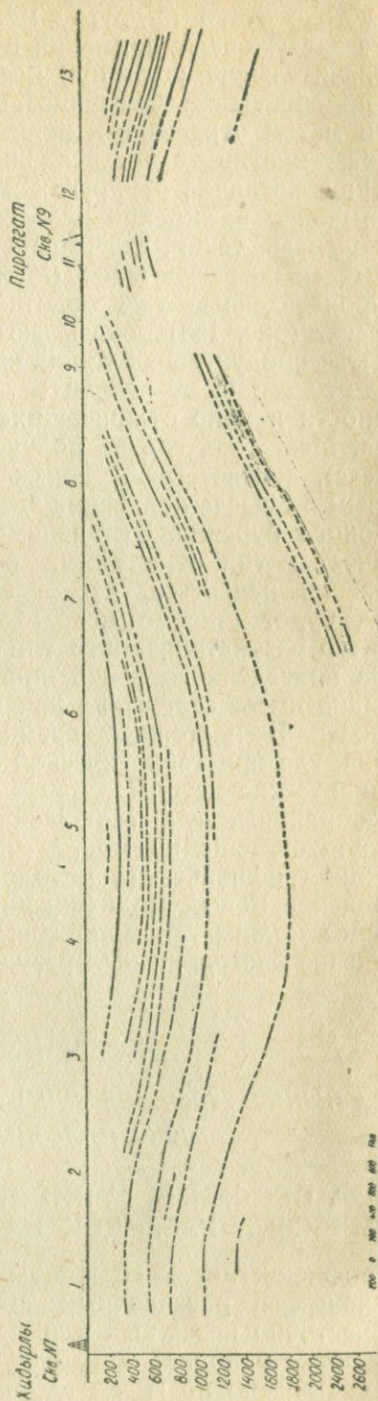


Рис. 183. Разрез по профилю Хидырлы-Пирсаат по данным отраженных волн.

образование благоприятных для скопления нефти структур. Вследствие этого и другие магнитные аномалии этого района также заслуживают внимания и дальнейшей разведки.

Значительную роль при исследованиях нефтеносных структур приобретает в настоящее время сейсморазведка, в особенности метод отраженных волн. Этим методом могут быть расчленены многие толщи осадочных пород, имеющих весьма небольшое различие в упругих свойствах. Такое обстоятельство чрезвычайно важно при разведке отдельных структур и, в первую очередь, таких, где геофизика до сего времени не дала положительных результатов (Майнефть и др.).

Произведенные уже опытные работы в районе Хидырлы—Пирсагат (рис. 183) показывают, что отраженными волнами отбивается продуктивная толща непосредственно. Кроме того, получены отражения от границ раздела песков и глин небольшой мощности и мало отличающихся по упругим свойствам друг от друга. Места же, где не получено отражений (пустые места на разрезе), соответствуют зонам тектонических нарушений, ненадежным в смысле получения здесь нефти и неблагоприятным для глубокого бурения. Эти данные, а также то развитие, которое получает метод отраженных волн на других объектах, дают основание надеяться, что в самом недалеком будущем этот метод будет широко использован для разведки нефтеносных структур рассматриваемого типа на всей территории СССР.

Из приведенного выше описания видно, какое колоссальное значение имеет геофизика при поисках и разведке нефтеносных структур. В настоящее время нет ни одного нефтеносного района, где при геологической разведке не были бы применены геофизические методы.

Те районы, где геофизика не дала еще положительных результатов, еще не могут считаться безнадежными для применения геофизических методов; дальнейшее развитие методов и введение новых модификаций, разрешающих все большее и большее количество вопросов, дают основание надеяться, что получение благоприятных результатов будет достигнуто и здесь.

Глава VIII

Применение геофизических методов при поисках и разведке полезных ископаемых

§ 26. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ РАЗВЕДОК НА РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ

Геофизические методы обычно привлекаются к разрешению поисковых и разведочных задач на рудных месторождениях уже частично известных или же в прилегающих к таким месторождениям районах, общее представление о геологии которых уже составлено по предшествовавшим исследованиям.

Проектирование геофизических работ является весьма важным этапом их производства: от тщательности разработки проекта зависит, зачастую, успех или неудача всей работы.

Основные этапы проектирования, следующие за первичной общей формулировкой задач намечаемых исследований, таковы:

1) учет всех геологических особенностей месторождения, которые могут быть использованы для целей геофизической разведки;

2) выбор наиболее рациональных методов для геофизического исследования намечаемого к изучению месторождения или района;

3) составление детального обоснованного плана работ, в соответствии с действующими нормами производительности труда, и сметы расходов на выполнение запланированного объема работ.

Изучение материалов предшествовавших исследований

Первым и одним из основных этапов проектирования является изучение наиболее современных и полных материалов по геологии месторождения и прилегающего к нему района, характеру и масштабу рудопоявлений, морфологии рудных тел, минеральному составу руд и вмещающих пород.

При рассмотрении этих материалов особое внимание следует уделять изучению тектоники района и вопросам структуры рудного поля. Подобного рода факторы весьма часто дают возможность выделять методами геофизики, в первую очередь, наиболее перспективные по возможной рудоносности зоны, для последующей концентрации работ более детальными и часто более сложными методами геофизического комплекса, имеющими целью прямые поиски руд.

Само собой разумеется, что в тех случаях, когда на подлежащем геофизическому исследованию объекте или на аналогичных по типу месторождениях уже проводились геофизические работы, — результаты их также должны быть предварительно изучены со всей тщательностью.

Геофизическое опробование каменного материала, представляющего наиболее распространенные типы пород и руд подлежащего исследованию месторождения, является одной из существенных предпосылок рационального проекта геофизической разведки рудного месторождения.

При подборе образцов для предварительного лабораторного геофизического опробования надлежит следить как за тем, чтобы наиболее полно были представлены все основные разновидности руд и пород, так и за тем, чтобы отобранные образцы отражали и те степени видоизменений, в которых эти породы встречаются *in situ* в данном месторождении. Так, например, при наличии, наряду с первичными, окисленных руд, железных шпал, руд различных генераций и т. п., геофизическому опробованию должны быть подвергнуты образцы всех подобных типов рудных образований.

При наличии в тех или иных породах повышенной местами трещиноватости, пористости, тех или иных проявлений минерализации, контактовых и вторичных изменений — должны быть определены физические свойства всех этих разновидностей.

При геофизическом опробовании, проводящемся с целью проектирования работ на рудных месторождениях, должны быть определены следующие физические свойства:

1) магнитные свойства — магнитная восприимчивость χ и остаточное намагничивание I_r ;

2) электрические свойства — удельное электросопротивление ρ при максимальном увлажнении и, в случае необходимости, при других физических условиях;

3) плотность σ .

В отдельных случаях целесообразно проводить также измерения радиоактивности образцов.

Методика определений физических свойств горных пород и параллельного изучения «активных факторов», т. е. тех или иных особенностей, влияющих на возникновение и характер отдельных физических свойств породы, используемых разведочной геофизикой, дана в соответствующем разделе настоящего курса.

Производство лабораторного или предварительного полевого геофизического опробования в практике часто оказывается по тем или иным причинам неосуществимым. В этих случаях приходится заменять опробование каменного материала использованием литературных данных.

По материалам минералогических и петрографических описаний руд или пород могут быть, с той или иной степенью приближения, намечены ожидаемые физические свойства этих пород. Опыт показывает, что при достаточно внимательном подходе и тщательном учете «активных факторов» такие провизорные данные чаще всего оказываются довольно близкими к фактически наблюдаемым при последующих полевых работах на месторождении. Если и не столь часто сходятся абсолютные величины физических констант, то почти всегда выдерживаются относительные значения этих величин.

Выделение и формулировка поисково-разведочных задач

Сопоставление основных данных о геологическом строении района и типах рудопроявлений с результатами геофизического опробования дает возможность выделить из общего комплекса вопросов, подлежащих разрешению при поисковых и разведочных работах на месторождении, те задачи, при решении которых целесообразно применение геофизических методов.

Задачи, ставящиеся перед разведочной геофизикой при исследовании рудных месторождений, чаще всего сводятся к двум основным группам вопросов: 1) выявление структур рудных полей и 2) поиски и прослеживание рудных тел.

Выявление элементов, объединяемых обычно в понятие о структуре рудного поля, часто более доступно для геофизи-

ческих методов исследований, чем прямые поиски руд. В то же время установление контролирующих оруденение факторов, как-то: прослеживание контактов вмещающих пород, жильных полей изверженных пород, фиксирующих направления разломов, поиски и прослеживание зон смятия, минерализации, контактовых изменений, — позволяет не только концентрировать дальнейшие, более детальные, геофизические работы в значительно суженных зонах, но и само по себе во многих случаях уже оказывает значительную помощь разведчику, давая руководящие указания для концентрации поисково-разведочных выработок.

Непосредственные поиски и прослеживание рудных образований основываются как на использовании физических свойств самих руд, являющихся объектом разведки или поисков, так во многих случаях и на фиксации физических полей, создаваемых породами или минералами, парагенетически связанными с рудами искоемых металлов.

При составлении проекта геофизических работ важнейшей задачей является выявление всех возможностей разведочной геофизики не только в отношении собственно искоемых руд, но и всех сопутствующих оруденению минеральных образований.

При установлении задач, ставящихся перед разведочной геофизикой на том или ином рудном месторождении, следует помнить следующие основные положения.

В круг задач, намечаемых к решению геофизическими методами, должно войти наибольшее количество вопросов, стоящих перед всем комплексом геолого-разведочных исследований на месторождении, ограниченное исключительно лишь техническими возможностями разведочной геофизики и рентабельностью ее применения.

Рентабельность применения геофизики является обязательным условием для включения того или иного вопроса в круг задач разведочной геофизики на данном месторождении. Геофизике обычно не поручается разрешение вопросов, с равным успехом доступных для изучения другими методами геологического исследования, когда затраты на геофизику оказались бы выше, чем стоимость производства работ обычными геологическими методами.

В зависимости от сложности поставленных задач и вероятности непосредственного производственного успеха намечаемых геофизических исследований, проектируемые работы делятся на производственные, опытно-производственные и научно-исследовательские. К первым относятся работы, производимые методами, апробированными при разведках месторождений подобного типа или при решении тех или иных геологических задач в аналогичных условиях, причем применимость этих методов на данном объекте не вызывает сомнений. К опытно-производственным относятся работы, выполняемые методами, применимость которых весьма вероятна теоретически, но еще не подвергалась проверке в поле в соответствующих геологических условиях. К научно-исследовательским относятся работы, требующие даль-

нейшей разработки существующих методов, постановки полевых экспериментов, а в некоторых случаях — первичной разработки и проверки новых методов или видоизменений существующих.

Выбор методов исследования

Этапом проектирования, непосредственно следующим за четкой формулировкой поисковых и разведочных задач, ставящихся перед геофизическими методами на данном объекте, является предварительный выбор наиболее рациональных методов исследования. Выбор этот является предварительным потому, что весьма часто последующие опытные работы на месторождении дают новые указания на особенности исследуемого объекта, заставляющие немедленно вносить коррективы в запроектированную методику.

Избранная при проектировании методика геофизических исследований должна удовлетворять следующим основным и совершенно обязательным условиям.

1. Избранный метод разведочной геофизики должен быть технически обоснован достаточным различием в тех физических свойствах, подлежащих геофизическому расчленению пород, которые используются проектируемым методом.

2. Ожидаемые различия в интенсивности физических полей должны безусловно превышать величины вероятных погрешностей измерений в данных геологических и топографических условиях.

3. Избранный метод должен обладать экономическими преимуществами перед другими методами, которые могут применяться при решении данной задачи с одинаковым производственным эффектом. При всех прочих равных условиях, предпочтение отдается тому методу, при котором производство работ требует наименьших затрат на оплату труда, транспорт и работу обслуживающих установок. При этом учитывается требуемая расчетом детальность сети наблюдений тем или иным методом, точность измерений при различных типах измерительной аппаратуры и соответствующая этим условиям производительность труда.

4. При применении комплекса методов не может быть допущено бесцельное дублирование измерений двумя или больше методами, использующими одни и те же физические особенности объекта. Такое дублирование допустимо лишь при необходимости детализации первоначальных наблюдений, при экспериментировании на опытных участках и во всех тех случаях, когда последующие наблюдения другим методом предназначены для контроля результатов и проводятся на резко ограниченных по площади отдельных участках.

В этой же мере недопустимо применение двух или нескольких методов, хотя бы и основанных на использовании различных физических свойств, в тех случаях, когда намеченная задача равноценно решается одним из этих методов и применение другого не оправдывается необходимостью.

Производственно-экономическая часть проекта

На основе технического проекта и действующих норм производительности труда составляется расчет потребного технического персонала и рабочей силы, подсчитываются расходы на материалы, транспорт, амортизационные отчисления и т. п., после чего составляется смета расходов на производство работ. Этот этап составления проекта является общим для геофизических работ на любых объектах и не приобретает каких-либо специфических особенностей при проектировании исследований рудных месторождений.

Для обеспечения большей оперативности в процессе полевых работ необходимо лишь предусмотреть возможность замены одних методов другими. Последняя особенно часто оказывается рациональной при работе на рудных месторождениях.

В виде особого приложения к программе работ дается расчет стоимости одного наблюдения по каждому из намечаемых к применению методов и вычисленные на этой основе переводные коэффициенты, показывающие, какими эквивалентными по стоимости измерениями может быть заменен данный вид работ. Для удобства последующего использования рекомендуется за единицу стоимости принимать наиболее дешевый вид работ, относя к этой величине стоимость наблюдений другими, более дорогими методами.

Опытные работы на месторождении

Составлением программы, сметы расходов и календарного плана заканчивается предварительный, камеральный этап проектирования геофизических работ на рудных месторождениях. Дальнейшее, окончательное установление наиболее целесообразной методики исследований переносится в поле, где проводится последний этап проектирования — опытные и научно-исследовательские работы на месторождении.

Работы эти имеют целью проверку правильности запроектированной методики работ и выяснение всех возможностей разведочной геофизики при исследовании данного месторождения. Таких дополнительных исследований можно не проводить лишь в тех случаях, когда методика геофизической разведки изучаемого месторождения уже полностью разработана ранее, при предшествовавших геофизических работах.

Выбор участка для производства опытных работ. Участок для производства опытных работ избирается с учетом следующих основных условий:

- 1) для опытных наблюдений выбирают наиболее изученный в геологическом отношении участок, по сравнению с другими частями месторождения;

2) избранный участок должен отражать все типичные особенности геологического строения месторождения и встречающиеся типы оруденения;

3) по характеру рельефа участок не должен существенно отличаться от остальной подлежащей исследованию площади.

Если, в силу местных условий, не удастся выбрать один небольшой участок, который полностью отвечал бы всем поставленным условиям, то оказывается необходимым проводить опытные работы на двух и более участках.

На избранном для опытных работ участке не должно быть никаких сооружений или установок, вносящих искажения в измеряемые физические поля. Так, например, участок с проходящими по нему линиями электропередач, блуждающими токами, подземными металлическими конструкциями или обсаженными буровыми скважинами должен быть забракован как объект опытных исследований теми методами, при работе которыми эти факторы могут внести дополнительные искажения в измеряемые физические поля. Эти искажения часто столь велики, что делают в дальнейшем геологическую интерпретацию полученных результатов весьма затруднительной, а подчас и вовсе невозможной.

При проведении металлометрических съемок такими помехами, искажающими результаты наблюдения, являются большое количество поверхностных выработок, а также обширные площади, занятые отвалами. Рудные отвалы, механический и химический перенос их поверхностными водами и ветром, часто влекут за собой возникновение так называемых «ложных ореолов рассеяния».

Отвалы пустых пород могут сделать недоступными опробованию существующие истинные ореолы рассеяния близ рудных образований.

Параметрические измерения. Для внесения необходимых корректив в запроектированную методику работ, а также для использования при последующей геологической интерпретации результатов их, проводят измерения физических свойств пород и руд в условиях их естественного залегания.

Наиболее целесообразно проводить эти измерения специально разработанными методами и аппаратурой.

В случае необходимости специальные приемы опробования могут быть в известной степени заменены измерениями на обнажениях при помощи обычной полевой геофизической аппаратуры. Так, при достаточно благоприятных условиях удовлетворительные результаты дают измерения электропроводности при помощи четырехэлектродной схемы с малыми разносами и обычного сложного потенциометра. Величины разносов электродов при этом выбирают со всей тщательностью, а также особо следят за качеством заземлений.

Определение магнитных свойств с достаточной для практических целей степенью приближения можно производить при помощи той полевой аппаратуры, которая на данном объекте применяется.

Помимо широкого опробования тех физических свойств, на которых основаны запроектированные и применяемые в данном случае методы, особое внимание должно быть обращено на возможность выявления и других свойств, могущих быть использованными.

Для иллюстрации важности этого вопроса можно привести случай из недавней практики. При производстве комплексных геофизических работ на одном из месторождений выяснилось, что часть оловоносных полиметаллических руд обладает интенсивной магнитностью. Каменный материал был недоступен для предварительного геофизического опробования, а имевшиеся минералогические описания не давали основания предположить магнитность руд. Геофизики-разведчики получили возможность часть дорогостоящих работ заменить дешевыми магнитными измерениями.

В некоторых случаях, когда на месторождении отсутствуют обнажения, удобные для измерения физических свойств тех или иных пород *in situ*, прибегают к опробованию значительной серии образцов. В этом случае желательно, чтобы образцы были свежееотколоты и специально подобраны.

Для определений электропроводности в таких случаях часто приходится прибегать к мелкому электробурению на площадях с более или менее известным геологическим разрезом.

Наблюдения на опытном участке. Измерения на опытном участке проводятся всеми методами, запроектированными для исследования месторождения.

В тех случаях, когда оптимальная густота сети наблюдений не устанавливается с достаточной ясностью при предварительном проектировании, наблюдения на опытном участке ведутся по нескольким вариантам сетки. Наиболее целесообразная густота наблюдений устанавливается эмпирически, из сопоставления полученных графиков физических величин с известными элементами геологического строения.

Опытные работы на месторождении должны дать ответы на все вопросы, оставшиеся не вполне ясными при предварительном проектировании. Основными общими для всех методов вопроса являются целесообразность применения метода для решения той или иной геологической задачи и установление, в положительном случае, необходимой и достаточной густоты сети наблюдений.

Попутно выясняется ряд дополнительных условий, знание которых необходимо для успешной работы тем или иным методом. Так, например, при электроразведочных работах на постоянном токе опытные работы помогают установить наиболее рациональную в данных условиях разновидность метода и разность питающих и приемных электродов.

При работах методом интенсивности проверяются условия заземлений, качество и сила тока в цепи, наиболее удобные размеры планшетов, влияние рельефа. Вопросы влияния рельефа, интенсивности аномалий, вида и густоты сети подлежат выяснению при работах методом индукции и измерениях естественного электрического поля.

При работах методом магнитометрии выясняется интенсивность магнитных аномалий, необходимая точность работы, целесообразность учета вариаций, влияние рельефа и т. п.

При применении на месторождении методов металлометрических съемок полевой этап проектирования работ сводится к исследованию интенсивности и характера распределения «ореолов рассеяния» рудных тел. Для этой цели рекомендуется избрать две-три линии вкрест простирания хорошо изученных (хотя бы с поверхности) рудных тел и отобрать достаточно частые пробы по этим линиям, с двух-трех разных глубин делювия и элювия. При выборе линий необходимо учитывать сделанные выше указания об искажениях, вносимых в результаты наблюдений рудными отвалами и их выветриванием.

Полученная в результате такого опробования общая схема распределения рудного ореола рассеяния в делювии-элювии позволяет установить наиболее благоприятную глубину и методику отбора и обработки проб для тех или иных геологических и топографических условий, встречающихся в изучаемом месторождении.

Чем большим количеством данных о характере ореолов рассеяния и их распределении в тех или иных условиях будет располагать геофизик-разведчик в результате опытных работ, тем более надежной окажется и дальнейшая геологическая интерпретация ореолов рассеяния, которые могут быть выявлены при производстве поисковых работ.

Всесторонняя обработка полученных опытных данных, сопоставление их с известными особенностями геологического строения и прочими условиями месторождения проводятся одновременно с полевыми опытными измерениями. Необходимые коррективы в программу и методику работ вносятся немедленно, с тем, чтобы при развертывании последующих производственных работ уже были сделаны все нужные исправления.

Научно-исследовательские работы на месторождении

Всякого рода исследования, связанные с разработкой новых приемов и методов геофизической разведки подлежащего изучению рудного месторождения, должны быть отнесены к группе научно-исследовательских работ.

Как и любая иная отрасль науки, разведочная геофизика непрерывно совершенствуется, расширяя количество используемых ею физических свойств горных пород и привлекая все новые и новые физические явления для создания новых методов и приемов геофизической разведки.

Практика геофизических исследований должна выдвигать новые, неиспользованные ранее разведочной геофизикой физические свойства, и указывать общую схему возможного их использования, давая затем материал для теоретической разработки новых методов. Главнейшей в этом направлении задачей геофизика-разведчика на рудном месторождении является выявление и привлечение таких еще неиспользованных физических свойств и явлений, постановка экспериментов на опытном участке и выяснение возможностей создания новых эффективных методов исследования.

Как пример, можно привести включение в комплекс методов геофизической разведки металлометрических съемок, происшедшее совсем в недавнее время. Это было вызвано необходимостью найти метод для распознавания рудных и безрудных аномалий, выявленных методами геофизики, и обосновано наблюдениями над характером «ореолов рассеяния», возникающих при разрушении поверхностных частей рудных тел.

Изучение ореолов рассеяния привлекло в комплекс геофизических методов такие технические приемы, как спектральный анализ и ряд других методов индикации рудных «ореолов». С каждым годом становится все шире круг рудных минералов, наличие которых в ореолах рассеяния устанавливается быстрыми и относительно дешевыми приемами спектроанализа и полевой химической индикации.

§ 27. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ РЕШЕНИИ ВОПРОСОВ СТРУКТУРЫ РУДНЫХ ПОЛЕЙ

I. ЗАДАЧИ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ ПРИ ДЕТАЛЬНОМ ГЕОЛОГИЧЕСКОМ КАРТИРОВАНИИ РУДОНОСНЫХ УЧАСТКОВ

Успех разведки рудного месторождения в большой мере зависит от правильности понимания разведчиками геологического строения района, вмещающего месторождение. Еще в большей степени зависит от этого рациональное ведение поисков и разведок горными выработками. Знание геологической структуры предотвращает в значительной части проходку «пустых» выработок, уменьшает объем горных работ до минимально необходимого при той или иной детальности поисков и разведок.

Проведение геологических съемок рудоносных районов (масштаба от 1 : 25 000 до 1 : 5 000), как первый этап поисков рудных месторождений, считается обязательным во всех случаях. Столь же необходимой предпосылкой рациональной постановки разведочных работ является геологическая съемка в крупном масштабе (1 : 2000—1 : 1000) самого участка месторождения.

Основной задачей таких исследований является установление связи оруденения с теми или иными элементами геологического строения. Геофизические методы играют существенную роль при решении этой задачи, значительно удешевляя стоимость работ.

При детальных поисковых и разведочных работах на рудных месторождениях площади, исследуемые методами геофизики, обычно не превышают 10—15 км², чаще же выражаются величиной в 2—5 км².

В тех, не столь частых, случаях, когда при поисках рудных месторождений геофизическими методами охватываются более значительные площади, вопросы, ставящиеся перед ними, обычно принимают характер широких структурно-геологических, и рассмотрение методики их решения не входит в задачу настоящего раздела курса. Методика эта описана выше при рассмотрении вопросов геологического картирования и выявления глубинных структур методами геофизики.

Нам предстоит рассмотреть методику геофизического исследования некоторых геологических факторов, чаще других контролирующих зоны оруденения месторождений, применяемую при детальных поисковых работах.

Наиболее часто при исследовании рудных месторождений возникает следующая группа вопросов о геологическом строении, в большинстве случаев с успехом разрешаемая методами геофизики.

1. Установление линий тектонических нарушений, связанных с ними изменений во вмещающих рудные образования породах и жильных полей, фиксирующих направления разломов.

2. Прослеживание контактов литологически различных пород, к которым в тех или иных случаях приурочены рудопроявления изучаемого месторождения.

3. Установление и прослеживание контактовых ореолов массивов изверженных пород, скарновых зон и других проявлений контактового метаморфизма, генетически связанных с рудообразованием.

Выявление линий тектонических нарушений и контактов, контролирующих оруденение

Значительная часть рудных месторождений приурочена к линиям тектонических нарушений и ослабленным зонам, являвшихся каналами для проникновения рудоносных растворов. При изучении таких месторождений разведчику необычайно важно знать направления этих нарушений. Прослеживание линий разломов на участке месторождения весьма часто является главным средством руководящим указанием при поисках рудопроявлений. В тех случаях, когда любая из соподчиненных зон тектонических нарушений может оказаться фактором, контролирующим оруденение, особенно важно не пропустить ни одной из таких зон, зачастую недоступных непосредственному обнаружению по местным условиям обнаженности.

Геофизические методы обладают в этом направлении широкими возможностями, и использование их для детального геологического картирования рудоносных площадей является, по нашему мнению, обязательным, так как значительно уменьшает

потребный объем горных работ, концентрируя дальнейшие работы в узких локализованных зонах. Кроме того, применение разведочной геофизики может предотвратить пропуск части перспективных по рудоносности зон, скрытых от глаз наблюдателя, пользующегося обычными методами геологического исследования.

Констатация наличия тектонических разломов основана на наблюдении типичных текстурных изменений вмещающих пород, более или менее мощных трещин, выполненных тем или иным материалом, а также интенсивной минерализации, закономерно проявляющейся вдоль локальных линейно вытянутых зон.

Применение к решению такого рода задач методов геофизики основано на том, что в большинстве случаев появление тех или иных изменений, связанных с тектоническими факторами, влечет за собой и изменение физических свойств горных пород, достаточно интенсивное для установления этого факта методами разведочной геофизики.

Геофизические исследования в зонах дробления. Зоны дробления, являясь одним из проявлений дислокационного метаморфизма, характеризуются как минералогическими и структурными изменениями пород, подвергшихся сжатию, так и чисто внешними текстурными деформациями.

В тех случаях, когда с возникновением зоны дробления не был связан привнос какого-либо активного, с точки зрения геофизики, вещества, минералогические и структурные изменения, легко обнаруживаемые при детальном петрографическом изучении пород из зоны разлома, не вызывают изменений физических свойств столь заметных, чтобы участки измененных пород могли быть выделены методами геофизики. Исключение составляют лишь те случаи, когда в результате химической перегруппировки в процессе динамо-метаморфизма активные (с точки зрения геофизики) минералы образуются за счет элементов, присутствовавших ранее в подвергшейся изменению породе. В большинстве же подобного рода случаев, изменению физических свойств способствует появление текстурных деформаций, главным образом, — появление интенсивной трещиноватости, способствующей ускорению дальнейших процессов поверхностного выветривания, а также связанное с последними повышение пористости, влагоемкости пород, а иногда и повышение их способности выделять радиоактивные эманации.

Изменение некоторых физических свойств горных пород, связанное с процессами динамо-метаморфизма, весьма часто достаточно велико.

Проделанные в последние годы лабораторные исследования выявили ряд закономерностей в изменении физических свойств пород в зависимости от главнейших текстурных факторов.

В § 2 приведены некоторые данные для ряда наиболее распространенных типов горных пород.

Повышение пористости и, в прямой связи с этим, увеличение влагоемкости горной породы влекут за собой значительное

изменение ряда физических свойств, особенно важным из которых является увеличение электропроводности. Обнаружение такого рода нарушений наиболее целесообразно производить методами электроразведки.

Выбор частной методики зависит от морфологии зоны дробления и ее размеров. При малых мощностях зон смятия можно рекомендовать применение методов переменного тока, при значительной мощности целесообразно применение различных модификаций метода сопротивлений на постоянном токе.

Из методов переменного тока в практике геофизических исследований у нас в Союзе наиболее часто сейчас применяют методы интенсивности и индукции. Вопрос о преимуществах одного из этих методов перед другим в тех или иных случаях разведочной практики является еще предметом научных исследований. Можно указать лишь на преимущества метода индукции при прослеживании узких локализованных зон дробления и на целесообразность применения метода интенсивности при площадных исследованиях на обширных полях.

Естественно, что при работах методами электроразведки на участках рудных месторождений наряду с электроаномалиями, обусловленными зонами нарушений, должны быть обнаружены и аномалии, вызванные достаточно мощными рудными телами, выделение которых и является задачей дальнейших геофизических исследований. Уместно напомнить, что при интерпретации этих аномалий должны быть учтены все указания о выделении поверхностных аномалий, обусловленных особенностями рельефа и неоднородной электропроводностью наносов.

Вторым, достаточно распространенным типом тектонических проявлений, представляющим интерес при поисках и разведке рудных месторождений, являются более или менее мощные линейно вытянутые трещины, выполненные обломочным материалом, происходящим целиком от вмещающих пород, т. е. без привноса новых элементов и интенсивной минерализации. Этот случай является более благоприятным, чем описанный выше, при том условии, что мощность трещины достаточна для выявления ее геофизическими методами при производстве наблюдений по не весьма густой сетке. Значительное сгущение сети наблюдений, необходимое при малых размерах исследуемого объекта, ограничивается экономической рентабельностью.

Трещины, выполненные обломочным материалом и глинистым веществом, создают удобные условия для циркуляции подземных вод, всегда в той или иной мере минерализованных. Такая трещина в целом оказывается значительно лучшим проводником электрического тока, чем вмещающие, более плотные породы.

Это обстоятельство и определяет целесообразность применения при поисках и прослеживании такого рода трещин электрических методов разведки. При выборе частного метода следует руководствоваться теми же соображениями, что и в случае исследования зон дробления, т. е. учитывать разницу в электропро-

водности брекчированной зоны и вмещающих пород, размеры трещины, характер наносов и особенности рельефа.

В некоторых частных случаях, когда брекчированная зона является сбросовой трещиной, амплитуда сброса достаточно велика и в составе разорванной толщи имеется какой-либо горизонт с резко отличными физическими свойствами, — прослеживание линии сброса может быть осуществлено и иными методами. Так, например, при наличии в составе толщи интенсивно-магнитных пород (залежей магнитных железных руд, покровов и интрузивных пластов основных пород, обогащенных магнетитом и т. п.) поиски и прослеживание сбросовой трещины

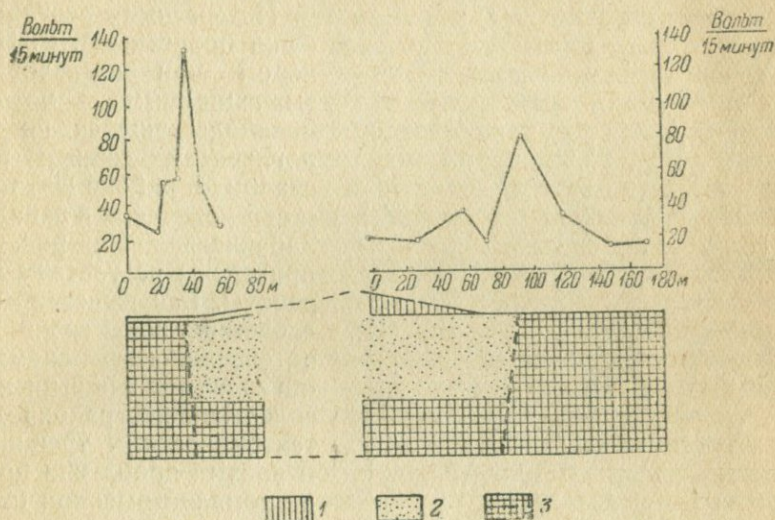


Рис. 184. Эманационные профили над сбросами (по Мюллеру).

1 — ракушечный известняк; 2 — верхний и 3 — нижний пестрый песчаник.

можно вести методом магнитометрии высокой или средней точности, в зависимости от интенсивности наблюдаемых магнитных аномалий.

В тех случаях, когда при изучении месторождения оказывается необходимым определить и амплитуду сброса, часто разрывающего рудные тела при послерудных тектонических подвижках, это может быть произведено при помощи электроразондирований на постоянном токе. Обязательным условием при этом является наличие в нарушенной толще какого-либо маркирующего горизонта, отличного по электропроводности от остальных слоев толщи.

Дробление пород в зонах смятия, пониженная сопротивляемость их агентам поверхностного выветривания и минералогические изменения, происходящие в горных породах в процессе их разрушения, повышают способность пород в зонах дробления к выделению радиоактивных эманаций. Исследование таких зон иногда оказывается целесообразным проводить методами

радиометрии. Чаще всего применяемая в таких случаях эманационная (радоновая) съемка производится путем отбора по профилям и исследования проб почвенного воздуха и может охватывать значительные площади, так как является не столь дорогим методом геофизики.

Мюллер исследовал характер распределения эманации радона над сбросовыми трещинами. На рис. 184 приведен график, иллюстрирующий интенсивность эманации по профилю, пересекающему трещины сбросов в Лейхтенбурге в Тюрингии.

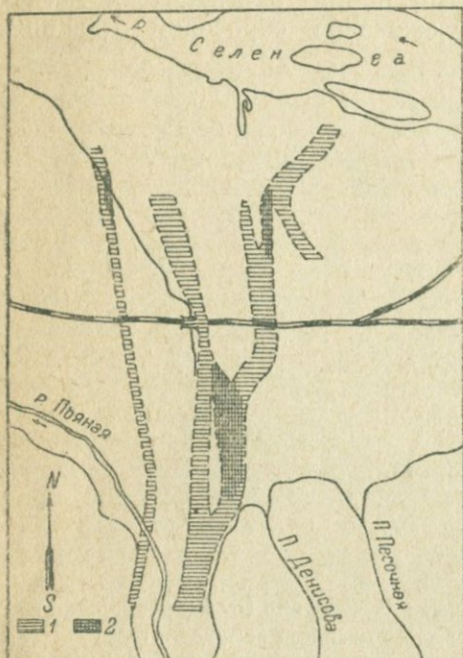


Рис. 185. Эманационная съемка тектонической зоны (по А. С. Певзнеру).

1 — средние аномалии; 2 — сильные аномалии.

званные с воздействием эманаций или растворов, продвигающихся по ним в ту или иную фазу вулканического цикла, затрудняют или облегчают, в зависимости от своего характера, применение геофизики для поисков и прослеживания таких зон. В каждом отдельном случае необходим строго обдуманный подход при проектировании геофизических работ по поискам и прослеживанию зон минерализации. Возможны случаи, когда процессы минерализации изменяют физические свойства пород в зоне смятия в сторону приближения к тем же свойствам неизменных вмещающих пород, затрудняя выявление тектонической зоны методами геофизики. Так, например, выполнение трещин, пор и пустот минералами, близкими по физическим свойствам к породам зоны дробления, может

Интересные результаты были получены А. С. Певзнером при исследовании эманационным методом предполагавшейся по геологическим данным зоны разлома в районе Питательского источника в западном Забайкалье. На рис. 185 приведены результаты этой работы. Как выяснено впоследствии, зоны средних по интенсивности аномалий обусловлены повышенным содержанием радона над тектоническими трещинами и зонами дробления пород, а аномалии высокой интенсивности вызваны наличием здесь пегматитовых жил, обладающих повышенной радиоактивностью.

Поиски и прослеживание зоны минерализации.

Изменения в зонах смятия и дробления, связанные с воздействием эманаций или растворов, продвигающихся по ним в ту или иную фазу вулканического цикла, затрудняют или облегчают, в зависимости от своего характера, применение геофизики для поисков и прослеживания таких зон. В каждом отдельном случае необходим строго обдуманный подход при проектировании геофизических работ по поискам и прослеживанию зон минерализации. Возможны случаи, когда процессы минерализации изменяют физические свойства пород в зоне смятия в сторону приближения к тем же свойствам неизменных вмещающих пород, затрудняя выявление тектонической зоны методами геофизики. Так, например, выполнение трещин, пор и пустот минералами, близкими по физическим свойствам к породам зоны дробления, может

уменьшить влагоемкость породы, затруднить циркуляцию вод и тем самым приблизить такие свойства, как плотность и электропроводность породы, к тем же свойствам вмещающих пород.

Однако в значительном большинстве случаев интенсивная минерализация в зонах дробления приводит к значительным изменениям физических свойств и появлению новых «активных факторов», облегчающих выявление этих зон методами геофизики. Рассмотрим некоторые из этих случаев, наиболее часто встречающиеся в разведочной практике.

Магнитосодержащие скарны, магнетит и пирротин в зонах дробления. Пневматолитовый привнос кремния, алюминия и тяжелых металлов часто приводит к образованию в зонах смятия скарновых пород, содержащих наряду с железистыми силикатами также свободные окислы железа. Часто в скарнах присутствует магнетит, как в виде отдельных кристаллических вкрапленников и жилков, так иногда в виде изоморфной подмеси в самих ферросиликатах. В более поздние фазы минерализации в зонах дробления часто появляется также пирротин.

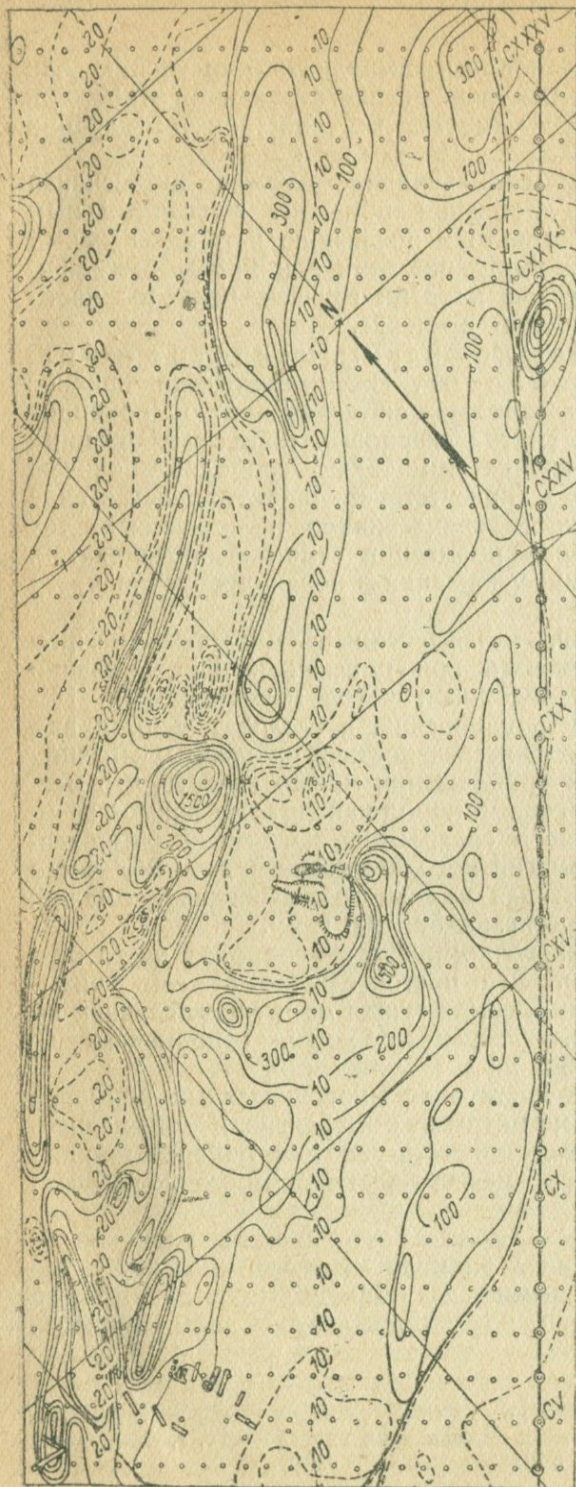
Магнетит и пирротин, являясь минералами ферромагнитными¹, позволяют применять при поисках и прослеживании таких зон несложный и недорогой метод магнитометрии. Потребная при этом точность измерений, а следовательно, и вид аппаратуры определяются интенсивностью ожидаемых магнитных аномалий. В первом приближении можно считать, что магнитная восприимчивость горных пород находится в прямой зависимости от количественного содержания магнитных компонентов. Содержание ферромагнитного компонента в 1—2% часто оказывается достаточным для надежного выявления аномалий, которые в этом случае достигают 50—100 гамм.

Распределение магнитного компонента в породах часто оказывается неравномерным. Это обстоятельство следует учитывать при выборе съемочной сети, сгущая ее в таких случаях до рациональных пределов, главным образом, основываясь на результатах опытных работ на месторождении.

В качестве одного из достаточно многочисленных примеров использования наличия магнитных компонентов в минерализованных зонах смятия можно привести работы в районе Смирновского полиметаллического месторождения (Восточное Забайкалье).

Предполагаемая здесь зона тектонических нарушений проявилась отчетливыми аномалиями вертикальной составляющей, приуроченными к общему простиранию на расстоянии 2,5 км. Один из участков этой зоны приведен на рис. 186.

¹ При проектировании работ необходимо учитывать возможность наличия в некоторых случаях немагнитных модификаций пирротина, т. е. обязательно проводить предварительное геофизическое опробование.



Другим примером может служить месторождение Эге-Хая в Якутии, где пирротин является не только одним из компонентов оловоносных жил, но и широко распространен в виде вкрапленников в измененных породах всей зоны разлома. Зона эта хорошо прослеживается методом магнитометрии при высокой точности наблюдений.

Пиритизация и зон смятия. Использование разведочной геофизикой столь распространенного в зонах тектонических нарушений явления, как пиритизация, возможно лишь в тех случаях, когда этому благоприятствует характер развития минерала в породах зоны дробления.

Присутствие в породе неизменного пирита в виде разобленных вкрапленников мало изменяет физические ее свойства. В то же время присутствие пирита, цементирующего брекчированную породу в виде многочисленных пересекающихся жилок и

Рис. 186. Магнитные аномалии, связанные с зоной разлома; Смирновское месторождение (по М. В. Юневу).

Изолинии ΔZ ; 1 — положительных напряжений; 2 — отрицательных напряжений.

прожилков, значительно увеличивает электропроводность породы и позволяет применять при прослеживании подобных зон минерализации методы электроразведки.

Окисление сульфидов железа в зоне выветривания и дальнейшее выщелачивание продуктов их изменения повышает пористость, влагоемкость, а вследствие этого и электропроводность породы. Таким образом, даже в тех случаях, когда в породах зоны смятия пиритизация проявлена лишь обильной разобщенной вкрапленностью, применение электроразведки весьма часто также оказывается возможным.

Во многих случаях, когда процесс окисления в поверхностных частях интенсивно пиритизированной зоны дробления еще не полностью завершен, возможно применение метода, использующего возникающую при этом естественную электродвижущую силу, — метода естественного поля.

О кварцевании зон смятия. Возможность выявления и прослеживания окварцеванных зон смятия зависит, в основном, от интенсивности окварцевания. Применение для этой цели электроразведочных методов оказывается целесообразным лишь в тех случаях, когда интенсивное окварцевание пород в зоне смятия приводит к появлению существенных различий в электропроводности между ними и неизменными вмещающими породами.

В практике геофизической разведки часты случаи, когда окварцеванные зоны дробления прослеживаются методами постоянного тока в виде линейно вытянутых или приуроченных к общему простиранию участков с относительно повышенными электросопротивлениями.

Аналогично этому, применение электроразведки часто оказывается возможным при исследовании окварцеванных приконтактовых зон интрузий изверженных пород.

Выявление и прослеживание нерудных жильных полей и контактов литологически различных пород. Одним из весьма распространенных факторов, фиксирующих существование и направление зон разлома, является жильное выполнение трещин.

Относя вопросы применения разведочной геофизики при непосредственных поисках и разведке рудных жильных тел к дальнейшему систематическому изложению, рассмотрим некоторые случаи геофизического исследования нерудных жильных образований, как факторов контроля оруденения.

В качестве методики косвенных поисков того или иного типа оруденения, прослеживание нерудных жильных образований составляет широко распространенную разведочную задачу; приуроченность рудных проявлений к контактам жил с вмещающими породами, а также прямая генетическая связь жильного минералообразования с оруденением — явления, встречающиеся исключительно часто в разведочной практике. Столь же часто оруденение контролируется ослабленными зонами вдоль контактов литологически различных пород или оказывается приурочен-

ным к одной из контактирующих пород, вовсе не встречаясь в другой из них.

Все эти явления ставят подобные вопросы детального геологического картирования в ряд актуальных задач для геофизических исследований на рудных месторождениях.

Многообразие сочетаний пород и минеральных образований, выполняющих трещины, с вмещающими породами и вообще пород между собою не позволяют достаточно подробно рассмотреть многие из них. Ограничимся рассмотрением некоторых случаев и общими указаниями, которые, вместе с самыми первоначальными сведениями о физических свойствах пород, слагающих подлежащий исследованию объект, позволят разведчику ориентироваться в возможности рационального применения того или иного метода геофизики.

Применение магнитного метода. Довольно широкий круг задач в области прослеживания жильных полей и контактов доступен к решению несложным методом магнитометрии.

Из всех магнитных компонентов горных пород магнетит и титано-магнетит являются наиболее широко распространенными. Прочие ферромагнитные минералы, т. е. пирротин и некоторые, чаще всего вторичные, окислы железа являются далеко не столь часто встречающимися. Несмотря на возможность успешного использования магнитных свойств этих минералов при геофизических исследованиях некоторых специальных объектов, — широкого общего значения при геологическом картировании рудноносных площадей с помощью методов геофизики они не имеют.

Распространенность магнетита в качестве рудной примеси в значительной части изверженных пород и в меньшей степени в метаморфических, а также количественные вариации его содержания в них являются главнейшим критерием при определении применимости магниторазведки к решению тех или иных задач при изучении геологии рудных месторождений.

До сих пор не проделано еще сколько-нибудь полных исследований вопроса о распространении магнетита, как компонента различных горных пород. Первые попытки суммирования имеющихся данных приводят к следующим грубо схематическим выводам.

Осадочные породы обычно оказываются практически немагнитными. Их магнитная восприимчивость χ чаще всего колеблется в пределах от 0 до 50×10^{-6} CGSM.

Метаморфические породы оказываются магнитными лишь в тех случаях, когда в процессе метаморфизма в них появляется более или менее интенсивная вкрапленность магнетита. В связи с этим и магнитные свойства метаморфических пород варьируют в достаточно широких пределах, хотя значительная часть их оказывается практически немагнитными.

Изверженные породы в значительном большинстве случаев в той или иной степени магнитны, но их магнитные свойства варьируют столь широко, что весьма часто удается резко разли-

чать породы, возникшие в различные фазы при дифференциации одного и того же магматического очага.

Кислые эффузивы чаще всего оказываются практически немагнитными, в то время как большинство гранитоидов содержит в той или иной степени магнитные компоненты.

Содержание магнетита в основных породах обычно больше, чем в породах кислого ряда, причем в основных эффузивах значительно больше, чем в глубинных габброидах.

Наконец, магнитные свойства ультраосновных пород обычно достаточно интенсивны, но варьируют в широких пределах.

Таким образом, имея возможность, на основе общих соображений, заранее составить первоначальное суждение о возможности применения в каждом отдельном случае магнитного метода,

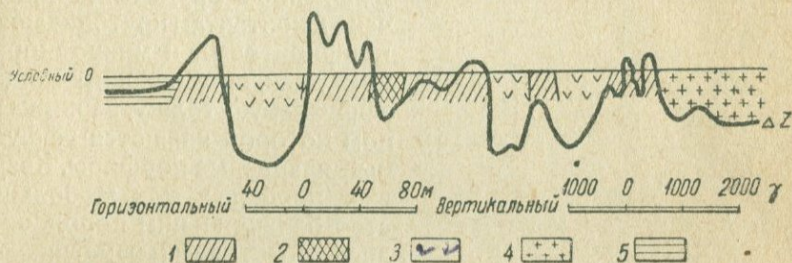


Рис. 187. Кривая ΔZ и схематический геологический разрез через Варшавский змеевиковый массив (Урал) (по А. Г. Линькову).

1 — плотный змеевик; 2 — смятый змеевик; 3 — габбро; 4 — гранит; 5 — осадочно-метаморфические породы.

разведчик должен тщательно проверить эти предположения при проектировании геофизических исследований. Специальный, повторный просмотр имеющихся шлифов, просмотр и опробование каменного материала, изучение литературы, направленное к выяснению роли магнетита в порообразовании на подлежащем дальнейшему исследованию объекте, обязательно должны предшествовать выбору геофизического метода.

Одним из удачных (и в то же время распространенных в рудоносных зонах) случаев прослеживания контактов и определения конфигурации жильных полей является сочетание осадочных и изверженных пород. Почти во всех случаях разница в магнитных свойствах осадочных и изверженных пород достаточна для выявления таких контактов или жил методом магнитометрии. Основным вопросом в таких случаях является предварительное выяснение относительных значений величин аномального магнитного поля над теми и другими породами для выбора требуемой точности измерений, а отсюда и аппаратуры. Нецелесообразно применение точной съемки локаль-вариометрами (весами) Шмидта там, где отличия в напряжениях магнитного поля легко могут быть обнаружены с помощью более грубого, но значительно более производительного магнитометра Тибберг-Талена.

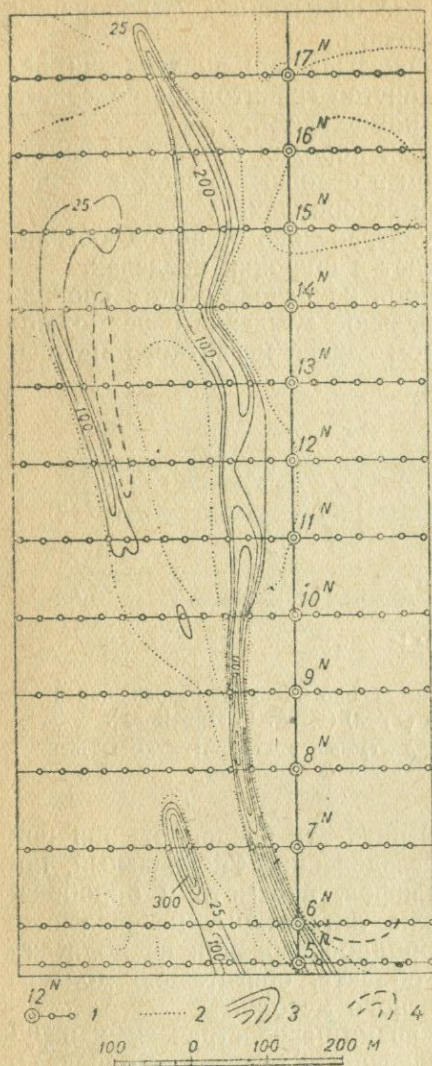


Рис. 188. Изолинии ΔZ над порфирировыми дайками (Б. Синанчинское месторождение) (по Л. Д. Берсудскому).

1 — профили съемки; 2 — нулевая изолиния; 3 — изолинии положительных ΔZ ; 4 — изолинии отрицательных ΔZ .

жилых контактов и вместе помогла прослеживанию жил наименее изученном и плохо обнаженном Северном участке месторождения. Канавы, заданные по геофизическим данным, имели размеры, минимально необходимые лишь для вскрытия

Можно привести ряд примеров удачного применения магнитного метода при детальном геологическом изучении рудоносных участков.

На рис. 187 приведен график напряжений ΔZ по одному из профилей, пересекающих ряд контактов и жил литологически различных пород на Варшавском змеевиковом массиве (Урал).

На Б. Синанчинском месторождении олова все известное промышленное оруденение приурочено к контактам крутопадающих порфирировых и микродиоритовых даек, прорезающих мощную эффузивную толщу, верхним членом которой являются эффузивные кварцевые порфиры. Кварцевые порфиры, как и большинство близких к ним пород, оказались практически немагнитными (χ в среднем $5-10 \times 10^{-6}$ CGSM). Близкими к ним по магнитным свойствам оказались и микродиориты. Однако порфириты, близкие по составу к диабазам, обладали магнитностью от 2000 до 9700×10^{-6} CGSM в зависимости от неравномерно распределенной в них примеси мегнетита. На рис. 188 и 189 изображено распределение ΔZ над одним из участков месторождения и типичный график ΔZ над дайкой, а на рис. 190 — схема расположения порфирировых даек, составленная на основе результатов магнитных исследований. Эта схема в дальнейшем дала возможность разведчикам, не прибегая к дорогостоящим поисково-разведочным работам горными выработками, проверить рудоносность всех с другими данными геофизики

Седловинной и Перевальной на

обоих контактов даек. На этом примере видно, насколько уменьшает необходимый объем горно-поисковых работ применение геофизики.

На рис. 191 приведен пример выполнения магнитным методом геологической задачи — выделения тальковых сланцев в контакте с змеевиками. К тальковым сланцам в Гумбейском районе (Урал) приурочены месторождения коренного золота. Высокие напряжения ΔZ над змеевиками резко отличаются от пониженных значений ΔZ в зонах тальковых сланцев.

Из последнего примера видно, что совершенно необязательно, чтобы выявляемые жильные породы обладали повышенными магнитными свойствами относительно вмещающих пород. Столь же удачны и обратные сочетания, когда более или менее интенсивно магнитные породы прорезаны трещинами, выполненными немагнитным веществом или породой. На фоне повышенных напряжений ΔZ такого рода выполнения трещин прослеживаются в виде зон относительно пониженных напряжений магнитного поля. Так, например, кварцевые жилы, местами оруденелые, в Джидинском

вольфрамовом месторождении (Забайкалье), залегающие частью в метаморфических сланцах, частью в гранитах, прослеживаются в виде резких минимумов напряжений вертикальной составляющей магнитного поля. Рис. 192 иллюстрирует еще один подобный пример: жила диорита в змеевиках (месторождение Кутарстан в Башкирии) проявляется четким минимумом Z_a на общем фоне повышенных напряжений магнитного поля над змеевиками.

Уместно привести общие теоретические случаи магнитных полей над контактами пород, обладающих различной магнитной

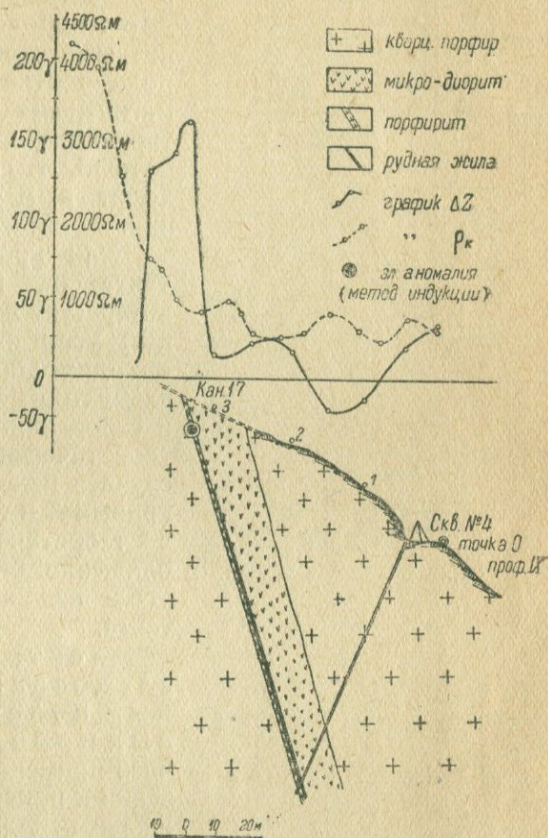
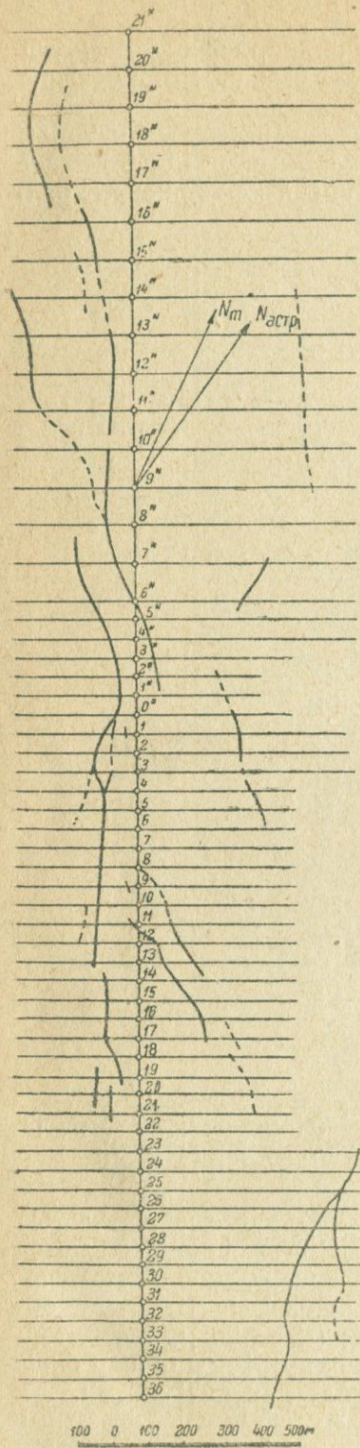


Рис. 189. Кривые R_k и ΔZ над зоной разлома и дайкой порфирита (Б. Синанчинское месторождение) (по Л. Д. Берсудскому).



восприимчивостью. На рис. 193 а и б приведены два теоретических случая распределения H и Z над контактами пород с различными магнитными свойствами при различных направлениях падения контактов. В случае а в центральной части разреза находится порода с более высокими магнитными свойствами, в случае б — порода с относительно более низкими магнитными свойствами, чем контактирующие с ней породы. Разрез широтный, т. е. линии контактов проходят в меридиональном направлении.

Если кроме выхода линии контакта на поверхность разведчика интересует направление и приближенный угол падения контакта, то необходимо проводить измерения всех элементов магнитного поля, т. е. H , Z и склонения. Вычислены и построены теоретические кривые для различных случаев падения контактов. Сличение кривых Z и H , наблюдаемых в натуре, с теоретическими позволяет приблизительно определить направление и угол падения интересующего контакта.

Электроразведка при исследовании нерудных жильных полей и контактов горных пород. Рассмотрение ряда случаев применения методов электроразведки к поискам и разведке нерудных жильных образований и прослеживанию контактов некоторых горных пород проведено в разделах, посвященных исследованию месторождений нерудных полезных ископаемых и вопросам геологического картирования методами разведочной геофизики.

Рис. 190. Схема расположения порфириновых даек по данным магнитного метода (Б. Синячинское месторождение) (по Л. Д. Берсудскому).

1 — профили съемки; 2—3 — оси магнитных аномалий, соответствующие выходам порфириновых даек.

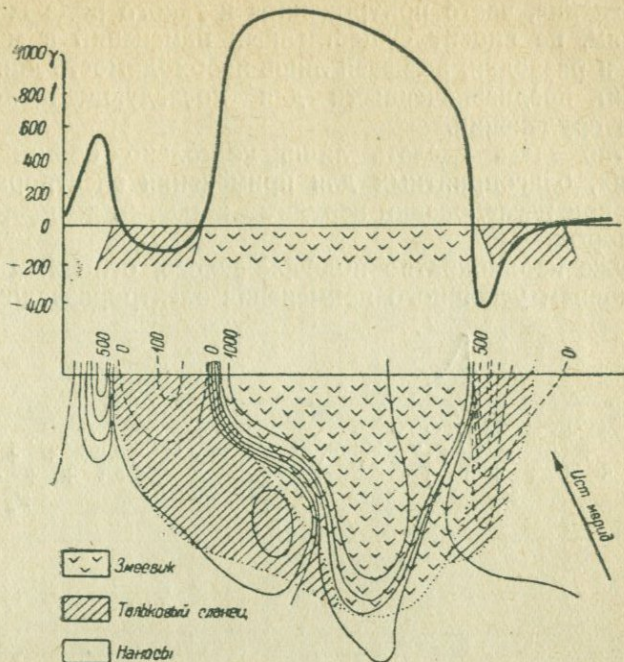


Рис. 191. План магнитометрической съемки и профиль ΔZ на Гумбейском змеевиковом массиве (Урал) (по Д. С. Миккову).

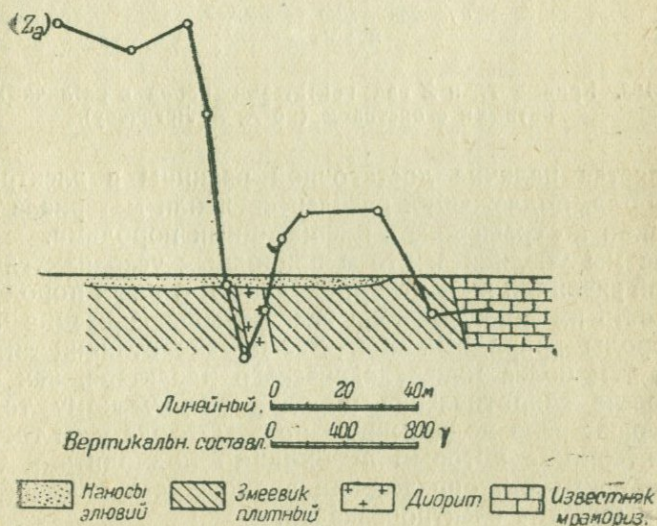


Рис. 192. Магнитная аномалия над жилой диорита в змеевиках (месторождение Кутарстан, Башкирия) (по А. Г. Линькову).

Оруденение, часто приуроченное к такого рода жильным выполнениям, не вносит существенных изменений в методику их поисков и разведки, вызывая лишь необходимость дополнения ее методами, предназначенными для последующей локализации участков оруденения.

Уместно здесь сделать лишь несколько общих замечаний о случаях, благоприятных для применения электроразведочных методов при исследовании нерудных жильных выполнений и контактов пород.

Как уже неоднократно подчеркивалось, основным и главным условием успешного применения электроразведочных мето-

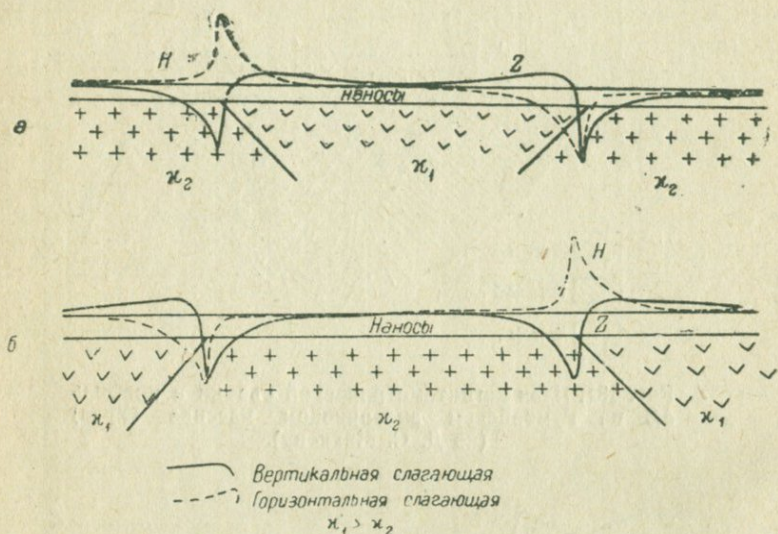


Рис. 193. Кривые H и Z над контактами пород с различными магнитными свойствами (по А. А. Логачеву).

дов является наличие достаточной разницы в электропроводности пород, подлежащих расчленению, или материала жильных выполнений по сравнению с вмещающими породами.

Выше мы убедились, что в природных условиях главнейшей причиной различий в электропроводности горных пород является способность их к поглощению влаги и минерализация насыщающих породы природных вод. Все прочие отличия литологического и тем более минералогического характера, как факторы, изменяющие сопротивление пород электрическому току, чаще всего играют явно подчиненную роль. Отсюда ясен тот главнейший критерий, с которым необходимо подходить к тому или иному объекту при определении возможности применения в их изучении методов электроразведки.

Влияние термодинамических условий, резко различных при образовании интрузивных, жильных и излившихся пород, а тем более пород осадочных и метаморфических, обуславливает и

различия в их текстуре, структуре, в способности к сопротивлению агентам поверхностного выветривания и, как следствие, — в величинах их пористости, влагоемкости, а в связи с этим — электропроводности.

Не следует, конечно, думать, что различия в минералогическом составе вообще не влияют на электропроводность горных пород. Наличие такого влияния несомненно и иногда оказывается доминирующим в тех случаях, когда минералы, входящие в состав контактирующих пород, резко различны по удельному электрическому сопротивлению.

В значительном большинстве случаев прослеживание жильных полей и контактов оказывается посильной задачей для электроразведки.

При выборе частной методики надлежит руководствоваться теми же основными соображениями, которые мы излагали ранее, т. е. при равных технических возможностях методик применять наиболее простую и недорогую из них.

Если расположить наиболее часто применяемые методы электроразведки по степени возрастания сложности аппаратуры и полевой техники, а в связи с этим и по возрастающей стоимости производства работ этими методами, то ряд этот будет иметь следующий вид:

- 1) метод сопротивлений на постоянном токе (профилирование, снятие градиента),
- 2) метод изолиний (на переменном и на постоянном токе),
- 3) метод интенсивности,
- 4) метод индукции.

В то же время совершенно недопустимо в погоне за несложностью и большей дешевизной применять методику, не обладающую равными техническими возможностями по сравнению с другой, хотя бы и более сложной. Так, например, применение метода сопротивлений (профилирование, снятие градиента) при исследовании сложных жильных полей с маломощными, невыдержанными по простиранию жилами не может быть рекомендовано. Очевидно, здесь уместнее применить метод интенсивности с последующей детализацией этим же методом или частичным уточнением и прослеживанием аномалий методами индукции или постоянного тока (детальное профилирование, электроразведка).

Выше уже указывались преимущества и недостатки отдельных методов электроразведки, которые обязательно должны приниматься во внимание при постановке тех или иных работ.

Применение гравиметрии, сейсмического и радиоактивных методов. Широкое и успешное использование гравиметрии и сейсмического метода при решении вопросов региональной, структурной и глубинной геологии общеизвестно. В то же время при решении задач детального геологического картирования рудоносных площадей эти методы, а также методы радиоактивные не получили в разведочной практике СССР широкого распространения. Их чаще всего применяют

лишь в тех случаях, когда другие методы оказываются неспособными решить поставленные задачи. Так, например, метод гравиметрии довольно широко привлекается к работам лишь на хромитовых месторождениях, так как в силу специфичности геологии их прочие методы, исключая магнитометрию, привлекаемую для решения некоторых геологических задач, не дают нужных результатов.

Редкое применение гравиметрии и сейсмического метода объясняется большей дороговизной их при возможности решать те же задачи методами электроразведки или магнитометрии, а редкое применение радиометрии — узкими границами возможностей ее применения. То же можно сказать и о методе геотермии, во все не нашедшем еще применения в решении вопросов, связанных с исследованием рудных месторождений, хотя некоторые, пока неудачные, попытки его использования и были сделаны (Блява, Хапчеранга).

Нельзя сказать, что при исследовании рудоносных площадей не встречается вопросов, требующих применения в их разрешении сейсмического метода. Так, например, для оценки перспектив рудоносности Хапчерангинского оловянного месторождения исключительный интерес представляет выяснение подземного рельефа массива гранит-порфира, погружающегося в юго-восточном направлении и подстилающего рудоносные зоны. Резко расчлененный рельеф, неоднородность наносов и сложность геологического разреза делают применение здесь глубоких (до 1,5—2 км) электроразведочных работ мало рациональным. Однако дороговизна производства сейсмических работ до сих пор затрудняет их осуществление, несмотря на желательность постановки этих работ.

Подобного рода вопросы нередко ставятся при изучении рудоносных районов, и вполне возможно, что сейсмический метод при дальнейшем его развитии займет свое место в комплексе методов при геофизических исследованиях рудных месторождений.

II. НЕКОТОРЫЕ ЧАСТНЫЕ СЛУЧАИ ПРИМЕНЕНИЯ ГЕОФИЗИКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Проявления контактового метаморфизма

Возможности выявления геофизическими методами ряда явлений минерализации, сходных по конечным результатам с некоторыми проявлениями контактового метаморфизма, частично уже описаны выше.

Разведочная геофизика обладает также рядом возможностей для выделения зон, подвергшихся термальному метаморфизму без привноса новых элементов.

Электроразведочными методами часто оказывается возможным выделять зоны перекристаллизации известняков среди неизменных пород того же состава, отделять глинистые отложения от образовавшихся из них при термальном метаморфизме

глинистых и слюдяных сланцев и роговиков, отличать зоны перекристаллизованных в кварциты кварцевых песчаников и ряд других подобных проявлений термального метаморфизма.

Оконтуривание железных шляп рудных месторождений

Наличие железной шляпы, образующейся при окислении некоторых сульфидов, часто является характерным поисковым признаком для месторождений сульфидных руд. Нередко и сами железные шляпы представляют интерес, как полезное ископаемое, в тех случаях, когда в образованиях железной шляпы концентрируются ценные металлы.

Пористые, ноздреватые образования железных шляп, состоящие в основном из водных окислов железа, кварца и ряда второстепенных минералов, при сравнительно небольшой глубине залегания от поверхности являются почти всегда благоприятным объектом для геофизических исследований.

Некоторые водные окислы железа обладают заметной магнитностью, а в ряде случаев, когда железные окислы образуют псевдоморфозы, замещающая ферромагнитные минералы, они в значительной степени сохраняют и более интенсивные магнитные свойства первичных минералов.

В ряде случаев примесь магнетита в лимонитах железных шляп дает возможность надежного оконтуривания последних методом магнитометрии. Подобные работы были успешно проведены на Смирновском сульфидно-полиметаллическом месторождении (см. рис. 194).

В тех случаях, когда процесс окисления сульфидов и образования железной шляпы протекает достаточно интенсивно и не столь далеко от дневной поверхности, хорошие результаты при



Рис. 194. Магнитные аномалии над магнетитсодержащей железной шляпой. Смирновское месторождение, Серный рудник.

Изолинии ΔZ : 1 — положительных значений; 2 — отрицательных значений.

оконтурировании железных шляп дает метод естественного поля, использующий возникающую при этих процессах естественную электродвижущую силу.

В последнее время для той же цели был предложен также так называемый ионный метод, основанный на индикации мигрирующих в зону элювия-делювия свободных анионов серной кислоты. Метод этот еще не получил широкого применения, однако при опытных работах уже подтверждена правильность предположений, положенных в его основу.

В частности, такие опытные работы были проведены на полиметаллическом месторождении Буурду в Северной Киргизии. Повышенные концентрации свободной серной кислоты в поверхностных окисленных частях зоны полиметаллического сульфидного оруденения довольно четко отмечались при измерениях ионным методом. На рис. 195 приведены полученные при этом графики потенциала избирательных электродов.

Наконец, текстурные особенности железных шляп, большая их влагоемкость и повышенная кислотность циркулирующих в их пределах природных вод позволяют применять в целях выявления и оконтурирования железных шляп различные модификации методов электроразведки.

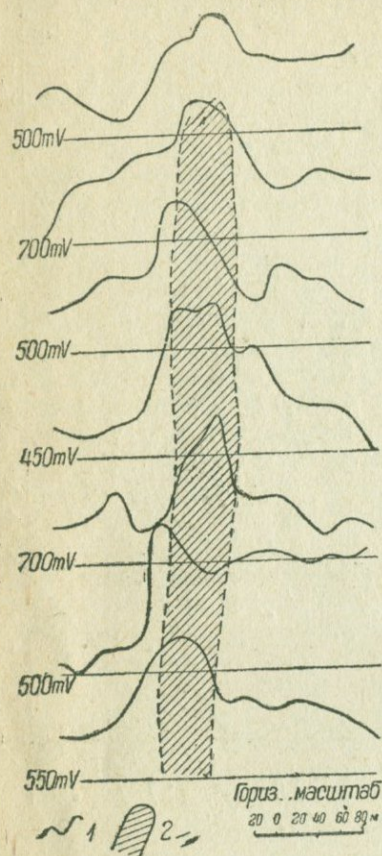


Рис. 195. Промер концентрации свободной H_2SO_4 (ионный метод) над рудной зоной месторождения Буурду (Северная Киргизия) (по И. С. Сидорову).

1 — график потенциала избирательных электродов; 2 — контуры зоны полиметаллического оруденения. Масштаб графиков: 1 см = 40 м.

Кароттаж рудных скважин

Применение на рудных месторождениях различных видов кароттажа буровых скважин не столь часто оказывается необходимым. Оно целесообразно в тех случаях, когда недостаточный выход керна

или другие обстоятельства не позволяют с необходимой точностью учесть мощность и число пересекаемых скважиной рудных тел. В случаях недостаточности документации старых скважин, при условии хорошей технической сохранности последних, применение кароттажа может помочь восстановить и уточнить сведения о пересеченных скважиной рудных телах. Точность,

возможная при выявлении мощностей с помощью карротажа, достигает нескольких сантиметров (рис. 196).

Применение того или иного из существующих видов карротажа зависит, в основном, от физических свойств руд и вмещающих пород, встречающихся в разрезе, пересекаемом скважиной.

Применение ондометрии

Ряд вопросов рудничной геологии, особенно в условиях действующих предприятий, недоступен разрешению распространенными геофизическими методами, а для решения обычными приемами горной разведки требует крупных материальных затрат. К таким вопросам относятся поиски разорванных послерудными тектоническими подвижками частей рудных тел, выявление рудоносности толщ, заключенных между подземными выработками и поверхностью, а также неразведанных пространств между самими горными выработками.

В этих случаях часто возможно применение мало распространенного у нас в Союзе метода ондометрии, приспособленного к производству работ в подземных выработках. Физические основы метода ондометрии, использующего особенности прохождения электромагнитных волн в горных породах, ограничивают возможности его применения кругом хорошо проводящих ток рудных образований.

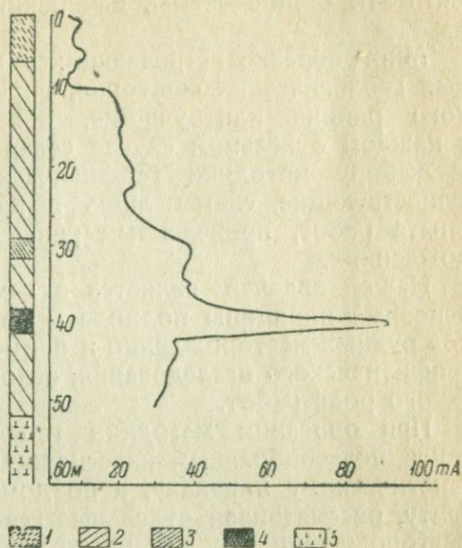


Рис. 196. Электрический карротаж скважины (Первоуральский рудник, Урал) (по П. Ф. Родионову).

1 — наносы; 2 — кварцево-серицитовые сланцы; 3 — кварцево-серицитовые сланцы с вкрапленностью сульфидов; 4 — рудная зона (колчеданные руды); 5 — альбитизация.

§ 28. ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ РАЗВЕДКА ГЛАВНЕЙШИХ ТИПОВ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Развитие применения геофизики при поисках и разведке рудных месторождений СССР за ряд последних лет обусловило накопление значительного опыта исследований, слагающихся из теоретической разработки методики комплексных геофизических работ на различных рудных объектах, производства опытных полевых работ по ее применению и обобщения данных широкой производственной практики.

К настоящему времени советская разведочная геофизика располагает установившимися, в общих чертах, схемами производства работ и подхода к изучению с помощью геофизических методов ряда типов месторождений. Не следует, конечно, понимать эти общие схемы, как некий твердо установленный стандарт.

Многообразие встречающихся в практике сочетаний различных геологических факторов, определяющих строение рудоносного района или участка, обязывает геофизика-разведчика в каждом отдельном случае совершенно объективно подходить к выбору методики геофизических исследований, используя существующие схемы лишь в качестве данных обобщенного опыта работ, проведенных ранее на близких по типу месторождениях.

Нашей задачей является в самом сжатом виде изложить основные принципы подхода к изучению ряда главнейших типов рудных месторождений и примерные схемы их комплексного геофизического исследования, основанные на накопленном опыте такого рода работ.

При описании методики геофизических исследований мы сочли целесообразным классифицировать месторождения не по генетическому признаку, а по доминирующему рудному компоненту, рассматривая отдельные генетические типы внутри групп месторождений тех или иных металлов.

1. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД

Месторождения железных руд отличаются исключительным многообразием генетических типов.

С точки зрения возможностей и методики исследования геофизическими методами удобно разделить главнейшие типы месторождений железных руд на две группы:

1) месторождения, главным рудным минералом которых является магнетит,

2) месторождения слабомагнитных и практически не магнитных руд.

К первой группе можно отнести следующие месторождения.

1. Месторождения магнетита и титано-магнетита магматического происхождения. Рудные минералы — магнетит и магнетит с ильменитом. Форма рудных тел — преимущественно шпильры (достигающие иногда значительных размеров), зоны богатой вкрапленности в изверженных породах и жилы (инъекционные).

2. Месторождения контактового типа. Главнейшие рудные минералы — магнетит, гематит (железный блеск, мартит). Форма рудных тел преимущественно неправильная, хотя оруденение часто расположено вдоль контактов, следуя простиранию метаморфизованных или замещенных пород.

3. Месторождения гидротермального типа в тех случаях, когда главным рудным минералом в них является магнетит. Форма тел преимущественно жильная.

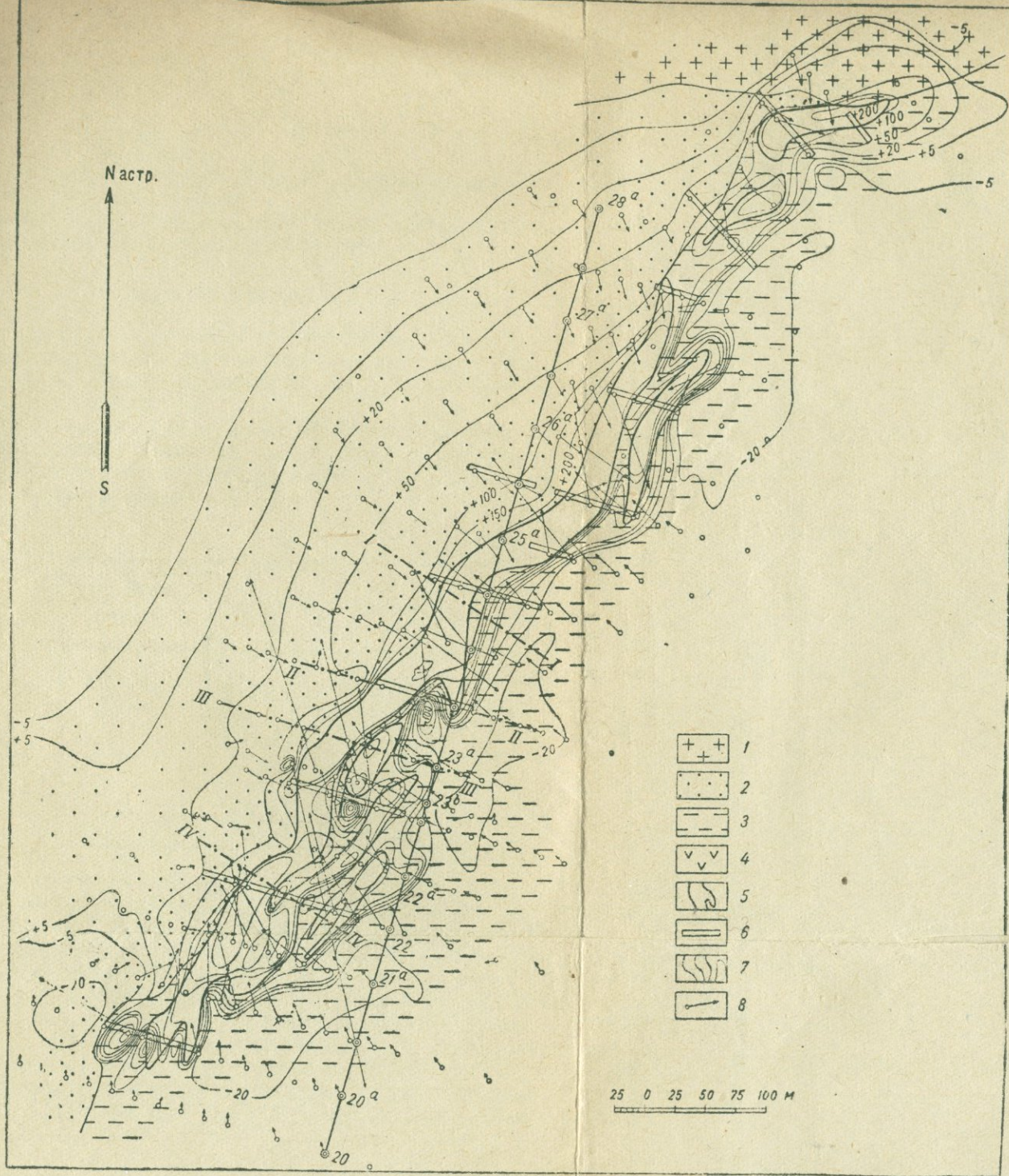


Рис. 197. Магнитные аномалии над одной из залежей месторождения Железный Кряж.

1 — гранит; 2 — метаморфизованные кварциты и песчаники; 3 — контактные роговики; 4 — жильный порфирит; 5 — контур рудной зоны; 6 — разведочные каналы; 7 — изолинии $Z_a(\pm)$ в сотых долях H_0 ; 8 — векторы H_a .

Масштаб: 1 $H_0 = 1$ см.

4. Россыпные месторождения магнетита.

Ко второй группе можно отнести следующие месторождения.

1. Месторождения гидротермального типа в тех случаях, когда преобладающим минералом в рудах является сидерит или гематит. Форма рудных залежей чаще неправильная, иногда жильная.

2. Месторождения железных руд осадочного и инфильтрационного происхождения.

Главнейшие рудные минералы месторождений этих типов — бурые железняки, сидерит.

Формы залегания — пласты, пластообразные залежи, линзы, гнезда и залежи неправильной формы.

Магнитные свойства железных руд

Рассмотрению методики геофизических исследований железорудных месторождений необходимо предпослать краткие дополнительные сведения о магнитных свойствах главнейших рудных минералов железа.

Магнетит ($\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) обладает наиболее высокой магнитной восприимчивостью χ . Измерения χ магнетитовых руд из различных месторождений и различного генезиса дали следующие результаты (табл. 20).

Таблица 20

По Кенигсбергеру	По Пучиха	По Грене	По ЦНИГРИ
0,81 CGSM	0,5 CGSM	0,5 CGSM	0,25 CGSM
1,20 »	0,5 »	0,3 »	0,3 »
0,78 »	0,9 »	0,3 »	0,11 »
0,70 »	2,0 »	0,6 »	0,15 »
1,22 »			0,25 »

Часть измерений относится к монокристаллам

Как видно из приведенных данных, магнитная восприимчивость магнетитовых руд значительно варьирует, но не встречается ниже 0,1 CGSM и редко превышает 1,0 CGSM.

Установлено, что магнитная восприимчивость магнетитов и «магнетитолитов» различного генезиса — различна. Предполагают, что это обусловлено как условиями его образования, так и тем циклом изменений, которые он претерпевает в последующие периоды (Ф. Ю. Левинсон-Лессинг). Вопрос этот еще весьма мало изучен, хотя и проделаны некоторые весьма интересные исследования. Термомагнитное изучение магнетитовых руд показывает также, что при высоких температурах, близких к точке

Кюри, магнитная восприимчивость магнетита резко повышается¹. Приведенными обстоятельствами отчасти и объясняются различия в величинах магнитной восприимчивости для магнетитов различного генезиса.

Магнитные свойства титано-магнетитов близки к таковым для магнетита, хотя при термическом воздействии их намагничивание несколько отлично от магнетита.

Гематит (Fe_2O_3) в большинстве случаев не обладает ферромагнитными свойствами. Ряд образцов чистого гематита при измерении дал следующие величины магнитной восприимчивости ($\chi \times 10^{-6}$ CGSM): 9,46; 316; 51; 33; 41 (Грене); 31,6; 25; 36,8 (Херроун и Вильсон). В то же время Кенигсбергер наблюдал магнитные разности гематита, магнитная восприимчивость которых доходит до $2,25 \times 10^{-2}$ CGSM. Есть основания считать, что магнитные модификации гематита наблюдаются в тех случаях, когда его происхождение связано с окислением магнетита. Кенигсбергер, принимая термин, предложенный П. Вагнером, называет магнитные разности гематита, представляющие собой псевдоморфозы с сохранившимся строением кристаллической решетки магнетита — магхемитом. Мартит, по Грене, обладает $\chi = 4600 \times 10^{-6}$ CGSM, χ некоторых разностей гематита достигает $1000 - 1500 \times 10^{-6}$ CGSM.

Бурые железняки и лимониты ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) обладают магнитной восприимчивостью, колеблющейся около $100 - 200 \times 10^{-6}$ CGSM, т. е. являются весьма слабомагнитными, а чаще всего практически немагнитными.

Сидерит (FeCO_3) также обладает слабой магнитностью. Имеющиеся измерения показывают, что χ сидерита не превышает $400 - 450 \times 10^{-6}$ CGSM.

Поиски и разведка месторождений сильно магнитных железных руд

Общим признаком, объединяющим месторождения, отнесенные нами к первой группе, является доминирующее значение магнетита, как главного компонента руд, и, как следствие этого, — сильная их магнитность.

Магнитные руды железа были одним из первых объектов применения геофизики в области исследования рудных месторождений. Интенсивная магнитность руд определяет и метод геофизики, который пользуется исключительным распространением при поисковых и разведочных работах на месторождениях этой группы, а именно — магнитный метод.

Необходимо отметить, что наряду с магнитностью, индуцируемой магнитным полем земли, ферромагнитные руды всегда в той или иной степени обладают собственным или остаточным магнетизмом (I_r), достигающим иногда значительных величин по отношению к индуцированному.

¹ Температура точки Кюри для магнетита, т. е. точки, при нагревании выше которой магнетит теряет полностью свою магнитность, равна $\sim 525^\circ$.

Возникновение I_r , повидимому, можно связывать с особенностями намагничивания руд в процессе формирования рудных тел в условиях более высоких температур.

Этим объясняется часто наблюдаемое в практике явление, когда измеряемое напряжение аномального поля значительно превышает величины, которые можно было бы ожидать, исходя из магнитной восприимчивости руд и силы намагничивающего (нормального земного) поля. Поэтому при производстве магнитных съемок на ферромагнитных объектах настоятельно рекомендуется, наряду с исследованием магнитной восприимчивости, проведение массовых измерений I_r на образцах руд для внесения соответствующих корректив при геологической интерпретации результатов исследований.

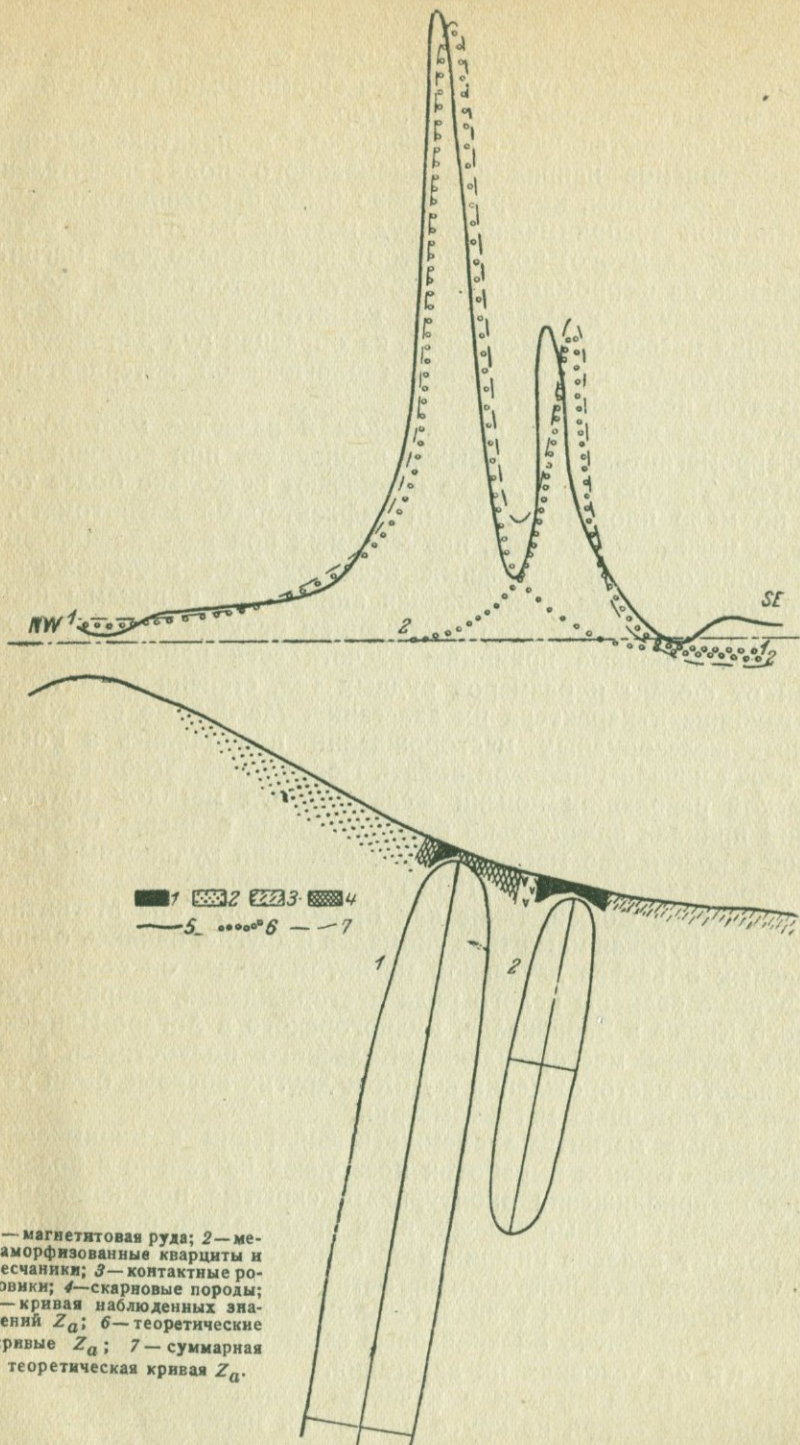
Магнитные измерения при поисках и разведке месторождений ферромагнитных руд обычно производят при помощи магнитометра Тибберг-Талена, реже применяют несколько более точный, но мало производительный дефлекторный магнитометр.

Виды магнитных съемок, применяемых при рекогносцировочных, поисковых и детальных исследованиях месторождений ферромагнитных руд, применяемая аппаратура и приемы полевой работы описаны в соответствующем разделе курса. Там же приведены основные принципы расчета сети измерений, зависящей от формы и размеров рудных тел, степени магнитности руд, глубины и характера их залегания. Магнитные съемки отдельных железорудных месторождений проводились в России еще перед началом мировой войны. После Октябрьской социалистической революции поиски железных руд методом магнитометрии приняли значительно более широкие размеры. Особенно большое количество магнитных исследований рудоносных районов произведено в 1931—1932 гг. Крупнейшие железорудные месторождения Союза, такие как Кривой Рог, Гора Магнитная, Благодать, Курская магнитная аномалия и другие, явились одними из первых объектов детальной магнитометрической съемки.

Крупные размеры целого ряда месторождений, например Железного Кряжа в Забайкалье, Рудногорского в Ангаро-Илимском районе, группы месторождений Кольского полуострова, Мало-Хинганского месторождения в ДВК и других впервые были установлены с помощью магнитометрии.

Детальные магнитные съемки в сочетании с минимальным количеством горных выработок позволяют не только с большой степенью приближения оконтуривать скрытые под наносами и даже «слепые» рудные залежи, но и производить ориентировочный подсчет запасов низших категорий. Разработанные методы геологической интерпретации магнитных аномалий над залежами сильно магнитных руд в значительном числе случаев позволяют выводить достаточно обоснованные заключения о размерах рудных тел и об условиях их залегания.

На рис. 197 приведен в качестве примера план магнитных аномалий над одной из круто падающих магнетитовых залежей Железного Кряжа и соответствующий участок геологической



1—магнетитовая руда; 2—
 метаморфизованные кварциты и
 песчаники; 3—контактные ро-
 говики; 4—скарновые породы;
 5—кривая наблюдаемых зна-
 чений Z_a ; 6—теоретические
 кривые Z_a ; 7—суммарная
 теоретическая кривая Z_a .

Рис. 198. Геологический разрез и графики Z_a по профилю III—III (рис. 197). Месторождение Железный Кряж (по М. В. Юневу).

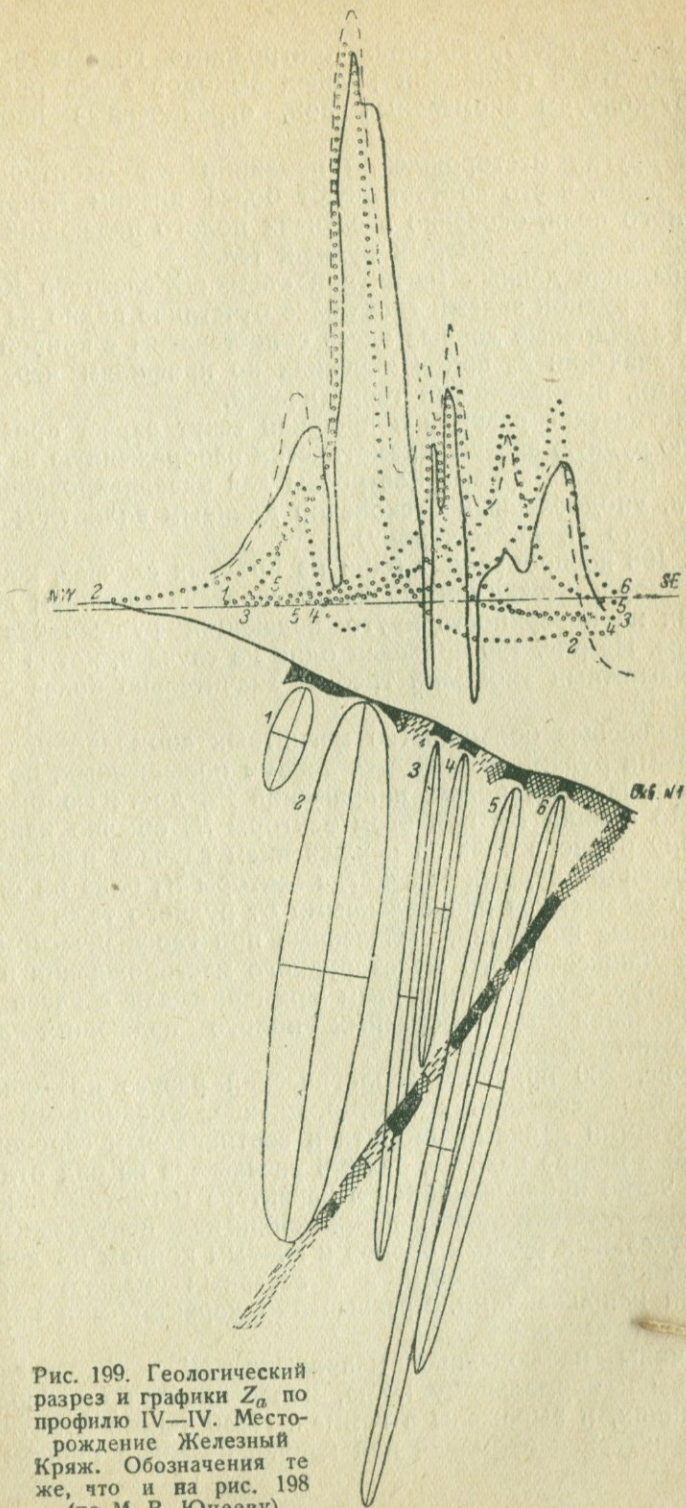


Рис. 199. Геологический разрез и графики Z_{α} по профилю IV—IV. Место-рождение Железный Кряж. Обозначения те же, что и на рис. 198 (по М. В. Юневу).

карты этого месторождения. Контрольные горные выработки показали, что с границами рудных выходов здесь обычно совпадают контуры аномальных зон, ограниченные изолиниями $Z_a \geq 1H_0$.

Для других месторождений изолинии Z_a , оконтуривающие рудные зоны, часто соответствуют более низким напряжениям магнитного поля, особенно в случаях полого падающих и горизонтальных пластообразных рудных тел.

Совпадение данных магнитной съемки Железного Кряжа со строением рудной залежи еще отчетливо видно на рис. 198 и 199. Разведочные данные здесь сопоставлены с кривой наблюдаемых значений Z_a при измерениях по профилям через 3 м и с кривыми, вычисленными теоретически.

Геологические разрезы и профили секут вкрест простирания сложную рудную залежь, схематически изображенную на рис. 197.

Теоретические кривые построены для идеализированных рудных тел, уподобленных бесконечно длинным эллиптическим цилиндрам (по И. М. Бахурину).

Рис. 198 воспроизводит один из простых случаев, когда суммарная теоретическая кривая Z_a обусловлена влиянием двух выходящих на поверхность круто падающих рудных тел разной величины. На рис. 199 приведен один из случаев, когда расшифровка магнитных аномалий требует значительно более сложных построений.

Подавляющее большинство магнитных аномалий над ферромагнитными рудами выражается зонами повышенных, по сравнению с нормальным полем, напряжений Z_a , достигающих иногда до 10—15 единиц H_0 ; при этом векторы H_a обычно направлены в сторону рудного тела за исключением случаев плоских и полого падающих рудных тел, когда векторы H_a близ их северных концов оказываются направленными от рудного тела.

Магнитные аномалии, выявленные при геофизическом исследовании Дашкесанского железорудного месторождения в Закавказье, могут служить типичным примером для случаев косоугольного намагничивания пластообразных полого падающих залежей ферромагнитных руд.

На рис. 200 приведен геологический разрез по одному из профилей, пересекающих месторождение. Эрозионным размывом, секущими дайками диорита и вертикальным сбросом, проходящим в центре разреза, залежь расчленена на ряд отдельных блоков, четко проявляющихся в характере магнитных аномалий. Невысокие положительные напряжения над центральными частями отдельных рудных блоков к южным концам их достигают значительной интенсивности, а у северных сменяются отрицательными напряжениями. Чрезвычайно характерны и изменения направлений векторов H_a .

Величины наблюдаемых напряжений H и Z -составляющих приведены к нормальному полю, измеренному при абсолютных наблюдениях, и выражены в гаммах. Необходимо отметить, что мало характерная аномалия над крайним южным блоком (пере-

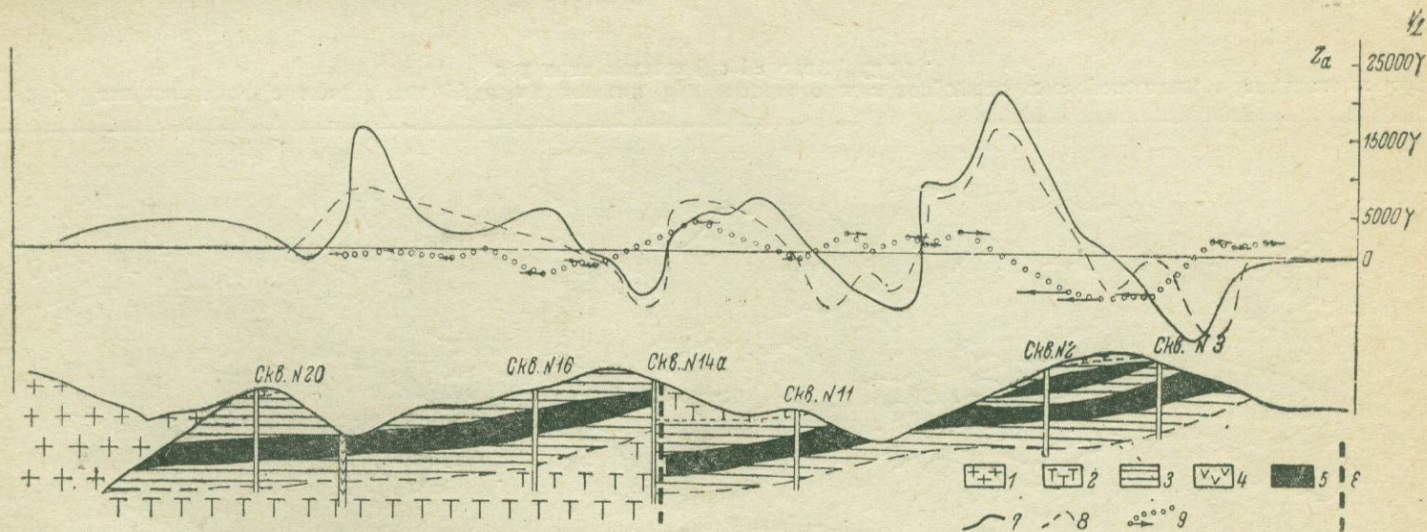


Рис. 200. Магнитные аномалии над полого падающими пластвыми залежами Дашкесанского железорудного месторождения (Закавказье) (по М. В. Юнесеву и Е. Г. Багратуни).

1 — гранодиорит; 2 — туфогенные породы; 3 — контактные роговики; 4 — жильный порфирит; 5 — рудная залежь (магнетито-гранатовые породы); 6 — трещина сброса; 7 — график наблюдаемых величин Z_a ; 8 — график Z_a , вычисленный теоретически; 9 — наблюдаемые кривая и векторы H_a (проекция на плоскость разреза).

сеченным скважиной № 20) обусловлена значительным преобладанием в рудах этого блока железного блеска; что резко отличает их от магнетито-гранатовых пород остальных частей рудной залежи. Как видно из рисунка, теоретические вычисления (по И. М. Бахурину) дают для Z_a кривую, близко сходящуюся с фактически наблюдаемой.

Наблюдаемые относительные отрицательные аномалии, расположенные близ положительных, обусловлены обычно влиянием более глубокого полюса магнитного рудного тела. Однако, хотя и весьма редко, встречаются случаи, когда рудные залежи про-

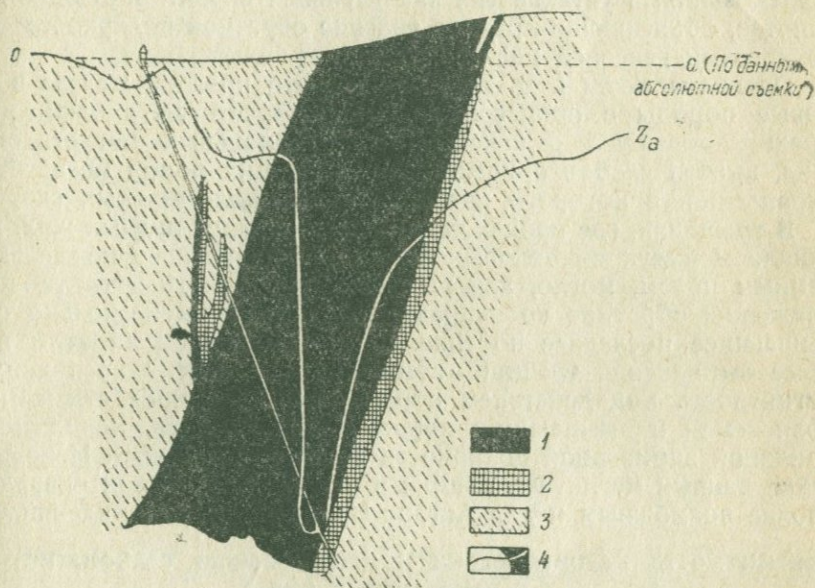


Рис. 202. Разрез по скважине № 2 и график Z_a над главной жилой Рудногорского месторождения (по Л. Д. Берсудскому).

1 — магнетитовая руда; 2 — брекчиевидная руда; 3 — кальцито-гроссуляровая порода; 4 — кривая Z_a по профилю 1. $1H_0 = 2,5$ см.

являют обратную магнитную полярность и прослеживаются на поверхности в виде зон интенсивных отрицательных напряжений Z_a .

В СССР это редкое явление проявилось исключительно ярко. Крупная группа из одиннадцати магнетитовых месторождений гидротермального происхождения, объединяемых под общим названием Ангаро-Илимской железорудной провинции, часть которых имеет весьма крупные размеры, проявляет обратную магнитную полярность. На рис. 201 и 202 изображена магнитная карта и разрез по профилю, пересекающему рудное тело одного из крупнейших месторождений провинции — Рудногорского (Игирьминского).

Подобные же магнитные карты дала магнитометрическая съемка остальных месторождений Ангаро-Илимской группы.

Контурам зон интенсивного оруденения почти во всех слу-

чаях соответствуют площади, оконтуриваемые изолиниями высоких отрицательных значений Z_a . Соответственно векторы H_a веерообразно расходятся по направлению от эпицентра верхнего магнитного полюса рудных тел. В то же время магнитные аномалии Ангаро-Илима не представляют собой простого негативного изображения обычных магнитных полей над магнетитовыми залежами, отличаясь от них широким распространением вокруг всех рудных тел невысоких положительных напряжений, которое не может быть полностью обусловлено влиянием нижнего магнитного полюса залежи. Проведенными специальными исследованиями установлена значительная вероятность одной из гипотез, объясняющих редкое явление обратной полярности особенностями генезиса месторождений.

Предполагают (Л. Д. Берсудский), что привнос железа в боковые породы в процессе пневматолитовой метаморфизации, предшествовавшей отложению гидротермальных магнетитовых жил, вызвал слабое оруденение вмещающих пород магнетитом, вкрапленность которого наблюдается в околожилых скарпах.

В трещинах, где происходило формирование рудных жил, под влиянием индукции боковых пород, намагниченных нормальным земным полем, могло, как выяснено, возникнуть магнитное напряжение, обратное по направлению земному и несколько превышающее последнее по силе. В последовавшем за этим процессе выполнения трещин отлагавшийся магнетит воспринимал магнитность под действием обратно направленного суммарного поля земли и вмещающих пород, что и явилось, повидимому, причиной аномальной полярности магнетитовых жил. Использование данных магнитной съемки в разведочных целях оказалось вполне возможным и для Ангаро-Илимских месторождений.

Применимость магнитометрии к исследованию слабомагнитных и немагнитных руд

К месторождениям, отнесенным нами ко второй группе, принадлежат многочисленные рудные образования, в которых доминирующими компонентами руд являются минералы, не обладающие ферромагнитными свойствами. Данная нами выше краткая магнитная характеристика бурых, красных железняков и шпатовых руд ясно показывает, что для успешного применения магнитометрии с целью поисков и разведок этих типов руд совершенно необходимы дополнительные особо благоприятные геологические условия. Такими условиями может оказаться ряд факторов. Приведем главные из них:

- 1) существование в рудах примеси магнетита или магнитных вторичных окислов железа;
- 2) залегание слабомагнитных руд среди совершенно немагнитных пород (главным образом, осадочных);
- 3) залегание скоплений немагнитных руд в породах, обладающих заметной магнитностью.

Необходимость наличия подобных дополнительных факторов ясно видна хотя бы из того, что многочисленные магнитораз-

дочные работы на крупнейших месторождениях бурых железняков дали отрицательные результаты. Никаких магнитных аномалий над известными рудными скоплениями в большинстве случаев не получено. С такими результатами, за исключением единичных случаев, были проведены магнитные съемки на ряде месторождений Тульского, Керченского, Липецкого районов, Урала и Западной Сибири.

Ряд магнитных съемок, произведенных в Орско-Халиловском районе, дал подобные же результаты. Лишь на двух месторождениях этого района — Мало-Халиловском и Ново-Киевском были получены магнитные аномалии над пластообразными залежами латерито-оолитовых руд (лимонит, гематит, гетит) в коре выветривания змеевикового массива. Относительные величины ΔZ над рудными телами достигали +100, +200, а на Ново-Киевском месторождении и +500 γ . На рис. 203 видно, что в одном из этих случаев контуры аномальных зон с некоторой степенью приближения повторяют форму рудных тел.

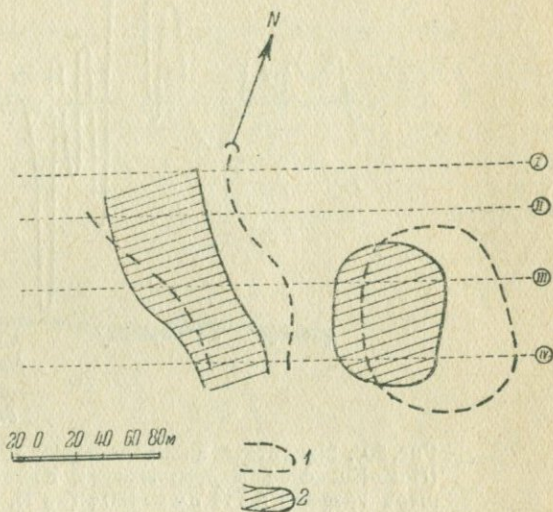


Рис. 203. Магнитные аномалии над бурыми железняками (Мало-Халиловское месторождение, Южный Урал) (по Н. Н. Сочеванову).

1 — контуры рудных тел (по разведочным данным); 2 — контуры зон повышенных значений вертикальной слагающей ($\Delta Z = +100, +200 \gamma$).

В Ново-Халиловском и Ново-Киевском месторождениях встречены два основных типа руд: рассыпчатые, светлые, охристые бурые железняки с псевдооолитовыми образованиями (магнитная восприимчивость χ около 50×10^{-6} CGSM) и значительно более плотная оолитовая разновид тех же руд, темнокоричневого, почти черного цвета, измерение одного из образцов которой показало $\chi = 22\,800 \times 10^{-6}$ CGSM при наличии сильной полярности. Причина интенсивной магнитности этой разновидности руд не была выяснена¹. На рис. 204 приведен график распределения вертикальной слагающей магнитного поля по одному из профилей над пластообразной рудной залежью Ново-Киевского месторождения. Резкие изменения градиента кривой соответствуют

¹ На одном из месторождений этого же района были обнаружены кальцито-магнетитовые щетки в пустотах жезд бурого железняка. Распространенность этого явления и происхождение его остались неизученными.

неравномерному распределению магнитных и немагнитных разновидностей руд. Для удобства рассмотрения, на рис. 204 вертикальный масштаб при изображении залежи увеличен в 5 раз.

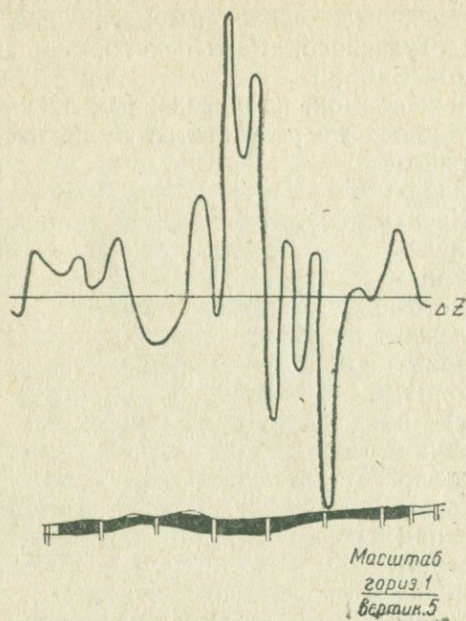


Рис. 204. Магнитные аномалии над бурями железняками (Ново-Киевское месторождение, Южный Урал). Масштаб графика ΔZ : 1 см = 100 γ (по Н. Н. Сочеванову).

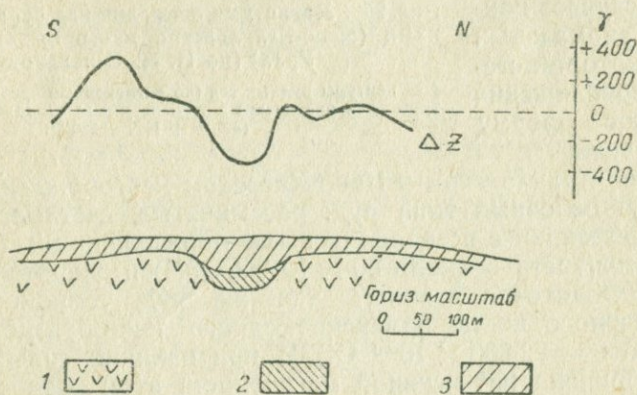


Рис. 205. График ΔZ и геологический разрез через месторождение бурого железняка Фогельсберг.
1 — базальт; 2 — бурый железняк; 3 — глина.

Нажонец, уместно привести наблюдаемый Мейером случай выделения залежи немагнитного бурого железняка в базальте, обладавшем заметной магнитностью (рис. 205).

Остается заключить, что при проектировании магнитных исследований на месторождениях бурого железняка совершенно необходимо проведение предварительного опробования магнитных свойств всех разновидностей руд и вмещающих пород. В ряде случаев результаты опробования могут указать на целесообразность постановки магнитной съемки и на точность измерений, необходимую при ее проведении.

Другие методы геофизики обычно не привлекаются к исследованию месторождений железных руд, хотя многие из последних и могли бы явиться объектом изучения электроразведочными методами.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ХРОМИТОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Месторождения хромистого железняка генетически всегда связаны с ультраосновными изверженными породами. Главнейшие промышленные месторождения хромитов принадлежат к магматическому типу. В процессе дифференциации ультраосновной магмы минералы хромитовой группы образуют широко рассеянную мелкую вкрапленность в дунитах и перидотитах. При кристаллизации остаточного расплава часть рудного материала обособляется в виде линз, жилообразных залежей и скоплений неправильной формы в дунитах и перидотитах, превращенных, чаще всего, в серпентиниты. Рудные тела обычно весьма невелики, хотя в редких случаях и достигают значительных размеров.

Основные физические свойства, используемые при геофизическом исследовании месторождений хромитов, — плотность и магнитная восприимчивость.

На рис. 206 приведены вариационные кривые плотностей серпентинитов (змеевиков) и хромитов, построенные по результатам исследования свыше двухсот образцов из месторождения Верблюжьей горы на Урале. Подобного же типа кривые характерны и для ряда других месторождений хромитов. Приведенные данные достаточно ясно обосновывают широкое применение гравиметрии при поисках и разведке хромитовых залежей. Избыточная плотность $\Delta\sigma$ хромитов по сравнению с змеевиками, составляющая для месторождения Верблюжьей горы в среднем 1,2, для большинства хромитовых месторождений составляет 1,0—1,5.

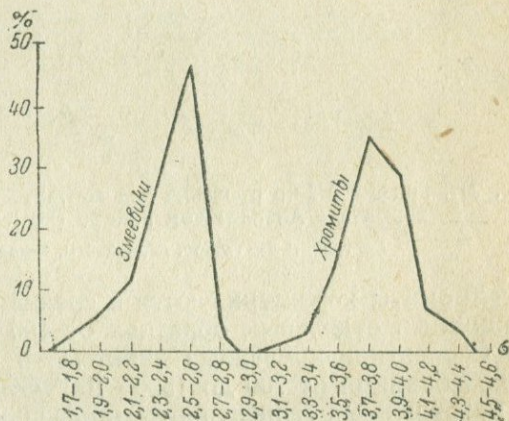


Рис. 206. Вариационные кривые плотности змеевиков и хромитов месторождения Верблюжьей горы (Урал) (по Б. А. Андрееву).

Относительная дороговизна работ методом гравиметрии¹ заставила разведчиков-геофизиков попытаться комплексировать его с другим более дешевым методом для предварительного выделения более узких площадей для непосредственных поисков руд и, тем самым, уменьшения затрат на гравиметрические работы.

Многочисленные исследования показывают, что серпентинизированные дуниты, пироксениты и разрушенные змеевика (серпентиниты) обладают значительной магнитной восприимчивостью. Магнитным оказывается также значительное большинство хромитовых руд.

Б. А. Андреев приводит магнитную характеристику образцов пород и руд из разных районов и разных хромитовых месторождений Союза, располагая их в порядке возрастания средней величины магнитной восприимчивости κ :

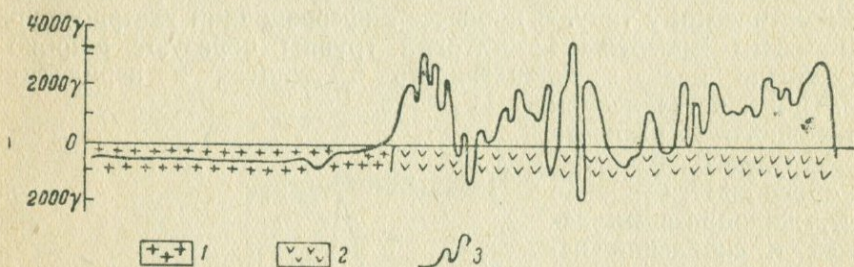


Рис. 207. График ΔZ по профилю над контактом (Ключевское месторождение хромита в Алапаевском районе (по Юнькову и Уманцеву).

1 — гранит; 2 — габбро, перидотиты, змеевика; 3 — кривая ΔZ .

Хромиты характеризуются в среднем $600 \cdot 10^{-6}$ CGSM, с колебаниями в отдельных образцах от 100 до $3800 \cdot 10^{-6}$ CGSM.

Серпентинизированные дуниты — в среднем $1200 \cdot 10^{-6}$ CGSM с колебаниями от 700 до $1500 \cdot 10^{-6}$ CGSM.

Разрушенные серпентиниты (змеевика) — в среднем $1500 \cdot 10^{-6}$ CGSM.

Серпентинизированные перидотиты и серпентиниты — в среднем $3700 \cdot 10^{-6}$ CGSM с колебаниями от 1200 до $8100 \cdot 10^{-6}$ CGSM.

Все остальные породы из районов месторождений хромитов (осадочные, жильные, туфы и т. д.) оказались в большинстве практически немагнитными.

Приведенные данные ясно показывают, что выделение хромитовых залежей среди вмещающих измененных ультраосновных пород, при столь неоднородной магнитности тех и других, нерационально проводить магнитным методом, который может привести, если руководствоваться средними величинами κ , наряду со случайными удачами, и к явно ошибочным выводам.

В то же время приуроченность хромитовых месторождений

¹ В условиях съемки на хромитах стоимость одной точки порядка 30 руб.

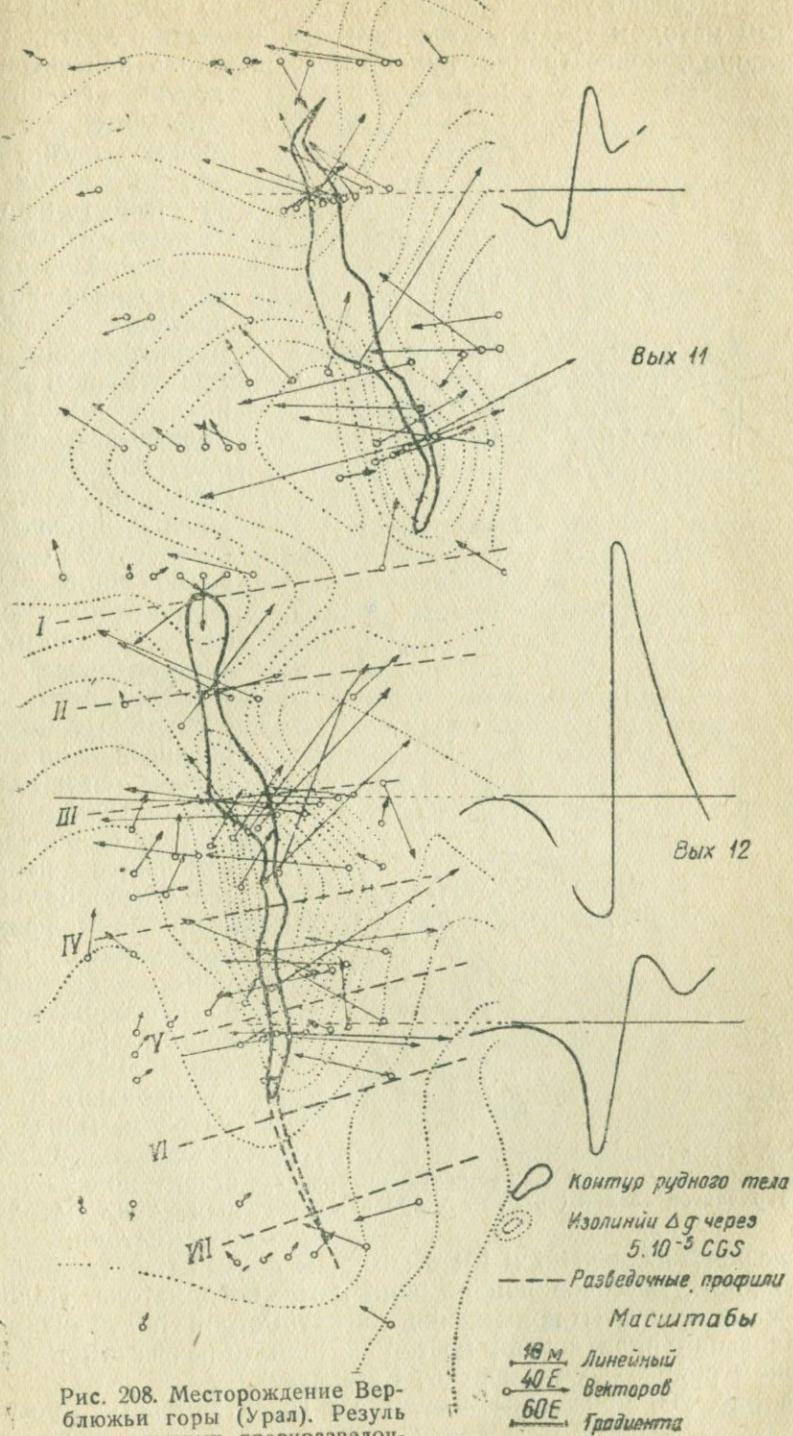
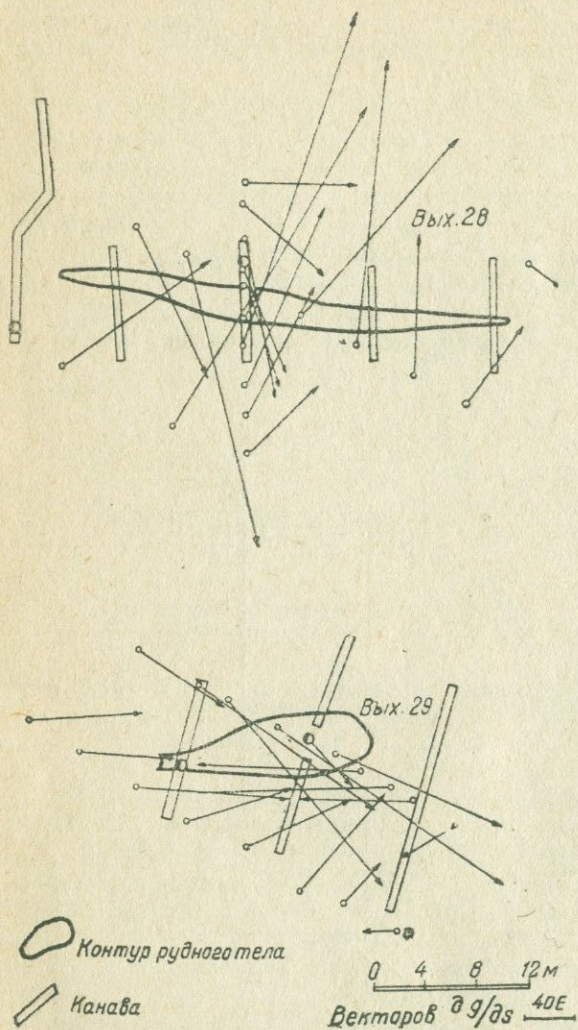


Рис. 208. Месторождение Верблюжьей горы (Урал). Результаты опытных гравиразведочных работ на хромитовых выходах (по А. А. Юнькову).

лишь к массивам ультраосновных пород, легко выделяемых магнитным методом среди подавляющего большинства других горных пород, концентрация рудопроявлений вдоль контактов и других геологических факторов выдвигают магнитометрию как метод, могущий быть использованным с большой пользой. Тщательная интерпретация данных магнитометрии, при обязательном использовании всех имеющихся сведений о геологическом строении месторождения, в большинстве случаев дает возможность выделять наиболее перспективные по рудности участки для последующего производства непосредственных поисков рудных тел методом гравиметрии.



Таким образом, намечается наиболее целесообразный комплекс геофизических методов для поисковых работ на месторождениях хромитов: картирование змеевиковых массивов магнитным методом, и на выделенных им участках поиски рудных тел методом гравиметрии.

Рис. 209. Месторождение Верблюжьей горы (Урал). Рудные тела, открытые по данным поисковой гравиметрической съемки (по Б. А. Андрееву).

Уже ранее на рис. 187 и 191 были даны примеры картирования змеевиковых массивов при помощи магнитного метода. Подобные же результаты применения магнитометрии получены при исследовании ряда других месторождений (Ключевском в Алапаевском районе — см. рис. 207, Кутарстан).

На рис. 208 приведены результаты гравитационных измере-

ний на месторождении Верблюжьей горы (Урал), произведенных в опытных целях над известными выходами хромитовых руд. Ряд работ по геофизическому исследованию месторождений хромитов (Верблюжьей горы, Алапаевское, Аккаргинское) привел к открытию новых рудных тел на поисковых участках и уточнению контуров известных залежей.

На рис. 209 приведены два случая открытия рудных тел на месторождении Верблюжьей горы.

При постановке гравиразведочных работ особое значение приобретает выбор сети наблюдений, зависящий от размеров и формы рудных тел, глубины их залегания и характера распространения.

Существуют способы расчета сети при поисках хромитовых месторождений. Чаще всего измерения на поисковых участках ведутся по квадратной сети порядка 25×25 м.

Выявление хотя бы одной аномальной точки влечет за собой обязательную детализацию наблюдений, иногда приводящую к открытию новых рудных тел.

Расширение технических возможностей методов индикации рудных «ореолов рассеяния» в элювии-делювии позволило в настоящий момент вплотную подойти к использованию этих методов при поисках и разведке месторождений хромитов. Уже разработана методика спектрального анализа на хром и на этой базе проводятся опытные полевые работы по «хромометрической съемке». В ближайшее время методика комплексных геофизических исследований на месторождениях хромита пополнится новым методом, который позволит более четко отличать рудные аномалии от безрудных и тем самым сделает результаты геофизических работ на хромиты значительно более однозначными и полноценными.

III. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ВОЛЬФРАМА

Вольфрамовые месторождения обычно связаны с интрузиями кислых пород. По генезису подавляющее большинство их относится к пневматолитовому (иногда контактовому) и гидротермальному типам.

К первым принадлежит ряд месторождений шеелита (CaWO_4) и вольфрамита $[(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4]$, располагающихся обычно в зонах контакта кислых интрузий с осадочными породами и сопровождающихся интенсивной метаморфизацией последних и образованием скарнов разнообразного состава.

Большинство промышленных вольфрамовых месторождений (в том числе и месторождений СССР) принадлежит к гипотермальному типу. Месторождения этого типа обычно имеют жильную форму, залегая как в самом теле интрузии, так и в осадочных породах, недалеко от контакта.

Вольфрамовое оруденение весьма часто оказывается приуроченным к кварцевым, реже к кварцево-полевошпатовым жилам.

Главнейшие рудные минералы вольфрама — вольфрамит, шелит и гюбнерит (крайний член ряда ферберит — вольфрамит — гюбнерит, лишенный железа).

Опыт советской геофизики в исследованиях месторождений вольфрама весьма невелик. Комплексному геофизическому изучению подверглось лишь одно месторождение, да и то при весьма небольшом объеме работ; рекогносцировочные исследования с помощью металлометрической съемки проведены также на некоторых месторождениях Калбинского хребта и Южного Алтая.

При поисках месторождений контактового и пневматолитового типа геофизические методы могут быть применены в первую очередь при детальном геологическом картировании рудоносных участков. Приуроченность рудопроявлений к контактовой зоне кислых интрузий выдвигает и те основные задачи, к решению которых геофизика может быть привлечена, — уточнение контактов пород, поиски и оконтуривание небольших по размерам выходов изверженных пород, с которыми связаны рудопроявления, поиски и прослеживание зон окварцевания и кварцевых жил, прослеживание скарновых зон и т. д.

Подобного же рода задачи, за исключением некоторых, могут быть также поставлены перед геофизикой при исследовании гидротермальных месторождений вольфрама.

Для непосредственных поисков вольфрамового оруденения разведочная геофизика не располагает достаточно широкими возможностями. Рудные минералы вольфрама не обладают ни повышенной электропроводностью, ни сколько-нибудь заметной магнитностью, ни радиоактивностью. Минеральные ассоциации, с которыми вольфрамовые соединения встречаются в рудах месторождений, также не дают каких-либо предпосылок к успешному использованию обычных методов геофизики, если исключить весьма редкие случаи наличия в них существенной примеси магнетита или радиоактивных минералов. Единственным благоприятным для этих методов сочетанием, правда, широко распространенным, является приуроченность вольфрамового оруденения к кварцевым и, реже, к пегматитовым жилам. Это может позволить во многих случаях с успехом использовать геофизические методы для косвенных поисков оруденения.

При исследовании одного из вольфрамовых месторождений оказалось возможным применить для выделения некоторых кварцево-гюбнеритовых жил как электроразведку, так и магнитометрию, хотя материал рудных жил и не обладал сколько-нибудь заметной магнитностью. Метаморфизованные эффузивные породы (зеленые сланцы), являющиеся вмещающими породами для целого ряда оруденелых кварцевых жил, оказались настолько интенсивно магнитными, что жилы выделялись среди них резкими минимумами ΔZ на общем фоне высоких магнитных напряжений.

На рис. 210 приведены графики ρ_k и ΔZ по профилям над двумя из таких жил (№ 1 и 2). Во всех остальных случаях жилы магнитным методом не могли быть выделены вследствие бли-

зости магнитных свойств вмещающих пород и материала жильных выполнений.

За последние годы значительно расширилось применение, в комплексе геофизических методов, металлометрических съемок. Разработка специальной методики приближенного количественного определения вольфрама в пробах с помощью спектрального анализа позволила привлечь метод металлометрической съемки к работе и на вольфрамовых месторождениях. Относительно

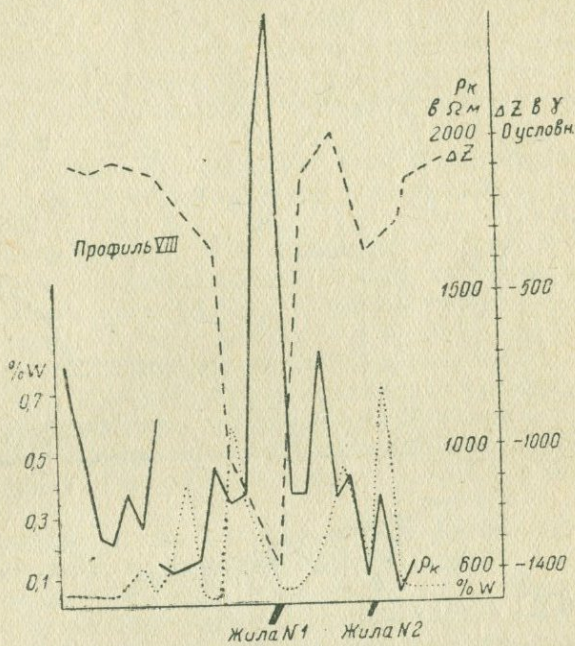


Рис. 210. Графики ρ_k , ΔZ и процентного содержания вольфрама в пробах из элювия-делювия по одному из профилей над кварцево-гюбнеритовыми жилами в метаморфизованных эффузивах.

высокая производительность вольфрамометрической съемки (до 100 проб с анализом в один рабочий день при бригаде из лаборанта, коллектора и 4—5 рабочих) позволяет его применять в качестве поискового метода иногда даже без предварительного выделения участков другими методами геофизики, а лишь руководствуясь общими геологическими соображениями.

К недостаткам этого метода следует отнести ограничение рационального его применения условиями рельефа, характером и мощностью наносов, а также некоторую расплывчатость во многих случаях индикации материнской жилы по ореолу рассеяния в делювии, особенно в случаях неблагоприятных соотношений простирания жил с рельефом местности. Желательно все же комплексировать металлометрическую съемку с одним из

возможных к применению на том или ином объекте геофизических методов. В условиях некоторых месторождений, сопоставление данных электроразведки с результатами опробования элювия и делювия давало значительно более четкие результаты, как это можно видеть из рис. 211.

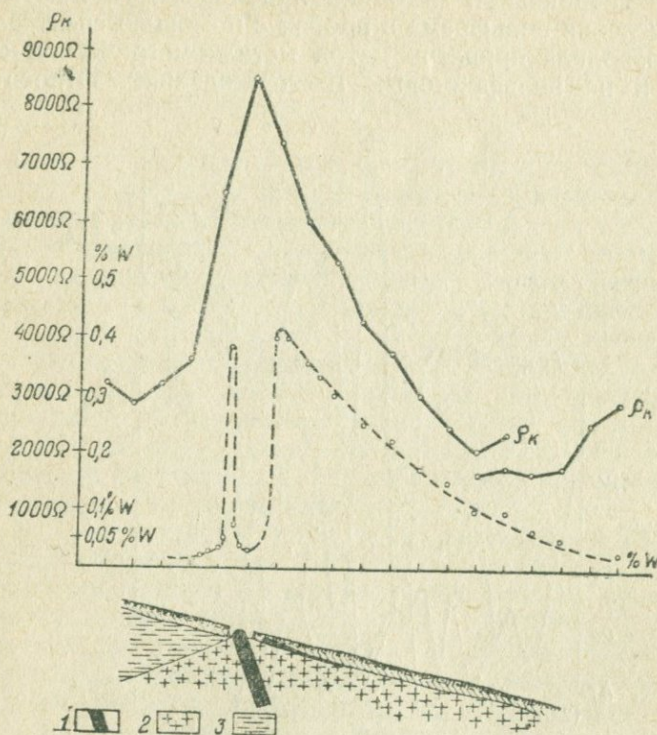


Рис. 211. График ρ_k и кривая содержания вольфрама в ореоле рассеяния.

1 — кварцево-полевошпатовая жила с гюбнеритом; 2 — гранит; 3 — сланцы.

Подобного рода комплексирование методов весьма желательно во всех случаях, где это возможно; оно послужит для уточнения местоположения рудных тел и для взаимного контроля результатов работ двумя или несколькими методами перед передачей их для разведочной проверки.

IV. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ПОЛИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ И МЕДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Главнейшие промышленные концентрации свинца, цинка, серебра и меди принадлежат, в основном, к гидротермальному (в подавляющем большинстве мезотермальному) типу, хотя вообще генетические типы полиметаллического и медного оруденения достаточно разнообразны.

Наиболее широко распространенными компонентами первичных полиметаллических и медных руд, определяющими, в основном, и методы, применяемые при геофизических исследованиях, являются: галенит (PbS), сфалерит (ZnS), халькопирит ($CuFeS_2$). Резкая количественная подчиненность минералов серебра в полиметаллических рудах исключает возможность использования их физических свойств для целей разведочной геофизики. В зонах окисления и вторичного обогащения широким распространением пользуются: церуссит ($PbCO_3$), англезит ($PbSO_4$), вуртцит (ZnS), смитсонит ($ZnCO_3$), халькозин (Cu_2S) и многие другие. В качестве существенных примесей, ассоциирующих с полиметаллами и медью, распространены сульфиды железа (пирит, пирротин и др.), часто играющие доминирующую количественную роль в составе руд.

Широко развиты в окисленной зоне сульфидных полиметаллических и медных месторождений разнообразные минералы железных шляп.

Одним из наиболее часто используемых при геофизических исследованиях рассматриваемой группы месторождений физических свойств руд является их электропроводность.

Как отмечено в § 2, наиболее высокопроводящими оказываются сплошные колчеданные руды и полиметаллические в тех случаях, когда доминирующим компонентом в них оказывается галенит. Более высоким электросопротивлением отличается сфалерит и значительная часть остальных как первичных, так и вторичных рудных минералов полиметаллических и медных месторождений.

Сравнительно резкие отличия в электропроводности различных рудных минералов — свинца, цинка и меди — ставят вопрос о возможности успешного применения электроразведочных методов геофизики при исследовании рассматриваемой группы месторождений в тесную зависимость от минерального состава руд, электропроводности и характера развития главнейших их компонентов, глубины залегания первичных руд, характера и мощности железной шляпы, а также электрических свойств вмещающих пород.

По условиям образования и форме рудных скоплений можно выделить следующие главнейшие типы рудопроявлений:

1) жильный тип (простые, сложные и четковидные жилы, штокверки);

2) линзообразные и неправильной формы залежи в сланцах и известняках. Для меди, кроме перечисленных, распространены еще два типа оруденения, имеющие большое промышленное значение: порфировые руды, залегающие в виде зон интенсивного оруденения, рассеянного по сложной сети мелких трещинок в верхних апикальных частях гипабисальных кислых интрузий, и медистые песчаники.

Последние приурочены к зонам тектонических нарушений и имеют пластово-линзообразную форму. Рудные минералы в ме-

дистых песчаниках образуются путем метасоматического замещения известковистого цемента.

Методика комплексных геофизических исследований рассматриваемой группы месторождений складывается из следующих основных этапов.

1. Применение методов геофизики при детальном геологическом картировании и выявлении факторов, контролирующих оруденение, с целью предварительного выделения наиболее перспективных по рудоности зон.

2. Выявление и оконтуривание связанных с рудоносной зоной железных шляп в тех случаях, когда эти образования достаточно велики и характер их благоприятен для применения тех или иных методов геофизики (см. § 27).

3. Непосредственные поиски сульфидного оруденения, проводимые, главным образом, методами электроразведки, реже другими методами.

4. Дополнительное исследование выявленных аномальных зон с целью выделения тех из них, связь которых с оруденением особенно вероятна.

За последние годы расширилось применение, наряду с различными модификациями электроразведочных методов, используемых для оценки характера электроаномалий (электрондирование, несимметричное профилирование и т. п.), также металлотрических съемок.

Разработаны и применяются методы экспресс-анализов проб, взятых при металлотрической съемке, с приближенной количественной оценкой содержания свинца, цинка и меди, кратко описанные в соответствующем разделе курса.

Само собой разумеется, что целесообразность применения металлотрических съемок определяется характером и мощностью наносов и наличием благоприятных условий для возникновения механических или солевых «ореолов рассеяния» при разрушении поверхностных частей рудных тел.

Выбор основного метода для выявления рудных тел, отличающихся более высокой электропроводностью по отношению к вмещающим породам, является делом достаточно сложным и требует тщательного учета всех местных условий, как это можно заключить из всего изложенного ранее по этому вопросу.

В дополнение к данным ранее указаниям уместно привести несколько примеров применения различных методов электроразведки при поисках сульфидного оруденения.

На Блявинском месторождении медистого пирита с успехом применялся метод инертности.

Рудные тела в верхних частях представлены железными шляпами, протягивающимися до глубины 35—40 м.

С учетом мощности прикрывающих рудные тела современных наносов и третичных отложений, глубина залегания первичных сплошных сульфидов в среднем равна 50—60 м.

Рудные тела представляют собой мощные линзы, вытянутые, примерно, в меридиональном направлении.

Рис. 212 дает представление об одном из рудных тел Блявинского месторождения и о контурах полученной над ним методом интенсивности аномальной зоны. Характер аномалии виден из рис. 213. Предполагают, что электроаномалия вызвана не только

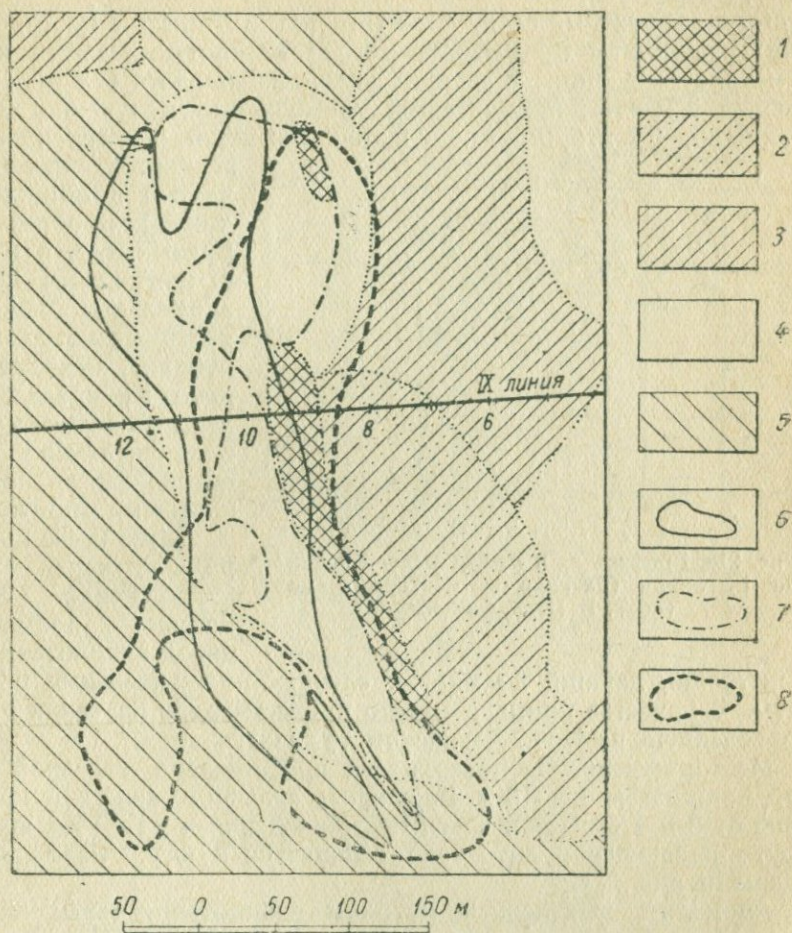


Рис. 212. Электроаномалия, выявленная методом интенсивности над рудной зоной (Блявинское месторождение) (по Т. П. Первушиной).

1 — железная шляпа; 2 — кварцевые порфиры; 3 — альбитофиры; 4 — третичные отложения и наносы; 5 — диабазы; 6 — контур рудного тела на глубине 64 м; 7 — контур рудного тела на глубине 32 м; 8 — контур электроаномалии.

глубоко залегающим сульфидным телом, но и влиянием интенсивно минерализованных вод, циркулирующих в более близких к поверхности частях рудной зоны.

Характер рудной зоны Блявинского месторождения, где в условиях полупроводящей среды происходит процесс окисления сульфидов, благоприятствует также появлению естественных

токов. Измерения показали наличие над известными рудными телами интенсивных естественных электрических полей.

Над рудным телом, изображенным на рис. 212, величины потенциалов естественного поля достигали -220 mV (измерения А. Ф. Огурского).

Отрицательными следует считать (на Блявинском месторождении) результаты применения метода эквипотенциальных линий и метода индукции. В первом случае наблюдался резкий «самоварный эффект», исключавший возможность получения четких аномалий, во втором — количество аномалий оказалось весьма

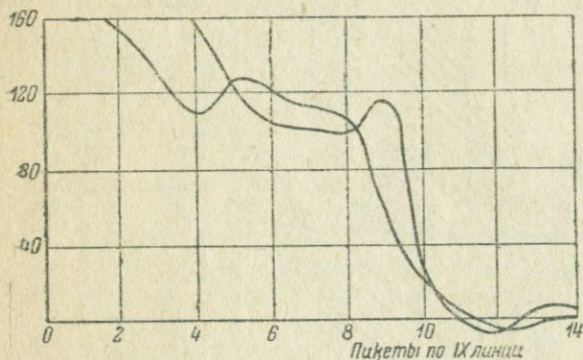


Рис. 213. Профиль a_p и a_z над рудной зоной по IX линии (Блявинское месторождение (по Т. П. Первушиной)).

велико. Совпадающие частью в общих чертах с простираением рудных тел, а иногда с контактами пород, аномальные оси, выявленные методом индукции, выходят далеко за пределы известных рудных тел и в значительной части обусловлены поверхностными причинами.

При исследовании ряда колчеданных месторождений Урала широко применялся метод эквипотенциальных

линий, давший во многих случаях положительные результаты. В качестве примера можно привести одну из таких работ, проведенную на Ново-Левинском руднике.

Месторождение на поверхности представлено железной шляпой мощностью 10—15 м. Первичные сульфиды залегают на глубине от 8 м в северной части месторождения и до 15 м в южной. Круто падающее рудное тело склоняется к югу. Размеры его видны из рис. 214.

Аномалия, выявленная методом эквипотенциальных линий, достаточно характерна для размеров и условий залегания этой рудной залежи.

На некоторых колчеданных месторождениях Урала (Кузнечиха, Левиха) хорошие результаты давал также метод интенсивности.

За период с 1925 по 1935 г. по подсчетам П. Ф. Родионова на колчеданных месторождениях Урала работало 96 электроразведочных партий. Открыто свыше 20 месторождений. Среди них — Левиха, Карпушиха, Электрическая линза, месторождение XV-й годовщины Октября, Северо-Первомайское и ряд других.

Большое количество исследований методами интенсивности и изолиний проведено на месторождениях ряда районов Рудного Алтая. Отсутствие данных о разведочной проверке не позво-

ляет пока вывести общее суждение об их результатах, хотя многие из обнаруженных аномалий заведомо были обусловлены известными рудными телами и единичные случаи разведочной проверки (Белоусовский рудник, Сургутановское, Лазурское месторождения) дали положительные результаты.

Явно отрицательными следует считать результаты электро-разведочных работ лишь в Риддерском районе, где даже из-

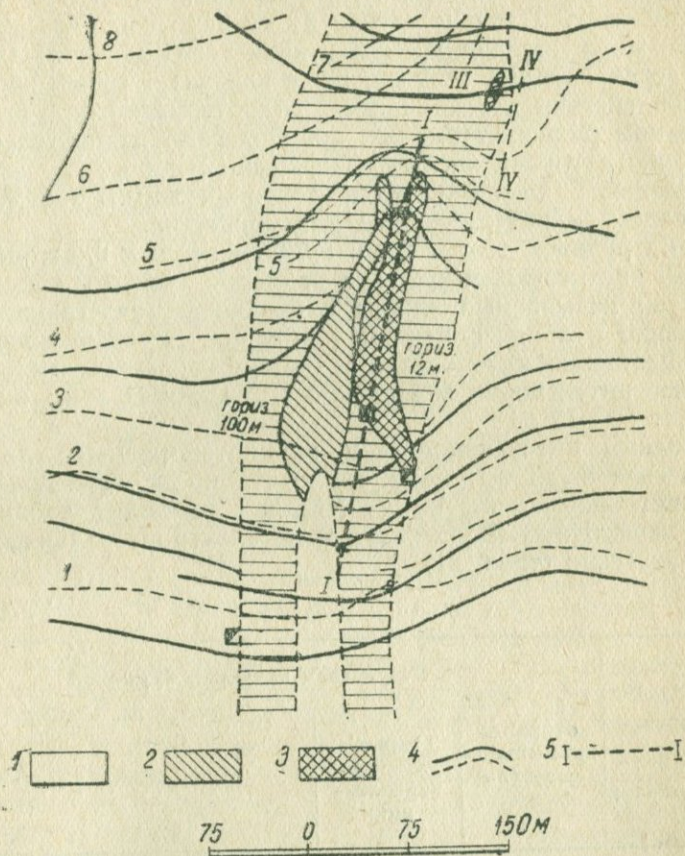


Рис. 214. Электроаномалия, выявленная методом эквипотенциальных линий над колчеданной залежью (Ново-Левинский рудник, Урал) (по П. Ф. Родионову).

1 — кварцево-серицитовые сланцы; 2 — контур сульфидов на горизонте 100 м; 3 — контур железной шапки; 4 — изолинии при разных положениях заземлений; 5 — осевая линия аномалии.

вестные рудные тела, представляющие собой преимущественно «слепые» линзы, не вызывали никаких аномалий при работе методами переменного тока и из-за отсутствия зон окисления не создавали естественных электрических полей. Вопрос о возможности поисков «слепых» линз методами электроразведки еще и сейчас является предметом научных исследований.

В продолжение ряда лет проводились геофизические исследования на Джекказганском медном месторождении. Работы производились преимущественно методами эквипотенциальных линий и интенсивности и охватили весь центральный Джекказган и Тас-Кудук. Общая площадь геофизических исследований достигает 100 км².

Джекказганские медные месторождения относят к мезотермальному типу. Происхождение их связано с процессами метасоматического замещения известковистого цемента (частично также зерен полевых шпатов, реже кварца) в серых песчаниках при воздействии восходящих гидротермальных растворов. Источником рудных терм, как предполагают, являются скрытые на глубине интрузии кислых изверженных пород.

Оруденение контролируется тектоническими зонами, несущими следы гидротермального метаморфизма.

Форма рудных тел частью приближается к пластообразным залежам, достигающим крупных размеров, частью представляет собой так называемые «жилы с брекчийей», залегающие непосредственно в зонах смятия и дробления. Рудные минералы — преимущественно халькопирит и борнит — развиты в виде более или менее интенсивной вкрапленности. Глубина зоны окисления достигает 10—15 м.

Методами интенсивности и эквипотенциальных линий на Джекказгане было выделено около ста предположительно рудных электроаномалий. И. С. Яговкин приводит таблицу, частично характеризующую результаты электроразведочных работ на Джекказгане (табл. 21).

Таблица 21

Год работ	Число проверенных аномалий	Результаты проверки бурением		
		открыты промышленные сульфидные руды	открыты сульфидные вкрапленники	отрицательные результаты
1927	1	1	—	—
1928	7	3	—	4 (одна дала бедные окисленные руды)
1929	8	4	1	3 (одна дала бедные окисленные руды)
1930	5	3	1	1 (бедные окисленные руды)
1931	3	2	—	1 (данные неполные)
	24	13	2	9

Данными о проверке остальных выделенных аномалий мы не располагаем.

Опытные геофизические работы, проведенные на месторождении Коунрад, оруденение в котором представлено типичными порфирированными рудами, привели Т. П. Первушину к следующим выводам:

1) при условии тщательного использования в процессе интерпретации электроаномалий всех имеющихся геологических данных, — возможно выделение зон повышенной концентрации сульфидов с помощью метода интенсивности;

2) метод измерения естественного электрического поля вследствие широкого распространения пиритизации, выходящей далеко за пределы промышленно интересного оруденения, никаких практически ценных указаний дать не может;

3) при решении ряда актуальных для направления разведочных работ задач детального геологического картирования вполне целесообразно применение метода сопротивлений на постоянном токе.

Работы методами электроразведки проводились также на многих жильных месторождениях сульфидов как в связи с поисками цветных металлов, так и при исследовании сульфидно-касситеритовых и никельсодержащих месторождений.

Опыт показывает, что в зависимости от местных условий наиболее применимыми в этом случае оказываются методы интенсивности или индукции с последующим дополнительным исследованием выявленных электроаномалий. Метод сопротивлений при малой мощности жил может быть использован только при косвенных поисках, выполняя задания по картированию рудоносных участков; некоторые его модификации могут быть использованы при исследовании причин, вызывающих электроаномалии, выявленные методами переменного тока.

В благоприятных случаях могут также быть применены метод естественного поля и металлометрическая съемка, могущие, в зависимости от местных условий, играть роль как контрольных, так иногда и поисковых методов.

Можно выделить случай, когда наличие в полиметаллических рудах магнитного компонента позволяет использовать магнитный метод разведки. Мы уже упоминали о таком явлении, наблюдаемом на Ванчинском оловоносном полиметаллическом месторождении. Подобный же случай встречен и на месторождении Ак-Тюс в Северной Киргизии.

Рудные тела, состоящие в основном из сульфидов свинца, меди и цинка, развитых в жильном кварце, приурочены в этом месторождении к зонам нарушений в метаморфических сланцах, прорванных дайками изверженных пород, и по форме представляют собой жильный штокверк мощностью от 8 до 20 м. Окисленные руды развиты мало.

Месторождение исследовалось несколькими методами. Над рудной зоной были получены индикации естественного электрического поля, достигавшие величин не более — 70 mV. Метод сопротивлений был с успехом применен при решении других задач на этом же месторождении, но над рудной зоной не было

получено четких аномалий. Наиболее четкие результаты дал метод точной магнитометрии. Рудная зона была оконтурена изо-

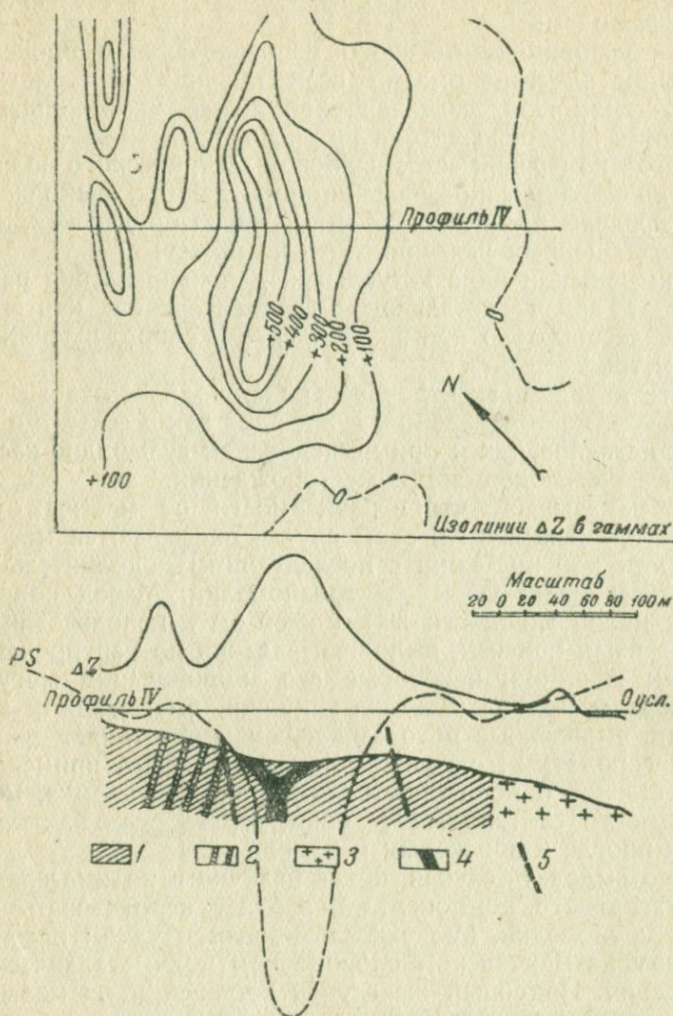


Рис. 215. Магнитная аномалия и аномалия естественного электрического поля над полиметаллической жиллой (месторождение Ак-Тюс, Северная Киргизия) (по И. С. Сидорову).

1 — сланцы; 2 — лампрофировые дайки; 3 — гранодиорит; 4 — рудное тело; 5 — линии тектонических нарушений.

линиями повышенных ΔZ , достигавшими значений до $+500 \gamma$ (рис. 215). Подобные же аномалии были выявлены и на поисковых участках.

Причина магнитности руд главного жильного поля месторождения Ак-Тюс осталась, к сожалению, не выясненной.

Предполагают существование в них примеси магнетита. Проверка одной из интенсивных магнитных аномалий (максимум ΔZ до 1400 γ) на поисковом участке показала наличие халькопиритовой жилы, содержащей магнетит.

Примером исследования полиметаллического месторождения, выполненного методами постоянного тока с контрольной ме-

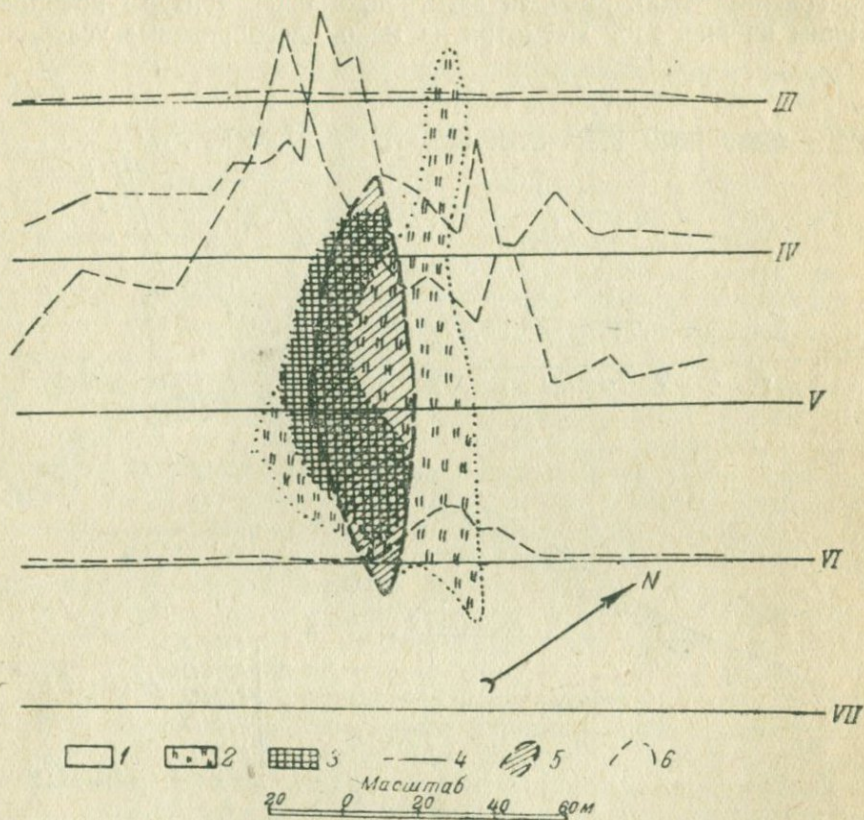


Рис. 216. Геологическая карта и результаты геофизических исследований на участке полиметаллического месторождения Арал-Тау (Казахстан) (по И. С. Сидорову).

1 — известняк; 2 — зона кальцитизации и известняковых брекчий; 3 — выход руды на поверхность (по геологическим данным); 4 — профили съемки; 5 — контур электроаномалии (по методу сопротивлений и эквипотенциальных линий); 6 — графики концентрации Pb в элювии-делювии.

таллометрической съемкой, могут служить работы, проведенные на месторождении Арал-Тау в Южном Казахстане.

Месторождение это приурочено к тектоническому контакту песчано-сланцевой толщи с известняками. Оруденение концентрировано в брекчированных участках известняков. Рудоносная известняковая брекчия интенсивно окислена, из рудных минералов содержит церуссит, смитсонит, лимонит и отдельные зерна сохранившихся сульфидов. По данным полевых измерений

электросопротивление брекчированных известняков с кальцитовым и рудным цементом составляет $2-5 \times 10^4 \Omega \text{ см}$. Электросопротивление вмещающих пород (плотных известняков), примерно, в десять раз больше.

Опытные работы над одним из известных рудных тел, проведенные методами сопротивлений и эквипотенциальных линий на постоянном токе, выявили электроаномалию, контуры которой видны на рис. 216. Несмотря на мало благоприятные условия,

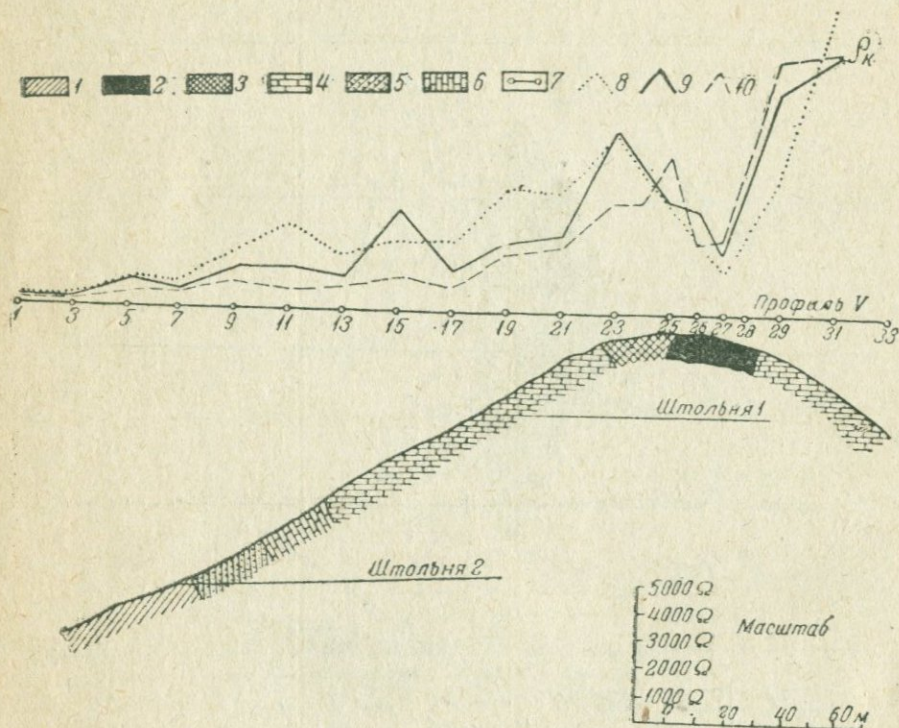


Рис. 217. График электросопротивлений по пятому профилю (месторождение Арал-Тау, Казахстан) (по И. С. Сидорову).

1 — сланцы; 2 — рудное тело (богатое оруденение); 3 — рудное тело (зона убогого оруденения); 4 — известняк; 5 — песчаники и сланцы; 6 — брекчированный известняк; 7 — пункты наблюдения по профилю; 8, 9 и 10 — графики ρ_k при разносах АВ-240, 120 и 60 м.

метод сопротивлений (снятие градиента, симметричное и несимметричное профилирование, электрозондирование) на ряде профилей позволил выделить известную рудную зону и наметить ряд подлежащих первоочередной проверке аномальных участков.

На рис. 217 приведены кривые ρ_k по профилю V, проходящему через центральную часть рудного выхода.

В качестве контрольного метода здесь была применена металлотометрическая съемка с нефелометрической индикацией свинца в пробах. На рис. 216 приведены графики, иллюстрирующие данные о концентрации свинца в элювии-делювии над рудной зоной.

Применение метода заряженного тела

Для выявления связи высокопроводящих рудных тел между собой в практике геофизической разведки часто применяют метод заряженного тела. В качестве примера такого рода работ можно привести исследования, проведенные на месторождении XV-й годовщины Октября (Урал), результаты которых по одному из участков приведены на рис. 218.

При заземлении в 30-й скважине изолиниями оконтуриваются два участка наибольшей концентрации сульфидов (северная и средняя линзы), расположенные здесь близко к поверхности.

При заземлении в шурфе № 3 изолиниями оконтуривается южная линза. Различия в распределении потенциала при различных заземлениях, повидимому, обусловлены тем, что более высокопроводящие рудные линзы (ближайшие к заземлению) расположены в общей минерализованной зоне, в целом также обладающей несколько повышенной по сравнению с вмещающими породами электропроводностью.

Заканчивая рассмотрение некоторых случаев применения геофизических методов при поисках и разведке высокопроводящих руд, необходимо отметить, что с точки зрения методики геофизических исследований в эту же группу приходится относить кроме сульфидов цветных металлов также сульфиды железа и мышьяка, отличающиеся столь же высокой электропроводностью и к тому же весьма часто оказывающиеся существенными компонентами полиметаллических и медных руд.

Изложенные нами общие указания о методике работ полностью, кроме, конечно, металлометрических съемок, относятся ко всем колчеданным месторождениям.

Типичным примером применения геофизических методов при исследовании сложных колчеданных месторождений может служить работа, проведенная Гансом Лундбергом в Кристинеберге в Швеции. Рудные линзы этого месторождения, состоящие в основном из пирита, халькопирита и пирротина, неравномерно распределены среди метаморфизованных кварцитов и хлоритовых сланцев.

Линзы вытянуты в меридиональном направлении; мощность их колеблется от 2 до 12 м, чаще же всего она близка к 6—7 м. Исследования, проведенные методом эквипотенциальных линий, дали четкие электроаномалии, хорошо совпадающие с контурами рудных тел, как это видно из сопоставления с геологической картой, сделанного на рис. 219.

V. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОЛОВА

Промышленные концентрации олова чаще всего встречаются в месторождениях гидротермального происхождения. Имеющиеся коренные месторождения пегматитового типа редко оказываются промышленно интересными вследствие крайней неравно-

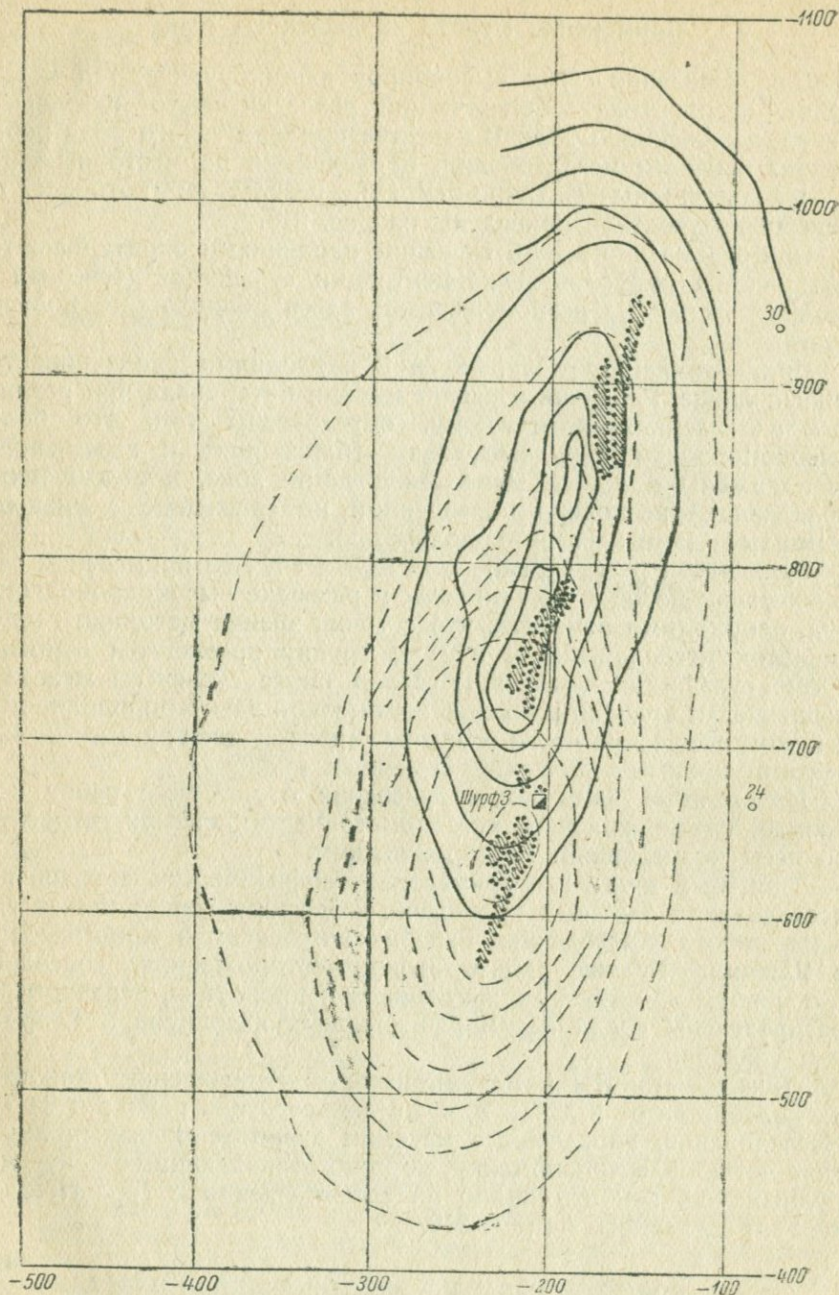


Рис. 218. Изопотенциальные линии, полученные методом заряженного тела (месторожд. XV-й годовщины Октября (по Л. А. Добровольскому).

1 — сульфидные руды (горизонт 54 м); 2 — изолинии при заземлении в шурфе № 3;
 3 — изолинии при заземлении в скважине 30; 4 — устья буровых скважин.

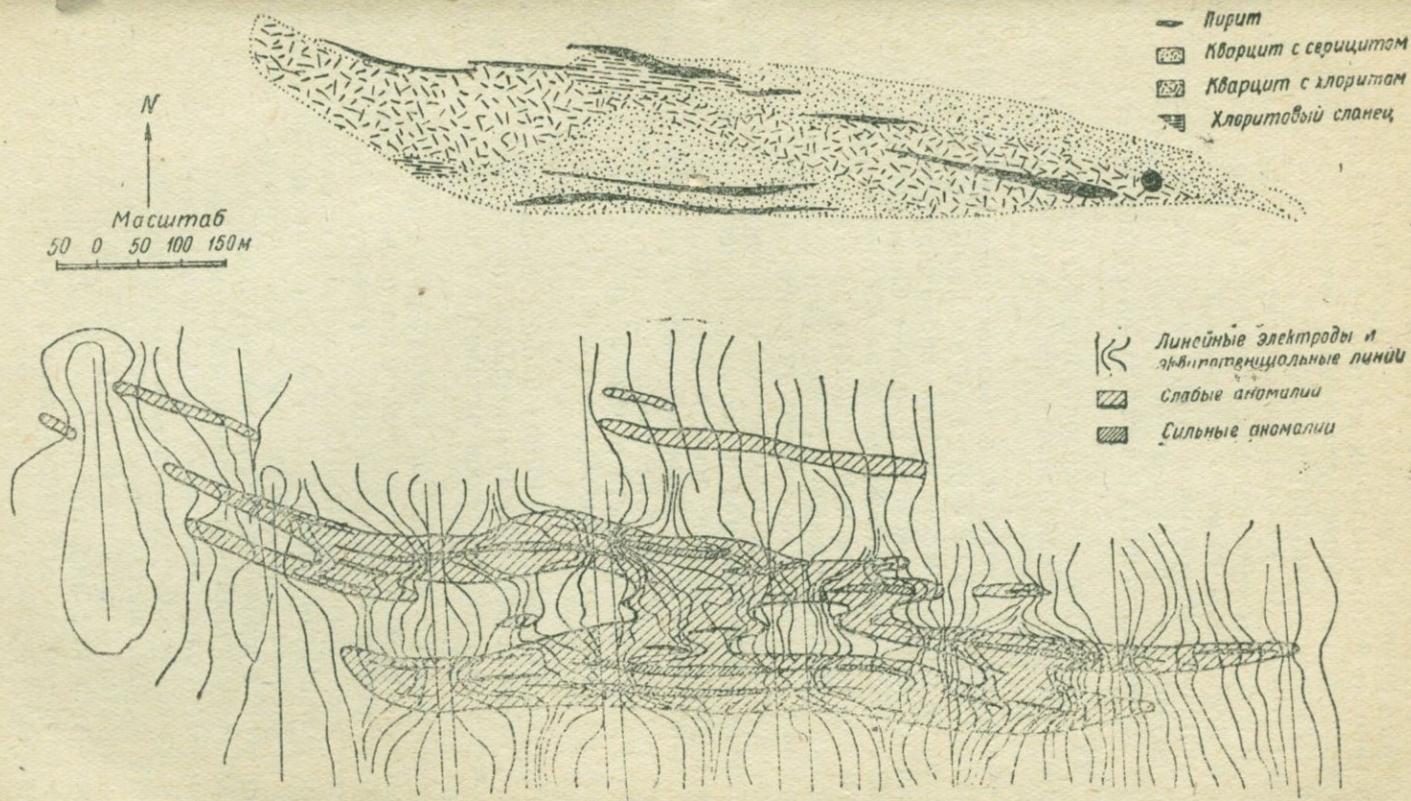


Рис. 219. План электроаномалий метода изолиний и геологическая карта пиритового месторождения Кристинеберг (по Лундбергу и Эклунду).

мерности оруденения. В магматических месторождениях промышленных концентраций олова не встречается вовсе.

Из гипо- и мезотермальных месторождений наибольшим распространением пользуются два типа — кварцево-касситеритовый и сульфидно-касситеритовый.

Пегматитовые и кварцево-касситеритовые месторождения часто заслуживают внимания как материнские породы для образования промышленных концентраций олова в россыпях.

Сульфидно-касситеритовый тип, напротив, не благоприятствует образованию россыпных месторождений вследствие мелкого рассеяния касситерита и часто тесного срастания его с сульфидами.

В СССР большинство эксплуатирующихся и разведываемых коренных месторождений олова принадлежит к сульфидно-касситеритовому типу.

Геофизические методы исследования сравнительно широко привлекаются к поискам и разведке оловянных месторождений. В частности, геофизические работы проводились и частью проводятся на Хапчерангинском, Большом Синанчинском, Шерловогорском месторождениях, а также на месторождениях Якутии, Чукотского полуострова и Калбинского хребта.

Первым этапом применения разведочной геофизики является ее участие в детальном геологическом картировании.

Порфиритовые дайки Б. Синанчи и Ванчина, обогащенные пирротином зоны разломов в песчано-глинистых сланцах Эге-Хая в Якутии, трещинные зоны в Хапчеранге и подобные им факторы контроля оруденения локализуют дальнейшие поиски рудных тел на отдельных перспективных по рудоносности зонах и участках. Возможности и некоторые практические случаи применения в этих целях разведочной геофизики мы рассмотрели выше.

Методика дальнейших поисков и оконтуривания рудных тел зависит, главным образом, от минерального состава первичных руд и интенсивности процессов окисления в поверхностных частях рудных тел.

Главнейшими сульфидными минералами, с которыми ассоциируется касситерит в рудах сульфидно-касситеритовых месторождений, являются: пирротин, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, реже арсенопирит. Преимущественно жильная форма рудных тел, приуроченность их к линиям тектонических нарушений и высокая электропроводность этого типа руд создают благоприятные условия для применения геофизики.

Наиболее удачным для геофизических исследований сочетанием являются оловосодержащие сульфидные руды с преобладанием в их составе ферромагнитных разновидностей пирротина.

Часть рудных жил Хапчерангинского месторождения легко прослеживается магнитным методом благодаря значительному содержанию в них пирротина. На рис. 220 приведен график ΔZ по профилю вкрест простирания одной из таких жил — Смирновской.

Часть II. Применение геофизических методов в геолого-разведочной практике.

Введение.

Глава VII. Геофизические методы в решении задач региональной и структурной геологии.

- | | |
|--|-----|
| § 21. Геологические задачи, решаемые методами разведочной геофизики, и основные принципы проектирования геофизических работ | 195 |
| § 22. Особенности физических полей регионального масштаба. Закономерности пространственно-временного изменения физических свойств пород, как специфическое выражение геологических процессов | 199 |
| § 23. Общие данные об использовании региональных гравитационных и магнитных карт | 124 |
| § 24. Комплексная методика решения глубинно-геологических задач. | 237 |
| § 25. Методика поисков и разведки нефтеносных структур | 242 |

Глава VIII. Применение геофизических методов при поисках и разведке месторождений полезных ископаемых.

- | | |
|--|-----|
| § 26. Основные принципы проектирования геофизических разведок на рудных месторождениях | 266 |
| § 27. Геофизические работы при решении вопросов структуры рудных полей | 275 |
| I. Задачи разведочной геофизики при детальном геологическом картировании рудоносных участков | 275 |
| II. Некоторые частные случаи применения геофизики при исследовании рудных месторождений | 292 |
| § 28. Геофизическая разведка главнейших типов рудных месторождений | 295 |
| I. Поиски и разведка месторождений железных руд | 296 |
| II. Исследование хромитовых месторождений | 309 |
| III. Исследование месторождений вольфрама | 313 |
| IV. Поиски и разведка полиметаллических и медных месторождений | 316 |
| V. Поиски и разведка месторождений олова | 327 |
| VI. Геофизическое исследование месторождений других металлов. | 336 |
| VII. Геофизическое исследование россыпных месторождений | 340 |
| § 29. Поиски и разведка геофизическими методами нерудных месторождений | 343 |

Глава IX. Применение методов разведочной геофизики при решении различных вопросов.

- | | |
|--|-----|
| § 30. Геофизические работы при гидро-геологических исследованиях и при решении задач инженерной геологии | 353 |
| § 31. Прочие объекты применения методов разведочной геофизики. | 369 |
| Литература | 376 |

Ответственный редактор *П. М. Татаринов*

Ведущий и технический редактор *Е. В. Климина*

Сдана в набор 4/VIII 1938 г.

Подписана к печати 28/VIII 1938 г.

Формат 62×94

Уч.-авт. л. 27,4

Тип. зн. в 1 бум. л. 120400

Печ. л. $2\frac{3}{4}$ + 4 вкл.

Бум. л. $11\frac{7}{8}$

Тираж 3000

Ленгорлит № 3644

Бумага фабрики „Сокол“

Заказ № 656

2-я типография ГОНТИ им. Евгении Соколовой. Ленинград, пр. Красных Командиров, 29.

Окисление поверхностных частей рудных жил (в которых существенным компонентом является пирротин), часто достигающее до значительных глубин от поверхности, сильно снижает интенсивность магнитных аномалий над ними, особенно в случаях малой мощности жил.

Пирротин, быстро окисляясь, чаще всего переходит в легко растворимые сульфаты и далее в водные окислы железа (лимонит). Все продукты изменения и разрушения пирротина практически немагнитны.

Предельная для возможности применения магнитного метода глубина залегания первичных пирротинсодержащих руд не может быть установлена заранее, так как зависит от целого ряда

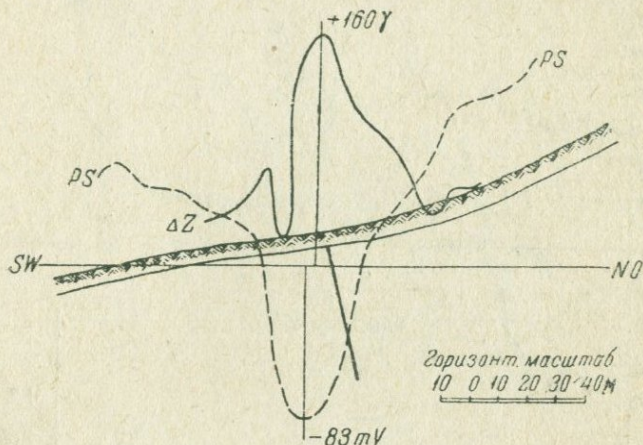


Рис. 220. Графики ΔZ (в γ) и P. S. (в mV) над Смирновской пирротин-касситеритовой жилой (Хапчеранга) (по А. П. Соловову).

причин, как то: магнитных свойств местных разновидностей пирротина, количественного содержания его в руде, мощности и протяженности на глубину первичных руд и т. п.

При проведении магниторазведочных работ на месторождении Эге-Хая в Якутии геофизики столкнулись, кроме указанного, с другим осложняющим обстоятельством. Над южным, в то время еще не вскрытым, продолжением рудной зоны, представляющей собой цементиремую пирротином брекчию, состоящую из обломков песчано-глинистых сланцев, были получены расплывчатые аномалии с нечетким максимумом ΔZ , интенсивностью не более 180 γ . В центральной части месторождения магнитные аномалии над рудной зоной имеют значительно более резкий характер, причем максимум ΔZ достигает +270 γ от условного нормального поля над неизменными сланцами.

Объяснение особого характера аномалий в южной части участка одним лишь погружением зоны первичных руд на большую глубину оказалось недостаточным. Пришлось допустить существование на глубине интенсивной пирротиновой вкрапленности

во вмещающих породах близ рудной зоны. На этом участке точки для заложения контрольных разведочных выработок (давших, правда, впоследствии благоприятный результат) не могли быть заданы с той точностью, какую обычно дает магнитный метод.

На рис. 221 приведены для сравнения два графика ΔZ по профилям съемки, иллюстрирующие сказанное.

Профиль 9, 8 пересекает круто падающую (на восток под $\angle 60-70^\circ$) зону пирротин-касситеритового оруденения, мощ-

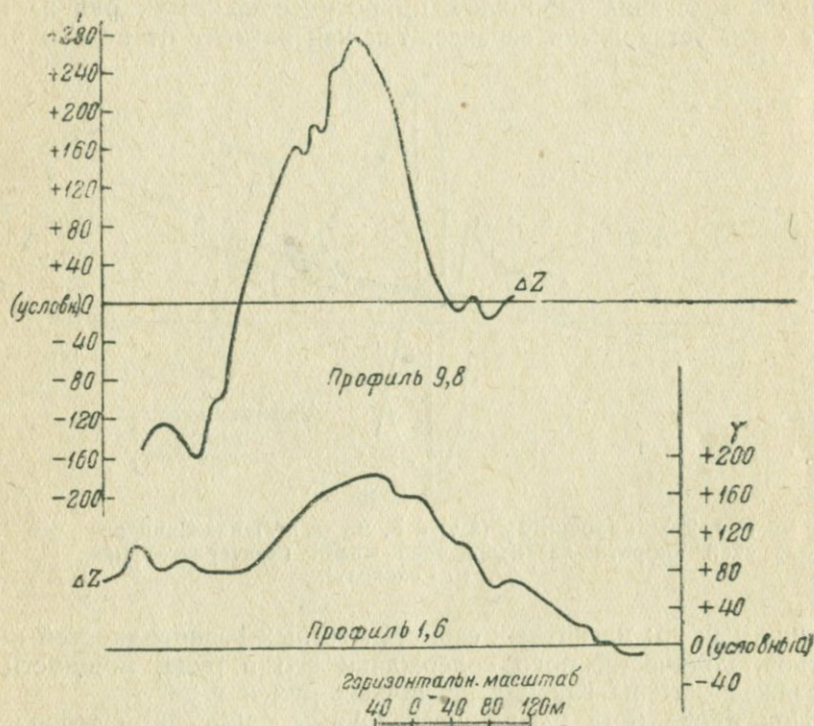


Рис. 221. Графики ΔZ по профилям вкостр простираения зоны пирротин-касситеритового оруденения (месторождение Эге-Хая в Якутии) (по А. Г. Линькову).

ностью 7—8 м в центральной части месторождения. Зона окисленных и полуокисленных руд доходит здесь до глубины 30—40 м при весьма малой мощности наносов.

Профиль 1, 6 относится к южной, мало разведанной части месторождения, где мощность наносов резко возрастает.

Если среди ассоциирующих с касситеритом сульфидов отсутствуют магнитные модификации пирротина, или же маломощные первичные руды залегают столь глубоко, что делают применение магнитного метода нерациональным, к работе привлекаются методы электроразведки.

Наличие мощной железной шляпы часто позволяет, как это выше описано, применять метод естественного поля и другие электроразведочные методы. Методика геофизических работ на сульфидных полиметаллических месторождениях описана в соответствующем разделе.

На Хапчерангинском, Б. Синанчинском, Ванчинском и других месторождениях применялись методы естественного поля, сопротивлений, эквипотенциальных линий, интенсивности и индук-

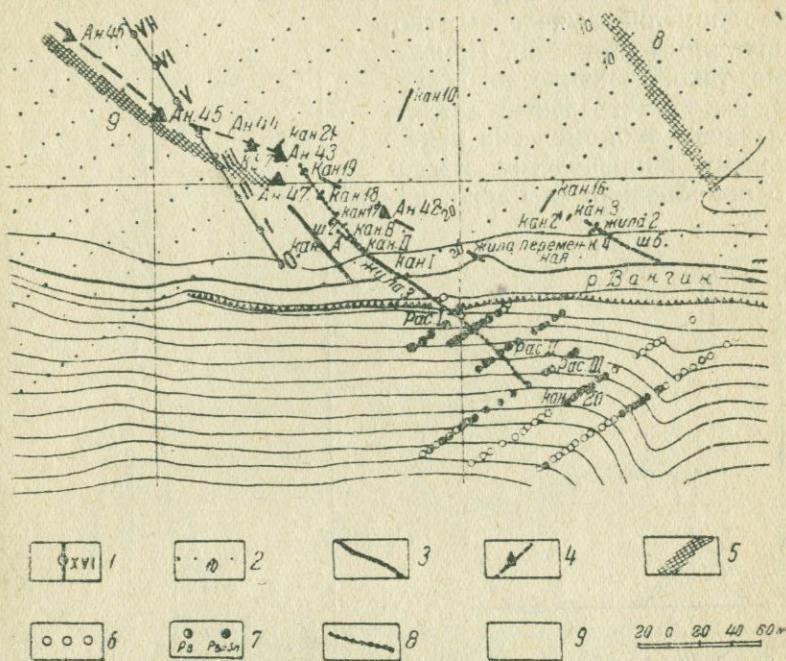


Рис. 222. Результаты комплексных геофизических работ на одном из участков Ванчинского месторождения (по Л. Д. Берсудскому).

1 — пикеты на магистральной линии; 2 — пункты наблюдений методом сопротивлений и магнитным; 3 — ось магнитной аномалии над дайкой порфирита; 4 — оси электроаномалий по методу индукции; 5 — зоны пониженных значений ρ_k ; 6—7 — места взятия проб при станнометрической съемке; 6 — пробы, лишенные Sn и Pb; 7 — пробы, показавшие наличие Sn и Pb в дельюви; 8 — рудные жилы; 9 — кварцевые порфиры (по Л. Д. Берсудскому).

ции, с помощью которых было выявлено большое количество электроаномалий. На рис. 220 приведен график потенциала естественного поля (P.S.) над Смирновской жилой (Хапчеранга). На рис. 222 в качестве примера комплексных исследований приведены результаты геофизических работ на Ванчинском месторождении. Рисунок этот характеризует вид результатов геофизических работ, передаваемых с соответствующими рекомендациями для разведочной проверки.

Интересно отметить, что на этом участке геофизикой было обнаружено пропущенное разведчиками продолжение жилы на основном ее простирании. Раздвоившаяся в одной из каналов

жила № 3 как будто выклинилась на основном простираии и далее прослеживалось лишь маломощное ее ответвление.

Методом индукции и магнитометрии было обнаружено ее продолжение на основном простираии (Ан. 47 на рис. 222). Кажущееся выклинивание оказалось одним из пережимов жилы, имеющей четковидный характер.

Практика полевых работ указала на необходимость нахождения критерия для надежного разделения «рудных» и «нерудных» аномалий, выявленных геофизическими методами. Привлечение такого технического средства, как спектральный анализ, сделавшего экономически рентабельным производство массового опробования на олово, по-

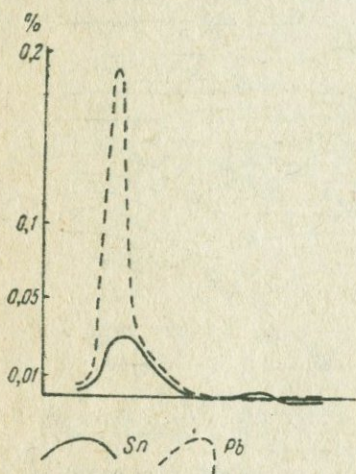


Рис. 223. Соотношение концентрации Sn и Pb в делювии над оловосодержащей полиметаллической жилой.

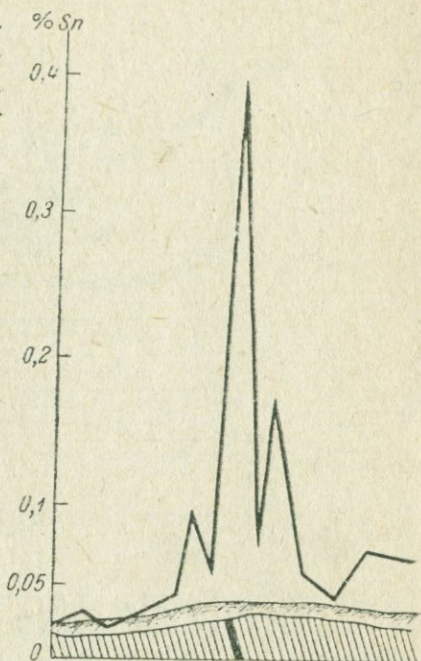


Рис. 224. Кривая содержания олова по пробам из элювия и делювия вкрест простираия жилы.

зволило использовать в качестве такого критерия данные станнометрической съемки.

В аномальных зонах, выявленных другими методами, проводят площадное опробование делювия или элювия, в результате которого выявляют наличие или отсутствие оловоносных ореолов рассеяния.

Стойкий касситерит является надежным индикатором существования ореолов рассеяния, возникающих в элювии и делювии за счет материала разрушающихся поверхностных частей рудных жил.

В случаях, когда исследованию подвергаются оловоносные полиметаллические месторождения, в рудах которых существенным, а иногда и доминирующим компонентом является галенит,

относительная бедность таких руд касситеритом и его распыленность заставляют применять комбинированную «станно-плюмбо-метрическую» съемку.

В этом случае галенит и продукты его разрушения оказываются более надежными индикаторами, чем касситерит. Это наглядно видно из рис. 223.

Разработана и успешно применяется методика совместного определения олова и свинца в пробах методом спектрального анализа.

Для индикации свинца (а при надобности и цинка, меди и других) в ореолах рассеяния возможно также применение мето-

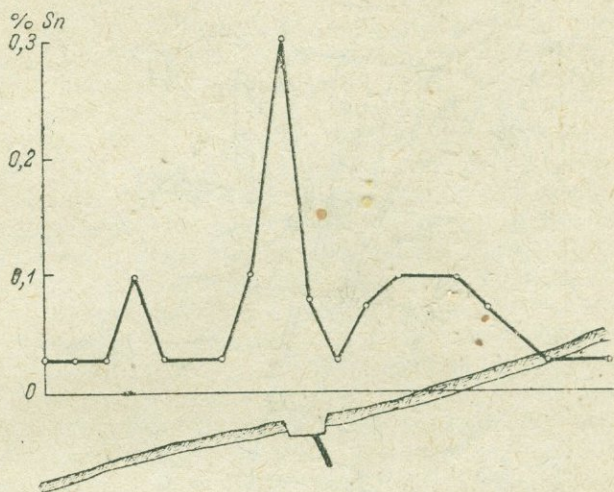


Рис. 225. Ореол рассеяния олова в элювио-делювио над рудной жилой.

дов нефелометрии и капельного анализа, специально приспособленных к полевым условиям.

В последнее время разработана также методика полевых химических экспресс-анализов на олово с приближенной количественной оценкой.

Рис. 224, 225 и 226 иллюстрируют результаты нескольких случаев применения на практике станнометрической съемки некоторых месторождений.

При проведении исследований на месторождениях пегматитового и кварцево-касситеритового типа методика, естественно, несколько изменяется.

Первичной геологической задачей в этом случае являются поиски и прослеживание пегматитовых и кварцевых жил методами электроразведки, как это описано выше, после чего дальнейшие поиски рудных скоплений наиболее целесообразно проводить с помощью станнометрической съемки. Последняя уместна, конечно, только в тех случаях, когда мощность и характер наносов и делювиально-элювиальной зоны, а также усло-

вия рельефа позволяют рассчитывать на успешность ее применения.

Методика геофизических исследований на россыпных месторождениях олова не отличается, в главных чертах, от методики

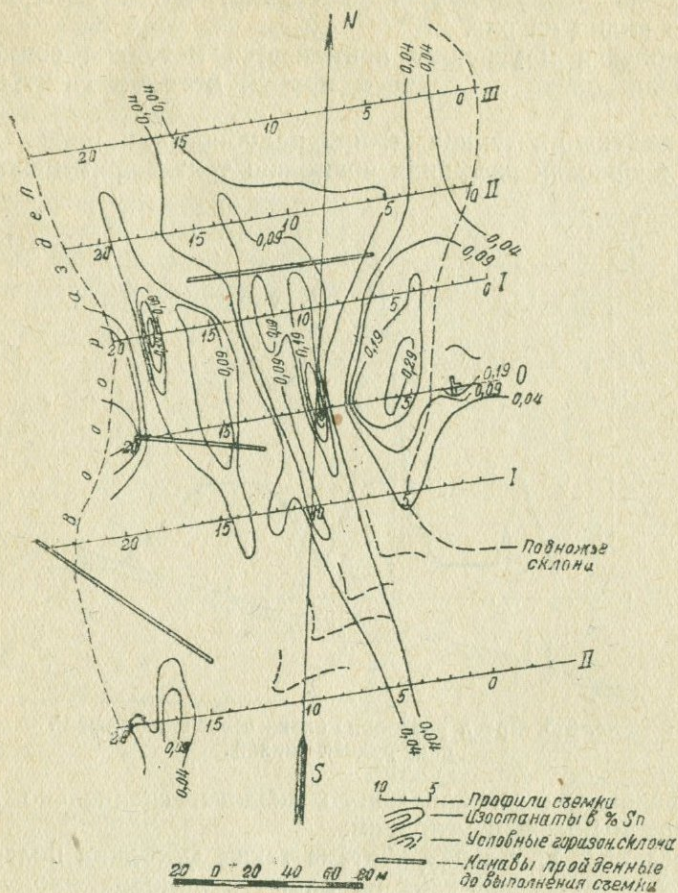


Рис. 226.

поисков и оконтуривания россыпей, обогащенных другими металлами, описанной в соответствующем месте. В СССР геофизическая разведка еще не привлекалась к разведке оловоносных россыпей.

VI. ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ДРУГИХ МЕТАЛЛОВ

В отношении месторождений некоторых металлов разведочная геофизика не успела еще накопить опыт, достаточный для того, чтобы можно было вывести какие-либо общие заключения

о возможностях и методике ее применения. Кроме того, некоторые рудные объекты содержат настолько незначительные количества интересующего, в том или ином случае, рудного компонента, что использование собственных физических свойств последнего оказывается недоступным для геофизики.

При геофизических исследованиях подобных объектов обычно используют либо косвенные признаки, выявляемые при изучении структуры рудного поля, либо те минеральные ассоциации, с которыми связан искомый компонент в исследуемом месторождении.

Рассмотрим некоторые случаи таких, наиболее обычных ассоциаций.

Марганец. Наибольшее промышленное значение имеют месторождения осадочного происхождения. Главнейшие рудные минералы марганца — пиролюзит (MnO_2) и псиломелан-вад ($n Mn_2O_3 \cdot mH_2O$) — чаще всего образуют конкреции, желваки и оолиты. Руды марганца частью плотные, частью представляют собой землистые рыхлые массы. Марганцевые минералы в рудах обычно встречаются совместно с другими металлическими компонентами, чаще всего с рудными минералами железа. При увеличении содержания последнего железисто-марганцевые руды переходят в существенно железные. Небольшое количество имеющихся измерений и опытных работ указывают на заметную магнитность марганцевых руд. Причина магнитности руд не изучена; повидимому, в них присутствуют магнитные окислы железа.

Магнитометрические съемки проведены на ряде марганцевых месторождений Никопольского района и в Западной Сибири. В Никопольском районе марганцевым залежам всюду соответствовали аномалии вертикальной слагающей порядка 100—200 γ . При увеличении мощности залежей наблюдались соответствующие повышения напряжений Z . Часть аналогичных и более слабых аномалий оказалась вызванной железистыми породами (железистые глины с конкрециями лимонита, роговообманковые породы и т. п.). На участках, лишенных магнитных аномалий, нигде марганцевых залежей встречено не было.

На Мазульском месторождении (Западная Сибирь) оруденелый марганцевыми минералами (манганит, пиролюзит, псиломелан) древний элювий образует отдельные гнезда во впадинах коренных пород, главным образом, эффузивно-туфовой толщи. В рудах значительно развиты примеси окислов железа. На рис. 227 приведены разрезы через некоторые из рудных гнезд и графики ΔZ над ними, по измерениям, сделанным при магнитометрической съемке. Как оказалось, рудным гнездам соответствуют повышения величин ΔZ , достигающие до +300 γ .

Можно сделать следующий вывод: если на площадях, намечаемых для поисков марганцевого оруденения магнитным методом, нельзя ожидать наличия сходных по интенсивности аномалий, которые были бы вызваны какими-либо другими геологическими причинами, — применение магнитометрической съемки

вполне целесообразно, при условии высокой точности измерений.

Молибден. Для молибденового оруденения применение обычных геофизических методов возможно лишь при косвенных поисках. В наиболее распространенных промышленных типах оруденения — в молибденсодержащих кварцевых жилах и рассеянных вкрапленниках — примесь молибденита обычно недостаточна для индикации ее обычными методами геофизики. При косвенных поисках вполне возможно, как отмечено ранее, выделение

методами постоянного тока плохо проводящих кварцевых жил, а также использование геофизики при геологическом картировании рудоносных участков.

Попытки применения при поисках молибденовых месторождений физико-химических методов еще не вышли из стадии экспериментирования.

Никель. Геофизические методы при исследовании месторождений никеля используются в довольно широких масштабах, но опять-таки при косвенных поисках или при геологическом картировании рудоносных площадей.

В Уфалейском районе на Урале, где никеленосность приурочена к контактам

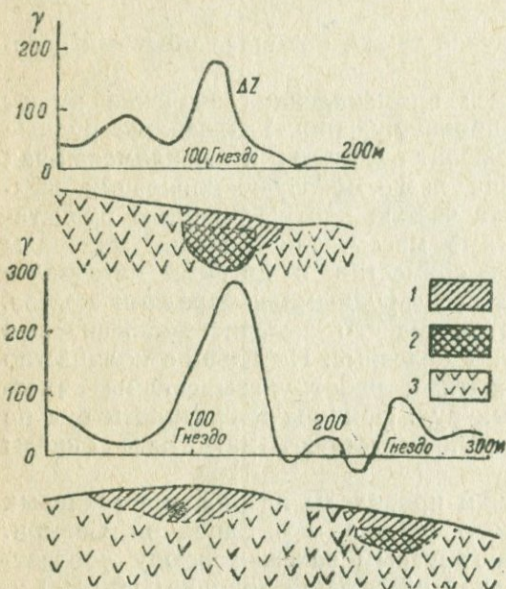


Рис. 227. Кривые ΔZ над железо-марганцовыми рудами Мазульского месторождения (Западная Сибирь).

1 — рудные гнезда; 2 — рудные гнезда, обогащенные марганцем; 3 — туфы.

змеевиков с осадочными породами, прослеживание последних с успехом выполнялось методом точной магнитометрии.

Точно так же, с помощью точной магнитометрии, хорошо прослеживались контакты ультраосновных пород с кварцево-гиперстеновыми диоритами, в условиях Монче-Тундры (Кольский полуостров), где к зоне контакта приурочено медно-никелевое оруденение. Поиски последнего производились методами электроразведки, так как никельсодержащие сульфидные руды Монче-Тундры отличаются высокой электропроводностью. В качестве поискового метода оказалось наиболее целесообразным применять метод интенсивности, а при неглубоком залегании первичных руд — и метод индукции. Методика комплексных геофизических работ на этом месторождении не отличалась

от обычно принятой для месторождений колчеданных руд и описанной выше.

Алюминий. Главнейшей алюминиевой рудой являются бокситы, как латеритного, так и осадочного происхождения (переотложенные или вторичные месторождения). Входящие в состав бокситов алюминиевые минералы не отличаются какими-либо доступными для геофизической индикации физическими свойствами. Все проведенные до сих пор геофизические работы на бокситовых месторождениях ограничивались применением метода магнитометрии.

Применение магнитного метода при поисках и разведке бокситовых месторождений основано на использовании магнитных свойств бокситов, содержащих в ряде случаев, наряду с многочисленными другими примесями, некоторые количества ферромагнитных окислов железа. Наличие указанных компонентов является в значительной мере случайным, и при проектировании геофизических работ на месторождениях боксита совершенно обязательно проведение предварительного исследования магнитности руд и вмещающих пород. В 1923 г. опытные работы на Тихвинском месторождении бокситов дали отрицательные результаты, так как руды оказались практически немагнитными. В 1932 г. подобные же работы были проведены на Урале в Режевском, Алапаевском, Синаро-Каменском и Надеждинском районах, причем оказалось, что магнитность распространенных здесь бокситов пизолитовой текстуры часто достаточна для выявления их методом магнитометрии при высокой точности измерений и благоприятных геологических условиях.

В Синаро-Каменском районе над большинством бокситовых залежей наблюдались перемежающиеся по интенсивности, положительные и отрицательные аномалии вертикальной слагающей магнитного поля. В некоторых случаях над бокситовыми залежами вовсе не было выявлено никаких магнитных аномалий, что, повидимому, может быть объяснено различиями в минералогическом составе руд.

На месторождении Красная Шапочка (Надеждинский район) выделение некоторых пластовых залежей боксита оказалось возможным вследствие некоторой магнитности вмещающих битуминозных известняков при немагнитности самих бокситов.

Положительные результаты дало применение магнитного метода на Тюхтинском месторождении боксита в Западной Сибири. Боксит залегает здесь под мощной толщей наносов, в виде пластообразных залежей мощностью от 5 до 13,5 м. Руды имеют ярко выраженную пизолитовую текстуру и обладают высокой магнитностью, причины которой недостаточно изучены. Характер магнитных аномалий над бокситовыми залежами виден из рис. 228, где приведен также и геологический разрез Тюхтинского месторождения. При помощи магнитного метода здесь удалось оконтурить значительное количество бокситовых залежей, резко сократив затраты на проходку поисковых выработок.

Можно заключить, что применение магнитного метода при поисках бокситов во многих случаях может оказаться рациональным, при условии тщательного учета геологического строения объекта и магнитных свойств местных разновидностей бокситов и вмещающих их пород.

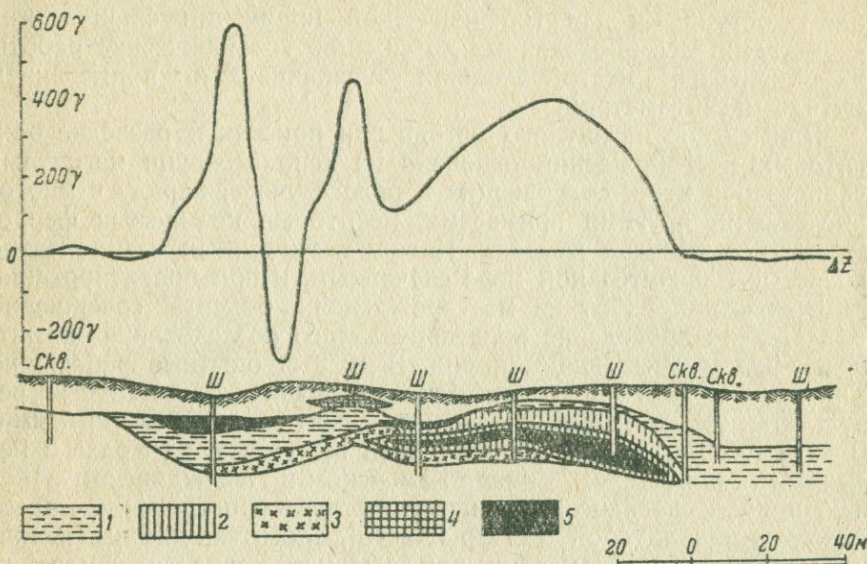


Рис. 228. Кривая вертикальной составляющей магнитного поля над пластообразными залежами боксита Тюхтинского месторождения (Урал).

1 — красная глина; 2 — глина с обломками боксита; 3 — разрушенный боксит; 4 — бокситовая мелочь; 5 — боксит плотный.

VII. ГЕОФИЗИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Химическая устойчивость благородных металлов и некоторых рудных минералов, обладающих значительным удельным весом, обуславливает накопление их в алювиальных россыпях. Золото, платина, вольфрамит, шеелит, касситерит и магнетит часто достигают промышленных концентраций в россыпях, возникающих при размыве рудных образований и массивов изверженных пород с рассеянным оруденением.

Разведочная геофизика находит широкое применение при исследовании россыпных месторождений как у нас в Союзе, так и за границей. В частности, многочисленные успешные работы проведены советскими золоторазведочными организациями.

Задачи, чаще всего разрешаемые методами геофизики, в основном, сводятся к двум:

- 1) поиски и оконтуривание участков россыпи, наиболее обогащенных тяжелыми рудными минералами;
- 2) выявление рельефа коренных пород, подстилающих россыпь, ложных плотиков и погребенных россыпей.

Выявление методами геофизики участков россыпи, обогащенных тяжелыми шлихами, основано, главным образом, на присутствии в этих шлихах тех или иных количеств магнитного компонента, наиболее часто — магнетита.

Из наиболее характерных минеральных ассоциаций необходимо отметить совместное нахождение в россыпях золота с магнетитом и ильменитом, платины с хромшпинелидами и магнетитом.

Во многих случаях, когда скопления искомого металла или рудного минерала связаны с местами концентраций в россыпи магнитных шлихов, оказывается целесообразным применение магнитного метода. Существенные ограничения в применение магнитометрии вносит лишь наличие в некоторых случаях повышенной магнитности пород плотика. В этих случаях, в особенности при неравномерном распределении магнитного компонента в подстилающих россыпь коренных породах, геологическая интерпретация выявляемых магнитных аномалий чрезвычайно затрудняется.

Подобный случай имел место при исследовании золотоносных россыпей на р. Б. Анзас в Западной Сибири. Плотиком россыпей здесь являются серицито-хлоритовые сланцы.

В магнитном отношении сланцы оказались неоднородными. Их магнитная восприимчивость κ варьирует, по ряду измеренных образцов, в пределах от нуля до $500 \times 10^{-6} \text{CGSM}$. В некоторых шлифах обнаружен под микроскопом магнетит. Аномалии вертикальной составляющей достигают здесь 500γ , как на участках речной долины, так и на склонах, лишенных алювиальных отложений, и вызваны, очевидно, неравномерной магнитностью коренных пород. Выделение по магнитным данным скоплений магнетита, несмотря на значительные, местами, его содержания в россыпи, оказалось невозможным.

Примером выгодного для применения геофизики сочетания геологических условий может явиться месторождение Мариинской тайги (Западная Сибирь). Коренными породами (плотиком) здесь являются немагнитные белые кристаллические известняки. Мощность россыпи колеблется от 3 до 8 м. Концентрации золота приурочены к «струям» и сопровождаются повышенным содержанием магнетита. На рис. 229 сопоставлены кривые изменений процентного содержания золота и магнетита в россыпи с графиком распределения ΔZ по разрезу через ключ Спорный в Мариинской тайге. Как видно из рисунка, максимальное содержание золота приурочено к максимуму ΔZ , вызванному скоплением магнитного шлиха.

Магнитный метод часто оказывается также применимым при поисках древних русел и речных долин, погребенных под позднейшими наносами и могущих представлять промышленный интерес, как россыпные месторождения. При этом используется, как и в предыдущем случае, наличие в россыпи магнитных компонентов.

В связи с небольшой интенсивностью магнитных аномалий над скоплениями магнитного шлиха, особенно при относительно больших глубинах его залегания, работы методом магнитометрии ведутся обычно локаль-вариометрами (магнитными весами) Шмидта. Чаще всего оказывается достаточным измерение одного ΔZ с точностью в $\pm 15—20 \gamma$.

Сеть наблюдений рассчитывают по общим принципам и проверяют на опытных участках.

Ряд вопросов геологии россыпей доступен к разрешению методами постоянного тока. Одним из таких вопросов является выявление скрытого под наносами рельефа коренных пород, т. е. определение мощности россыпи и неровностей плотика.

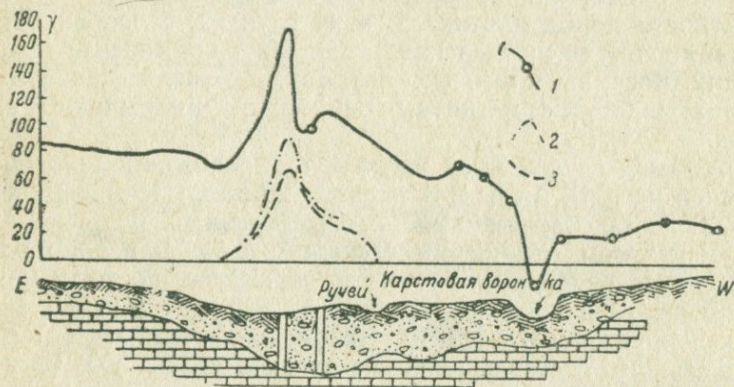


Рис. 229. Разрез по разведочной линии и кривая ΔZ над золото-содержащей россыпью (Маринская тайга, Западная Сибирь).

1 — кривая ΔZ ; 2 — кривая содержания золота; 3 — кривая содержания магнетита.

Масштабы: горизонтальный 1 см = 30 м; вертикальный 1 см = 10 м.

Рыхлые и насыщенные водой алювиальные отложения почти всегда отличаются по электропроводности от пород плотика. При помощи электроразведки на постоянном токе, глубина которых зависит от мощности алювиального слоя, рельеф коренных пород может быть определен с большой степенью приближения в значительном большинстве случаев. Существенной помехой для производства электроразведки иногда может явиться наличие в россыпи крупного валунного материала.

Тем же методом электроразведки возможно также решение одного из часто встречающихся вопросов геологии россыпей, а именно — установление истинного или ложного характера плотика, встреченного горными выработками.

Нередки случаи, когда россыпь разделена в вертикальном направлении непроницаемым пластом или иногда даже несколькими пластами, состоящими из плотной глины или сцементированной глиной галечника. Под такими ложными плотиками возможно существование промышленных россыпей. При благоприятном сочетании электропроводности алювиальной россыпи

и разделяющих ее плотных слоев, выделение последних электрозондированиями на постоянном токе оказывается вполне доступной задачей. Во многих случаях можно избежать крупных затрат на проходку большого количества горных выработок, сокращая их число до минимально необходимого для контроля данных электроразведки.

§ 29. ПОИСКИ И РАЗВЕДКА ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ НЕРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

К нерудным полезным ископаемым относится большое количество объектов, имеющих огромное значение в хозяйственной жизни нашей страны. Вопросы ускорения поисков и разведки месторождений этих ископаемых, а также удешевление разведочных работ находятся в прямой зависимости от возможности применения геофизических методов.

В настоящее время выполнено довольно большое количество геофизических работ в целях поисков и разведки нерудных месторождений. Описание всех их не входит в нашу задачу; здесь мы приведем лишь небольшое количество объектов и укажем, какие результаты могут быть достигнуты и какие методы геофизического исследования должны применяться.

Уголь

Изучение угленосных толщ в целом относится к задачам структурной геологии, рассмотренным в § 23, 24. Дальнейшие работы по поискам и разведке углей заключаются в изучении внутреннего строения угленосной (продуктивной) толщи: оконтуривание и прослеживание продуктивных свит, выявление отдельных пластов угля, определение элементов залегания и т. д.

К разрешению поставленных задач гравиразведка и магниторазведка не могут быть привлечены ввиду отсутствия необходимых для этого условий — разности физических свойств угля и вмещающих его пород, достаточной мощности пластов угля и т. д. Что же касается сейсморазведки, то для нее также не всегда имеются необходимые условия: отсутствует выдержанность на достаточном расстоянии отражающих поверхностей, редко наблюдается однородность покрывающих пород и т. д. Опыты в Кузбассе показали, что в большинстве случаев, ввиду сложности геологических условий залегания отдельных пластов (наличие сбросов, флексур, надвигов и т. д.), сейсморазведка дает либо неверные результаты, либо большой процент ошибки в определении тех или иных данных. Если к этому присоединить соображения о высокой стоимости сейсмических работ, то для разведки сравнительно неглубоких горизонтов применять сейсморазведку будет нерентабельно.

Возможность применения электроразведки для решения поставленных задач также ограничивается рядом условий, различных для отдельных бассейнов, но наиболее простые задачи ре-

шаются удовлетворительно, и иногда могут быть получены весьма ценные данные.

Во всех угольных бассейнах преимущественное развитие в продуктивной толще имеют песчано-глинистые породы, обладающие, примерно, одинаковым сопротивлением (50—200 Ω м). Встречающиеся в некоторых бассейнах известняки обладают сопротивлением в 300—400 Ω м. Угли резко дифференцируются по сопротивлениям; так, каменный уголь обладает сопротивлением 2000—6000 Ω м, бурый уголь до 100 Ω м и антрацит 0,1—10 Ω м. Таким образом могут встретиться различные соотношения сопротивлений угля и вмещающей породы и могут быть такие условия, когда электроразведка не даст благоприятных результатов (равенство сопротивлений угля и вмещающей породы).

Другим, не менее важным фактором, определяющим применимость электроразведки, является степень насыщенности продуктивной толщи углем. При небольшой угленасыщенности, продуктивная толща по сопротивлению будет мало отличаться от безугольной, и обнаружение ее электроразведкой будет невозможно.

Условия залегания свиты также играют значительную роль при электроразведке: при крутом падении пластов необходимо исследование по горизонтали (электропрофилеирование), при пологом — по вертикали (электробурение).

Опыт работы в Кузбассе показал, что при имеющихся там сопротивлениях угля и вмещающих пород (2000—6000 Ω м и 20—200 Ω м) и при крутом падении пластов можно отбивать угленосную свиту от безугольной при 2% угленасыщенности и даже несколько меньше.

На рис. 230 приведен электропрофиль Чумыш-Усятское, где угленосная свита H_1 четко выражается максимумом r_k (b) и может быть легко обнаружена. Максимумы c и d вызваны по всей вероятности затухающей складчатостью пород, погружающихся под безугольную свиту H_2 . Западный максимум (a) вызван известняками и отличается от других одинаковыми сопротивлениями r_k при всех разносах АВ. При горизонтальном залегании пластов требуется большая угленасыщенность для получения благоприятных результатов.

Выполнив несколько таких профилей, можно построить электрическую карту, на которой по увеличенным сопротивлениям можно проследить продуктивную толщу на всем ее протяжении. Однако необходимо иметь в виду, что четкие результаты получаются лишь при одинаковой мощности наносов и при одинаковом сопротивлении их на всей исследуемой площади. Если этого наблюдаться не будет (можно проверить несколькими электробуровыми), то интерпретация будет сложнее: анализируют каждый профиль в отдельности и результаты наносят на общую карту, которая имеет вид пластовой карты с малой степенью детализации (рис. 45).

Что же касается буроугольных месторождений, то в большинстве случаев выделение и прослеживание продуктивных свит

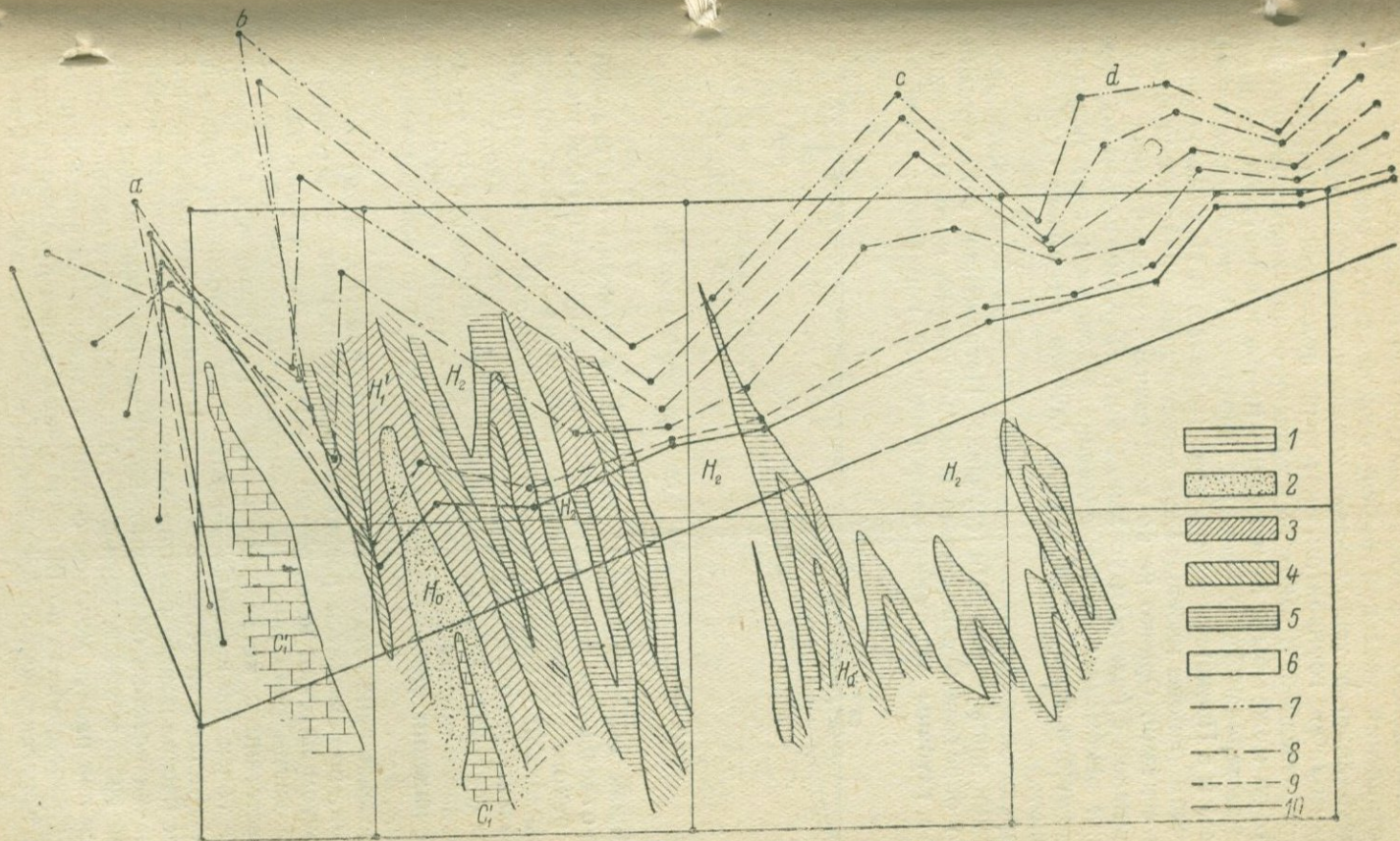


Рис. 230. Электропрофиль Чумыш-Усятское (Кузбасс).

1 — C_1^1 — нижний карбон; 2 — H_0 — непродуктивная свита; 3 — H_1^1 — нижняя подсвита; 4 — H_1^2 — средняя подсвита; 5 — H_1^3 — верхняя подсвита;
 6 — H_2 — безугольная свита; 7 — электропрофиль при $AB = 960, 600$ и 360 м; 8 — то же при $AB = 180$ м; 9 — то же, при $AB = 90$ м;
 10 — то же, при $AB = 50$ м.

здесь невозможно вследствие равных или близких друг к другу сопротивлений угольной и безугольной свит. Успеха можно ожидать лишь в тех случаях, когда угольная свита связана с каким-либо горизонтом, который поддается обнаружению электроразведкой. В некоторых случаях обнаружение продуктивных толщ может быть произведено методом естественного поля. Л. Я. Нестеровым в районе ст. Карталы (Полтаво-Брединская полоса) и в Прокопьевском районе (Кузбасс) и Н. С. Бибиковым в Орском районе наблюдались естественные поля над угленосными свитами. Однако не во всех случаях имелась ясная связь потенциалов с наличием угольных свит. Поэтому нельзя во всех случаях рекомендовать исследование угленосных свит методом естественного поля, хотя в ряде случаев он может оказаться полезным.

Определение элементов залегания складок может быть произведено лишь в простых случаях. Погружение оси складки можно определить с помощью электробурений, которыми определяют глубины залегания какого-нибудь горизонта; разница

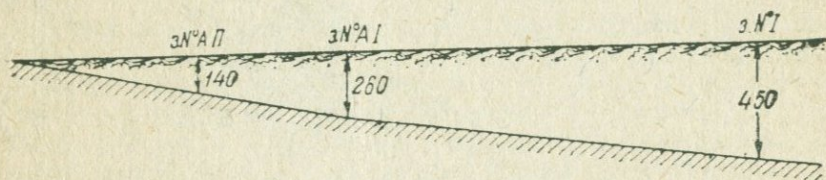


Рис. 231. Определение угла погружения складки.

в глубинах дает указание о величине погружения оси складки между отдельными точками. Так Л. Я. Нестеровым в Прокопьевском районе (Кузбасс) определены углы погружения оси 1-й синклинали с помощью трех электробуровых, по которым установлены углы 10° — в начале и 6° — далее, вдоль оси складки (рис. 231). Поведение крыльев складки может быть определено лишь при малых углах падения тем же способом; при крутом падении ошибка в определении углов становится значительной.

Прослеживание отдельных угольных пластов, скрытых под наносами, производится различно, в зависимости от залегания. При крутом падении необходимо применять электропрофилеирование с двумя разносами АВ, размер которых устанавливается в соответствии с мощностью наносов (в 10—20 раз больше). Густота точек по профилю должна быть небольшой, порядка величины мощности угольного пласта или немногим меньше. При близком расположении пластов друг от друга, могут отметиться лишь пачки пластов, без возможности расчленения их даже при большей густоте точек. Несколько лучшие результаты могут получиться при работе методом снятия градиента. На рис. 232 приведен электропрофиль по III разведочной линии промышленного участка Карагандинского бассейна, полученный инж. С. И. Рынг;

изводится с помощью электробурения. Глубина возможного обнаружения ограничивается 10—20-кратной мощностью пласта, причем количество выявляющихся пластов не превышает 2—3. Определение элементов залегания (глубины, мощности и т. д.) возможно только для верхнего пласта, об остальных можно говорить лишь ориентировочно.

Большую помощь при разведке углей могут принести каротажные работы — см. § 19.

Пегматиты

В течение последних 3—4 лет для поисков и разведки пегматитовых жил стали привлекаться геофизические методы. Пегматиты обычно залегают в виде жил неправильной формы или четковидных тел, заключенных в гранитах, гнейсах или сланцах. По физическим свойствам обычно пегматит отличается от вмещающих пород и поэтому может быть обнаружен геофизическими методами. Удельное сопротивление пегматита достигает $3 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^5 \Omega \text{ м}$, в то время как вмещающие породы обладают сопротивлением 10^1 — $10^3 \Omega \text{ м}$ и редко $10^4 \Omega \text{ м}$. Пегматит отличается увеличенной концентрацией эманацій радия по сравнению с окружающими породами. Используя эти данные, для поисков и разведки пегматитовых жил применяют электроразведку и радиоразведку (эманационный метод). Каждый из этих методов отмечает не только жилы пегматита, но и ряд прочих факторов. Так, при электроразведке повышенными сопротивлениями отмечаются кварцевые жилы, неоднородность наносов и т. д. При эманационной съемке максимумы могут получиться над ничтожными по мощности, но целиком каолинизированными жилами, над сбросами, зонами разрушения и т. д. Применение обоих методов исключает большинство таких ложных аномалий, и при совместном рассмотрении результатов вероятность обнаружения только пегматитовых жил становится весьма большой.

Примером поисков пегматитовых жил могут служить работы на Кондаковском месторождении мусковита (Восточная Сибирь). На рис. 233 приведены графики ρ_k и концентрации эманації радия вдоль одного из профилей на Березовской заявке. График ρ_k имеет два максимума (на 8 и 16 точках), эманационный подтверждает лишь один (на 16 точек). Второй максимум ρ_k , очевидно, «ложный». Дополнительный профиль ρ_k , снятый с меньшими разностями АВ, указал, что максимум ρ_k на 8-й точке обусловлен влиянием наносов и не может быть вызванным пегматитовой жилой. График ρ_k строился по данным съемки градиента при $AB=100$ — 150 м , $MN=5 \text{ м}$ и шаге в 5 м . Можно пользоваться и другими модификациями метода сопротивления, например, электропрофилированием системой $AMNB$ или другой. На рис. 234 приведены результаты разведки на Бирюсинских месторождениях (Восточная Сибирь) с установкой $AMONB$. Жила отмечается весьма отчетливым максимумом ρ_k . По климатическим и геологическим условиям данного района (обводненность, ча-

стые дожди, наличие мерзлоты и пр.) радиоразведка не могла быть здесь применена, и работы ограничивались одной лишь

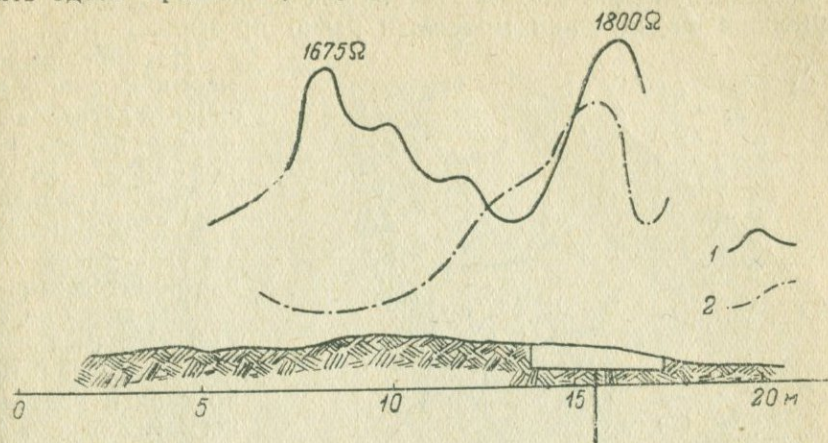


Рис. 233. Поиски пегматитовых жил.
1 — кривая сопротивления ρ_c ; 2 — кривая концентрации emanации.

электроразведкой; некоторые максимумы ρ_c после проверки геолого-разведочными работами оказались вызванными не жилами пегматита.

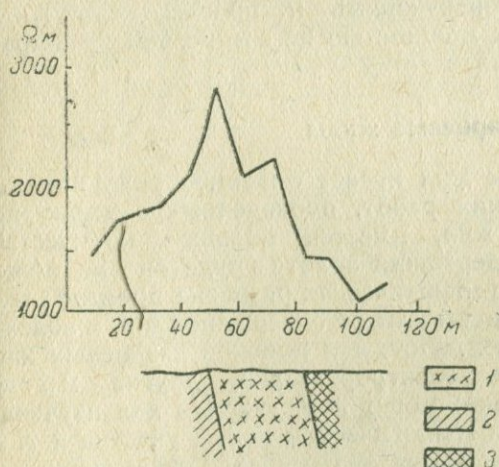


Рис. 234. Электропрофиль над пегматитовой жилой.
1 — пегматит; 2 — двулюдистый сланец; 3 — амфиболит.

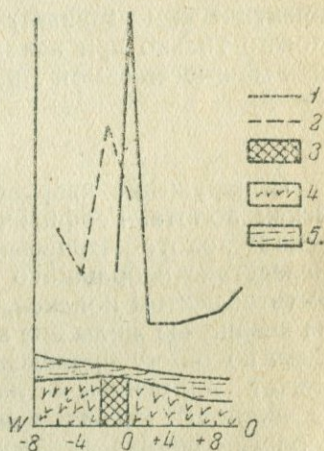


Рис. 235. Определение мощности жилы методом поверхностного кароттажа.
1 — ход с 0 на W; 2 — ход с W на 0, 3 — пегматит; 4 — гнейс; 5 — сухие, песчано-валунистые наносы.

Определение мощности отдельных жил может производиться многими способами. При работах в Северной Карелии применялся поверхностный кароттаж: на рис. 235 приведены резуль-

таты работ на жиле № 1 участка Плотина (Лоухского района). При сравнении результатов с истинными данными оказалось, что ошибка в определении мощности редко превышает 10%.

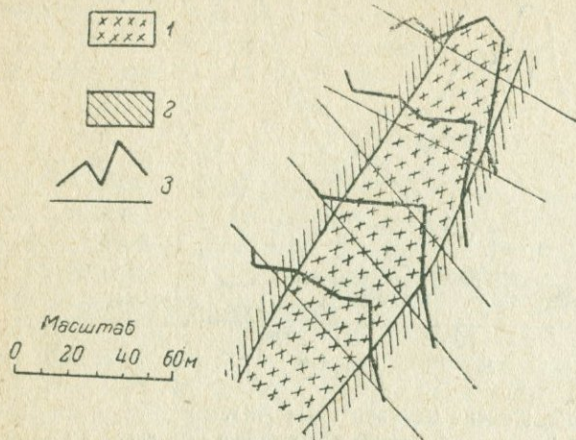


Рис. 236. Определение мощности жилы методом снятия градиента.

1 — пегматит; 2 — двулюдитые сланцы; 3 — график $P_{гк}$.

практическим данным) обнаруживать и прослеживать жилы можно только при наносах мощностью не выше чем 2—3-кратная мощность самой жилы.

Кварцевые жилы

Обнаружение кварцевых жил играет большую роль при поисках золота. Геофизических работ, проведенных с целью поисков золото-кварцевых жил, имеется большое количество. Вследствие небольшого содержания золота в руде оно не может быть объектом поисков, и геофизическая разведка производится на кварцевые жилы вне зависимости от содержания в них золота. Судя по опыту проведенных работ, для поисков кварцевых жил может применяться лишь электроразведка, другие методы (в частности магниторазведка) могут привлекаться для изучения геологии района, уточнения геологической карты участка и т. д.

При поисках могут встретиться два случая: когда кварцевые жилы проводят электрический ток лучше, чем вмещающие породы, и когда они являются плохими проводниками.

Первый случай встречается тогда, когда материалом жилы являются раздробленные, трещиноватые породы, заполненные глинистыми разностями и служащие путями циркуляции вод. Примером такого случая может служить Интернациональный рудник (Казахстан), где кварцевые жилы, сильно трещиноватые с поверхности, приурочены к изверженным породам, прорезающим дислоцированные и метаморфизованные породы силурий-

ского возраста (туфы, туфовые песчаники и кремнистые сланцы).

На графике ρ_k кварцевые жилы отличаются понижением сопротивлений, как это можно видеть на рис. 237. К. П. Козин отмечает, что при поисках на этом месторождении выявлялись кварцевые жилы мощностью в 5 см и выше, а иногда и отдельные прожилки в 2 см под наносами в 1 м.

Примером поисков жил, обладающих большим сопротивлением, чем вмещающие породы, могут служить работы на месторождении Джеламбет (Казахстан). Здесь кварцевые жилы залегают в порфириновых кристаллических туфах, туфовых песчаниках и порфиритах; материалом жил являются кварц и кальцит с незначительной вкрапленностью сульфидов. На графиках ρ_k кварцевые жилы отмечаются увеличением сопротивлений (рис. 238).

Методика поисков кварцевых жил в обоих случаях заключается в профилировании с большим АВ и малыми MN и шагом.

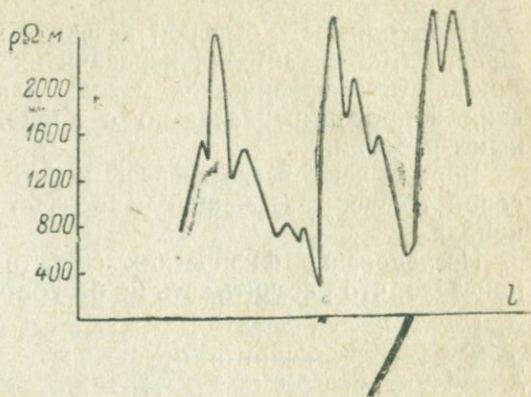


Рис. 237. Электропрофиль над золотокварцевыми жилами на Интернациональном руднике (Казахстан).

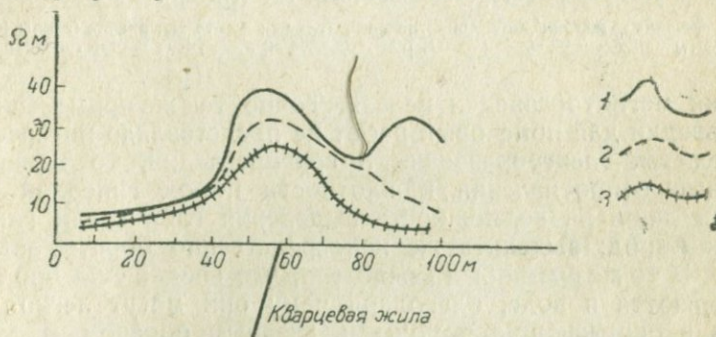


Рис. 238. Электропрофиль над золотокварцевой жилой на месторождении Джеламбет (Казахстан).

1 — график ρ_k при АВ=80 м; 2 — то же при АВ=45 м; 3 — то же при АВ=15 м.

Может быть применен метод снятия градиента, дающий лучшие результаты при близко расположенных жилах, но более дорогой по сравнению с электропрофилированием.

В некоторых случаях желательным бывает выявление интрузии на исследуемых участках, так как к ним обычно приурочены кварцевые жилы, и прослеживание контактов изверженных и

осадочных пород; в этом случае применяется электропрофилирование или магниторазведка.

Бораты

Необходимость быстрой разведки месторождений боратов на Индере (Казахстан) для передачи их в эксплуатацию заставила применить геофизические методы для решения ряда геологических вопросов параллельно с проводимыми геолого-разведочными работами.

Бораты чаще всего связаны карстовыми проявлениями в гипсовой толще, залегающей непосредственно над соляным ядром купола.

Исследование физических свойств пород гипсовой толщи показало, что рассчитывать на благоприятные результаты от при-

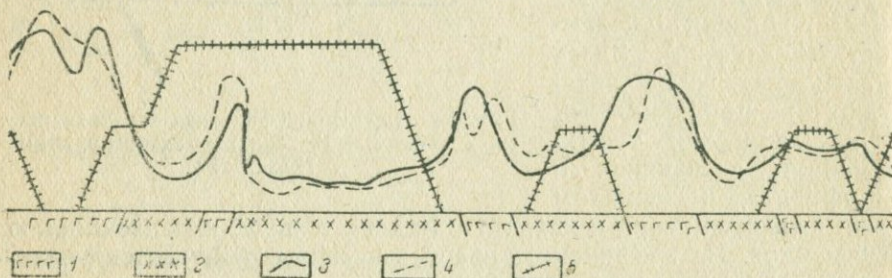


Рис. 239. Кривые сопротивлений борометрической съемки по V профилю месторождения Кзыл-Тау (Индер).

1 — слой высоких электрических сопротивлений (гипсы); 2 — то же, низких (глины Кзыл-Тау); 3 — кривая ρ_{sc} при $AB = 60$ м; 4 — то же, при $AB = 100$ м; 5 — кривая борометрической съемки.

менения магниторазведки нельзя. Точно так же применение сейсморазведки для поисковых работ не представляло интереса. Что же касается электроразведки и гравиразведки, то измеренные удельные сопротивления и плотности пород гипсовой толщи указали лишь на возможность выделения глин среди гипсов и других пород; выделить же непосредственно бораты затруднительно. В то же время было выяснено, что соединения бора легко растворяются в воде, благодаря чему они могут легко мигрировать в окружающие породы и, главным образом, в делювий и аллювий. Вокруг боратовой залежи, выходящей под наносы, образуется ореол рассеяния, который может быть обнаружен физико-химическим анализом.

Производя анализ проб, взятых вдоль исследуемого профиля, можно сделать заключение о присутствии боратов. На рис. 239 приведены результаты электропрофилирования и барометрической съемки по V профилю месторождения Кзыл-Тау; наблюдается совпадение участков пониженных сопротивлений и наличия ореола рассеяния. Считая, что бороносные глины обладают меньшим сопротивлением и одновременно создают ореол рас-

сеяния, можно строить геологические разрезы вдоль исследуемых профилей, Такой разрез для V профиля приведен на рис. 239 внизу.

Кроме исследования вдоль отдельных профилей, можно производить площадную электрическую съемку участка, в результате которой строить карты изом. Гипсы должны характеризоваться как тела с высокими сопротивлениями, глины—низкими.

Минеральные строительные материалы, цементное сырье и прочие

В большинстве случаев геологическая обстановка благоприятствует применению геофизических методов для целей поисков и разведки этих полезных ископаемых.

Геологический разрез представляется в самом простом виде: сверху залегают рыхлые четвертичные отложения (ледниковые, делювиально-элювиальные, озерные), снизу — непосредственно полезная толща. Глубины, подлежащие исследованию, обычно бывают порядка нескольких метров, реже десятков метров. Имеется полная возможность применить электроразведку или сейсморазведку, так как различие в физических свойствах пород перекрывающих и подстилающих (удельного сопротивления и скорости распространения упругих колебаний) почти всегда имеется. При всех прочих равных условиях выбор должен оставаться на электроразведке, как на более дешевом методе. Применять необходимо электробурение или электропрофилеирование с разносами АВ, выбираемыми на общих основаниях. Результаты геофизических работ можно представлять в виде разрезов, карт изогипс или изом; они могут принести большую помощь разведчику при разрешении многих геологических вопросов.

Глава IX

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ ПРИ РЕШЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ВОПРОСОВ

§ 30. ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПРИ ГИДРО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ И ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ

Для разрешения различных гидро-геологических задач стали все чаще и чаще привлекаться геофизические методы разведки; в настоящее время геофизика дает весьма ценные указания по целому ряду вопросов.

Главными вопросами при гидрогеологических исследованиях являются:

1) поиски геологических структур, способствующих образованию водных бассейнов (синклинали, депрессии и др.);

2) непосредственные поиски воды или водоносных толщ.

Первый вопрос достаточно хорошо поддается исследованию геофизическими методами, второй разрешается пока только в простейших случаях.

Для поисков геологических структур, способствующих водонакоплению, может с успехом применяться электроразведка постоянным током, для которой в данном случае имеется основная предпосылка для применения: водоносный слой почти всегда обладает меньшим или большим сопротивлением, чем подстилающий его водоупорный горизонт. При электроразведке обычно получают кривые ρ_k с возрастающими или с понижающимися значениями сопротивлений в нижней части, соответствующие водоупорному горизонту. По данным электроразведки можно построить либо отдельные разрезы вдоль профилей, либо карту изогипс кровли водоупорного горизонта. По этим данным судят

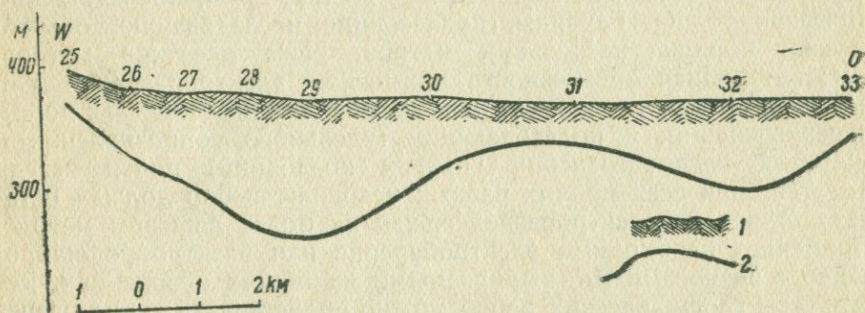


Рис. 240. Геологический разрез по данным электроразведки по III профилю в районе ст. Биегиз (по А. Ш. Усманову).

1 — поверхность земли; 2 — поверхность плотных пород.

об участках, благоприятных для водонакопления, и о месте заложения скважин для вскрытия их.

Примером таких работ может служить исследование участка в районе станции Биегиз (Казахстан) для обнаружения пониженных участков плотных, палеозойских пород (сланцы, песчаники, известняки, конгломераты), залегающих под слоем рыхлых отложений кайнозоя (мергеля, глинистые породы и др.). Сопротивление первых порядка сотен Ω м, вторых 8—12 Ω м.

В результате исследований получен ряд разрезов, один из которых приведен на рис. 240. На этом разрезе имеется два погружения палеозойских пород (в районе электроразведочных № 29 и 32), которые, по видимому, и могут служить участками для водонакопления.

Другим примером являются работы одной из партий ЦНИГРИ 1936 г. Задача, поставленная перед партией, заключалась в определении рельефа палеозойских пород (песчаники, сланцы),

залегающих под третичными отложениями (рыхлые песчано-глинистые породы) в связи с поисками полезных ископаемых, связанных со структурами (уголь — нефть); однако при наличии депрессии последняя могла бы служить дренажем для вод палеозойских пород и явиться источником водоснабжения. Кривые электробурений имеют двухслойный характер (рис. 241) и по ним легко отбивается граница палеозоя и третичных отложений. По данным электробурений составлены геологические разрезы и построена карта изогипс (рис. 242). Последняя дает ясное представление о поведении палеозойских пород и указывает на наличие депрессии в западной части участка. Депрессия вытягивается в северо-восточном направлении и в центральной части имеет относительную отметку в 400 м. На основании полученных

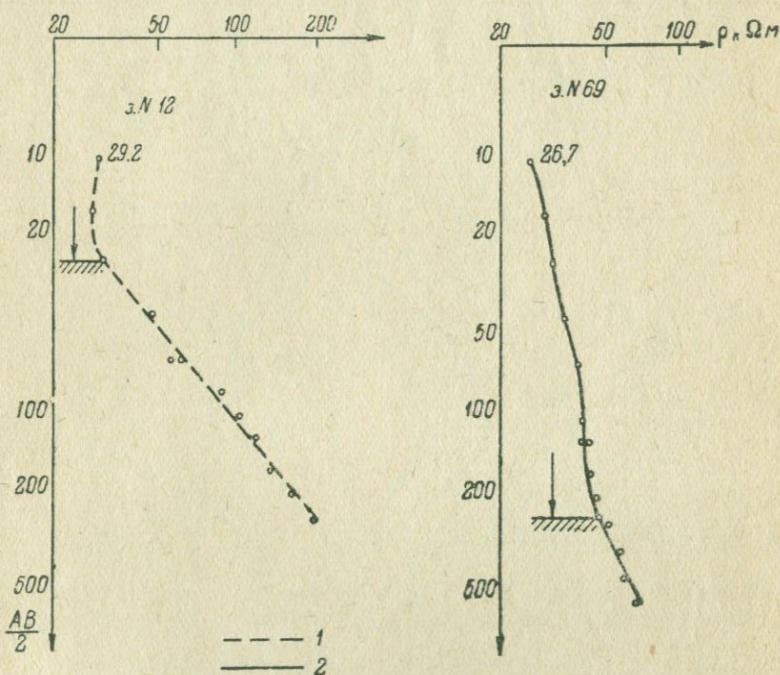


Рис. 241. Типичные кривые электробурений.

1 — электробуровая, полученная при неглубоком залегании палеозойских пород;
2 — электробуровая в районе депрессии.

данных не трудно установить место заложения скважины для вскрытия водоносного горизонта; оно в данном случае будет недалеко от точки пересечения I и XIV профилей.

Кроме указанных выше структур, воды могут сосредоточиваться в древних руслах рек, в зонах выноса и других, закрытых с поверхности более молодыми отложениями. В этом случае перед геофизикой ставится задача обнаружения погребенных русел, а иногда и получения данных о рельефе самого русла.

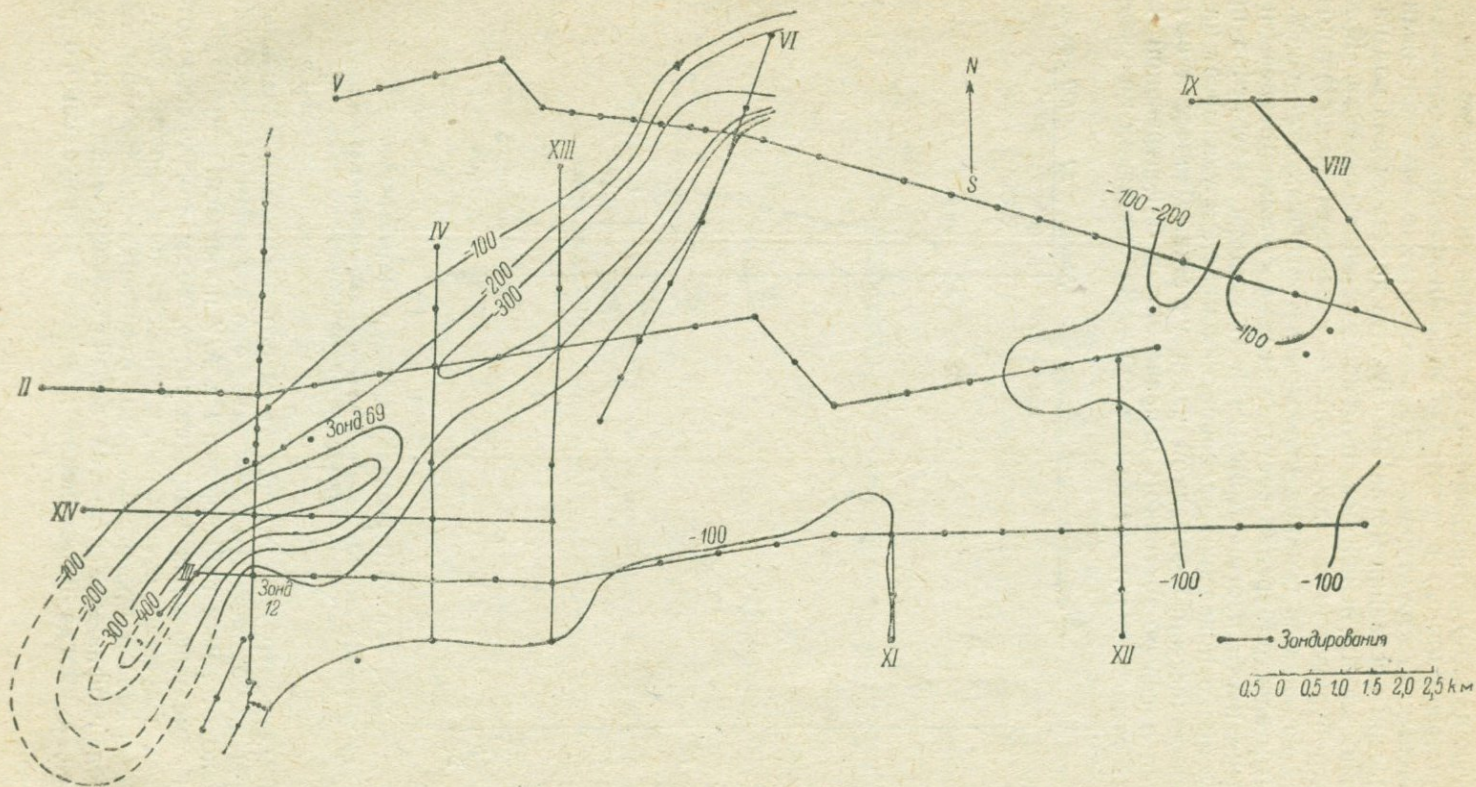


Рис. 242. Карта изогипс кровли палеозоя по данным электроразведки (по А. С. Семенову).

Для разрешения этих задач применяют метод электропрофиле-рования или электробурения, в зависимости от предъявляемых к электроразведке требований.

Сопротивление пород, заполняющих русла, может быть и больше и меньше сопротивления пород, слагающих ложе, в зависимости от литологического состава, насыщенности водой и т. д. Так, при работах Карагандинского геолого-разведочного бюро в районе железнодорожной ветки Караганда—Балхаш породами, заполняющими погребенную долину, являлись рыхлые образования (глины, пески, песчаники с галькой и др.) с сопротивлением от единиц до нескольких десятков Ω м; породами, слагающими ложе, являлись плотные изверженные породы, кон-

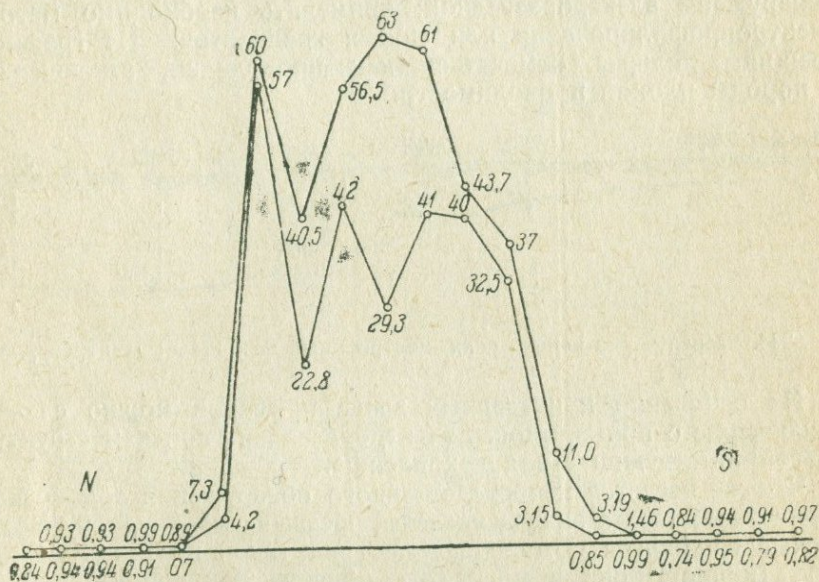


Рис. 243. Электропрофиль через погребенное русло реки в районе горы Кюрсанга (Азербайджан). Цифрами указаны сопротивления.

гломераты, метаморфические сланцы с сопротивлением порядка тысяч Ω м. Такая разница в сопротивлениях была крайне благоприятна для производства электробурений, вследствие чего получены хорошие результаты, подтвержденные скважинами. Но может встретиться и обратное соотношение сопротивлений, когда породы, залегающие в руслах, имеют большее сопротивление чем породы, слагающие ложе или долину. На рис. 243 представлен график сопротивлений, полученный при электропрофилеировании в районе горы Кюрсанга (Азербайджан), где необходимо было определить местоположение погребенного русла реки. Породами, слагающими ложе, являлись песчано-глинистые отложения, русло же было заполнено грубозернистыми породами — галечником. По графику легко отбиваются границы русла. Такая же законо-

мерность в сопротивлениях пород наблюдалась при работах С. Я. Литвинова в 1932 г., когда задачей, стоящей перед электро-разведкой, являлось определение мощности водоносного аллювия (с сопротивлением 100—1000 Ω м), залегающего на глинистом водоупорном горизонте (с сопротивлением в 20 Ω м). В результате произведенных электробурений были получены разрезы через пойму реки, один из которых приведен на рис. 244.

Воды могут быть приурочены к трещинам и обнаружение их или прослеживание (известных) играет иногда большую роль. Обычно трещины заполнены обломками пород и глиной и могут служить коллекторами воды. Они обладают меньшим удельным сопротивлением, чем окружающие породы, поэтому могут быть обнаружены электроразведкой; применять необходимо методы электропрофилирования или снятия градиентов. На графиках трещины должны отмечаться как проводники, заключенные в породы плохой проводимости.

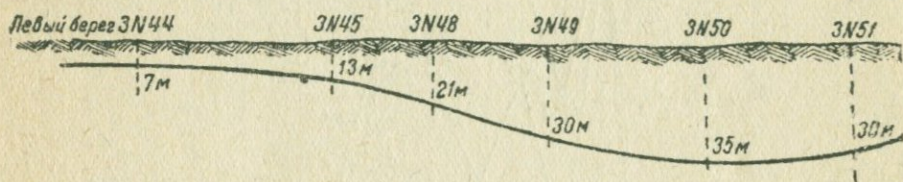


Рис. 244. Разрез через пойму реки, построенный по данным электробурения.

На основании приведенных выше примеров можно сделать заключение о применимости электроразведки к поискам структур, благоприятствующих водонакоплению.

Что же касается непосредственного обнаружения водоносных горизонтов, то эта задача является чрезвычайно трудной. Водоносные горизонты обычно залегают на такой глубине, где при своей мощности они не могут быть обнаружены: например, водоносный слой в 1 м на глубине 10 м, и т. д. С другой стороны, известно, что проводимость горных пород зависит, главным образом, от количества и качества пропитывающей их воды, что находится в прямой зависимости от пористости пород и химического состава воды. При насыщении пресной водой порода, вмещающая воду, по своему электрическому сопротивлению будет мало отличаться от породы, увлажненной вследствие капиллярных и других явлений. Благодаря постепенному переходу одного состояния в другое наблюдается и постепенное изменение сопротивления, что сильно влияет на точность определения глубины водоносных пород. Лучшие условия могут быть при минерализованных водах. Здесь можно рассчитывать на получение благоприятных результатов вследствие большей разности в сопротивлениях отдельных горизонтов. Так пески, насыщенные минерализованной водой, обладают сопротивлением порядка 1—10 Ω м; при насыщении их пресной водой сопротивление поднимается до сотен Ω м. Эти данные могут быть исполь-

зованы для разграничения пород, насыщенных водой с различной степенью минерализации. Исследование с использованием этого фактора может производиться путем измерений сопротивлений как вдоль поверхности земли (электропрофилирование), так и по вертикали (электробурение). Такие работы были произведены А. С. Семеновым в районе Ярославля в 1932 г., где им установлены границы юрских пльвунов, насыщенных сильно минерализованной водой, с юрскими же глинами и песками, насыщенными водой меньшей минерализации. Сопротивление первых оказалось порядка 7—8 Ω м, вторых — 50 Ω м, благодаря чему по кривой сопротивления они сильно отличаются друг от друга. На рис. 245 приведены графики сопротивления при двух разносах АВ и разрез, построенный на осно-

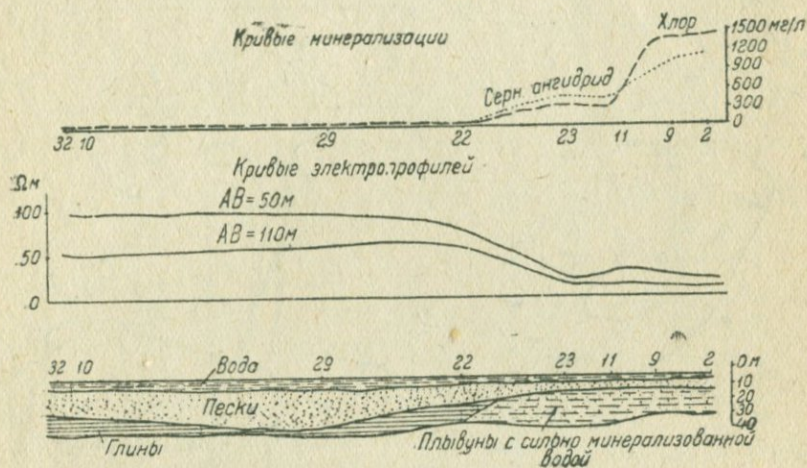


Рис. 245. Определение степени минерализации электропрофилированием.

вании данных электробурений; кроме того, на рисунке приведены кривые минерализации пород вдоль профиля, составленные на основании анализа вод. Бывает необходимо прослеживание границ распространения минерализованных вод среди пресных (например, для целей эксплуатации минеральных источников) или, наоборот, пресных вод среди минерализованных (водоснабжение, орошение и т. д.). Такие задачи могут быть выполнены путем площадной съемки, в результате которой по картам сопротивлений судят о наличии той или иной зоны: изоомы повышенных сопротивлений дадут контуры зон с пресной водой среди минерализованных вод и изоомы пониженных сопротивлений — зоны минерализованных вод среди пресных. Такие работы были произведены в Средней Азии для целей орошения, где пресные грунтовые воды заключены в обломочных отложениях выноса и граничат с сильно минерализованными водами. По данным произведенных здесь электробурений построена карта изоом (рис. 246, II), которая и дает возможность разграничить

пресные и минерализованные воды. Для сравнения на рисунке приведена карта минерализации вод; последняя определена по взятым пробам (рис. 246, I). Наблюдается небольшое смещение изоом на юг относительно изолинии минерализации, что, вероятно, объясняется недостаточным количеством взятых проб или слишком малыми разносами АВ, по которым построена карта изоом. Аналогичные работы были произведены в районе курорта Большие Соли (Ивановской области) для оконтуривания минеральных вод для целей их эксплуатации и др.

Большое количество вопросов, касающихся режима вод, может решаться при помощи измерений непосредственно в скважинах. Измерения ρ , Р, S, температуры и других величин могут

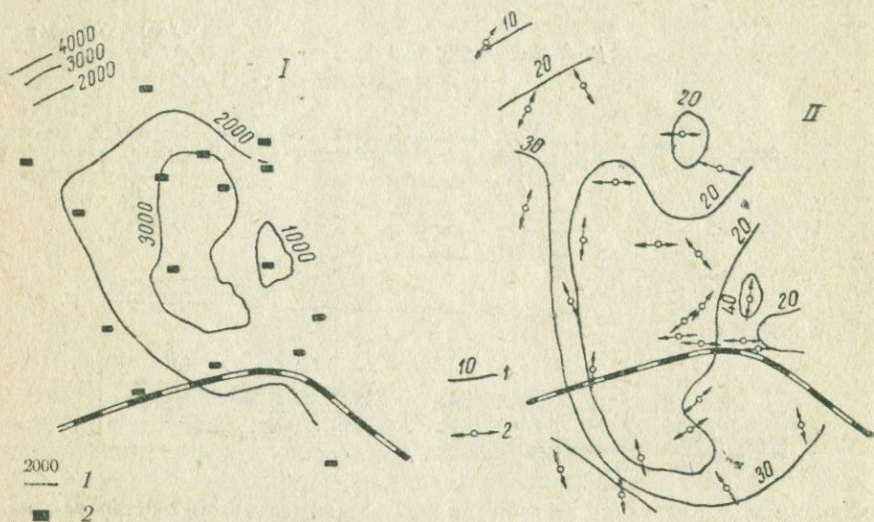


Рис. 246. Разведка пресных вод в Средней Азии.

I — карта минерализации, определенная по взятым пробам: 1 — изолинии содержания сухого остатка в воде в мг/л; 2 — шурф. II — карта изоом: 1 — изоомы; 2 — электробуровые.

дать представление об уровне вод, степени их минерализации, решать вопросы обводненности пластов, направления и скорости подземного потока и т. д. Достаточно хорошо разработанная методика измерений, возможность искусственно создавать различные физические условия в скважинах (изменять давление, температуру и т. д.) дают исследователю большие возможности в определении различных факторов, характеризующих водоносные горизонты. Эти вопросы крайне важны при нефтяной разведке и эксплуатации и там им уделяется исключительное внимание (см. § 19 и 20).

Геофизические методы разведки получили довольно широкое распространение при проведении инженерно-геологических исследований. При проектировании различных сооружений требуется разрешение многих геологических вопросов, где гео-

физика может принести существенную пользу. Особое развитие геофизика получила при инженерно-геологических работах, связанных со строительством гидросооружений (плотины, туннели и пр.).

Основной задачей, стоящей перед геофизикой, является прослеживание рельефа пород, которые могут служить основанием под то или иное сооружение. Такими породами бывают коренные кристаллические или глинистые породы, находящиеся на небольшой глубине и покрытые сверху наносами. Глубина исследования обычно не превышает 40—50 м, но при этом требуется

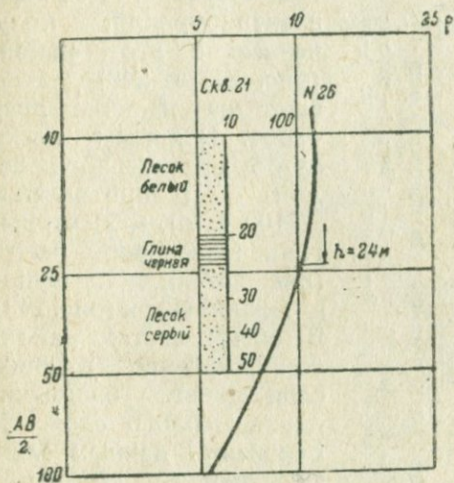


Рис. 247. Типичная кривая электробрения для северной части участка (Ярославль).

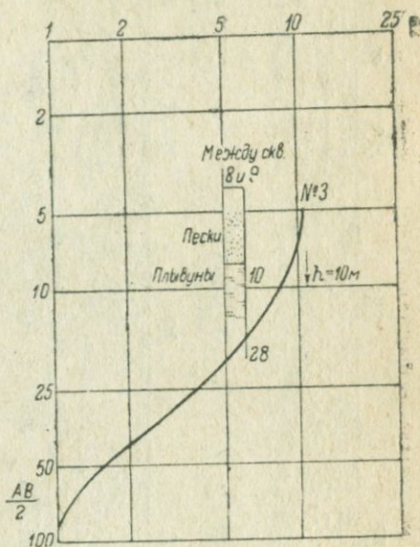


Рис. 248. Типичная кривая электробрения для южной части участка (Ярославль).

достаточная точность в определении глубины залегания прослеживаемого горизонта.

Методом, которым можно пользоваться для разрешения поставленной задачи, является электроразведка, отвечающая при существующей методике работ и интерпретации большинству поставленных требований. Нужно отметить, что породы, предназначенные под основание, могут служить хорошим опорным горизонтом для электроразведки — сопротивление их в большинстве случаев постоянно как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях. Этого нельзя сказать про перекрывающие их отложения; в зависимости от насыщенности водой и литологического состава сопротивление их может сильно меняться на весьма небольших расстояниях, что и необходимо иметь в виду при производстве исследований. Отношения сопротивлений пород опорного горизонта и перекрывающих могут быть различными; так, сопротивление вышележащего аллювия может быть больше со-

противления подстилающих глинистых пород и, наоборот, — сопротивление кристаллических пород больше сопротивления песчано-глинистых наносов. Таким образом кривые электробурений могут быть как с уменьшающимися сопротивлениями, так и с возрастающими.

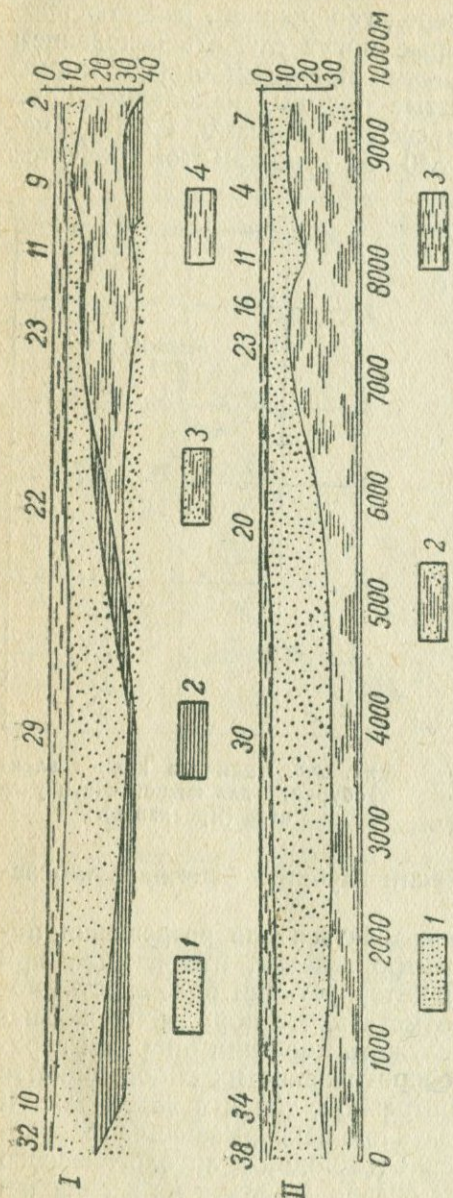


Рис. 249. Профиль по руслу реки Волги в районе Долматово-Норское (уч. Ярославля).

I — геологический разрез по данным механического бурения: 1 — песок; 2 — глина; 3 — плавун; 4 — вода; *II* — геологический разрез по данным электробурения: 1 — песок; 2 — глина; 3 — плавун; 4 — вода.

Типичной работой для выбора места под плотину является работа на р. Волге у Ярославля в районе Долматово-Норское. Кривые электробурений, полученные в этом районе (рис. 247 и 248), указывают на наличие двух слоев: 1) воды и песка, слабо насыщенного водой (сопротивление $\sim 100 \text{ } \Omega \text{ м}$), и 2) черных глин в северной части (рис. 247) или плавунцов в южной части (рис. 248). В обеих частях района сопротивление второго слоя меньше сопротивления первого слоя. На основании данных электробурения строились геологические разрезы, один из которых, при исследовании вдоль русла реки, приведен на рис. 249, *II*. Сравнивая его с геологическим разрезом, построенным на основании данных буровой разведки (рис. 249, *I*), видим, что большой разницы между ними не наблюдается.

Другим примером применения электроразведки могут служить результаты работ, показанные на рис. 250. Задача, стоявшая перед электроразведкой, заключалась в выявлении кровли девонских отложений. Девонские отложения представлены пестроцветными песчаными глинами с перемежаю-

и сланцы и 3) двухслойные с отношением сопротивлений $\sim 1:10$ (III), что соответствует воде и гальке.

Если это соответствие справедливо, то разрез, построенный на основании электробурений, будет иметь вид, приведенный на рис. 252.

К оценке данных, получаемых в условиях узких рек с крутыми берегами, необходимо подходить крайне осторожно, так как наличие вблизи точек электробурений крутых склонов сильно влияет на точность определения глубин. Для исключения этих факторов электробуровые необходимо располагать на расстоянии от берегов, не меньшем 5—8-кратной глубины интересующего горизонта.

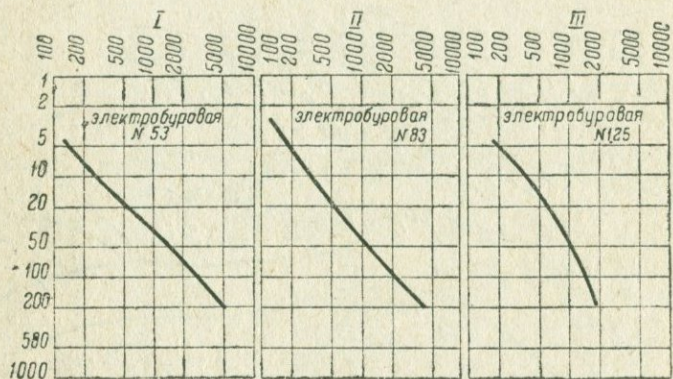


Рис. 251. Типичные кривые электробурения при разведке на участке Облакетка — деревня Феоклистова.

При инженерно-геологических работах на участках, где предполагается строительство туннелей, задача также заключается в определении рельефа плотных кристаллических пород. Выбор проектировщика трассы туннеля останавливается на таком участке, где была бы исключена возможность выхода туннеля из плотных пород. Кроме того, желательным является обнаружение крупных трещин, зон разломов и прочих более или менее значительных по размеру участков разрушенных пород, в которых проходка туннеля и его эксплуатация могут вызвать нежелательные осложнения. Для разрешения этих задач применяют также электробурение по достаточно густой сетке на всем участке, подлежащем исследованию.

Примером могут служить электроразведочные работы при выборе участка для трассы туннеля для электростанции на р. Ниве (Кольский полуостров). Коренными породами здесь являются гранито-гнейсы с сопротивлением $1-2 \cdot 10^4 \Omega \cdot \text{м}$, выдерживающимся на всем участке исследования; сверху они перекрыты четвертичными отложениями: мореной, пльвуном, песками и прочими с включением валунов различного размера и растительным слоем или торфом. Сопротивление перекрывающих пород крайне

различно: от $1 \cdot 10^3 \Omega \cdot м$ для торфа и растительного слоя до $1 \cdot 10^5 \Omega \cdot м$ для морены и пльвунов, причем мощности их не выдерживаются. Таким образом, электробуровые были как с уменьшающимися сопротивлениями, так и с увеличивающимися. В результате исследования была получена карта изогипс (рис. 253), по которой можно сделать заключение об общем подъеме коренных пород к северу с более интенсивным повышением на восток, чем на запад. Этот общий подъем усложнен местными понижениями рельефа коренных пород, доходящими до высоты уровня моря и даже ниже (электробуровые 105—108). Кроме того, в районе пикетов 68—74 глубина коренных пород по данным нескольких электробуровых не соответствует общему ходу изогипс (заштрихованный участок на карте); здесь можно предполагать наличие трещины или сильно нарушенной зоны в коренных породах, на которую необходимо обратить серьезное внимание при выборе трассы туннеля, как на неблагоприятный участок в смысле цельности массива.

Работа с аналогичными целями была произведена в районе строительства Сухумской ГЭС, где задача, поставленная перед электроразведкой, заключалась в определении наличия или отсутствия гранитов на трассе предполагаемого туннеля между речками Восточная и Западная Гумисты. Вследствие почти недоступного рельефа местности пришлось ограничиться проходкой трех электропрофилей, но и с помощью их удалось установить, что граниты не распространяются в зоне, захватываемой трассой туннеля, что и явилось ответом на поставленный перед электроразведкой вопрос.

Такие же задачи можно разрешать и при инженерно-геологических исследованиях на участках, где предполагается строительство отводящих каналов, водосбросов и др.

Кроме исследований при строитель-

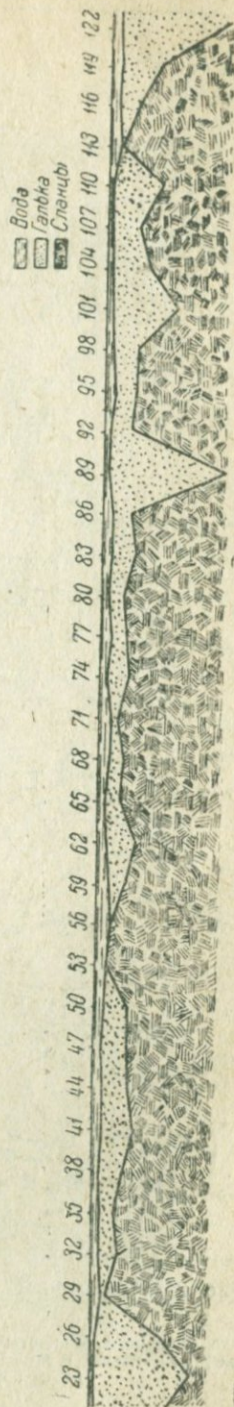


Рис. 252. Геологический разрез по данным электробурений в районе проектируемой плотины на р. Иртыше (по В. А. Шлаву).

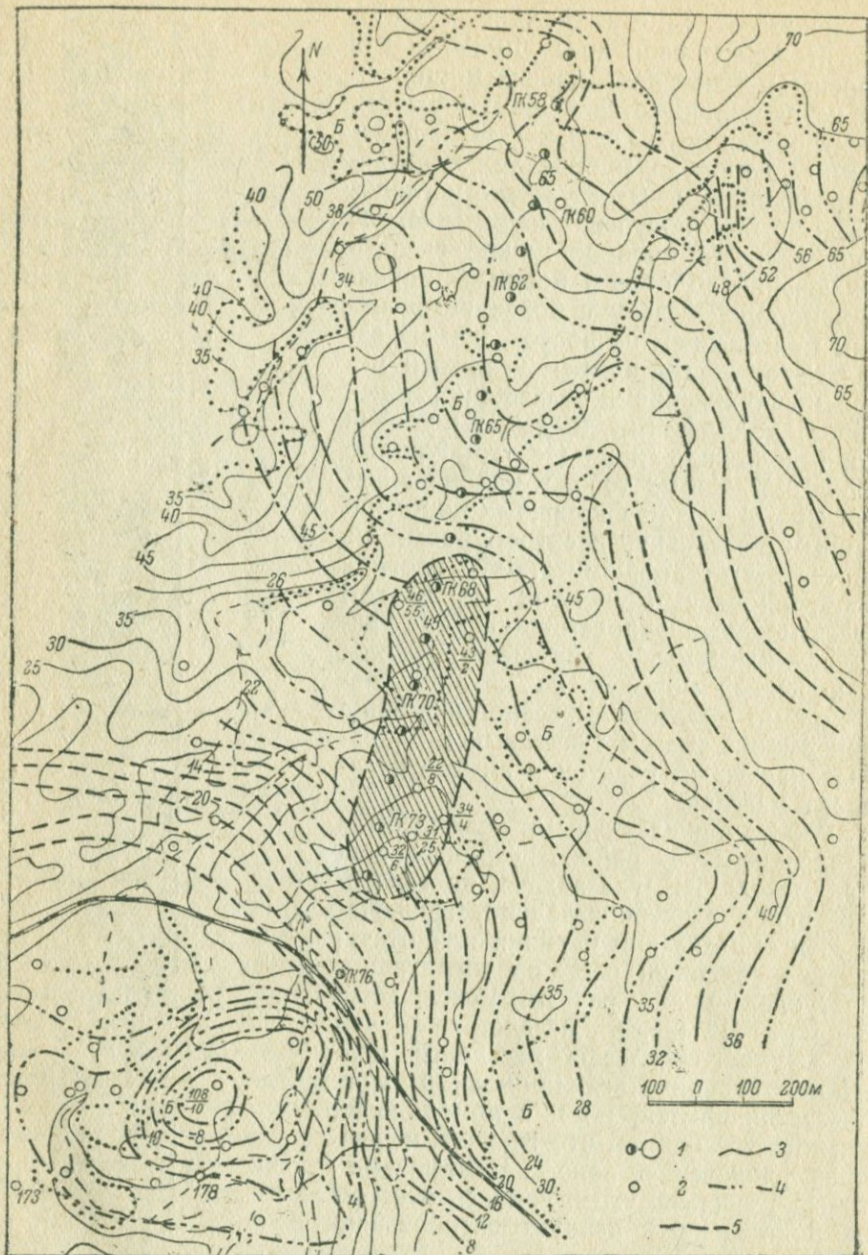


Рис. 253. Карта изогипс южной части участка по данным электробурения (по Н. С. Бибикову).

1 — топографические пикеты и репера; 2 — электробуровые; 3 — горизонталы поверхностного рельефа; 4 — изогипсы кровли коренных пород; 5 — предполагаемые изогипсы кровли коренных пород. Точками обозначены контуры болот.

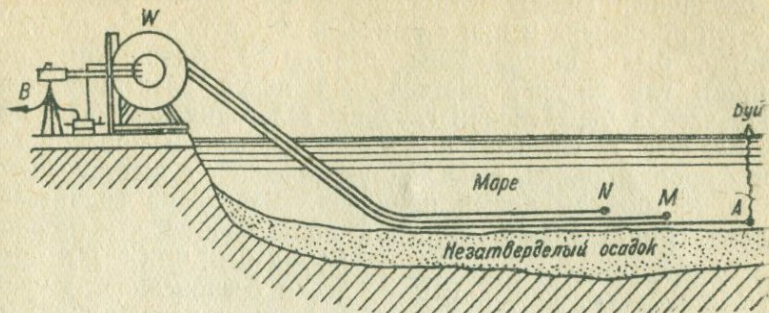


Рис. 254. Схема производства работ в море.

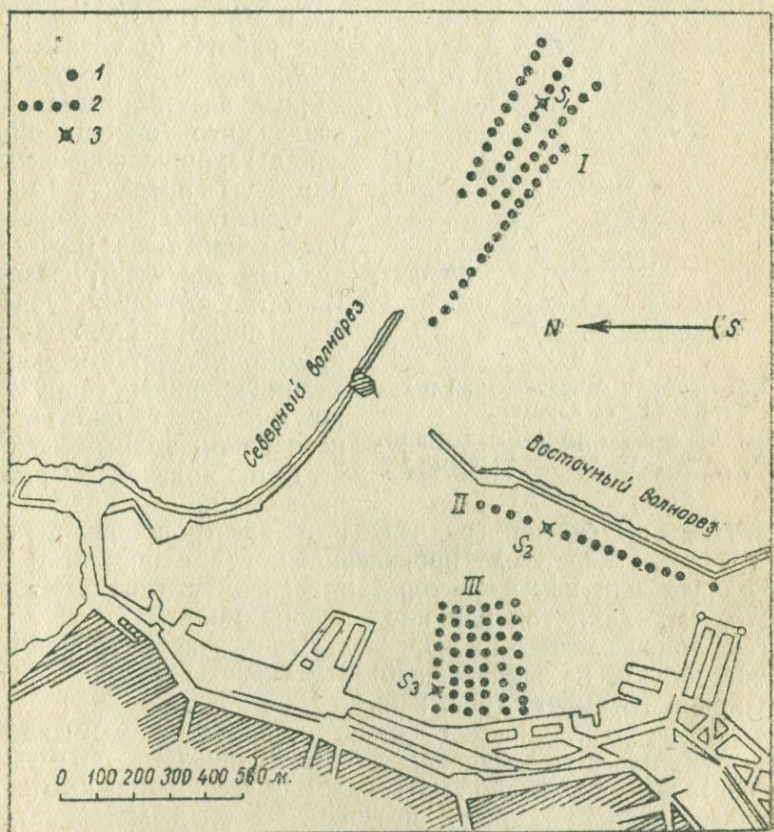


Рис. 255. Электроразведка в Алжирском порту.

1 — точки электробурений; 2 — профили электрических измерений; 3 — скважины

стве различных гидроэлектросооружений, электроразведка может быть применена и при строительстве других объектов. Так, например, были произведены работы в Алжирском порту (Африка), где задача, поставленная перед электроразведкой, заключалась в определении глубины залегания коренных пород (кристаллических сланцев) под слоем наносов и морской воды. Работы производились в связи с увеличением существующей гавани и постройкой новых причалов. Благодаря значительной разности сопротивлений морской воды, наносов и коренных

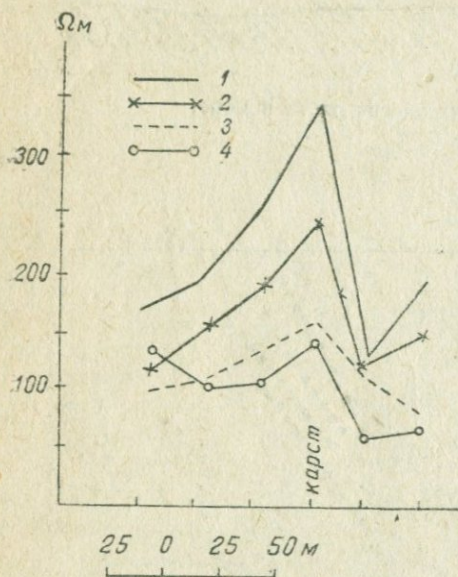


Рис. 256. Профили сопротивлений и градиента над карстом.

1 — электропрофиль при $AB = 50$ м; 2 — то же, при $AB = 30$ м; 3 — то же, при $AB = 15$ м; 4 — график градиентов при $AB = 120$ м и $MN = 5$ м.

пород (0,2, 0,74 Ω м и практически бесконечность) удалось разрешить задачу с достаточной точностью. Разведка производилась с берега при помощи лебедки (рис. 254) путем снятия повторных электропрофилей с установкой $AMN \infty$ при различных расстояниях AM и MN . Проверочные буровые работы (в точках S_1 , S_2 и S_3 , рис. 255) подтвердили данные электроразведки и показали, что точность определения глубины коренных пород была в пределах 10—15%.

Обнаружение карстовых проявлений также может быть задачей для электроразведки. Известно, что карст играет существенную мешающую роль при строительстве и эксплуатации крупных сооружений, но он может иногда быть источником водоснабжения.

При поисках карстовых проявлений необходимо применять методы снятия градиентов и электропрофилирование. На графиках карстовые проявления могут отображаться как проводники или как изоляторы, в зависимости от заполнения карстов породами той или иной проводимости.

Так, при исследовании карста в Ленинградской области, последний (ничем не заполненный) отметился увеличением сопротивления и градиента (рис. 256).

В районе дер. Чапаевка (Саратовский край) карстовая воронка отметилась уменьшением сопротивления (рис. 257), так как она оказалась заполненной материалом более проводящим (сильно разрушенные известняки и песчано-глинистый материал), чем окружающая среда (известняки).

Кроме перечисленных выше примеров применения геофизики, при инженерно-геологических изысканиях может встре-

тяться ряд вопросов, к разрешению которых может быть привлечена электроразведка. При железнодорожных изысканиях, при выборе участков под строительство городов, заводов, шлюзов и т. д. электроразведка может принести существенную пользу в разрешении ряда задач — преимущественно по установлению мощности рыхлых отложений.

Из других методов, которые могут быть применены для разрешения инженерно-геологических задач, необходимо отметить сейсморазведку. Хотя до настоящего времени этот метод почти не применялся — введение его в практику крайне желательно, так как он может быть проверочным методом при применении электроразведки или же самостоятельно решать отдельные задачи, где электроразведка не применима.

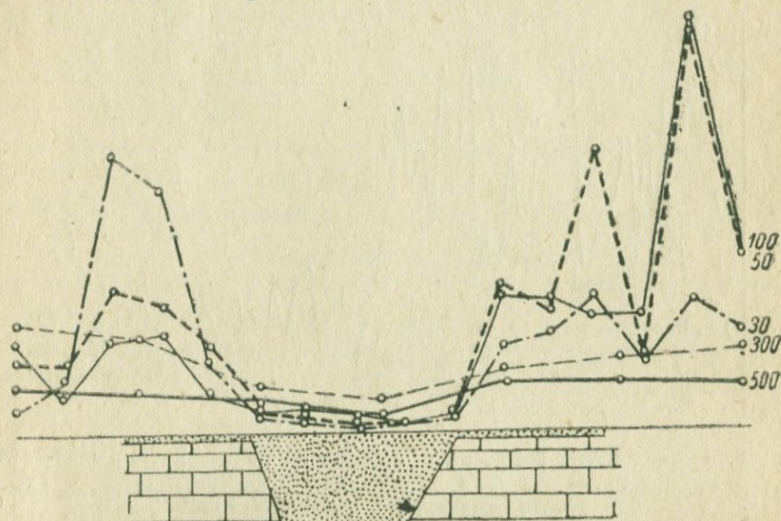


Рис. 257. Электропрофиль над карстовой воронкой (Чапаевка, Саратовское Заволжье).

§ 31. ПРОЧИЕ ОБЪЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ РАЗВЕДОЧНОЙ ГЕОФИЗИКИ

Кроме описанных выше объектов применения геофизических методов для целей поисков и разведки различных полезных ископаемых или для изучения геологических структур, имеется еще целый ряд вопросов, при разрешении которых геофизические методы иногда могут дать весьма ценные данные. Ниже мы разберем несколько таких вопросов.

Изучение коррозии

Пребывание какого-либо металла в почве в течение продолжительного срока приводит к разрушению его. Согласно существующей теории, разрушение металла происходит вследствие

следующих причин: металл, соприкасаясь с почвой, содержащей даже незначительное количество растворенных в воде солей, образует как бы «гальванический элемент» в яром виде. Образование этого «элемента» сопровождается разрушением металла, которое может продолжаться непрерывно, если этот «гальванический элемент» замкнут в цепь. Процесс может быть усилен за счет циркулирующих в земле теллурических, естественных и блуждающих токов, причем металл сам может служить проводником этих токов. Степень влияния всех этих причин зависит от состояния контакта между металлом и почвой, а следовательно, и от величины сопротивления почвы, непосредственно участвующей в контакте. Процесс разрушения металлов от указанных

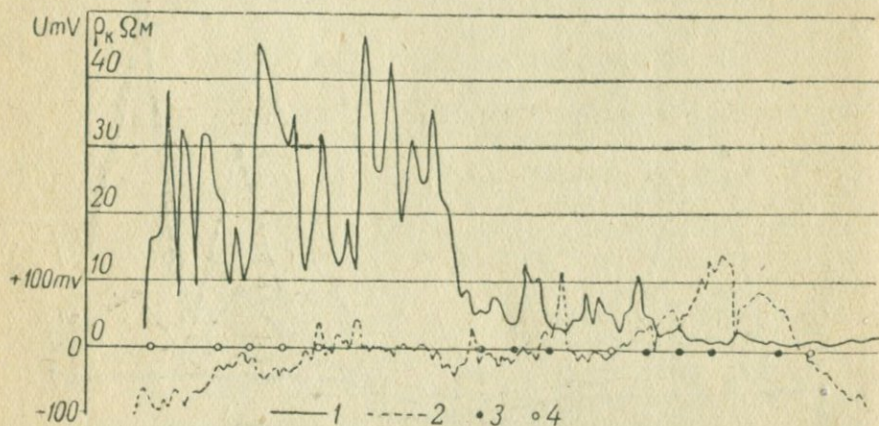


Рис. 258. Исследование коррозии нефтепровода Баку — Батуми (253—365 км)
 1 — график сопротивления; 2 — график P. S.; 3 — участки нефтепровода, пораженные коррозией;
 4 — участки нефтепровода с сохранившейся трубой.

причин носит название коррозии металлов, а почва, благоприятствующая коррозии, называется коррозионной.

Коррозии подвергаются все нефте- и продуктопроводы, телефонные магистрали, водопроводы и т. д.; этому вопросу сейчас уделяется большое внимание. Изучение коррозии и коррозионности почв может производиться: 1) на действующих трубопроводах — для установления мест повреждений (если они имеются) или участков активного развития процесса коррозии и 2) до прокладки трубопровода — для указания наиболее коррозионных участков трассы. Для разрешения поставленных задач может быть применено обычное измерение сопротивлений пород установкой $AMNB$. Размеры установки — 7,5 м для AB и 1,5 м для MN , расстояние между точками — 50—100 м; измерения необходимо производить в 6—8 м от трубопровода. Примером исследования коррозии на существующем трубопроводе могут являться измерения вдоль трассы Баку — Батуми, где одновременно происходило вскрытие трубопровода для определения разрушенности его. Результаты обследования части этого трубопровода при-

ведены на рис. 258; не трудно заметить, что вблизи пораженных участков трубопровода породы имеют пониженные сопротивления. На основании многих примеров и опытов, принято считать,

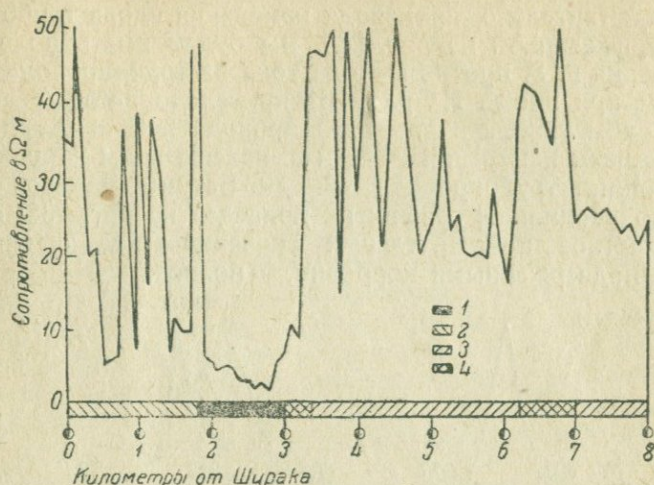


Рис. 259. Исследование трубопровода Шираки — Кухети.

Степень коррозийности участков:

1 — весьма сильно; 2 — сильно; 3 — слабо и 4 — очень слабо.

что при сопротивлении пород меньше $5 \text{ } \Omega \text{ м}$ трубопроводу угрожает интенсивный процесс коррозии; на участки с таким сопротивлением необходимо обратить серьезное внимание. В резуль-

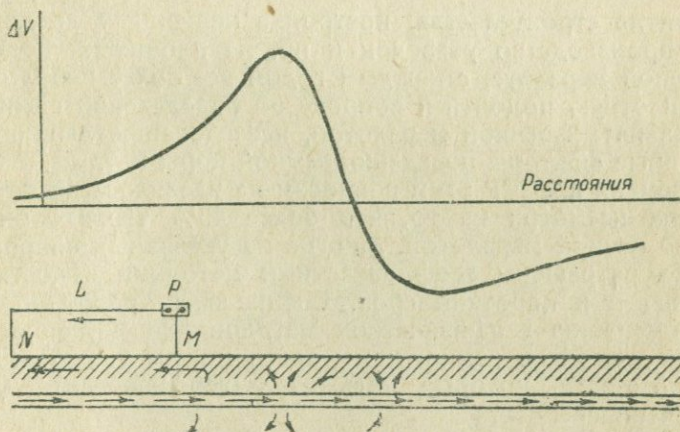


Рис. 260. Зависимость между разностями потенциалов на поверхности земли и местом входа и выхода электрического тока в трубопроводе.

тате промеров сопротивлений пород указана степень коррозийности участков на трубопроводе Шираки—Кухети (рис. 259). Грозный — Махач-Кала, Гурьев — Орск и т. д.

Другим методом, определяющим наличие мест с усиленным процессом коррозии, является метод измерения Р. S. Кроме того, этот метод может указывать места входа и выхода паразитных токов. Действительно, производя измерения вдоль трубопровода по схеме, указанной на рис. 260, мы будем иметь положительные значения Р. S. против выхода тока из трубопровода и отрицательные при входе. На рис. 261 приведено исследование данным методом трассы вдоль трубопровода в Cormeilles (Париж), где по данным измерений Р. S. и выявлены зоны коррозии. При исследовании трубопровода Баку — Батуми измерения Р. S. также производились; график их приведен на рис. 258; соответствие участков положительных значений Р. S. с участками, наиболее подверженными коррозии, — полное.



Рис. 261. Исследование коррозии трубопровода в Cormeilles (Париж).

Вечная мерзлота

Развитие строительства, постройка новых железнодорожных линий, производство разведок и пр. на площадях, подверженных вечной мерзлоте, с каждым годом все более и более заставляет вплотную подойти к вопросу об определении границ площадей, занятых вечной мерзлотой, исследованию влияния ее на те или иные факторы поведения земной коры и т. д. До настоящего времени в СССР этим вопросам не уделялось достаточного внимания, несмотря на то, что более 40% территории СССР охвачено вечной мерзлотой. Многие из указанных вопросов могут быть разрешены геофизическими методами с достаточной точностью и в короткий срок. Специальных работ, посвященных применению геофизических методов для изучения вечной мерзлоты, — очень немного; мы здесь можем указать лишь на те возможности, которые имеются у геофизических методов для изучения ее.

Известно, что горные породы в мерзлотном состоянии имеют некоторые физические свойства, отличные от свойств их в обычном состоянии. Так, суглинки обладают скоростью распространения упругих колебаний 322 м/сек, а в мерзлотном состоянии — 1590 м/сек. Наличие такой разницы в скоростях дает основание применить метод преломленных сейсмических волн для определения верхней границы мерзлотного слоя. Большие возможно-

сти имеет метод отраженных волн; с помощью его, очевидно, можно отбить и нижнюю границу мерзлотного слоя.

Существенным препятствием для применения сейсмических методов является небольшая глубина исследования (вечная мерзлота распространяется в глубину на первые десятки метров); этот вопрос в настоящее время находится в стадии изучения и имеются данные для благоприятного его разрешения.

Другим методом, которым можно пользоваться при исследовании вечной мерзлоты, является электроразведка. Об электрических сопротивлениях промерзлых пород известно, что они увеличиваются в 10, 20 и даже 100 раз по сравнению с сопротивлениями пород в обычном состоянии. Затруднившимся в применении электроразведки являются большие переходные сопротивления заземлений, вследствие чего невозможно пропустить электрический ток. При наличии же с поверхности земли деятельного слоя, электроразведка может быть применена и могут разрешаться следующие задачи: оконтуривание зон вечной мерзлоты и таликов, прослеживание верхней границы мерзлоты и др. Работы должны заключаться в проведении электропрофилирования и электробурения.

Есть предпосылки к возможности применения для исследования вечной мерзлоты метода естественного поля и ондометрии. Большую помощь может принести кароттаж скважин: измерение ρ_k , температуры, сопротивления раствора и др. сможет дать ценные указания о мощности мерзлого слоя, таликов, о притоке грунтовых вод, температуре и т. д.

Определение мест, наиболее поражаемых молнией

Обнаружение мест, наиболее поражаемых молнией, имеет практическое значение при разрешении ряда вопросов, как, например, при строительстве линий передач электроэнергии, телеграфа, пороховых складов и пр.

Избирательная способность грозовых разрядов поражать определенные участки — известна давно. Несомненно, что при грозовом разряде молния выбирает путь с наименьшим электрическим сопротивлением. Поскольку проводником для молнии служит воздух, а приемником — земля, в уменьшении их сопротивлений на поражаемом участке по сравнению с окружающими мы должны видеть причину рассматриваемого явления.

Причинами же такого уменьшения сопротивлений могут быть следующие факторы: воздух над поражаемым участком может быть более ионизирован, вследствие чего он стал и более электропроводным; земля же может иметь в данном месте меньшее сопротивление в силу геологических условий данного участка. Вопрос сводится к обнаружению таких мест, что легко может быть выполнено геофизическими методами.

Естественно предположить, что источником ионизации воздуха является излучение радиоактивных элементов, действующ-

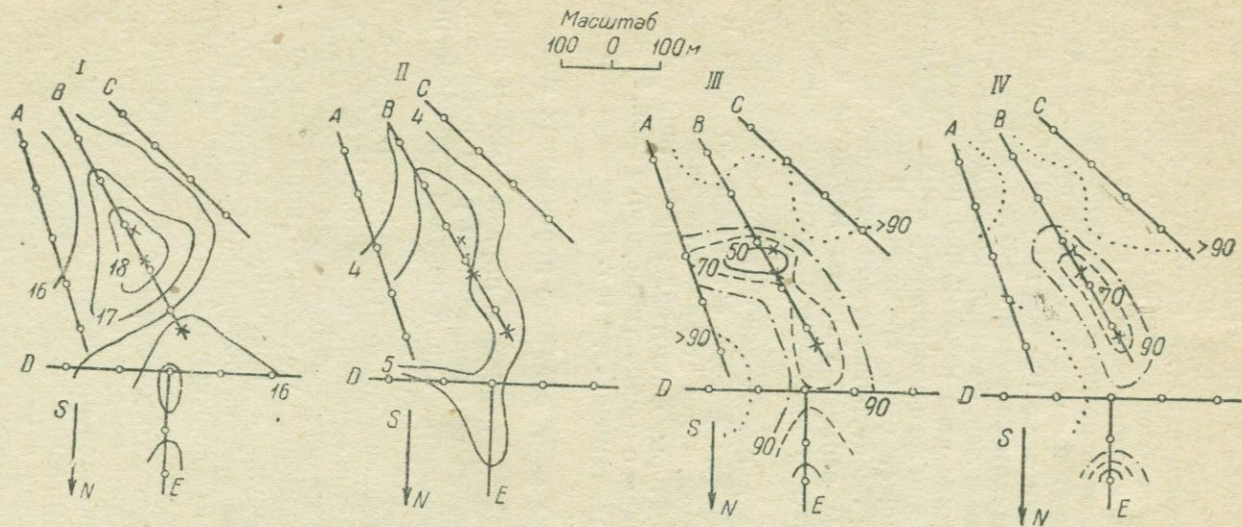


Рис. 262. Геофизические работы в районе д. Загромажье (Лужского округа).

I — изоинии одинаковой интенсивности излучения, выраженные в числе ионов, образованных в 1 см/сек; *II* — изоинии одинаковой электропроводности воздуха в 10^{-4} единицах CGSE; *III* — изоэмы на глубине 25 м; *IV* — изоэмы на глубине 37,5 м; X — места пожаров, возникших вследствие ударов молнии.

щих на поражаемом месте в большей степени, чем на окружающей площади¹.

Что же касается электропроводности земли, то последняя может иметь увеличенную проводимость в данном месте в силу различных геологических условий. Таким образом вопрос об обнаружении наиболее поражаемых участков может быть сведен к обнаружению мест с большей радиоактивной деятельностью и с одновременным уменьшением удельного сопротивления пород.

Методы, которые можно рекомендовать для производства этих работ — радиометрия и электроразведка постоянным током (метод сопротивлений).

Первым методом осуществляется съемка участка для определения интенсивности проникающих земных излучений, а также и общей проводимости атмосферного воздуха, вызванной присутствием в нем положительных и отрицательных ионов. Вторым методом определяется сопротивление пород как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях до сравнительно небольшой глубины (30—40 м).

Наблюдения этими методами производят по точкам вдоль профилей, разбиваемых на исследуемом участке через 100—200 м, густота точек по профилю — 30—50 м.

Такие же работы были произведены Л. Н. Богоявленским в Лужском округе. Результаты этих работ приведены на рис. 262, где с полной ясностью видно соответствие данных, полученных геофизической съемкой, с контурами участков, часто поражаемых молнией.

БИБЛИОТЕКА
Геологического Ин-та
Арм. Фил. АН Узун. ССРСР

32/10
37/11

¹ В настоящее время считается установленным, что все элементы земной коры содержат в большей или меньшей степени продукты распада урана и тория, а также и продукты распада радиоактивных эманаций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Рейх, Геологические основы прикладной геофизики, „Прикладная Геофизика“, вып. 1, ОНТИ, 1936.
2. К. Юнг, Гравиметрические методы прикладной геофизики, „Прикладная Геофизика“, вып. 1, ОНТИ, 1936.
3. А. А. Михайлов, Курс гравиметрии и теории фигуры земли, ГТТИ, 1933.
4. П. М. Никифоров, Физические основания гравитационного метода горной разведки, Известия ин-та прикладной геофизики, вып. 1 и 2, 1925—1926.
5. С. Чепмен, Земной магнетизм, Гидрометеорологическое изд-во, 1937.
6. И. М. Бахурин, П. Б. Вейнберги и В. Я. Павлинов, Курс магнитной разведки, ОНТИ, 1933.
7. Н. В. Розе, Н. Н. Трубятченский и Б. М. Яновский, Земной магнетизм и магнитная разведка, ОНТИ, 1934.
8. Г. Ангенхейстер, Г. Хаальк и Н. Щодро, Магнитометрия, „Прикладная Геофизика“, вып. 3, ОНТИ, 1936.
9. Л. Я. Нестеров, Н. С. Бибииков, А. Ш. Усманов, Курс электро-разведки, ОНТИ, 1938.
10. И. Гуммель и В. Гейне, Электрические методы прикладной геофизики, „Прикладная Геофизика“, вып. 4, ОНТИ, 1936.
11. Г. А. Гамбурцев, Б. В. Дерягин, Г. Мартин, О. Мейсер, Сейсмометрия, „Прикладная Геофизика“, вып. 2, ОНТИ, 1934.
12. Г. А. Гамбурцев, Сейсмические методы разведки, ч. I и II, ОНТИ, 1937—1938.
13. В. А. Соколов, Газовая съемка, ОНТИ, 1936.
14. И. Гуммель, Радиоактивный метод прикладной геофизики, „Прикладная Геофизика“, вып. 4, ОНТИ, 1936.
15. С. А. Красковский, Геотермические измерения, Материалы ЦНИГРИ, Геофизика, сборник 6, ОНТИ, 1938.
16. П. Н. Тверской, Курс геофизики, ГИЗ, 1932.
17. А. И. Заборовский, Геофизические методы разведки, ГНТГИ, 1932.
18. Ив и Кейс, Геофизические методы горной разведки, ГНТГИ, 1932.
19. К. А. Хэйланд, Геофизические методы разведки, ГНТИ, 1931.
20. В. А. Сельский, Краткий курс прикладной геофизики, ОНТИ, 1938.
21. П. И. Степанов, А. П. Ротай и др., Геологическое описание Донецкого каменноугольного бассейна. Южная экскурсия. Путеводитель XVII Межд. геол. конгр., 1937.
22. Е. О. Погребницкий, О факторах метаморфизма углей Донецкого бассейна, „Химия Твердого Топлива“.
23. В. С. Шехунов, К вопросу о метаморфизме углей, „Проблемы Советской Геологии“, № 3, 1938.
24. М. М. Тетяев, О геологическом районировании складчатых областей, „Проблемы советской геологии“, № 2, 3, 1936.
25. А. Д. Архангельский, А. А. Михайлов, В. В. Фединский и Е. Н. Люстих, Геологическое значение аномалии силы тяжести в СССР, „Известия Академии Наук“, № 4, 1937. Серия Геологическая.
26. А. Д. Архангельский, Н. В. Розе, В. В. Коллюбакин, В. П. Орлов и А. И. Падеревская, Тектоника докембрийского фунда-

мента восточноевропейской платформы по данным общей магнитной съемки СССР, „Известия Академии Наук“, № 2, 1937, Серия геофизическая и географическая.

27. П. М. Никифоров, Гравиметрия и геофизика (доклад), Сборник „Геолого-разведочные работы во втором пятилетии“, вып. III, 1933.

28. А. Д. Архангельский, Геология и гравиметрия, ОНТИ, 1933.

29. А. Д. Архангельский, Н. С. Шатский и др., Краткий очерк геологической структуры и геологической истории СССР, Изд. Академии Наук, 1937.

30. Б. А. Андреев, Применение геофизических методов при поисках и разведке хромитовых месторождений, Труды ЦНИГРИ, вып. 100, 1937.

31. Л. Д. Берсудский. К вопросу о причинах обратной магнитной полярности рудных залежей Ангаро-Илимского района, Труды ВСГРТ, вып. 20, 1937.

32. „За недра Урала“, Сборник статей, УралНИГРИ, 1934.

33. A. Edge, T. Laby, The principles and practice of geophysical prospecting. Cambridge, 1931.

34. Reich, Über die elastischen eingenschaften von Gesteinen und damit Zusammenhängende geologische Fragen. Gerl. Beitz. Z. Geoph. 1927, Bd. XVII.

35. C. Branner, Sandstone Porosities in Paleozoic Region in Arkansas. Bull. of the Am. Ass. of Petrol. Geologists, № 1, 1937.

36. H. Reich, Angewandte Geophysik für Bergleute and Geologen. Leipzig, 1933.

37. O. L. Alexanian. Traité pratique de prospection géophysique. Paris et Liège, 1932.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Предисловие	3
Введение.	
§ 1. Задачи разведочной геофизики	5
§ 2. Физические свойства горных пород	8

Часть I. Основы методов разведочной геофизики.

Введение. <i>VV</i>	
<i>Глава I. Гравиразведка.</i>	
§ 3. Земное гравитационное поле <i>VV</i>	30
§ 4. Наблюдения с гравитационным вариометром	36
§ 5. Обработка и расшифровка вариометрических наблюдений	42
<i>Глава II. Магниторазведка.</i>	
§ 6. Земное магнитное поле <i>VV</i>	46
§ 7. Магнитные приборы . . <i>VV</i>	51
§ 8. Магнитные съемки . . <i>VV</i>	55
§ 9. Истолкование данных магнитной съемки. <i>VV</i>	59
<i>Глава III. Электроразведка.</i>	
§ 10. Методы электрических сопротивлений <i>VV</i>	65
§ 11. Методы изолиний, интенсивности и индукции	86
§ 12. Другие методы электроразведки	107
<i>Глава IV. Сейсморазведка.</i>	
§ 13. Общие основы сейсморазведки <i>V.V.</i>	121
§ 14. Метод преломленных волн	126
§ 15. Метод отраженных волн	135
<i>Глава V. Другие методы разведочной геофизики.</i>	
§ 16. Физико-химические методы <i>VV</i>	149
§ 17. Радиоактивные методы <i>VV</i>	156
§ 18. Геотермия	165
<i>Глава VI. Кароттаж скважин.</i>	
§ 19. Кароттаж физических свойств	170
§ 20. Различные операции в скважинах	187

1497