

550.83  
ПЧУ

# ПОДЗЕМНАЯ ГРАВИРАЗВЕДКА

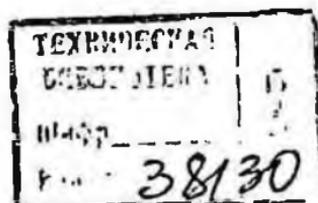


2004

530.83  
ПЧУ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ УССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ  
ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ им. АРТЕМА

# ПОДЗЕМНАЯ ГРАВИРАЗВЕДКА (МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО)



Ленинград  
«Недра»  
Ленинградское отделение  
1979

Подземная гравиразведка (методическое руководство)/Н. Р. Бурьян, А. А. Юньков, Н. М. Анищенко и др. Л., Недра, 1979. 159 с. (М-во высш. и средн. спец. образования УССР. Днепропетр. горн. ин-т им. Артема).

Книга посвящена результатам применения подземной гравиразведки и опытно-методическим работам в этой области. Рассмотрены: возможности подземной гравиразведки при поисках возмущающих тел в околовыработанном пространстве; методика подземных измерений элементов гравитационного поля; гравиразведочная аппаратура; обработка результатов наблюдений и способы выделения локальных аномалий, принадлежащих искомым возмущающим объектам; методика интерпретации гравитационных аномалий с учетом условий горных выработок. На конкретных примерах показана геологическая эффективность подземных гравиметрических исследований в различных физико-геологических условиях при решении поисковых и разведочных задач. Намечены перспективы развития подземной гравиразведки при решении целого ряда геологических и горнотехнических задач.

Книга предназначена для геофизиков и геологов, работающих в геологоразведочных организациях и на предприятиях горнорудной промышленности. Она может быть полезной студентам геофизических специальностей высших и средних учебных заведений.

Табл. 15, ил. 42, список лит. 116 назв.

Авторы: Н. Р. БУРЬЯН, А. А. ЮНЬКОВ, Н. М. АНИЩЕНКО, Н. И. ВИЩЕНКО, И. В. ПЛИШКО.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Для повышения эффективности геологоразведочных работ на стадии эксплуатации месторождений полезных ископаемых в самых разных физико-геологических условиях все шире применяются методы подземной гравиразведки. Накоплен значительный опыт научно-исследовательских и опытно-методических работ по созданию и совершенствованию методики и техники подземной гравиразведки на всех ее этапах — от измерения поля до геологического истолкования результатов. Имеется множество статей и отчетов, посвященных частным вопросам. Отсутствие труда, в котором был бы систематизирован и обобщен опыт применения подземной гравиразведки при решении поисковых и некоторых других геологоразведочных задач, затрудняет более широкое внедрение этого метода в практику работ геологоразведочных и горнодобывающих предприятий. В связи с этим возникла необходимость обобщения многолетнего опыта исследований по подземной гравиразведке в виде методического руководства.

Предлагаемое методическое руководство написано в соответствии с требованиями действующей в настоящее время инструкции по гравиметрической разведке (1975 г.). Авторы ставили задачу разработать обоснованные рекомендации по практическому выполнению всех этапов гравиметрической съемки в горных выработках, что позволило бы проводить производственные работы практически без привлечения дополнительной специальной литературы.

В книге приведены теоретические положения, которые характеризуют особенности подземной гравиразведки. Авторы стремились подробно рассмотреть те вопросы, которые разобщенно, а иногда и противоречиво представлены в периодической литературе; меньшее внимание уделено общепринятым в практике гравиразведочных работ положениям. С учетом разнообразия физико-геологических условий различных типов рудных месторождений даны методические рекомендации для более сложных ситуаций, а затем показаны пути их упрощения.

В книге обобщены и систематизированы как уже опубликованные материалы, так и опыт, накопленный за последние годы.

Методическое руководство включает: историю подземной гравиразведки как метода (1); возможности подземной гравиразведки при поисках возмущающих тел в околоразработанном пространстве (2); методику подземных измерений элементов гравитационного поля (3); гравиразведочную аппаратуру и работу с ней (4); методику обработки результатов (5) и выделения локальных аномалий, принадлежащих искомому возмущающим телам (6); методику интерпретации гравитационного поля, измеренного в горных выработках (7), и перспективы развития подземной гравиразведки (8).

Методическое руководство составили по инициативе Минчермета СССР сотрудники Днепропетровского горного института им. Артема: старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук Н. Р. Бурьян; профессор, доктор геолого-минералогических наук А. А. Юньков; старший инженер Н. М. Анищенко. В работе приняли участие главный геофизик Н. И. Вищенко (соавтор раздела 3.3) и геофизик И. В. Плишко (соавтор разделов 3.3, 3.5, 3.7, 7.3 и 8) от Партии руднично-шахтной геофизики управления Укрчерметгеология Минчермета УССР.

Авторы выражают признательность кандидату геолого-минералогических наук В. М. Пелюшенко (трест Днепрогеофизика Мингео УССР) и младшему научному сотруднику М. В. Макееву (НПО «Геофизика») за предоставленные материалы и помощь при написании некоторых разделов книги. Авторы благодарят доктора физико-математических наук Е. Г. Булаха, доктора технических наук Е. А. Мудрецову, кандидата геолого-минералогических наук Ю. З. Борзенко, инженеров-геофизиков А. С. Плохого и Л. И. Золотареву, доцента кафедры геофизики Днепропетровского горного института М. В. Копнина и других товарищей за критические замечания и советы, которые содействовали улучшению качества настоящей работы.

## 1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Первые гравиметровые наблюдения в подземных выработках были выполнены в прошлом веке. При этом использовались маятниковые аппараты; основной целью работ было определение плотности верхних слоев земной коры [Г. Айри, 1854 г.; Р. Стернек, 1882 г.; И. Хейфорд, 1902 г.]. В 1924 г. А. Бирнбаум проводит подземные вариометрические, а в 1929 г. Г. Хаальк гравиметровые исследования в разведочных целях. Целый ряд трудностей технического и методического характера затормозили развитие метода на два десятилетия.

С 1930 по 1950 г. работы выполнялись эпизодически, нецеленаправленно и были, по существу, опытными. Сюда можно отнести съемки О. Майссера и Ф. Вольфа [1], Р. Бенфильда [2], С. Хаммера [3, 4], Г. Юнга [5] и некоторых других зарубежных исследователей. В нашей стране до 1950 г. следует назвать лишь одну работу — Б. А. Поклада и А. П. Казанского [1936 г.].

Начиная с 1950 г. бурно развиваются наземные гравиметрические исследования, которые способствовали интенсификации подземных измерений силы тяжести с целью определения средней плотности верхних слоев Земли. Обработывается методика подземных наблюдений и использования полученных данных для решения указанной задачи (С. Хаммер [3], Г. Роджерс [6], Г. Рише [7], В. Домзальский [8, 9], Г. Бодемюллер [10], З. Файклевич [11, 12], П. И. Лукавченко [13, 14] и др.). Параллельно решаются задачи эксплуатационной разведки, в последние 15 лет они становятся главными. Подземная гравиразведка привлекается при поисках слепых рудных тел, определении геоморфологии известных рудных тел, изучении структурных особенностей и тектоники эксплуатируемых участков месторождений, решении ряда горнотехнических и гидрогеологических задач.

Внедрение метода потребовало расширения теоретических и опытно-методических исследований. В разное время и в разных физико-геологических условиях (месторождения Урала, Кавказа, Казахстана, Алтая, Кривбасса) работы выполняют Институт физики Земли АН СССР (ИФЗ), Всесоюзный институт разведочной геофизики (ВИРГ), Казахский филиал ВИРГ, Москов-

ский геологоразведочный институт (МГРИ), Криворожский научно-исследовательский горнорудный институт (НИГРИ), Днепрпетровский (ДГИ) и Свердловский (СГИ) горные институты, а также геофизические производственные организации Мингео СССР и других министерств.

Многие положения теории и методики подземной гравиразведки были разработаны еще в 50-х и начале 60-х годов (З. Загорак [15], В. А. Казинский [16—22 и др.], В. З. Фурсов [23—25 и др.], Е. А. Мудрецова [26—29 и др.]). В этот же период было издано первое методическое руководство по подземным гравиметрическим съемкам на рудных месторождениях (Е. А. Мудрецова [30]), которое по содержанию скорее соответствовало инструкции. Методические рекомендации были изложены в соответствии с технической инструкцией по наземным гравиметрическим исследованиям [31] с учетом специфики подземных работ. Следует заметить, что это методическое руководство сыграло определенную роль в широком внедрении метода в практику подземных геофизических съемок.

В результате последующих исследований предлагаются критерии по выбору горных выработок и участков в них, обеспечивающие эффективные поиски возмущающих тел (А. А. Юньков и др. [32]); разрабатываются методы расчета поисковой сети для подземных условий (А. А. Юньков и др. [33—35]); решается проблема методики и техники измерения поля в горных выработках с интенсивной выемкой полезного ископаемого [Е. А. Мудрецова, 1962 г.; З. Г. Муромцева и др., 1964 г.].

К настоящему времени выяснены основные вопросы, связанные с обработкой измеренных значений элементов гравитационного поля. Существует ряд строгих и приближенных способов, позволяющих учитывать влияние горных выработок, в которых ведутся измерения, а также боковых выработок и отработанных пространств [14, 15, 36—39 и др.]. Надо отметить, что все существующие способы сравнительно громоздки и в дальнейшем для вычислений следует использовать ЭВМ.

Большой объем исследований по выделению локальных аномалий, принадлежащих искомому возмущающим массам, выполнили Е. А. Мудрецова, В. Н. Панасенко, Н. Р. Бурьян, В. И. Андреев, К. И. Соколовский и др.

Значительными этапами подземных гравиметрических исследований являются качественная и количественная интерпретация и геологический прогноз для рационального направления дальнейшей эксплуатационной разведки. В настоящее время можно считать достаточно разработанными только способы качественной интерпретации элементов гравитационного поля (З. Загорак [15], В. А. Казинский [17, 36], В. М. Пелюшенко [40—44], А. А. Юньков [45—49], З. Г. Муромцева, В. М. Юрков [50] и др.). Среди способов количественной интерпретации к удовлетворительно разработанным можно отнести лишь ана-

литический и способ подбора. Привлечение ЭВМ способствует успешному внедрению методов интерпретации наземной гравиразведки в практику подземных исследований.

В заключение отметим, что за весьма короткое время подземная гравиразведка помогла открыть множество рудных тел, решить целый ряд геологических, гидрогеологических, горнотехнических и других задач. Особенно возросло значение этого метода в связи с поисками глубокозалегающих месторождений.

## 2. ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА ПРИ РЕШЕНИИ ПОИСКОВЫХ И РАЗВЕДОЧНЫХ ЗАДАЧ

Одним из главных факторов, определяющих эффективность поисков и разведки возмущающих тел в околоразработанном пространстве, является правильный выбор комплекса составляющих гравитационного поля. Существуют разные точки зрения на рациональное использование функций и их комплексирование. Г. Хаальк (1934 г.), например, рекомендует измерять под землей лишь градиенты, З. Загорак (1953 г.) считает необходимым кроме градиентов использовать кривизну  $V_{xy}$ . В последние годы этим вопросом занимаются много авторов: В. А. Казинский (1957 г.), В. Ф. Полуэктов (1963 г.), В. М. Пелюшенко (1964 г.), В. Н. Панасенко, З. Г. Муромцева, В. М. Юрков (1965 г.), А. А. Юньков (1965 г., 1968 г.), Н. Р. Бурьян (1970 г., 1973 г.) и др. Даны рекомендации по решению поисковых задач с привлечением отдельных элементов гравитационного поля и их сочетаний.

Поисковые возможности элементов гравитационного поля и их комплекса, как правило, выявляют, анализируя характер изменения поля над моделями возмущающих тел, определенным образом расположенными в околоразработанном пространстве. В качестве моделей при этом берут тела правильной геометрической формы: шар, призму, цилиндр и т. д. Некоторые авторы склонны считать, что тело правильной геометрической формы является частным случаем и полученное при этом решение задачи не будет общим. Но и любая модель самой сложной формы создает поле, принадлежащее только ей, и тем самым также не приводит к общности решения. Более того, из-за сложности поля возникают существенные трудности, препятствующие установлению общих закономерностей его распределения в зависимости от местоположения в пространстве.

В данной работе для решения задачи в качестве модели принято тело правильной формы — круговой ограниченный по профилю цилиндр. Такая модель позволяет подчеркнуть изменение поля в зависимости от ее местоположения и ориентировки по отношению к профилю измерений, а также указать харак-

терные особенности поля над вытянутыми в некотором направлении телами. Рассмотрены поля составляющих гравитационного потенциала над указанной моделью и предельно изучаемые ими области околоработанного пространства. Выполнен анализ поисковых возможностей каждого элемента поля при измерении его в одной и нескольких выработках, а также комплекса элементов поля, полученного в одной выработке. Заметим, что в настоящее время аппаратура позволяет измерять лишь компоненты  $\Delta g$ ,  $V_{zz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$  и  $V_{\Delta}$ . Существует некоторый опыт высотных измерений  $\Delta g$  с целью вычисления  $V_{zz}$ . Вычисление по измеренным элементам других производных потенциала не дает удовлетворительной для практики точности, поэтому целесообразно использовать только наблюдаемые элементы поля.

## 2.1. Гравитационное поле тела, произвольно расположенного в околоработанном пространстве

Чтобы оценить характер гравитационного поля принятой модели — цилиндра  $ab$  (рис. 2.1), рассмотрим несколько случаев:

- 1) ось цилиндра параллельна оси  $x$ ;
- 2) ось цилиндра параллельна оси  $y$ ;
- 3) ось цилиндра параллельна оси  $z$ ;
- 4) ось цилиндра параллельна плоскости  $xOz$  и образует с осью  $x$  угол  $\alpha < 90^\circ$ ;
- 5) ось цилиндра параллельна плоскости  $xOz$  и образует с осью  $x$  угол  $\alpha > 90^\circ$ ;
- 6) ось цилиндра параллельна плоскости  $yOz$  и образует с осью  $y$  угол  $\alpha < 90^\circ$ ;
- 7) ось цилиндра параллельна плоскости  $yOz$  и образует с осью  $y$  угол  $\alpha > 90^\circ$ .

Достаточно записать математические выражения для 4-го и 6-го случаев или, что то же самое, для 5-го и 7-го, а для остальных получим как частные при соответствующих значениях  $\alpha$ .

Приведем формулу  $\Delta g$  для ограниченного по простиранию кругового цилиндра, ось которого параллельна плоскости  $xOz$  и образует с осью  $x$  некоторый угол  $\alpha$  (рис. 2.1, а). Для этого воспользуемся двумя системами прямоугольных координат:  $xuz$  и  $x'y'z'$  с общим началом в точке  $O$ . Будем считать, что ось  $x$  всегда направлена вдоль исследуемой выработки, а наблюдения выполняются в начале координат. Системы повернуты относительно друг друга вокруг оси  $y$  на угол  $\alpha$  — угол наклона оси тела.

Связь указанных систем координат можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} x &= x' \cos \alpha - z' \sin \alpha; \\ y &= y'; \\ z &= z' \cos \alpha + x' \sin \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Составляющая

$$\begin{aligned} \Delta g &= km \int_{x_1'}^{x_2'} z (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx' = \\ &= km [z' \cos \alpha / (y'^2 + z'^2) \cdot [x_2' (x_2'^2 + y'^2 + z'^2)^{-1/2} - \\ &\quad - x_1' (x_1'^2 + y'^2 + z'^2)^{-1/2}] - \sin \alpha [(x_2'^2 + y'^2 + \\ &\quad + z'^2)^{-1/2} - (x_1'^2 + y'^2 + z'^2)^{-1/2}]]. \end{aligned} \quad (2.2)$$

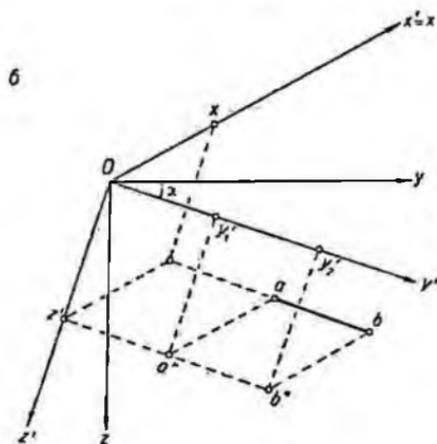
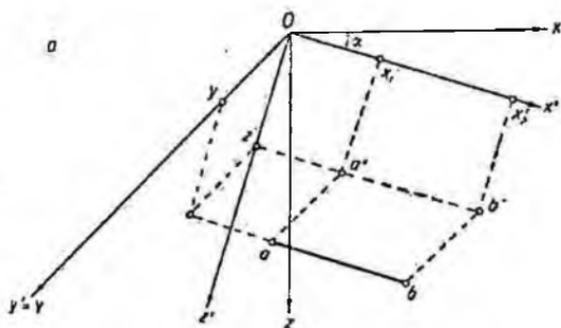


Рис. 2.1. Схема расположения возмущающего тела при расчете элементов гравитационного поля. Продольная ось тела параллельна плоскости  $xOz$  (а),  $yOz$  (б).

Аналогично записываются выражения других составляющих поля:

$$\left. \begin{aligned}
 V_{xz} &= 3km \int_{x_1'}^{x_2'} xz (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx'; \\
 V_{yz} &= 3km \int_{x_1'}^{x_2'} yz (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx'; \\
 V_{xy} &= 3km \int_{x_1'}^{x_2'} xy (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx'; \\
 V_{\Delta} &= 3km \int_{x_1'}^{x_2'} (x^2 - y^2) (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx'; \\
 V_{zz} &= km \int_{x_1'}^{x_2'} (2z^2 - x^2 - y^2) (x^2 + y^2 + z^2)^{-3/2} dx',
 \end{aligned} \right\} (2.3)$$

где  $k$  — гравитационная постоянная;  $m = \pi r^2 \sigma$  — масса единицы длины цилиндра;  $r$  — радиус сечения цилиндра в плоскости  $y'Oz'$ ;  $\sigma$  — аномальная плотность;  $x_1', x_2'$  — удаление границ тела по простираанию от начала координат;  $x, y, z$  — текущие координаты (см. рис. 2.1, а).

Аналогично получают выражения составляющих поля для тел, расположенных параллельно плоскости  $yOz$ , ось которых образует с осью  $y$  угол  $\alpha$  (рис. 2.1, б). В этом случае интегрирование выполняется по переменной  $y'$  в пределах от  $y_1'$  до  $y_2'$ .

По этим формулам были вычислены значения поля при  $\sigma > 0$  (при  $\sigma < 0$  все составляющие изменяют знак на обратный) для разного расположения возмущающих тел в пространстве относительно линии наблюдения (рис. 2.2, 2.3). На рисунках в верхней части показано местоположение возмущающего тела в плоскости  $yOz$  (1, 2, ..., 8) и его наклон к оси  $x$  или  $y$ .

Знаки аномалий  $\Delta g, V_{xz}, V_{yz}$  и  $V_{xy}$  по оси  $x$  в основном зависят от положения тела относительно или горизонтальной плоскости наблюдений ( $\Delta g, V_{xz}$ ), или вертикальной ( $V_{xy}$ ), или той и другой ( $V_{yz}$ ). Аномалии симметричны, если ось тела параллельна одной из координатных осей или наклонена в плоскости  $yOz$ , и асимметричны, если ось тела или ее проекция на плоскость  $xOz$  образует угол  $\alpha$  с осью  $x$ .

Некоторыми особенностями отмечаются аномальные кривые, когда ось масс находится в горизонтальной (1-е и 5-е положение тела) или вертикальной (3-е и 7-е положение тела) плоскости наблюдений. Если тело занимает 1-е или 5-е положение, а его ось параллельна одной из координатных осей, то

аномалии  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  равны нулю. Аномалии  $V_{yz}$  и  $V_{xy}$  также равны нулю, если массы находятся в 3-м или 7-м положении, а их оси параллельны одной из координатных осей или плоскости  $xOz$ . Своеобразный облик имеют аномалии  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  над телами в 1-м или 5-м положении, оси которых или их проекции на плоскость  $xOz$  образуют с осью  $x$  некоторый угол  $\alpha$  (см. рис. 2.2).

Из рис. 2.3 следует, что при расположении масс в 1-й или 5-й позиции и параллельности их осей плоскости  $yOz$  аномалии  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  невозможно отличить от тех, которые обусловлены такими же телами, но расположенными ниже либо выше горизонта наблюдений. Если же тело находится в 3-м или 7-м положении и его ось параллельна плоскости  $yOz$ , аномалии  $V_{xy}$  также невозможно отличить от тех, которые обусловлены телами, расположенными справа или слева от плоскости  $xOz$ . Указанные особенности связаны с тем, что максимальное влияние оказывают массы, находящиеся ближе к профилю наблюдений. Как в первом, так и во втором случае знаки аномалий зависят от угла наклона оси тела в плоскости  $yOz$ .

Характер поля  $V_{\Delta}$  и  $V_{zz}$  вдоль оси  $x$  не зависит от положения и ориентировки возмущающего тела в пространстве (см. рис. 2.2, 2.3). Форма, размеры и ориентировка тела влияют только на интенсивность аномалии и ее симметрию. Исключениями являются 1-е или 5-е положение при измерении  $V_{zz}$  и 3-е или 7-е положение при измерении  $V_{\Delta}$ . Если в общем случае  $V_{zz}$  — знакопеременная функция, то при расположении масс в горизонтальной плоскости наблюдения она имеет один знак на всей плоскости (отрицательная при  $\sigma > 0$ ). Если тело занимает 3-е или 7-е положение и его ось параллельна плоскости  $xOz$ , то аномалии  $V_{\Delta}$  всегда больше нуля на всей плоскости (при  $\sigma > 0$ ), а в точке  $x=0$  она равна нулю. При параллельности оси тела и оси  $x$  аномалия  $V_{\Delta}$  больше нуля и в точке  $x=0$ .

На основании аномальных кривых, приведенных на рис. 2.2, 2.3 (при избытке плотности), построены поля векторов  $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$  и  $V_{sz}$  (рис. 2.4). При недостатке плотности направление векторов изменяется на  $180^\circ$ . Распределение векторов тесно связано с положением тела в пространстве и его ориентировкой относительно координатных осей.

Приведенные рисунки имеют большое практическое значение. Аномальные кривые и векторы являются исходными данными, позволяющими установить возможность каждого элемента гравитационного поля и их комплекса при поисках возмущающих тел в околорыработанном пространстве и определить знак их аномальной плотности. Кроме того, они могут быть использованы при качественной интерпретации наблюдаемых в горных разработках гравитационных полей.

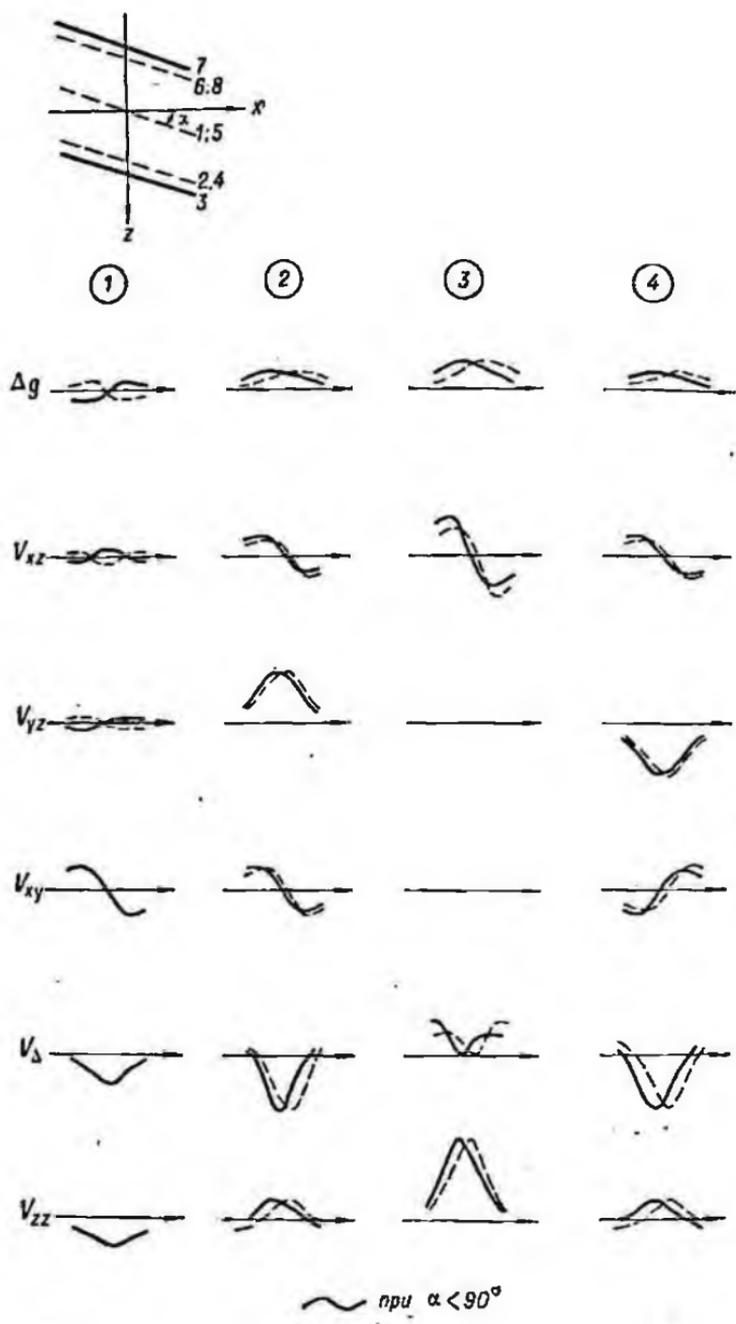
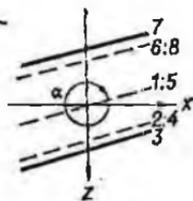
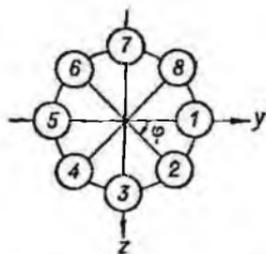


Рис. 2.2. Аномалии по оси  $x$  над наклонными к

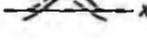
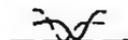
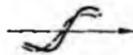
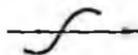
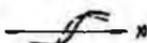
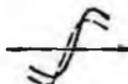


5

6

7

8



при  $\alpha > 90^\circ$

оси  $x$  ограниченными по пространству телами.

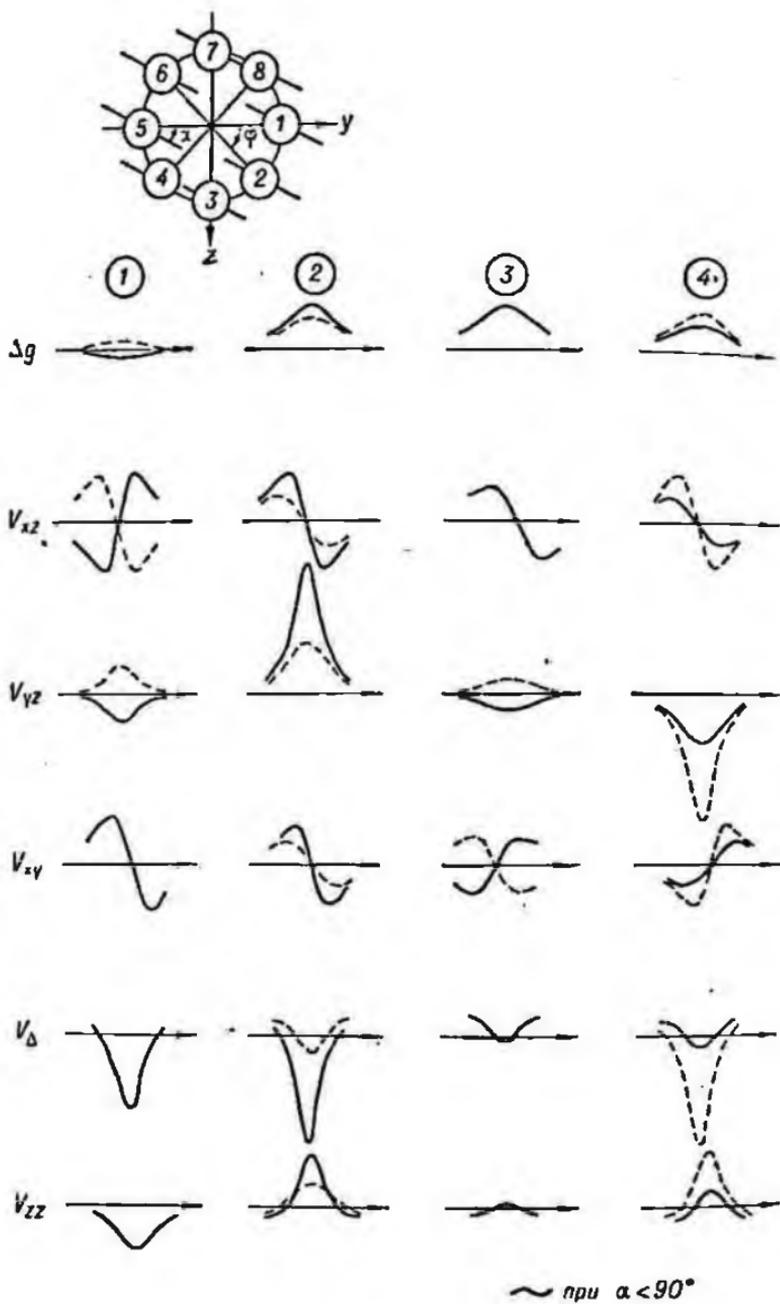
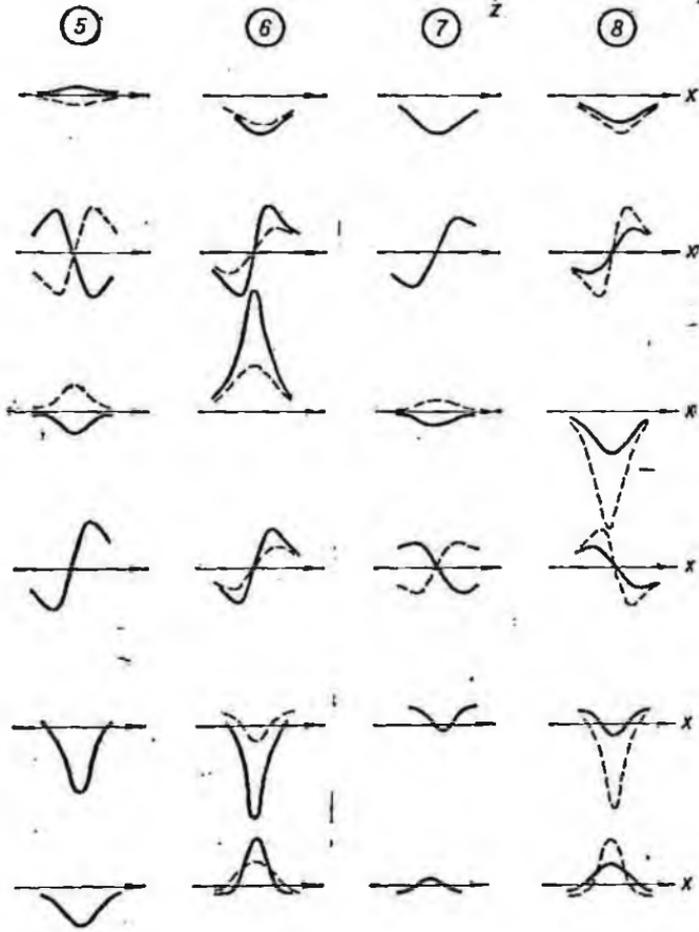
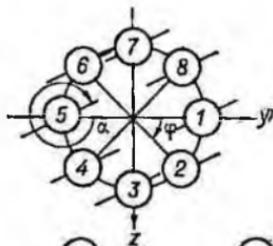
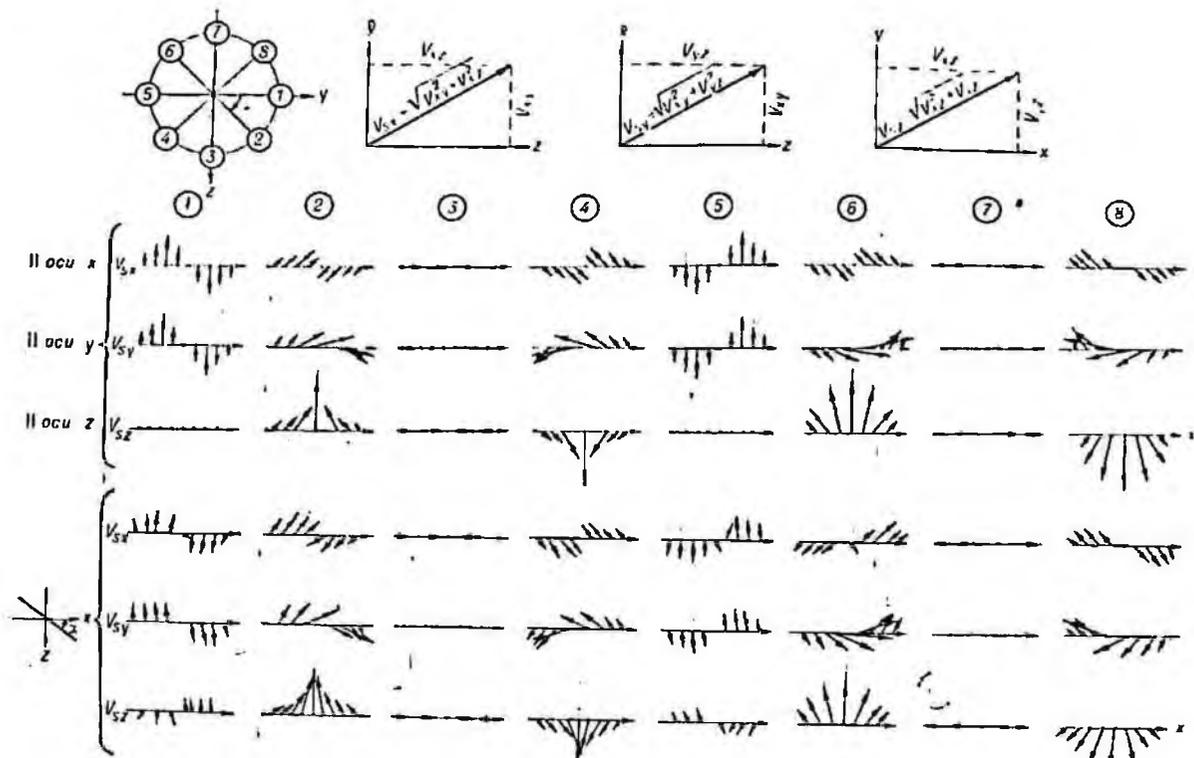


Рис. 2.3. Аномалии по оси  $x$  над наклонными  $k$



при  $\alpha > 90^\circ$

оси  $y$  ограниченными по пространству телами.



2 Зав. 737

ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
САНКТ-ПЕТЕРБУРГА  
01/2000

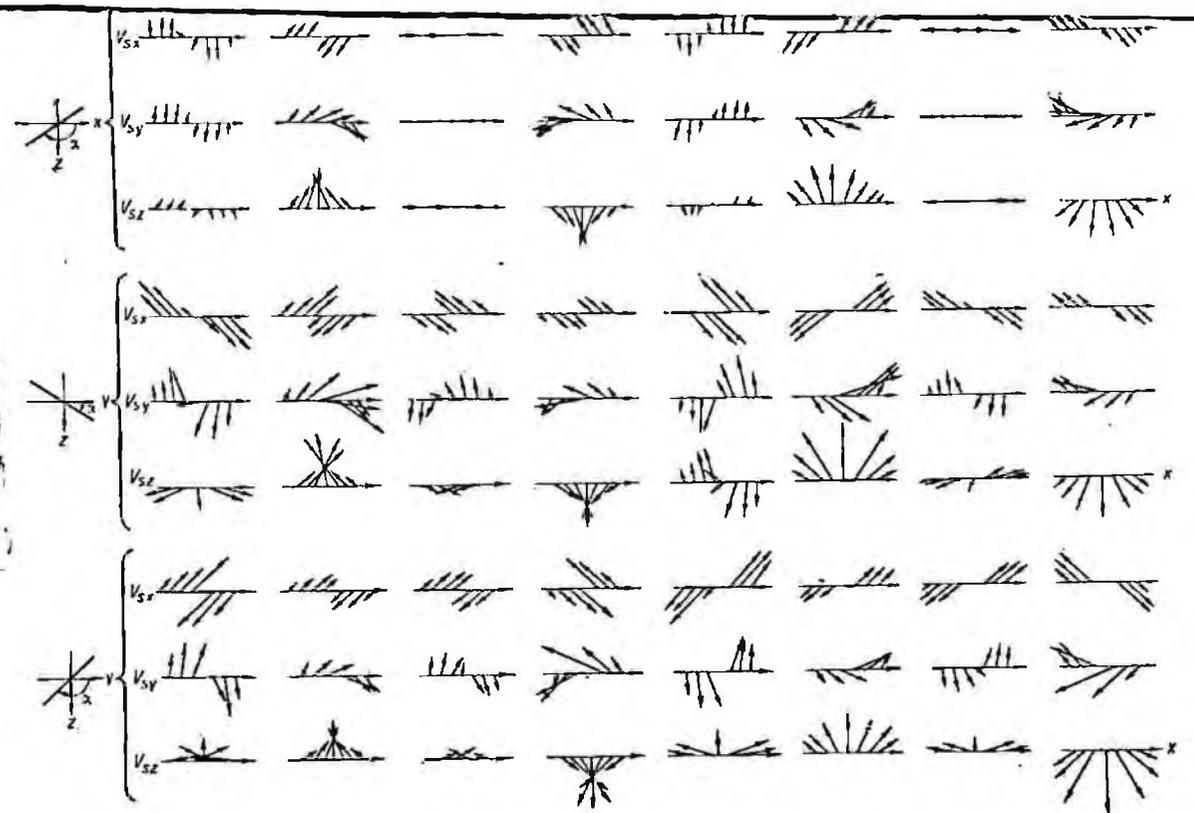


Рис. 2.4. Векторы  $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$ ,  $V_{sz}$  по оси  $x$  над ограниченным по пространству произвольно расположенным в пространстве цилиндрическим телом.

## 2.2. Предельно изученные области пространства для разных элементов гравитационного поля

Известно, что теоретически возможно измерить гравитационную аномалию, обусловленную бесконечно малыми и удаленными возмущающими массами. Практически измерить влияние масс или выявить его на фоне различных помех удается далеко не всегда. Можно обнаружить лишь определенные количества масс, создающие гравитационный эффект не менее некоторой наперед заданной величины  $\epsilon$  в некотором ограниченном пространстве. Величину  $\epsilon$  принято называть эффективной аномалией [33, 35, 51—53 и др.]. Под эффективной аномалией понимают такой уровень аномального поля, который включает погрешность измерения элемента поля, погрешность введения поправок при вычислении аномальных значений и уровень помех. К помехам относится влияние мелких плотностных неоднородностей внутри возмущающего тела, а также за его пределами.

Если задаться эффективной аномалией  $\epsilon$  и потребовать, чтобы некоторое возмущающее тело произвольно перемещалось в пространстве, но чтобы при этом его гравитационный эффект в некоторой точке  $O$  оставался равным  $\epsilon$ , то опишется вполне определенная поверхность. Эта поверхность ограничит область пространства, на границе и внутри которой будут обнаружены все заданные возмущающие тела, поскольку эффект от них в точке измерения больше или равен  $\epsilon$ . Такую область принято называть предельно изученной [33—35]. Для каждого элемента гравитационного поля предельно изученная область имеет свой вид. Форма тел сказывается на размерах области и некоторых ее деталях.

Рассмотрим предельно изученные области функций  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ ,  $V_{\Delta} = V_{xx} - V_{yy}$  и  $V_{zz}$  для шара (рис. 2.5). Они построены для шара радиусом  $r = 18,2$  м при  $\sigma = 1$  г/см<sup>3</sup>, эффективная аномалия силы тяжести  $\epsilon_{\Delta g} = 0,1$  мгал, а вторых производных  $\epsilon_V = 10$  Э. Следует оговориться, что в силу несопоставимости значений эффективных аномалий первой и вторых производных приведенный рисунок не может служить для сравнительной оценки их глубинности.

Вычислить предельно изученные области можно с помощью следующих формул, записанных в цилиндрической системе координат:

$$\left. \begin{aligned} \Delta g &= kmz (\rho^2 + z^2)^{-3/2}; \\ V_{xz} &= 3kmz\rho \cos \varphi \cdot (\rho^2 + z^2)^{-5/2}; \\ V_{yz} &= 3kmz\rho \sin \varphi \cdot (\rho^2 + z^2)^{-5/2}; \\ V_{xy} &= 3km\rho^2 \sin 2\varphi \cdot 0,5 (\rho^2 + z^2)^{-5/2}; \\ V_{\Delta} &= -3km\rho^2 \cos 2\varphi \cdot (\rho^2 + z^2)^{-5/2}; \\ V_{zz} &= km (2z^2 - \rho^2) (\rho^2 + z^2)^{-5/2}, \end{aligned} \right\} (2.4)$$

где  $m$  — масса шара, численно равная  $(4/3)\pi r^3\sigma$ ;  $\sigma$  — аномальная плотность шара;  $r$  — радиус шара;  $\rho, \varphi, z$  — текущие координаты.

Предельно изученная область функции  $\Delta g = e$  представляет собой две части пространства, ограниченные поверхностью, по-

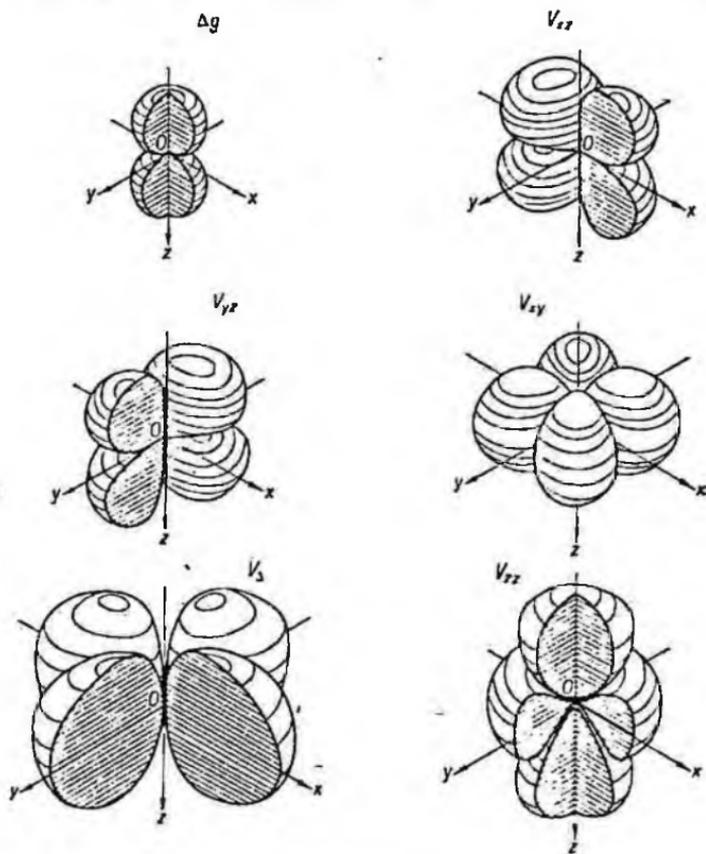


Рис. 2.5. Предельно изученные области пространства.

казанной на рис. 2.5. В сечении вертикальной плоскостью такая область дает фигуру, близкую к двум овалам, несколько больше сплюснутым у начала координат (рис. 2.6, а). В горизонтальной плоскости при  $z \neq 0$  сечение области имеет вид круга, а при  $z = 0$  область не существует ( $\Delta g = 0$ ).

Предельно изученная область функции  $V_{xz} = e$  представляет собой четыре грушевидных фигуры, расположенных симметрично относительно плоскостей  $xOy$  и  $yOz$ . Области не пересекают плоскостей  $xOy$  и  $yOz$ , так как при расположении масс в этих

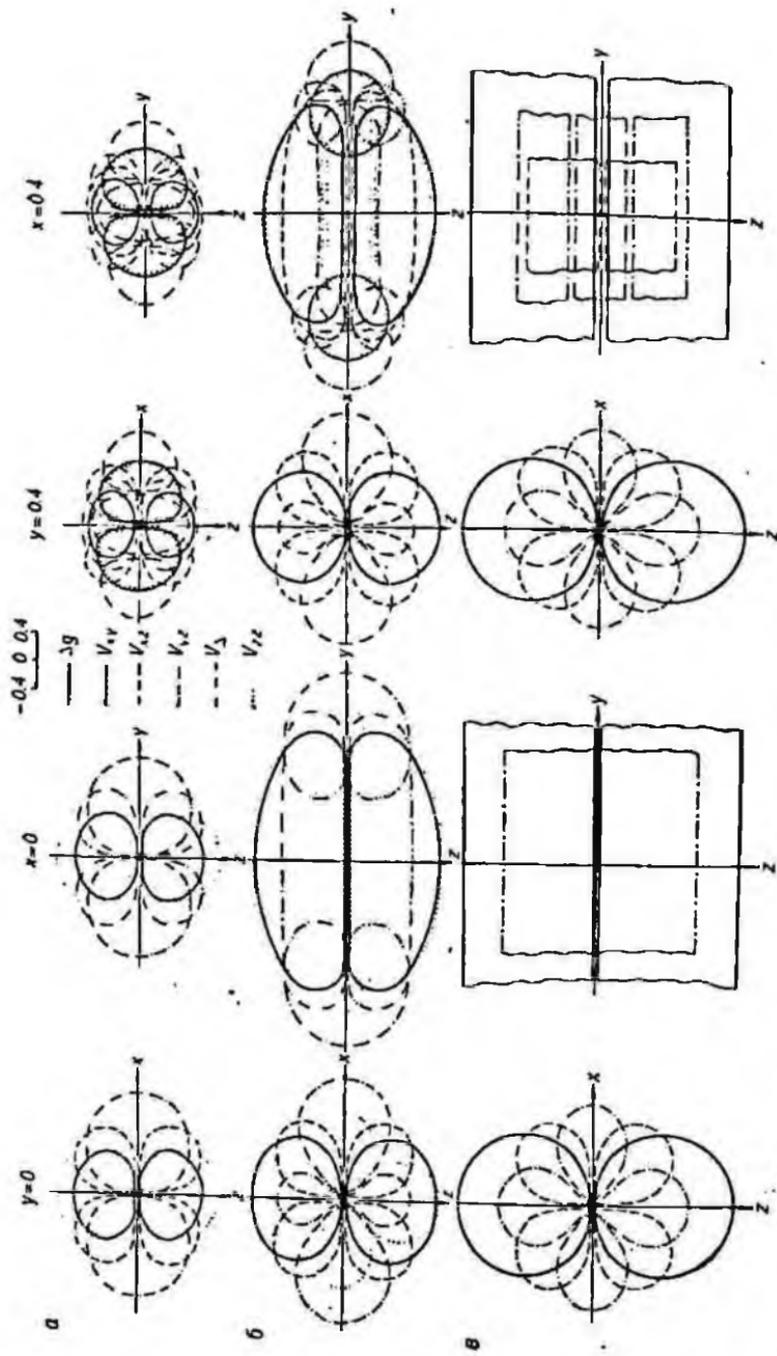


Рис. 2.6. Сечения предельно изученных областей пространства для шара (а), ограниченного (б) и бесконечного (в) кругового цилиндра.

плоскостях функция  $V_{xz}=0$ . Сечение области плоскостью  $xOz$  представляет собой 4-лепестковую розу с разобщенными лепестками. ..

Предельно изученная область функции  $V_{yz}=e$ , как это следует из выражения (2.4), по форме тождественна области  $V_{xz}$ , только повернута по часовой стрелке около оси  $z$  на  $90^\circ$ . Область не существует в плоскостях  $xOz$  и  $xOy$ , а в плоскости  $yOz$  имеет форму 4-лепестковой розы с разобщенными лепестками.

Предельно изученная область функции  $V_{xy}=e$  отличается более сложной формой. Она не пересекается с плоскостями  $xOz$  и  $yOz$ , а в плоскости  $xOy$  имеет вид 4-лепестковой розы. В плоскостях  $x=\text{const}$  или  $y=\text{const}$  область представляет собой два овала, симметрично расположенные относительно начала координат. Большие оси их направлены параллельно оси  $z$ , сжатие овалов со стороны начала координат несколько больше, чем с противоположной.

Предельно изученная область функции  $V_\Delta=e$ , как следует из выражения (2.4), подобна области  $V_{xy}$ , однако для  $V_\Delta$  она в 2 раза больше и повернута против часовой стрелки на  $45^\circ$ .

Своеобразный облик имеет предельно изученная область функции  $V_{zz}$ . Выше и ниже плоскости  $xOy$  симметрично расположены две ограниченные области грушевидной формы. Они как бы сжали область, пересекающую плоскость  $xOy$  и первоначально имевшую форму эллипсоида вращения около оси  $z$ . Эта область существует и в плоскости  $xOy$  и в начале координат, что является отличительной особенностью функции  $V_{zz}$ . Сечение области плоскостью  $xOy$  имеет вид круга, а в произвольной вертикальной плоскости дает своеобразную неправильную 4-лепестковую розу.

Как показали исследования, для любых трехмерных изометричных тел формы предельно изученных соответствующими элементами гравитационного потенциала областей подобны вышеописанным и отличаются только размерами. Некоторыми особенностями обладают области для вытянутых в горизонтальном направлении тел. При трансформации шара в круговой цилиндр предельно изученные области функций  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_\Delta$  и  $V_{zz}$  также вытягиваются в направлении простиранья тела (рис. 2, б, б). Для функций  $V_{xy}$  и  $V_{yz}$  над ограниченными цилиндрическими телами характерно смещение экстремумов в зону контактов тела. Соответственно экстремумам смещаются и элементы области с некоторым увеличением в объеме без существенного изменения формы. При бесконечных размерах цилиндрического тела предельно изученные области преобразуются в пространственные фигуры, ограниченные бесконечными в направлении простиранья тела цилиндрическими поверхностями (рис. 2, б, в). Составляющие  $V_{xy}$  и  $V_{yz}$  над такими телами равны нулю, следовательно, и предельно изученные этими функциями области не существ-

вуют. Рассмотрен случай, когда простираение тела совпадает с осью  $y$ . При простирании тела в направлении оси  $x$  все особенности области, описанные для составляющей  $V_{xz}$ , приобретает область  $V_{yz}$ , и наоборот. Области изученности для других составляющих поля также сохраняют свои особенности, изменится только направление их простираения.

Для непростых по форме и неоднородных по плотности тел предельно изученные области имеют более сложный облик, сохраняя при этом общие черты с вышеописанными областями.

Анализ предельно изученных областей указывает на ограниченность пространства, в пределах которого могут быть зафиксированы массы, создающие в точке наблюдения гравитационный эффект больше или равный  $\epsilon$ . Размеры области зависят в первую очередь от значения  $\epsilon$  и от массы тела, представляющего собой предмет поиска. Исследование предельно изученных областей для конкретных физико-геологических условий имеет большое практическое значение. Как правило, глубинность того или иного элемента физического поля оценивается в отдельной точке по экстремальным значениям поля над конкретными моделями возмущающих тел. Предельно изученная область, кроме того, позволяет наглядно представить все разведанное пространство. Знание предельно изученных областей оказывает помощь при оценке геологической эффективности выполненной или проектируемой съемки. Особенно полезно совместно рассматривать возможности различных составляющих гравитационного и других физических полей при обосновании рационального комплекса исследований.

### 2.3. Поисковые возможности элементов поля, измеренных в одной и нескольких горных выработках

Положим, что основной горной выработкой, в которой ведутся исследования, является нулевая (рис. 2.7). Вокруг этой выработки возмущающие массы могут располагаться произвольно, в том числе и так, как показано на рисунке. Другие горные выработки в зависимости от условий эксплуатации месторождения также могут занимать в пространстве любое место. В соответствии с указанным на рисунке расположением масс  $m$  горных выработок опишем поисковые возможности различных элементов поля.

**Аномалия  $\Delta g$ .** При известном знаке аномальной плотности и наличии аномалий  $\Delta g$ , измеренных в одной выработке (нулевой, например), можно уверенно судить о наличии масс в верхнем или нижнем полупространстве. Если знак плотности неизвестен, то необходимы измерения поля в нескольких горных выработках, расположенных на разных горизонтах. Для заданного взаимного расположения возмущающих масс и выработок можно привести распределение знаков поля в выработках (табл. 2.1).

Из табл. 2.1 следует, что по значениям  $\Delta g$ , измеренным в двух и более выработках, нельзя однозначно определить знак аномальной плотности и положение возмущающего тела, находящегося выше верхней или ниже нижней выработки.

В отдельных случаях по интенсивности и характеру изменения аномалии  $\Delta g$  вдоль выработки на разных горизонтах удастся указать место и знак аномальной плотности масс, располо-

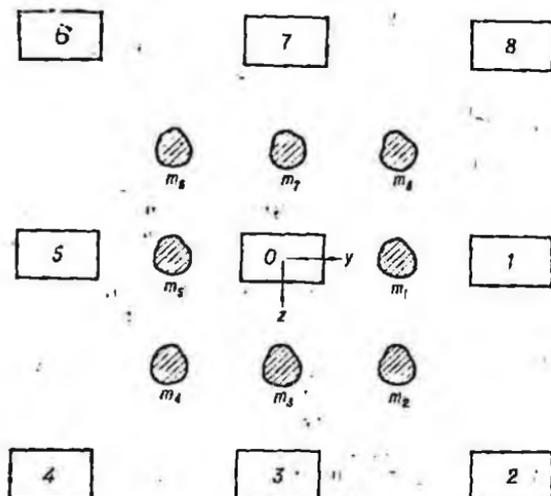


Рис. 2.7. Схема взаимного расположения возмущающих масс и горных выработок.

Таблица 2.1

Знаки аномалии  $\Delta g$  (при  $\sigma > 0$ ) в разных выработках

Варианты группирования выработок	Выработки	Массы							
		$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$
1	0	0	+	+	+	0	-	-	-
	1 (5)	0	+	+	+	0	-	-	-
2	0	0	+	+	+	0	-	-	-
	2 (3,4)	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0	0	+	+	+	0	+	-	+
	6 (7,8)	+	+	+	+	+	+	+	+

женных выше верхней или ниже нижней горной выработки. По измерениям  $\Delta g$  в двух выработках на разных горизонтах, если аномалия меняет знак, можно однозначно определить знак плотности  $\sigma$  и положение возмущающих тел, которые находятся между этими горизонтами.

Если массы  $m_1$  и  $m_5$  изометричны или их оси параллельны одной из координатных осей, а центры расположены на уровне наблюдений, то аномалия  $\Delta g$  в нулевой выработке равна нулю при  $\sigma \geq 0$ . Дополнительные наблюдения поля в одной из выработок (2, 3, 4, 6, 7 или 8) дают возможность определить наличие масс и знак их аномальной плотности (2-й и 3-й варианты группирования выработок).

При знакопеременной аномалии  $\Delta g$  (см. рис. 2.2) можно предположить присутствие в горизонтальной плоскости наблюдений возмущающих тел ( $m_1$  или  $m_5$ ), оси которых или их проекции на плоскость  $xOz$  наклонены к оси  $x$ . Для определения знака их аномальной плотности необходимы дополнительные наблюдения в выше- или ниже расположенных выработках. По сочетанию знаков аномалий в нулевой и дополнительной выработках можно судить также о наклоне оси тела ( $\alpha < 90^\circ$  или  $\alpha > 90^\circ$ ).

Сравнительно ограниченны поисковые возможности аномалии  $\Delta g$  при наличии в горизонтальной плоскости наблюдений наклонных тел, ось которых образует некоторый угол  $\alpha$  с осью  $y$ . Как уже отмечалось, такие аномалии невозможно отличить от вызванных аналогичными телами, но расположенными ниже или выше плоскости  $xOy$  (см. рис. 2.3). Утверждать наличие масс  $m_1$  или  $m_5$  в этом случае невозможно. Наблюдение на другом горизонте аномалии с обратным знаком будет истолковано как присутствие масс между дополнительным горизонтом и исходным, а не на самом исходном горизонте.

**Аномалия  $V_{xz}$ .** Обладает такими же поисковыми возможностями, какие имеет аномалия  $\Delta g$ .

**Аномалия  $V_{yz}$ .** По характеру изменения аномалии  $V_{yz}$  в одной выработке при известном знаке плотности возмущающих масс (например, при  $\sigma > 0$ ) можно выдать прогноз, что они находятся в I либо III квадранте, если  $V_{yz} > 0$ , или во II либо IV квадранте, если  $V_{yz} < 0$ . При  $\sigma < 0$  истолкование аномалий будет противоположным.

При наблюдении аномалии  $V_{yz}$  в двух горных выработках, определенным образом расположенных друг относительно друга (0 и 1, 0 и 5, 0 и 3, 0 и 7), и известном знаке аномальной плотности положение тела определяется с точностью до квадранта. Исключением являются массы  $m_1$  и  $m_5$  при использовании выработок 0 и 1 или 0 и 5, а также  $m_3$  и  $m_7$  при использовании выработок 0 и 3 или 0 и 7. В этом случае не устанавливается даже их наличие. Для решения задачи к первым вариантам

группирования следует подключить выработку 3 или 7, а ко вторым — 1 или 5.

Если аномальная плотность неизвестна, то по наблюдениям функции  $V_{yz}$  в двух выработках при любом их пространственном расположении по отношению к возмущающим массам поставленную задачу решить невозможно. Группируя горные выработки по три, можно найти такие варианты, при которых задача решается однозначно (табл. 2.2). Все варианты можно разделить на три группы.

I группа (варианты 1—5 и 21—24) решает задачу для всех масс, за исключением находящихся в горизонтальной плоскости наблюдения.

II группа (варианты 6—10 и 17—20) решает задачу для всех масс, за исключением находящихся в вертикальной плоскости наблюдения.

III группа (варианты 11—16) не решает задачу.

Для определения знака аномальной плотности и положения возмущающих масс  $m_1$  и  $m_5$  необходимо создать группу из четырех выработок: к любому варианту I группы надо подключить выработку 3 или 7. Чтобы выполнить аналогичные определения для масс  $m_3$  и  $m_7$ , необходимо к любому варианту II группы подключить выработку 1 или 5. Выявив знак аномальной плотности и положение тела, по асимметрии кривой можно установить наклон его оси.

**Аномалия  $V_{xy}$ .** При известном знаке плотности составляющая  $V_{xy}$  информирует, находятся возмущающие массы справа или слева от вертикальной плоскости наблюдения. Установить наличие масс в плоскости  $xOz$  по наблюдениям в одной выработке невозможно даже при известном знаке  $\sigma$ . Если знак плотности неизвестен, необходимы измерения в нескольких выработках.

По значениям  $V_{xy}$ , измеренным в двух или более выработках, нельзя однозначно определить знак аномальной плотности и положение возмущающего тела, если оно находится левее самой левой и правее самой правой горной выработки (табл. 2.3). Смена местоположения тела меняет знак  $\sigma$ , и наоборот.

Из табл. 2.3 следует, что необходимо и достаточно измерить  $V_{xy}$  в двух выработках, сдвинутых по горизонтали на некоторое расстояние  $y_1$ , чтобы определить знак  $\sigma$  и положение возмущающих тел, заключенных между ними (варианты 1 и 2).

Если массы расположены в вертикальной плоскости наблюдения  $xOz$ , то в нулевой выработке аномалия  $V_{xy}$  равна нулю при любом знаке  $\sigma$ . Дополнительные наблюдения в одной из боковых выработок дают возможность обнаружить массы в указанной плоскости и определить знак аномальной плотности.

**Аномалия  $V_{\Delta}$ .** На практике, когда аномалии  $V_{\Delta}$  от возмущающих тел наблюдаются на фоне региональных влияний, ука-

Таблица 22  
 Знаки аномалии  $V_{\mu z}$  (при  $\sigma > 0$ ) в разных выработках

Варианты группирования выработок	Выработок	Массы									
		$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$		
1,2	0	0	+	0	-	0	+	0	-	0 5 6 (2)	23,24
	1	0	-	-	-	0	+	+	+		
	2 (6)	+	+	+	+	+	+	+	+		
3,4	0	0	+	0	-	0	+	0	-	0 5 8 (4)	21,22
	1	0	-	-	-	0	+	+	+		
	4 (8)	-	-	-	-	-	-	-	-		
5	0	0	+	0	-	0	+	0	-		
	5 1	0 0	0 -	0 +	- +	0 0	0 +	0 +	- +		
6,7	0	0	+	0	-	0	+	0	-	0 7 6 (2)	19,20
	3	-	-	0	+	+	+	0	-		
	2 (6)	+	+	+	+	+	+	+	+		
8,9	0	0	+	0	-	0	+	0	-	0 7 8 (4)	17,18
	3	-	-	0	+	+	+	0	-		
	4 (8)	-	-	-	-	-	-	-	-		
10	0	0	+	0	-	0	+	0	-		
	3 7	0 +	0 +	0 0	- +	0 +	0 +	0 0	- +		
11,12	0	0	+	0	-	0	+	0	-	0 6 8 (4)	15,16
	2	+	+	+	+	+	+	+	+		
	4 (8)	-	-	-	-	-	-	-	-		
13	0	0	+	0	-	0	+	0	-		
	2 6	0 +	0 +	0 +	- +	0 +	0 +	0 +	- +		
14	0	0	+	0	-	0	+	0	-		
	4 8	0 -	0 -	0 -	- -	0 -	0 -	0 -	- -		
		$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$	Выработок	Варианты группирования выработок
Массы											

Таблица 2.3

Знаки аномалии  $V_{xy}$  (при  $\sigma > 0$ )

Варианты группирования выработок	Выработки	Массы							
		$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$
1	0 1 (2,8)	+ -	+ -	0	- +	- +	- +	0	+ -
		- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +	- +
2	0 4 (5,6)	+ -	+ -	0	- +	- +	- +	0	+ -
		+ -	+ -	+ -	+ -	+ -	+ -	+ -	+ -
3	0 3 (7)	+ -	+ -	0	- +	- +	- +	0	+ -
		+ -	+ -	0	- +	- +	- +	0	+ -

занные выше особенности кривых трудно заметить. Следовательно, можно считать, что характер изменения поля  $V_{\Delta}$  для всех разновидностей тел и их положений в пространстве одинаковый, поэтому использовать эту функцию для поисков тел в околывыработанном пространстве нецелесообразно. Однако как индикатор знака плотности составляющая  $V_{\Delta}$  может оказаться весьма полезной (при благоприятных физико-геологических условиях). Кроме того, она несет информацию о наличии или отсутствии возмущающих тел в околывыработанном пространстве.

**Аномалия  $V_{zz}$ .** При известном знаке аномальной плотности эта составляющая может информировать о наличии масс в горизонтальной плоскости наблюдения или за ее пределами. Аномалия  $V_{zz}$  в пределах масс (по оси  $z$ ) всегда отрицательна (при избытке плотности) и положительна за их пределами независимо от ориентировки масс в пространстве. Если  $V_{zz}=0$ , то возможны два варианта: массы отсутствуют или наблюдения ведутся в зоне контакта возмущающего тела. Для однозначного решения вопроса необходимы дополнительные измерения поля на ниже- или вышележащем горизонте.

Ценную информацию о положении тела в околывыработанном пространстве и его аномальной плотности несут результирующие векторы  $V_{sx}$ ,  $V_{sy}$ ,  $V_{sz}$ . Зависимость ориентировки векторов от положения возмущающего тела в пространстве легко проследить на рис. 2.4.

Следует заметить, что все рассмотренные поисковые возможности элементов гравитационного поля базируются лишь на анализе аномалий и не учитывают их абсолютных значений. При учете уровня эффективной аномалии, как следует из анализа областей изученности, возможности каждого отдельно

взятого элемента поля, даже при измерении его в нескольких выработках, сильно ограничиваются. Особенно это сказывается на поисках горизонтальных цилиндрических тел значительной протяженности (см. рис. 2.6).

Таким образом, задача по указанию положения возмущающего тела отдельно взятым элементом гравитационного поля при измерении его в одной горной выработке может быть решена для определенной части околоразработанного пространства и только в частных случаях при некоторых дополнительных данных: известна аномальная плотность, вероятность присутствия тела в этой части пространства и т. д.

Преимущество дают наблюдения поля в нескольких выработках. Задача по определению положения возмущающих масс и знака аномальной плотности решается однозначно, если массы находятся между двумя выработками, пройденными на разных горизонтах (для  $\Delta g$ ,  $V_{zz}$ ,  $V_{xz}$ ) или на одном горизонте (для  $X_{xy}$  и векторов  $V_{xz}$ ,  $V_{xy}$ ,  $V_{yz}$ ). Если задача решается при помощи поля  $V_{yz}$ , то необходимы измерения в трех, а иногда и в четырех выработках. Во всех случаях массы должны располагаться в межвыработанном пространстве.

На практике ведутся поиски возмущающих тел, как угодно расположенных в пространстве. Их наличие установлено по наблюдениям одного из элементов поля в одной выработке (например, нулевой); заведомо указать, в какой дополнительной выработке необходимо выполнить исследования, не представляется возможным. Удачный выбор той или иной дополнительной выработки может быть чистой случайностью. Поэтому на практике может понадобиться большее количество выработок, чем было указано теоретически.

#### 2.4. Рациональный комплекс элементов гравитационного поля при решении поисковых задач

Поисковые возможности гравипроизведки резко возрастают при совместном рассмотрении нескольких элементов поля, измеренных в одной выработке. Как уже было отмечено, элементы  $\Delta g$  и  $V_{zz}$  обладают одинаковыми поисковыми возможностями (глубина не принимается во внимание), поэтому достаточно проанализировать сочетания одного из них, например  $\Delta g$ , с другими составляющими поля. Варианты сочетания элементов гравитационного поля и их разрешающая способность в определении знака аномальной плотности и положения тела представлены в табл. 2.4 (для цилиндрических тел, ось которых параллельна одной из координатных осей) и табл. 2.5 (для наклонных тел); таблицы составлены на основании анализа рис. 2.2, 2.3.

В табл. 2.4 и 2.5 все варианты сочетаний разделены на три большие группы.

1. Задача по определению положения возмущающих тел и их аномальной плотности решается полностью.

2. Задача решается частично:

а) определяется знак  $\sigma$  и положение тел, за исключением тех, которые находятся в горизонтальной или вертикальной плоскости наблюдения;

б) не определяется знак  $\sigma$ , но при известном знаке плотности решается вторая часть задачи;

в) знак  $\sigma$  не определяется, но при известном знаке плотности решается вторая часть задачи, за исключением некоторых случаев.

3. Задача не решается.

Сложнее вести поиски возмущающих тел, произвольно расположенных в пространстве и имеющих некоторую вытянутость. В этом случае для решения задачи требуется более обеспеченный комплекс элементов поля, чем при поисках изометричных или цилиндрических и им подобных тел с простираем в направлении одной из координатных осей. Например, комплекс  $\Delta g$ ,  $V_{xy}$ ,  $V_{\Delta}$  и  $V_{zz}$  для наклонных тел определяет знак аномальной плотности и положение их в пространстве с точностью до квадранта, за исключением тел, наклоненных к оси  $z$  и находящихся в вертикальной плоскости наблюдения. В этом случае не устанавливается даже наличие масс. Если возмущающие тела изометричные или цилиндрические с простираем в направлении одной из координатных осей, указанный комплекс решает задачу без каких-либо ограничений. Более того, он переопределен. С той же точностью задача решается при использовании лишь элементов  $\Delta g$ ,  $V_{xy}$  и  $V_{\Delta}$ , а с точностью до полупространства — при использовании  $\Delta g$ ,  $V_{\Delta}$  (сверху, снизу или в плоскости  $xOy$ ) или  $V_{xy}$ ,  $V_{\Delta}$  (справа, слева или в плоскости  $xOz$ ). Функция  $V_{zz}$  переопределяет задачу и не вносит дополнительной информации.

Из анализа предельно изученных областей для различных тел (см. рис. 2.6) следует, что любой комплекс элементов поля и каждый элемент в отдельности имеют ограниченные возможности по глубинности выявления тел. Каждое сочетание позволяет в некотором ограниченном пространстве решить задачу с присущей ему точностью. Например, для сочетания  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$  такое пространство в плоскостях  $y=0,4$  и  $x=0,4$  при поисках шара ограничивается заштрихованными участками перекрывания областей (рис. 2.8). За пределами таких участков для некоторой части пространства можно лишь установить наличие масс без указания знака их аномальной плотности и местоположения.

Следует отметить, что полнее и для большего объема пространства задача решается при участии составляющей  $V_{\Delta}$ , особые свойства которой еще в 1957 г. были подмечены В. А. Казинским [17, 36] и использованы им для определения знака

Разрешающие способности сочетаний элементов гравитационного поля для цилиндрических тел, ось которых параллельна одной из координатных осей

Таблица 2.4

Группа	Вариант	Сочетание элементов поля	Определяется ли знак $\sigma$	Точность определения местоположения тела	Примечание
1	1	$\Delta g, V_{\Delta}$	Да	До полупространства	Задача решается полностью
	2	$\Delta g, V_{\Delta}, V_{zz}$			
	3	$V_{xy}, V_{\Delta}$			
	4	$V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$			
	5	$\Delta g, V_{xy}, V_{\Delta}$			
	6	$\Delta g, V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$			
	7	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}$			
	8	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}, V_{zz}$			
2а	9	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}$	Да	До квадранта	Для $m_1, m_3, m_5, m_7$ (см. рис. 2.7) надо знать знак $\sigma$ Не устанавливается однозначно положение $m_1$ и $m_5$ То же Не устанавливается однозначно положение $m_3$ и $m_7$ То же
	10	$\Delta g, V_{yz}, V_{\Delta}$			
	11	$\Delta g, V_{yz}, V_{\Delta}, V_{zz}$			
	12	$V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}$			
	13	$V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$			
26	14	$\Delta g, V_{zz}$	Нет	До полупространства	Задача решается при известном знаке $\sigma$
	15	$V_{xy}, V_{zz}$			
	16	$\Delta g, V_{xy}$			
	17	$\Delta g, V_{xy}, V_{zz}$		До квадранта	
	18	$\Delta g, V_{yz}$	Нет	До квадранта	Задача решается при известном знаке $\sigma$ , за исключением $m_1$ и $m_5$ То же Задача решается при известном знаке $\sigma$ , за исключением $m_3$ и $m_7$ То же
19	$\Delta g, V_{yz}, V_{zz}$				
20	$V_{yz}, V_{xy}$				
21	$V_{yz}, V_{xy}, V_{zz}$				
3	22	$V_{yz}, V_{\Delta}$	Да	?	Задача не решается
	23	$V_{yz}, V_{zz}$	Нет		
	24	$V_{yz}, V_{\Delta}, V_{zz}$	Да		
	25	$V_{\Delta}, V_{zz}$	Да		

Таблица 2.5

Разрешающие возможности сочетаний элементов гравитационного поля для наклонных цилиндрических тел

Группа	Вариант	Сочетание элементов поля	Определяется ли знак $\sigma$	Точность определения местоположения тела	Примечания
1	1	$\Delta g, V_{\Delta}$	Да	До полупространства	Задача решается полностью
	2	$\Delta g, V_{\Delta}, V_{zz}$			

Группа	Вариант	Сочетание элементов поля	Определяется ли знак $\sigma$	Точность определения местоположения тела	Примечания			
1	3	$V_{xy}, V_{\Delta}$	Да	До полупространства	Задача решается полностью			
	4	$V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$						
2а	5	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}$	Да	До квадранта	Для $m_3$ и $m_7$ (см. рис. 2.7) при наклоне тела или его проекции на плоскость $xOz$ к оси $x$ надо знать знак $\sigma$ . Если ось тела параллельна плоскости $yOz$ и наклонена к оси $y$ , не устанавливается наличие масс в плоскостях $xOy$ и $xOz$			
	6	$\Delta g, V_{yz}, V_{\Delta}$						
	7	$V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}$						
	8	$\Delta g, V_{xy}, V_{\Delta}$						
	9	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}$						
	10	$\Delta g, V_{yz}, V_{\Delta}, V_{zz}$						
	11	$\Delta g, V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$						
	12	$V_{yz}, V_{xy}, V_{\Delta}, V_{zz}$						
	13	$\Delta g, V_{yz}, V_{xy}, V_{zz}$						
								Если ось тела параллельна плоскости $yOz$ и наклонена к оси $y$ , не устанавливается наличие масс в плоскостях $xOy$ и $xOz$
								То же
				>				
				>				
				Если ось тела параллельна плоскости $yOz$ и наклонена к оси $y$ , не устанавливается наличие масс в плоскости $xOz$				
				То же				
				>				
				>				
2б	14	$\Delta g, V_{zz}$	Нет	До полупространства	Задача решается при известном знаке $\sigma$			
	15	$V_{xy}, V_{zz}$						
2в	16	$\Delta g, V_{yz}$	Нет	До квадранта	Задача решается при известном знаке $\sigma$ . Если ось тела параллельна плоскости $yOz$ и наклонена к оси $y$ , не устанавливается наличие масс в плоскостях $xOy$ и $xOz$			
	17	$\Delta g, V_{xy}$						
	18	$V_{yz}, V_{xy}$						
	19	$\Delta g, V_{yz}, V_{zz}$						
	20	$\Delta g, V_{xy}, V_{zz}$						
	21	$V_{yz}, V_{xy}, V_{zz}$						
				То же				
				>				
				Задача решается при известном знаке $\sigma$ . Если ось тела параллельна плоскости $yOz$ и наклонена к оси $y$ , не устанавливается наличие масс в плоскости $xOz$				
				То же				
				>				
3	22	$V_{\Delta}, V_{zz}$	Да	?	Задача не решается			
	23	$V_{yz}, V_{\Delta}$	Да					
	24	$V_{yz}, V_{zz}$	Нет					
	25	$V_{yz}, V_{\Delta}, V_{zz}$	Да					

избыточной плотности возмущающих масс. Однако элемент  $V_x$  весьма чувствителен к неровностям стенок горных выработок, что в значительной степени ограничивает и усложняет его использование на практике.

Некоторые замечания вызывает также составляющая  $V_{zz}$ . Известно, что для измерения аномалии  $V_{zz}$  пока не существует аппаратуры и непосредственно она не наблюдается. Градиент  $V_{zz}$  можно вычислить по значениям  $\Delta g$ , измеренным на разных уровнях в одной и той же точке. Опытные работы на рудниках

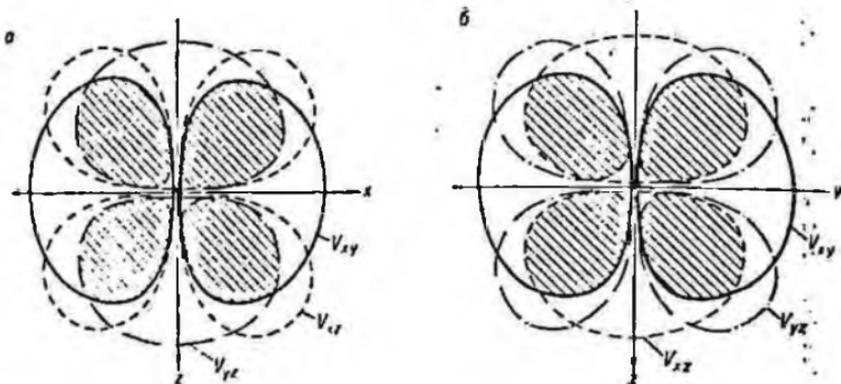


Рис. 2.8. Области обнаружения возмущающих тел в околорудном пространстве разными сочетаниями элементов поля, измеренными в одной выработке.

а — по квершлагу (ось  $x$ ); б — по штреку (ось  $y$ ).

Кривбасса, Урала, Горного Алтая показали, что при соответствующей методике наблюдений можно получить поле  $V_{zz}$  с погрешностью 100—150 Э. Отличаясь, однако, высокой чувствительностью к шероховатостям стенок выработки, аномалии  $V_{zz}$  не всегда могут давать удовлетворительную информацию об изучаемом пространстве. Эти замечания вносят существенные затруднения в использование отдельных сочетаний, приведенных в табл. 2.4 и 2.5, а сочетания группы I исключают вообще.

Практический интерес представляют следующие сочетания.

I.  $\Delta g$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$  или  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ . Для этого следует выполнить измерения гравиметром и вариометром или только вариометром. Сочетания позволяют определить с точностью до квадранта положение возмущающих тел и их аномальную плотность. Исключением являются массы в горизонтальной и вертикальной плоскостях наблюдения. Для них задача решается при известной плотности, а если ось тела параллельна плоскости  $yOz$  и наклонена к оси  $y$ , то не устанавливается даже наличие масс. Аномалии таких тел ничем не отличаются от обусловленных

массами, расположенными вне указанных плоскостей (см. рис. 2.3). Например, при наклоне тела к оси  $y$  на угол  $\alpha < 90^\circ$  аномалии масс  $m_1, m_7, m_8$  одинаковы по общему виду и различаются только интенсивностью. Аналогичная картина наблюдается для тел  $m_3, m_4, m_5$ . В первом случае массы  $m_1$  и  $m_7$  будут истолкованы как  $m_8$ , во втором — массы  $m_3$  и  $m_5$  как  $m_4$ .

II. При известной аномальной плотности можно определить местоположение тела (с некоторыми ограничениями), используя сочетания:  $\Delta g(V_{xz}), V_{yz}; \Delta g(V_{xz}), V_{xy}; V_{yz}, V_{xy}$ . Задача решается с точностью до квадранта. В частных случаях, для изометричных и цилиндрических тел, ось которых параллельна одной из координатных осей или наклонена к оси  $x$ , сочетание  $\Delta g(V_{xz}), V_{xy}$  решает задачу без каких-либо ограничений с точностью до квадранта (см. табл. 2.4). Более практичным является сочетание  $V_{xz}, V_{yz}$ , так как при этом измерения поля выполняются одним прибором — градиентометром. Все указанные сочетания вторых производных гравитационного потенциала также можно получить при помощи вариометра, однако он менее производителен, чем градиентометр.

В заключение следует отметить, что обоснование комплекса элементов гравитационного поля и его поисковых возможностей выполнено для наблюдений в одной горной выработке, к чему, как правило, стремится каждый исследователь. Такие наблюдения наиболее эффективны в экономическом отношении. При обосновании комплекса для конкретных физико-геологических условий необходимо выполнить моделирование, построить ожидаемые поля и предельно изученные области и провести их анализ.

### 3. МЕТОДИКА ПОДЗЕМНОЙ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Под методикой подземной съемки будем понимать: вид съемки, систему исходных и опорных пунктов, расположение и густоту рядовых пунктов наблюдения, методику и технику полевых измерений, точность получения элементов поля, точность и методику топогеодезических работ. Методика подземных съемок определяется поставленной задачей, физико-геологическими и горнотехническими условиями работ.

#### 3.1. Требования, предъявляемые к горным выработкам при гравиразведочных исследованиях

Для обеспечения эффективных поисков возмущающих тел каждая горная выработка как профиль наблюдений должна отвечать ряду технических требований. Расположение профилей измерений задается системой горных выработок, пройденных

из соображений наиболее рациональной и безопасной отработки месторождения. Вследствие этого не всегда возможно: 1) проложить столько профилей, сколько необходимо для детального изучения аномального поля; 2) пройти профиль вкрест предполагаемого простирания структуры; 3) удовлетворить требования к геофизическим профилям в отношении их протяженности, линейности и направления.

Эти замечания наглядно подтверждаются рис. 3.1, где показана геологическая ситуация на некотором эксплуатационном горизонте и положение системы горных выработок, пройденных с целью разведки и рациональной отработки рудных полей.

Профиль считается достаточно длинным, если в его пределах можно полностью выявить характерные черты аномалии от ожидаемых возмущающих тел; для этого аномальное поле должно быть изучено как в границах возмущающих масс, так и вне их. Если выполнять требование относительно протяженности профиля наблюдений, то исследования практически можно проводить лишь в очень ограниченном количестве выработок. Так, для выполнения гравиметрических наблюдений с целью поисков геологических неоднородностей на горизонте 410 м (см. рис. 3.1) можно было бы выбрать штреки основной откаточной и маркшейдерской линии III и с некоторыми допущениями квершлагги осей 7 и 59. Все другие выработки не соответствуют требуемой протяженности, ибо они не выходят за пределы рудовмещающих толщ, а следовательно, и за пределы вероятного местонахождения возмущающих масс.

В условиях подземных горных выработок требовать, чтобы профиль был прямолинейным, нельзя, поэтому для геофизических работ считается достаточным, если профиль не имеет острых углов излома. При построении аномальных графиков без учета изломов возможно появление искажений поля, которые могут быть приняты за локальные аномалии, вызванные геологическими неоднородностями.

Большое значение имеет направление поисковых профилей [55], особенно при выполнении работ в слоистых средах типа Криворожской структуры. Надо, чтобы профиль был нормальным к рудовмещающему слою. В противном случае необходимо вносить поправку в наблюдаемое поле за неперпендикулярность линии измерений по отношению к рудовмещающей толще и только после этого выполнять качественную и количественную интерпретацию.

На практике можно встретить очень сложные системы горных выработок. Каждая из них в отдельности не выдерживает предъявляемых требований, но по совокупности измерений в них иногда можно получить удовлетворительные результаты (например, система выработок в пределах осей 5—25 на рис. 3.1) и высказать некоторые суждения о геологическом строении данного участка исследуемого горизонта.

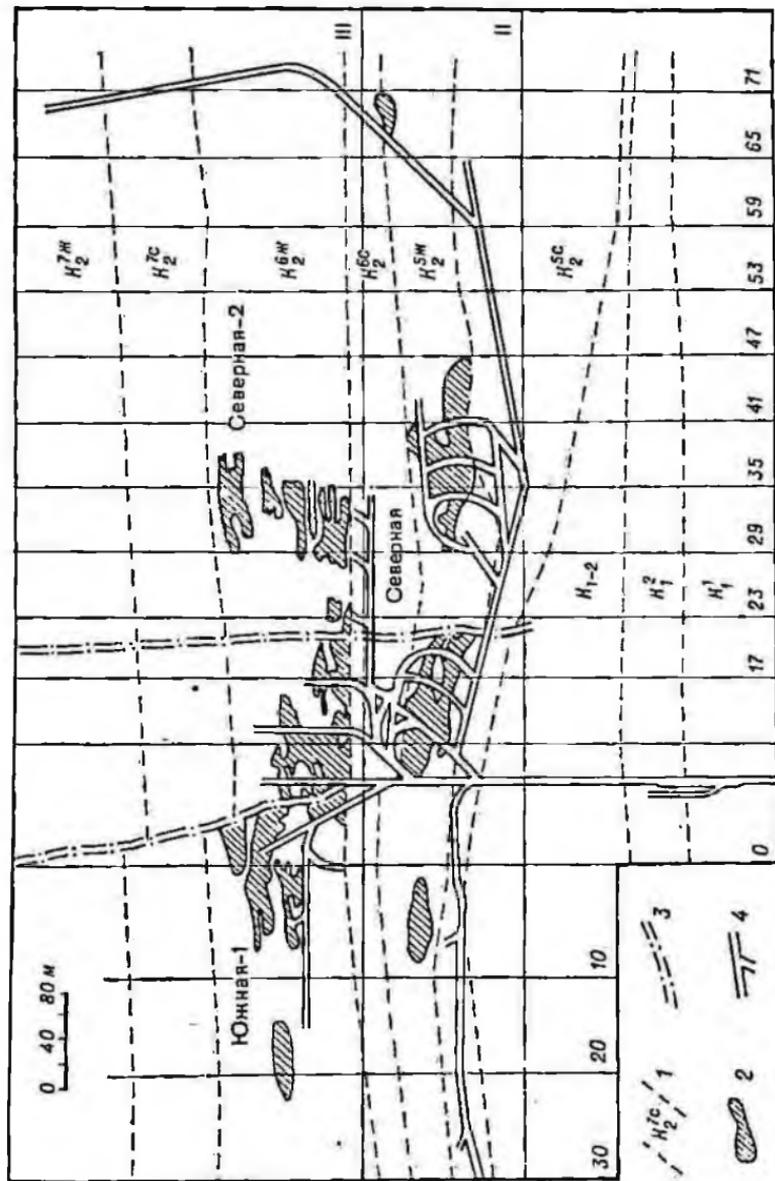


Рис. 3.1. Геологический план горизонта 410 м шахты «Центральная» рудника им. Фрунзе, Кривбасс.  
 1 — границы рудных тел; 2 — границы стратиграфические; 3 — диабазовые дайки; 4 — горные выработки.

При измерении вторых производных гравитационного потенциала неблагоприятными являются выработки со сплошным креплением стенок. Абсолютно непригодны выработки, не удовлетворяющие требованиям техники безопасности.

### 3.2. Геологические предпосылки при выборе эффективной горной выработки

Гравиметрические исследования в подземных горных выработках требуют предварительной оценки их перспективности на определенные геологические неоднородности. Вероятность присутствия полезного ископаемого в околорудном пространстве определяется на основании анализа геологических поисковых предпосылок и признаков [56—58 и др.], которые группируются по видам: стратиграфические, тектонические, геоморфологические, петрологические и др. Для каждого конкретного месторождения существуют свои основные виды поисковых предпосылок, которые могут быть совершенно нетипичными для других месторождений. В качестве примера рассмотрим поисковые предпосылки и признаки, характерные для некоторых рудных месторождений.

Для метаморфогенных месторождений богатых железных руд отмечается приуроченность рудных тел к определенным стратиграфическим горизонтам. Например, в условиях Криворожского месторождения мартитовые и гидрогематито-мартитовые руды связаны с железистыми роговиками средней свиты железорудной формации (с горизонтами  $K_2^{4ж}$ ,  $K_2^{5ж}$ ,  $K_2^{6ж}$ ). Важной тектонической поисковой предпосылкой является приуроченность рудных залежей к замыканию синклиналичных структур и к поперечной складчатости на крыльях. Характерен процесс выщелачивания кварца из роговиковых прослоев железистых пород. Монолитные и очень крепкие джеспилиты и железистые роговики с приближением к рудным залежам становятся пористыми и даже превращаются в рыхлую, мучнистую породу. «Окраскование» вмещающих пород является важным околорудным изменением и может быть использовано как существенная минералогическая предпосылка для поисков этого типа месторождений.

Для гидротермальных месторождений также характерны околорудные изменения вмещающих пород. Так, в высокотемпературных гидротермальных месторождениях изверженные породы превращаются в грейзены. В результате привноса минерализаторов в грейзенизированной породе возникают сопутствующие оруденению минералы: флюорит, топаз, берилл, турмалин, хлорит. На границе вмещающих кислых и изверженных щелочных пород вследствие щелочного метасоматоза наблюдаются процессы альбитизации. С альбитизированными и грейзе-

низированными породами могут быть связаны промышленные месторождения металлов.

Очень разнообразны изменения боковых пород у рудных тел среднетемпературных месторождений. Они проявляются, например, в березитизации — превращении кислых и средних изверженных пород в березиты. Кислые и средние эффузивные породы подвергаются окварцеванию и переходят во вторичные кварциты. Такие изменения пород используются в качестве поисковых признаков для месторождений меди и полиметаллов.

При поисках рудных жил гидротермального происхождения в изверженных породах ультраосновного состава принимают во внимание процессы серпентинизации, хлоритизации, карбонатизации, лиственитизации. Аналогичные изменения боковых пород наблюдаются в низкотемпературных месторождениях (серицитизация, окремнение, доломитизация и баритизация).

Предварительная оценка генетических и геологических поисковых предпосылок, их ведущей или пассивной роли для каждого типа руд значительно облегчает выбор перспективных для геофизических исследований горных выработок. Вследствие их ограниченной протяженности бывает трудно проследить некоторые предпосылки регионального характера. В целом же использование даже отдельных геологических предпосылок и признаков, а тем более их комплекса, помогает правильно оценить перспективность исследуемой горной выработки на поиски богатых рудообразований.

### 3.3. Определение плотности горных пород и полезных ископаемых

Изучая плотность горных пород и полезных ископаемых в пределах некоторого участка или месторождения в целом, делают вывод о дифференциации горных пород по плотности — важном физическом поисковом признаке — и, как следствие, о принципиальной возможности решения задачи методами гравиразведки. Без знания аномальных плотностей невозможно выбрать рациональную методику изучения гравитационного поля в поисковых и разведочных целях, а также выполнить обработку и последующую геологическую интерпретацию результатов съемки. Приведенные ниже рекомендации по определению плотности составлены на основе работ, обобщающих опыт по изучению физических свойств горных пород и полезных ископаемых [54, 59, 60].

Различают понятия средней истинной и средней кажущейся плотности. Под средней истинной плотностью понимается средняя плотность исследуемой разновидности горной породы или полезного ископаемого. Этот параметр может быть определен лабораторным способом, по данным гамма-гамма-метода и при помощи анализа статистических связей между плотностью

и другими физическими свойствами. Средняя кажущаяся плотность характеризует среднюю плотность некоторого слоя и определяется по результатам наземных гравиметрических наблюдений и измерений силы тяжести в скважинах и шахтах. Использование кажущейся плотности ограничивается несовершенством методики наблюдений и учета искажающих факторов.

### 3.3.1 Лабораторные методы

Наиболее благоприятными для определения плотности являются образцы, в которых еще не нарушено их естественное состояние. Поэтому невыветрелые образцы следует доставлять для опробования в кратчайшие сроки. Образцы, хранившиеся некоторое время и изменившие первоначальное содержание влаги, называются воздушно-сухими. Различают еще образцы в абсолютно сухом состоянии — предварительно высушенные при температуре  $105^{\circ}\text{C}$ ; по ним обычно изучают плотность пористых пород.

К лабораторным методам определения плотности относится гидростатическое взвешивание на технических весах и с помощью денситометра Самсонова. Плотность образца находят по результатам взвешивания его в воздухе и в воде:

$$\sigma = P_1 / (P_1 - P_2), \quad (3.1)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — вес образца соответственно в воздухе и в воде.

Пористые породы перед взвешиванием в воде целесообразно покрыть смесью воска с канифолью, имеющей плотность  $1,0 \text{ г/см}^3$ .

Для оценки случайной погрешности определения плотности необходимо ежедневно повторять не менее 10% измерений. Случайную погрешность единичного определения плотности образца денситометром или другим прибором, когда каждая величина измеряется дважды, вычисляют по формуле

$$\delta_{\text{пр}} = \sqrt{[\sum (\sigma_i - \sigma'_i)^2] / (2n)}, \quad (3.2)$$

где  $n$  — количество повторных измерений;  $\sigma_i$  и  $\sigma'_i$  — результаты первого и повторного измерения плотности  $i$ -го образца.

Для определения плотности отбирают образцы массой 100—400 г. Для образцов, имеющих плотность от 1,2 до 4,2  $\text{г/см}^3$ , погрешность измерения на денситометре не должна превышать 0,01—0,02  $\text{г/см}^3$ .

Плотность горных пород и полезных ископаемых определяют по линии наблюдения (вдоль выработки) и для всего объема отдельной литологической разности. В первом случае образцы необходимо отбирать так, чтобы равномерно охватить всю выработку по простиранию. Интервал отбора зависит от степени неоднородности встреченных выработкой толщ пород и должен быть постоянным. Принято брать один образец на интервале не более 2 м; в неоднородных толщах шаг сокращается до 1—

0,25 м. Следует придерживаться постоянного уровня отбора образцов (от подошвы выработки). Каждый образец снабжают этикеткой, где указано положение образца в пространстве, макроскопическое описание, время отбора, адрес экспедиции и фамилия исполнителя. Результаты определения плотности изображают в виде графика вдоль линии наблюдения.

Для изучения средней плотности некоторого объема породы из него отбирают  $n$  образцов, определяют плотность каждого образца и вычисляют значение средней плотности, характеризующей весь объем породы. Для представительности выборки необходимо при взятии образцов в скважинах и горных выработках выдерживать постоянный и достаточно малый интервал между точками отбора.

Данные о плотности обрабатывают в несколько этапов, используя приемы теории вероятностей и математической статистики. На первом этапе группируют однородные в геологическом отношении породы. На втором этапе для каждой породы составляют сведенные в разряды, ряды и полигоны распределения плотности. При построении полигонов по горизонтальной оси откладывают значения плотности, точнее, середины разрядов плотности, а по вертикальной оси — выраженное в процентах количество значений в соответствующем разряде (частость). Кривые, ограничивающие полигон распределения плотности, называются вариационными. Третьим этапом является анализ полученных вариационных кривых и вычисление статистических характеристик [60].

1. Средняя арифметическая плотность

$$\bar{\sigma} = (\sum^n \sigma_i) / n, \quad (3.3)$$

где  $\sigma_i$  — плотность  $i$ -го образца;  $n$  — количество образцов.

2. Дисперсия, описывающая степень геолого-петрографической неоднородности пород, вычисляется по формуле

$$\delta^2 = [\sum^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2] / (n - 1). \quad (3.4)$$

3. Средняя квадратическая погрешность (стандарт) определения плотности по одному образцу

$$\delta_{\sigma} = \sqrt{[\sum^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2] / (n - 1)}; \quad (3.5)$$

средняя квадратическая погрешность определения средней арифметической плотности

$$\delta_{\bar{\sigma}} = \sqrt{[\sum^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2] / [n(n - 1)]}. \quad (3.6)$$

Формулы (3.5) и (3.6) справедливы при  $n \geq 50$ .

4. Суммарная средняя квадратическая погрешность определения плотности одного образца

$$\delta_c = \sqrt{\delta_\sigma^2 + \delta_{пр}^2} \quad (3.7)$$

Задаваясь значениями  $\delta_\sigma$ ,  $\delta_{пр}$  и  $\delta_\sigma$ , на основе выражений (3.5) — (3.7) можно вычислить количество образцов, необходимое для определения плотности  $\sigma$  с заданной точностью.

При анализе распределения плотности пользуются коэффициентами асимметрии и эксцесса, критериями Линберга и Колмогорова, а также стандартами этих величин.

Как показали исследования В. М. Пелюшенко (1970 г.), значения средней плотности, определяемые по образцам, часто не соответствуют требуемой точности. Основными причинами этого являются недостаточное количество образцов, низкая точность классификации пород, несоответствие сети отбора распределению плотностных неоднородностей. Определение средней плотности по образцам дает положительные результаты для сравнительно однородных толщ пород. Для сложных геологических разрезов с частой перемежаемостью пород, изменчивостью их по плотности лабораторные методы не всегда пригодны.

### 3.3.2

Корреляционная связь между физическими параметрами пород

Понятие статистической связи предполагает такую зависимость, при которой каждому значению одной величины соответствует статистический ряд значений другой величины [59]. В практике обычно пользуются наиболее простым случаем статистической связи — линейной функциональной зависимостью между двумя параметрами. Выбор параметров и определение силы корреляционной связи начинают с систематизации исходных данных, которые представляют в виде графика, называемого полем корреляции, или в виде корреляционной таблицы.

Силу статистической связи между разными величинами определяют по коэффициенту корреляции  $r$ , который изменяется от  $-1$  до  $+1$ . При  $r=0$  линейная связь между параметрами отсутствует; при  $r=\pm 1$  — связь функциональна, т. е. каждое значение одного параметра однозначно определяет значение другого. При отрицательном коэффициенте корреляции росту одной из величин отвечает убывание другой. Достоверность линейной связи оценивается величиной  $|r|/\delta_r$ , где  $\delta_r$  — погрешность коэффициента  $r$ . При большом количестве точек ( $n > 50$ ) связь достоверна (с вероятностью 0,999), если  $|r|/\delta_r \geq 3$ . При меньших  $n$  пользуются специальными таблицами.

Для каждого типа месторождений могут быть характерными свои виды корреляционных связей. Так, используются зависимости между плотностью руд и содержанием в них различных компонентов ( $Fe$ ,  $SiO_2$ ), между плотностью пород и скоростью

распространения упругих волн и др. Примером может служить определение плотности по связи ее с магнитной восприимчивостью для магнетитовых руд Абаканского рудника в Красноярском крае [М. В. Макеев, А. А. Грознова, 1974 г.]. По изучен-

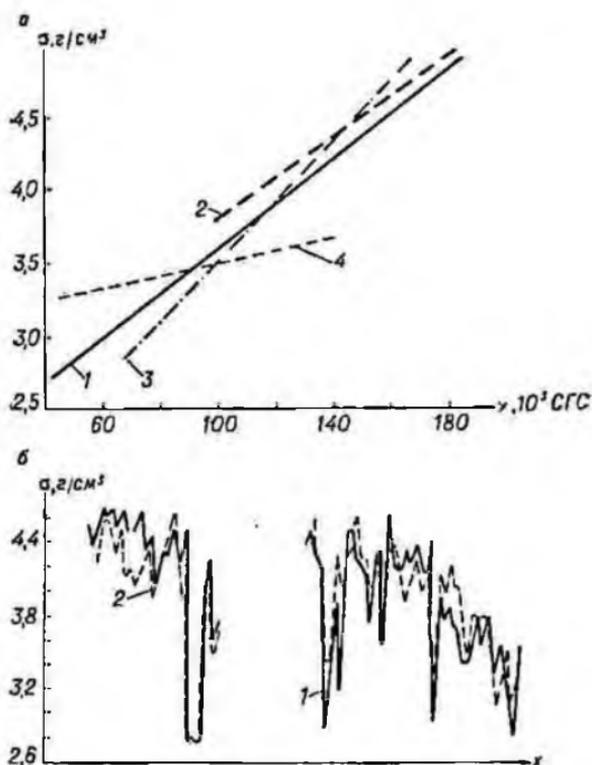


Рис. 3.2. К определению плотности по корреляционным связям между физическими параметрами пород. а — корреляционные зависимости между плотностью и магнитной восприимчивостью для магнетитовых руд Абаканского месторождения.

Руды: 1 — в целом, 2 — сплошные, 3 — с включением сульфидов, 4 — некондиционные.

б — сравнение результатов измерений плотности магнетитовых руд, выполненных разными лабораторными способами. 1 — определения плотности на образцах; 2 — результаты пересчета магнитной восприимчивости в значения плотности.

ной части рудных полей месторождения были выполнены сотни тысяч измерений магнитной восприимчивости аппаратурой РИВМ-1. Корреляционные зависимости были установлены отдельно для трех разновидностей руд: сплошных, со значительными включениями сульфидов и некондиционных (рис. 3.2, а). Результаты лабораторных определений плотности (непосредственных измерений и пересчета по магнитной восприимчивости)

совпадают с погрешностью до  $0,14 \text{ г/см}^3$  (рис. 3.2, б). Разброс в значениях плотности довольно большой; по-видимому, методика определения плотности по корреляционным связям с другими параметрами не вполне совершенна. Однако использование этого метода может дать существенный объем информации о плотности горных пород.

### 3.3.3 Гамма-гамма-метод

Гамма-гамма-методом (ГГМ) называют способ изучения плотности горных пород и руд, основанный на регистрации рассеянного ими гамма-излучения внешнего источника. В области энергий гамма-квантов выше 150—200 кэВ для сред, содержащих элементы с атомным номером меньше 30, изменения плотности потока рассеянного гамма-

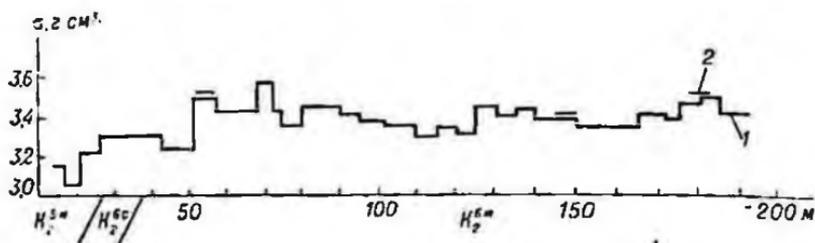


Рис. 3.3. Пример определения плотности гамма-гамма-методом в Кривбассе.

1 — по результатам гамма-гамма-метода; 2 — по лабораторным измерениям на образцах.

излучения связаны в основном с плотностью среды и геометрическими факторами. В этом случае ГГМ применяют для определения плотности горных пород и руд. Для регистрации рассеянного гамма-излучения предложено использовать серийную аппаратуру РСР-3 [61, 62], предназначенную для определения эффективного атомного номера горных пород и руд.

Гамма-гамма-метод дает возможность отбивать контакты плотностных неоднородностей, а также определять среднюю плотность горных пород в некоторой точке, интервале, массиве. Измерения выполняют непосредственно по стенкам горных выработок или скважин в дискретных точках с любым интервалом. Приведем в качестве примера результаты определения гамма-гамма-методом плотности горных пород по квершлагу 15к на горизонте 387 м шахты им. Орджоникидзе (рудник им. Ленина, Кривбасс) (рис. 3.3). Измерения выполнялись через 25 см, затем группировались в интервале 5 м, для которого вычислялось среднее значение интенсивности гамма-излучения. По нему согласно эталонировочному графику находили среднюю плотность пород для данного интервала. Для контроля по отдельным ин-

тервалам отбирали образцы и определяли их плотность лабораторным способом. Среднее квадратическое расхождение значений плотности, определенных этими способами, составляет  $0,05-0,07$  г/см<sup>3</sup>.

### 3.4. Выбор рационального поискового шага наблюдений в горных выработках

Поисковую сеть принято считать рациональной, а выполненную гравиметрическую съемку геологически эффективной, если она позволяет получить достоверную и полную геологическую информацию об исследуемом участке. Поле должно быть измерено таким образом, чтобы по нему можно было выявить все аномальные тела, расположенные в околывыработанном пространстве и представляющие интерес для эксплуатационной разведки, которые создают в пункте наблюдения поле больше либо равное эффективной аномалии  $\epsilon$ . Такая съемка требует конкретной постановки геологической задачи и расчета шага наблюдений, соответствующих реальным физико-геологическим условиям.

Начало решению этих задач в наземных условиях положено в 1937 г. А. А. Юньковым [51, 63]. В дальнейшем они развивались Б. А. Андреевым [52], П. И. Лукавченко [53], О. Б. Гинтовым (1969 г.) и др. Для подземных условий способы расчета шага наблюдений приведены в работах А. А. Юнькова, Н. Р. Бурьяна, Н. М. Анищенко [33, 35]. Заметим, что других способов пока не существует. Имеющиеся некоторые рекомендации основаны на опыте отдельных исследователей и не являются универсальными или хотя бы строго обоснованными для конкретных геологических условий. В качестве исходных данных для расчета шага наблюдений в работах [33, 35] приняты форма, размеры, плотность, глубина залегания тела, его вероятное удаление от исследуемой выработки, а также эффективная аномалия  $\epsilon$ .

#### 3.4.1

Предельные  
и оптимальные  
размеры  
шага наблюдений

Возмущающие тела в околывыработанном пространстве расположены самым произвольным образом. В связи с этим ставится задача найти оптимальные

расстояния между пунктами наблюдений, которые обеспечили бы надежное выявление аномальных масс при самых неблагоприятных условиях. Область пространства, предельно изученная функцией  $\Delta g$ , для шаровидного возмущающего тела радиусом  $r$  с аномальной плотностью  $\sigma$  имеет вид, показанный на рис. 3.4, а. Известно, что максимального значения функция  $\Delta g$  достигает над эпицентром масс. Если в этой же точке зафиксировать значение  $\Delta g$  и приравнять его эффективной аномалии  $\epsilon$ , то ему будет отвечать

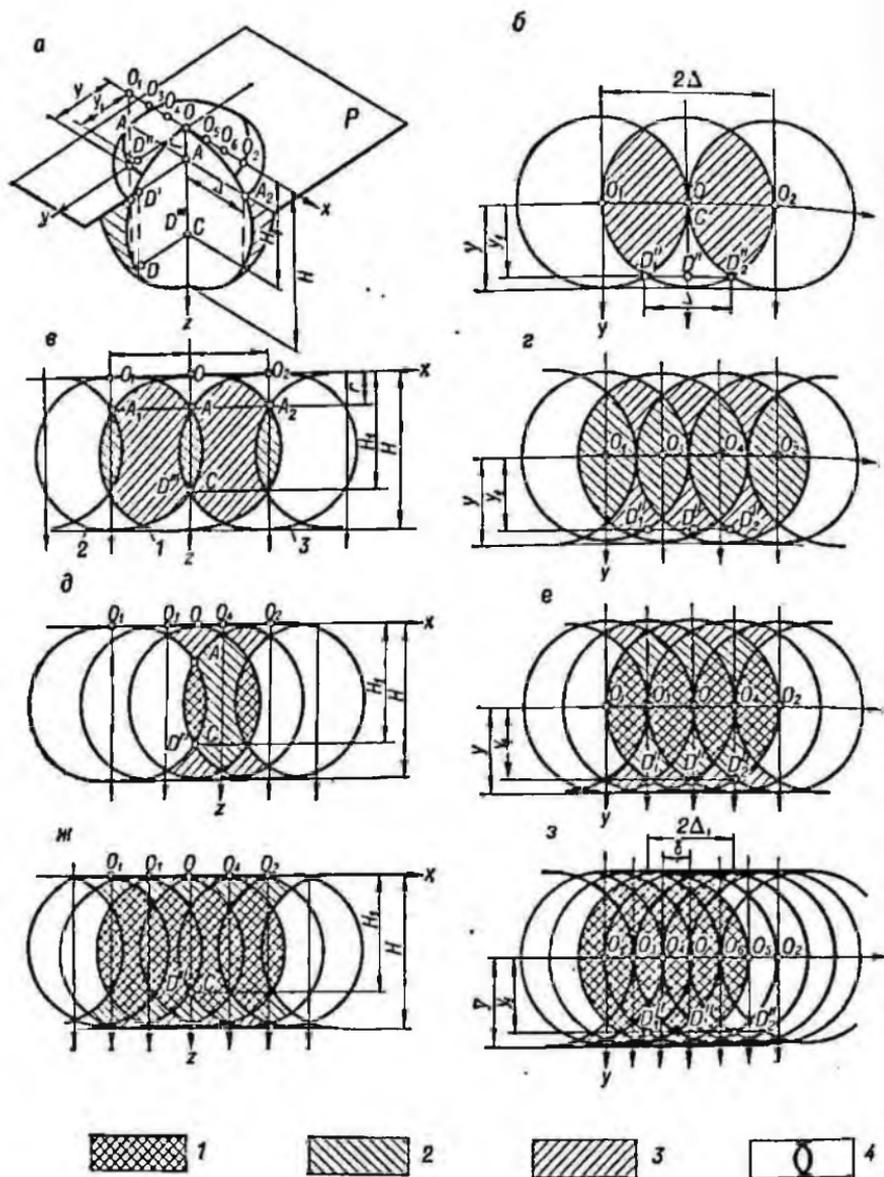


Рис. 3.4. Схема изученности пространства при разном шаге наблюдений. Зоны обнаружения тел: 1—более чем тремя пунктами, 2—тремя, 3—двумя, 4—менее чем двумя.

определенная глубина центра тела  $z=H$  [34]. При смещении пункта наблюдения от эпицентра тела в плоскости  $xOz$  при условии, что эффект  $\Delta g$  остается равным  $\epsilon$ , глубину  $H$  необходимо уменьшить до  $H_1$ . Нас интересует такое смещение пунктов наблюдения, при котором в определенной области пространства были бы обнаружены все тела заданных размеров, в том числе и касающиеся горизонтальной плоскости наблюдения ( $z=r$ ). Очевидно, что такая область пространства будет вписана в предельно изученную.

Рассмотрим сечение предельно изученной области вертикальной плоскостью  $xOz$ , представляющее собою овал, проходящий через точку  $O$  (рис. 3.4, а, контур 1). Точки  $A_1$  и  $A_2$  являются точками пересечения горизонтальной плоскости  $xOy$ , проведенной на глубине  $z=r$ , и контура сечения предельно изученной области плоскостью  $xOz$ . Разделим расстояние  $A_1A_2$  пополам и из концов отрезков  $AA_1$  и  $AA_2$  восстановим перпендикуляры до пересечения с осью  $x$ . Полученные точки  $O_1$  и  $O_2$  являются началом новых контуров изученности (контур 2 и 3). Предположим теперь, что возмущающее тело находится в точке  $A$ , т. е.  $z=r$  и тело касается плоскости наблюдения. В этом случае, учитывая предельно изученную область, можно считать, что в точках  $O_1$  и  $O_2$  тело создает аномалию  $\Delta g = \epsilon$ , так как оно лежит на границе контуров 2 и 3. Аномалия, создаваемая этим телом в точке  $O$ , заведомо больше  $\epsilon$ , так как тело находится внутри контура 1. Следовательно, точки  $O_1$  и  $O_2$  фиксируют предельное смещение пунктов измерения по оси  $x$ , а отрезки  $AA_1 = AA_2 = \Delta$  показывают предельные размеры шага наблюдений в направлении оси  $x$ . Глубиной обнаружения тел является  $H_1$ . Тело, расположенное в точке  $C$  на глубине  $H_1$ , так же как и находящееся в точке  $A$ , будет обнаружено тремя пунктами измерений. В рассмотренной схеме одно из наблюдений выполняется строго над эпицентром тела (точка  $O$ ). В общем же случае возмущающие тела будут обнаружены не менее чем двумя пунктами.

Все изложенное справедливо, если массы располагаются в вертикальной плоскости наблюдения. Однако задача состоит в выявлении тел, находящихся не только непосредственно под выработкой, но и в стороне от нее.

Рассмотрим проекцию сечения предельно изученной области плоскостью  $xOy$  при  $z=r$  (рис. 3.4, б). Этот рисунок иллюстрирует следующую задачу: необходимо обнаружить массы, находящиеся в точке  $D$  на удалении  $y_1$  от исследуемой выработки, причем глубина их обнаружения должна быть не меньше  $H_1$ . Если принять шаг наблюдений равным  $\Delta$ , то тело, находящееся в точке  $D$ , будет зафиксировано лишь одной точкой (точка  $O$ ), т. е. шаг  $\Delta$  задачу не решает, так как аномалия считается достоверной, если она зафиксирована не менее чем тремя пунктами наблюдений. Найдем оптимальные размеры шага путем

последовательного сгущения пунктов наблюдений (рис. 3.4, 2—3). В результате можно сделать вывод, что для достоверного выявления аномалии  $\Delta g$ , вызванной телом  $D$ , шаг наблюдений необходимо принять равным  $1/3$  хорды  $D_1''D_2'' = 2\Delta_1$  (рис. 3.4, 3), которая представляет собой отрезок линии пересечения плоскостей  $z=r$  и  $y=y_1$  (плоскость ожидаемого местонахождения возмущающих тел).

Таким образом, для расчета оптимального расстояния между пунктами измерений достаточно задать величину  $y_1$  и найти предельное значение  $\Delta_1$ , а оптимальное будет равным  $\delta = 2\Delta_1/3$ .

### 3.4.2 Методика расчета шага наблюдений

Формы и размеры рудных залежей многообразны. Наиболее часто встречаются следующие морфологические типы: пластовые, штоко-, гнездо-, линзо-, столбообразные и некоторые другие. На полиметаллических месторождениях Армении и Алтая, например, преимущественное развитие имеют линзо- и гнездообразные типы рудных залежей; на медноколчеданных месторождениях Урала — линзообразные и пластовые. На железорудных месторождениях типа Криворожского, как правило, встречаются все перечисленные типы рудных тел.

При расчете шага наблюдений форму, размеры и аномальную плотность объекта поиска задают на основании сведений о физико-геологических условиях участка съемки, морфологии и размерах тел полезного ископаемого, их значимости для народного хозяйства и рентабельности эксплуатации. Выбирают наиболее распространенные формы залегания полезного ископаемого на данном месторождении или участке съемки. Ожидаемые рудные залежи аппроксимируют телами правильной геометрической формы соответствующих средних размеров и для них разрабатывают методику расчета шага наблюдений. Например, линзо- и столбообразные возмущающие тела можно уподобить эллипсоидам вращения около горизонтальной или вертикальной оси с определенным соотношением полуосей; гнездообразные — шару; жилы и пласты — эллиптическому цилиндру или параллелепипеду, в отдельных случаях — круговому цилиндру и т. д.

Методику расчета шага наблюдений покажем на примере поисков линзообразных тел, уподобленных эллипсоиду вращения около горизонтальной оси с соотношением полуосей  $b=c$ ,  $a>c$ . Для решения задачи закрепим систему координат так, чтобы ось  $x$  была направлена вкrest простирания пород (по кваршлагам и ортам), ось  $y$  — по простиранию (по штрекам), а ось  $z$  — вертикально вниз. Для такого тела

$$\Delta g = \frac{2\pi k\sigma a c^2 z}{R^3} \left\{ \ln \left[ \sqrt{\frac{R}{c^2 + U}} + \sqrt{\frac{a^2 + U}{c^2 + U}} \right] - \sqrt{\frac{R(a^2 + U)}{(c^2 + U)^2}} \right\}, \quad (3.8)$$

где  $U$  — наибольший корень уравнения

$$x^2/(a^2 + U) + (y^2 + z^2)/(c^2 + U) = 1;$$

$R = a^2 - c^2$ ;  $z$  — глубина до центра эллипсоида;  $x, y$  — текущие координаты.

Решив уравнение (3.8) относительно  $x$  и  $y$ , получим предельное смещение пункта наблюдения соответственно по оси  $x$  и  $y$ , т. е. предельные размеры шага измерения по квершлагу и штреку. Сложность приведенного выражения затрудняет его аналитическое решение. Задачу удобнее решать графически — путем построения номограмм. Выполнив некоторые преобразования, найдем уравнение номограммы

$$A = \frac{\Delta g (a^2 - c^2)^{3/2}}{\sigma a c^2 z} = 2\pi k \left[ \ln \frac{1 + \sqrt{P+1}}{\sqrt{P}} - \frac{1 - \sqrt{P+1}}{P} \right], \quad (3.9)$$

где

$$P = (c^2 + U)/(a^2 - c^2) = 0,5 \times \\ \times [m^2 + n^2 - 1 + \sqrt{(m^2 + n^2)^2 + 1 + 2(n^2 - m^2)}]; \\ m = x/(a^2 - c^2)^{1/2}; \quad n = (y^2 + z^2)^{1/2}/(a^2 - c^2)^{1/2}.$$

Полагая в выражении (3.9)  $n = \text{const}$  и вычисляя при переменных  $m$  значения  $A$ , строим график зависимости  $A = f(m)$ . Изменяя параметр  $n$ , получаем серию таких графиков и сводим их в номограмму (рис. 3.5, а). Последовательность операций при расчете шага наблюдений с помощью номограммы рассмотрим на следующем примере.

Вначале необходимо задаться эффективной аномалией  $\Delta g = \epsilon$ , конкретными параметрами тела  $a, c, \sigma$  и его вероятным удалением от выработки  $y_1$ . Обычно при наблюдениях в квершлагах (ортах) вероятное удаление масс принимают равным половине расстояния между смежными выработками, а при наблюдениях по штрекам — расстоянию до внешней границы рудовмещающей толщи.

Пусть возмущающее тело имеет параметры:  $a = 20$  м,  $c = 10$  м,  $\sigma = 1$  г/см<sup>3</sup>. Предполагаемое удаление его от выработки  $y_1$  или  $x_1$  составляет 15 м. Эффективная аномалия  $\Delta g = \epsilon = 0,05$  мгал.

Определим шаг наблюдений в направлении оси  $x$  при касании телом плоскости наблюдения  $z = c$ .

Вычислим параметры номограммы:

$$A = \frac{\Delta g (a^2 - c^2)^{3/2}}{\sigma a c^2 z} = \frac{0,05 (0,04 - 0,01)^{3/2}}{1 \cdot 0,2 \cdot 0,01 \cdot 0,1} = 1,3;$$

$$n = \sqrt{\frac{y_1^2 + z^2}{a^2 - c^2}} = \sqrt{\frac{0,0225 + 0,01}{0,04 - 0,01}} \approx 1.$$

Значение  $A = 1,3$  откладываем на вертикальной шкале номограммы (см. рис. 3.5, а) и через найденную точку проводим горизонтальную линию до

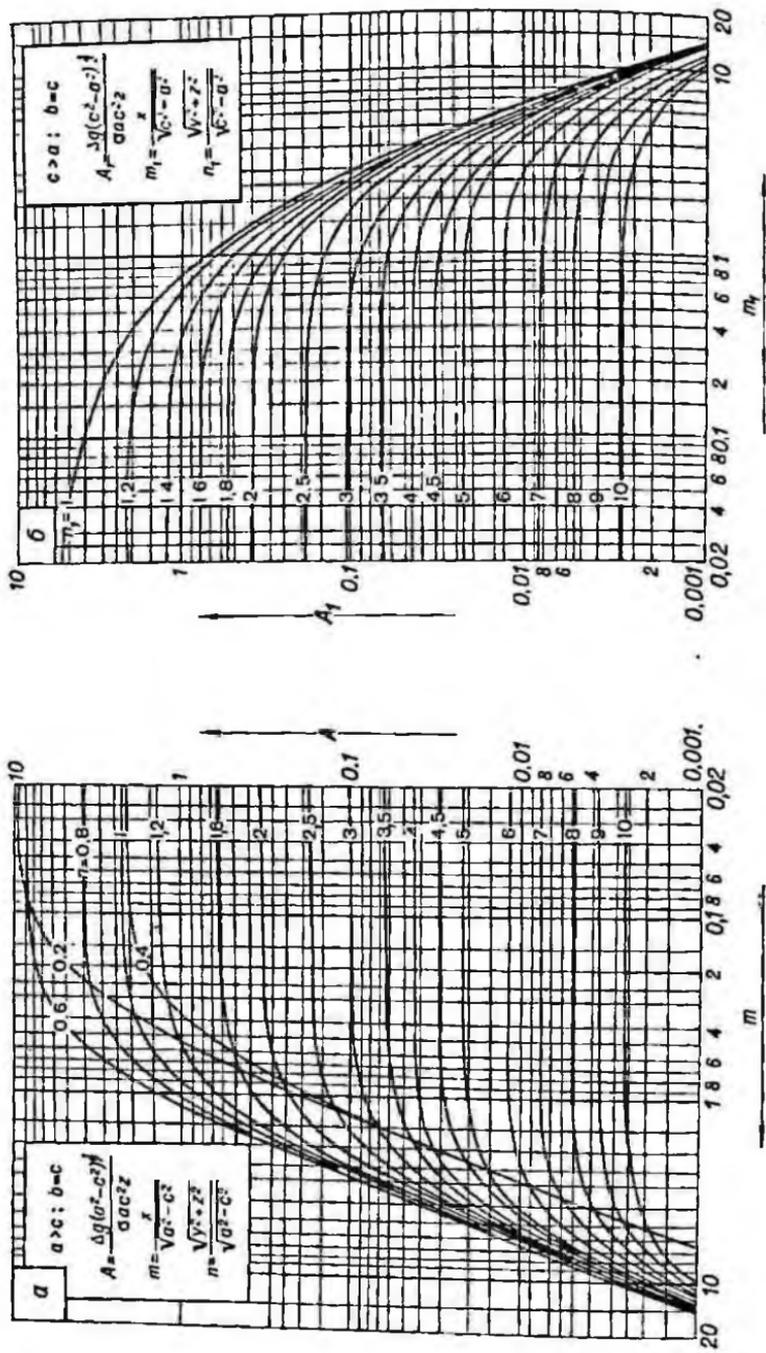


Рис. 3.5. Номограммы для расчета шага наблюдений при поисках тел, удлиненных эллипсоиду вращения около горизонтальной оси.

пересечения с кривой  $n=1$ . Из точки пересечения опускаем перпендикуляр на шкалу  $m$  и снимаем значение  $m=0,65$ . Из соотношения  $m=x/\sqrt{a^2-c^2}$  находим

$$x = \Delta = m \sqrt{a^2 - c^2} = 0,65 \cdot 10^2 \sqrt{0,04 - 0,01} = 11 \text{ м.}$$

Оптимальные размеры шага определяем из соотношения

$$\delta = 2\Delta : 3 \approx 7 \text{ м.}$$

Для расчета шага наблюдений по оси  $y$  следует воспользоваться той же номограммой, но в качестве исходных параметров необходимо взять

$$A = \Delta g (a^2 - c^2)^{3/2} / (\sigma a c^2 z) = 1,3;$$

$$m = x_1 / \sqrt{a^2 - c^2} = 0,15 : \sqrt{0,04 - 0,01} = 0,87.$$

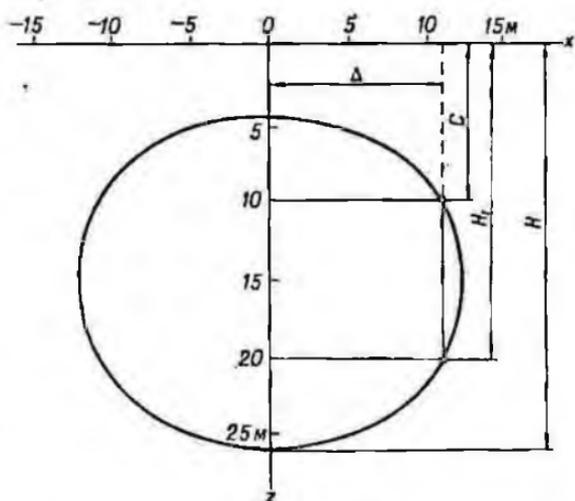


Рис. 3.6. Схема выяснения предельной глубины изученности разреза.

На номограмме в соответствующих точках восстанавливаем перпендикуляры к шкалам  $A$  и  $m$  и в точке их пересечения считываем значение  $n=0,8$ . По нему вычисляем предельные размеры шага в направлении оси  $y$ :

$$y = \Delta_1 = \sqrt{n^2 (a^2 - c^2) - z^2} = 10^2 \sqrt{0,64 (0,04 - 0,01) - 0,01} = 9,6 \text{ м.}$$

Оптимальный шаг

$$\delta_1 = 2 \Delta_1 : 3 \approx 6 \text{ м.}$$

Для оценки геологической эффективности съемки важно знать предельную глубину изученности разреза при заданном шаге наблюдений. Эта глубина может быть определена графически — построением сечения предельно изученной области в плоскости предполагаемого местоположения возмущающего тела (при  $y_1=15$  м или  $x_1=15$  м). Осуществляется это следующим образом.

Задавая произвольно глубину  $z$  и сохраняя  $\Delta g = \varepsilon = \text{const}$ , при помощи номограммы рис. 3.5, а находим соответствующие

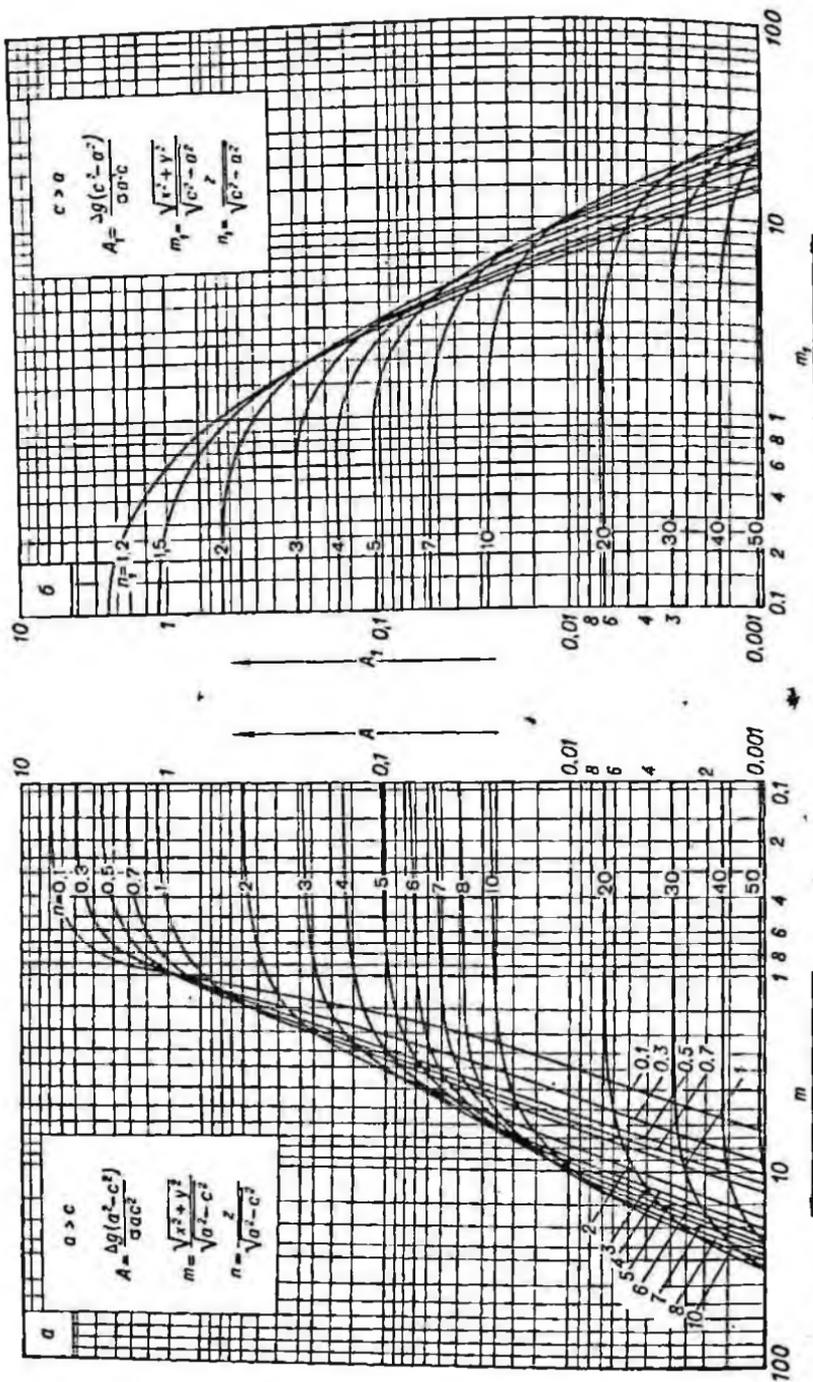


Рис. 3.7. Номограммы для расчета шага наблюдений при поисках тел, уплощенных эллипсоиду вращения около вертикальной оси.

значения  $x$  или  $y$  подобно тому, как определяли  $\Delta$  и  $\Delta_1$ . В результате получаем точки на границе сечения предельно изученной области плоскостями  $xOz$  или  $yOz$ . Соединив такие точки

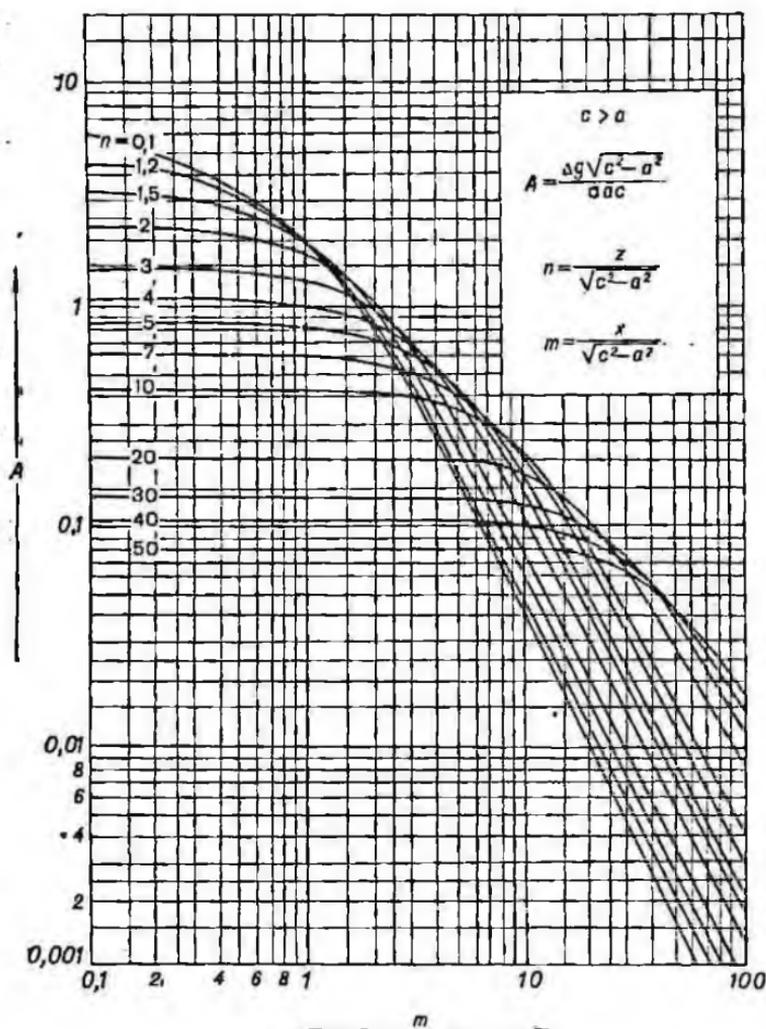


Рис. 3.8. Номограмма для расчета шага наблюдений при поисках тел, уподобленных эллиптическому цилиндру бесконечного пространства.

плавной кривой, получим искомое сечение (рис. 3.6). По оси  $x$  (или  $y$ ) откладываем от начала координат отрезок  $\Delta$  и из конца его опускаем перпендикуляр, который пересечет границы предельно изученной области в точках  $z=c$  и  $z=H_1$ . Значение  $H_1$

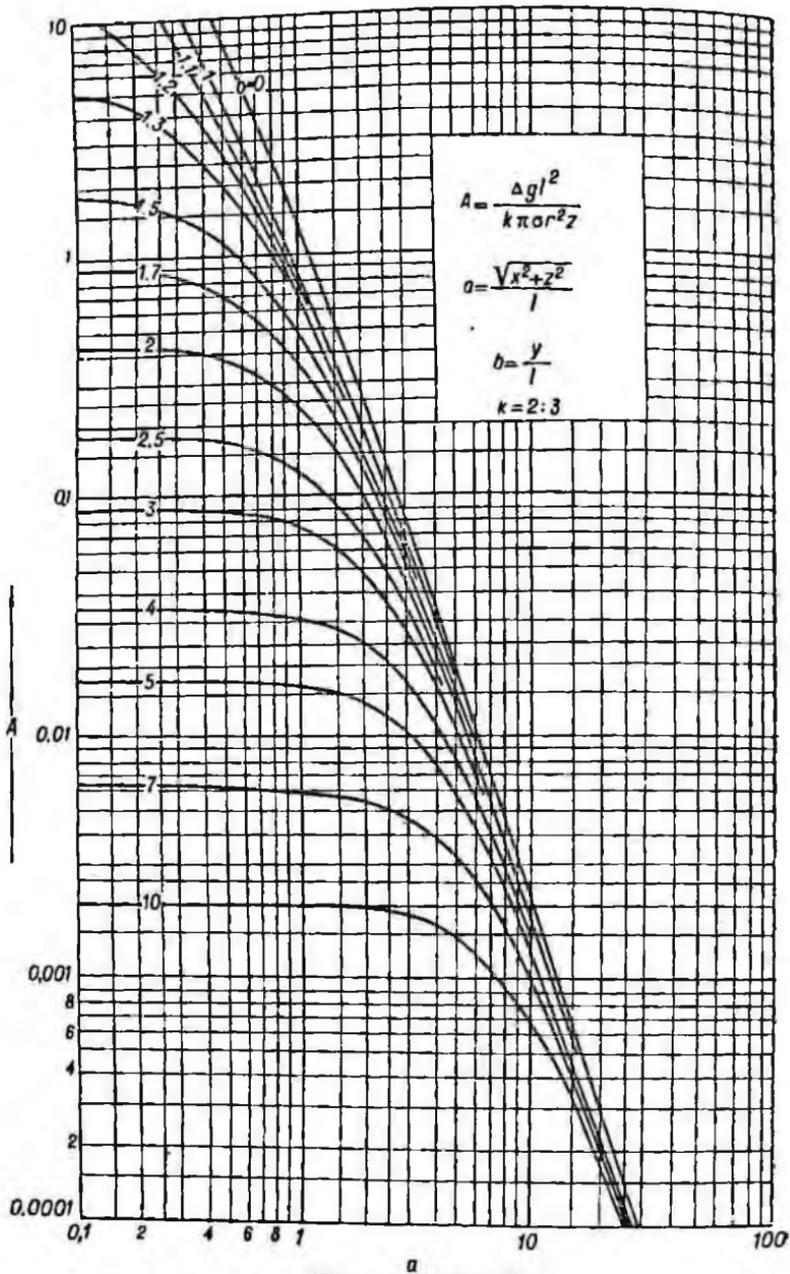


Рис. 3.9. Номограмма для расчета шага наблюдений при поисках тел, уподобленных круговому цилиндру ограниченного простираия.

$\Delta g$  — в миллигалах;  $r$ ,  $x$ ,  $z$  — в сотнях метров.

соответствует максимальной глубине обнаружения масс при наблюдениях с заданным шагом (в нашем случае  $H_1=20$  м).

По аналогии разработана методика определения шага наблюдений и глубины изученности разреза для других моделей возмущающих тел. Мы приводим номограммы для возмущающих тел, уподобленных: эллипсоиду вращения около оси  $x$  при  $b=c$  и  $c>a$  (рис. 3.5, б); эллипсоиду вращения около вертикальной оси при  $a=b$ ,  $a>c$  (рис. 3.7, а) и  $a=b$ ,  $a<c$  (рис. 3.7, б); эллиптическому цилиндру бесконечного простираения при  $c>a$  (рис. 3.8); круговому цилиндру ограниченного простираения (рис. 3.9). Чтобы воспользоваться номограммами, также необходимо задать параметры тела, вероятное его удаление от выработки  $y_1$  или  $x_1$  и эффективную аномалию  $\epsilon$ . Входные параметры номограмм вычисляются по приведенным на них формулам.

Для расчета предельного шага наблюдений при поисках тел, уподобленных шару, можно воспользоваться выражением

$$x = \Delta = \sqrt{(kmz/\Delta g)^{2/3} - (y_1^2 + z^2)}, \quad (3.10)$$

где  $m = (4/3)\pi r^3 \sigma$  — масса шара;  $y_1$  — вероятное удаление шара от выработки;  $z$  — глубина центра шара, принимаемая равной его радиусу (условие касания);  $\Delta g = \epsilon$ .

Максимальную глубину изученности для всех форм тел находят графически — построением предельно изученной области.

Аналогичные методики расчета шага наблюдений при поисках перечисленных выше тел имеются и для вторых производных гравитационного потенциала (А. А. Юньков, Н. Р. Бурьян, Н. М. Анищенко, 1975 г.).

### 3.4.3

Оценка возможности обнаружения возмущающих тел при оптимальном шаге наблюдений

Зная конкретные задачи съемки и располагая сведениями о физико-геологических условиях ее проведения, используя изложенный выше метод расчета шага наблюдений, можно оце-

нить возможность выявления интересующих нас тел проектируемой или уже выполненной съемкой. На примере залежей цилиндрической и шарообразной формы покажем изменение оптимальных размеров шага наблюдений  $\delta$  и глубины  $H_1$  обнаружения возмущающего тела в зависимости от эффективной аномалии  $\epsilon$ , массы тела, его формы и удаления от исследуемой выработки при измерении функции  $\Delta g$ ,  $V_{xx}$ ,  $V_{yz}$  и  $V_{xy}$  (табл. 3.1—3.5).

Для расчетов истинная плотность возмущающих тел была принята равной  $4 \text{ г/см}^3$  (аномальная  $0,5 \text{ г/см}^3$ ). Сообразно с массами тел  $[(500, 100, 50 \text{ и } 10) \cdot 10^3 \text{ т}]$  для выяснения закономерностей изменения шага наблюдений и глубины изученности разрезов в зависимости от точности работ для каждого вида съемки было принято по два значения эффективной аномалии: для гравитационной  $0,05$  и  $0,1$  мгал, для вторых производных  $5$  и  $10 \text{ Э}$  (суть таблиц не изменится, если аномальную плотность

Таблица 3.1

Зависимость шага  $\delta$  и глубины  $H_1$  от погрешности съёмки  $\Delta g = g$ , удаления  $y_1$  и массы тела

Масса тела, 10 <sup>г</sup>	Форма и размеры тела, м	$y_1$ , м	$\Delta g$ , мгал			
			0,05		0,1	
			$\delta$ , м	$H_1$ , м	$\delta$ , м	$H_1$ , м
500	Цилиндр $r=10$ , $2l=400$	0	14,0	32,0	7,3	10,0
		100	11,5	32,0	6,5	10,0
		200	7,0	15,0	2,0	10,0
		205	2,0	10,0	—	—
		250	—	—	—	—
	Шар $r=31$	0	37,0	47,0	27,0	31,0
		20	34,5	47,0	23,0	31,0
		30	31,2	47,0	17,5	31,0
		40	25,7	47,0	—	—
		50	16,3	47,0	—	—
		60	—	—	—	—
	100	Цилиндр $r=10$ , $2l=80$	0	11,5	23,0	6,6
20			10,8	21,0	5,9	10,0
40			7,0	10,0	1,0	10,0
50			—	—	—	—
Шар $r=18$		10	16,0	18,0	11,0	18,0
		18	15,3	18,0	8,8	18,0
		30	11,6	18,0	—	—
		—	—	—	—	
50	Цилиндр $r=10$ , $2l=40$	0	10,0	15,0	5,6	10,0
		10	9,1	15,0	5,0	10,0
		20	6,3	10,0	—	—
		30	—	—	—	—
	Шар $r=14$	0	11,0	14,0	7,0	14,0
		10	9,2	14,0	2,2	14,0
		14	6,5	14,0	—	—
		30	—	—	—	—
		—	—	—	—	
		—	—	—	—	
10	Цилиндр $r=5$ , $2l=32$	0	3,3	5,0	—	—
		10	3,2	5,0	—	—
		20	—	—	—	—
	Шар $r=8,4$	0	4,0	8,0	—	—
		5	3,6	8,0	—	—
		10	—	—	—	—
		—	—	—	—	
		—	—	—	—	

Зависимость шага  $\delta$  от погрешности съемки  $\Delta g = \varepsilon$ , удаления  $x_1$  и массы тела

Таблица 3.2

Масса тела, $10^3$ т	Размеры тела, м		$x_1$ , м	$\Delta g$ , мгал	
	r	2l		0,05	0,1
				$\delta$ , м	
500	10	400	0	130	90
			10	120	7
			15	100	—
			20	—	—
100	10	80	0	30	25
			10	27	—
			15	20	—
			17	5	—
			20	—	—
50	10	40	0	20	15
			10	19	—
			14	10	—
			15	—	—
10	5	32	0	11	—
			5	—	—

тел принять  $1 \text{ г/см}^3$  и соответственно эффективные аномалии для  $\Delta g$  0,1 и 0,2 мгал, для вторых производных 10 и 20 Э).

Из табл. 3.1—3.4 следует, что  $\delta$  и  $H_1$  в первую очередь зависят от эффективной аномалии  $\varepsilon$ , следовательно, от точности наблюдений и уровня помех. Чем больше значение  $\varepsilon$ , т. е. чем грубее съемка и выше уровень помех, тем меньше шаг наблюдений  $\delta$  и глубина изучения  $H_1$ .

Параметры  $\delta$  и  $H_1$  в значительной степени зависят также от удаления тела от исследуемой выработки. Для любых форм и размеров тела с удалением его от выработки эти параметры уменьшаются. Скорость уменьшения зависит от аномалии  $\varepsilon$ . Существует критическое удаление тел от выработки, за пределами которого при заданных параметрах тела и аномалии  $\varepsilon$  оно будет пропущено.

Из приведенных таблиц следует, что возможности каждой из составляющих гравитационного поля в одинаковых условиях измерений различны. Особенно четко это видно, когда объектами исследований являются вытянутые тела, а профили наблюдений проходят вкрест их простирания. Так, цилиндр радиусом

Зависимость шага  $\delta$  и глубины  $H_1$  ( $u_2$  для  $V_{xy}$ ) от удаления  $u_1$ , погрешности измерений  $\epsilon$  и массы тела

Таблица 3.3

Масса тела, $10^4$ т	Форма и размеры тела, м	$u_1$ , м	$\epsilon$ , %															
			5				10				5				10			
			$V_{xz}$				$V_{yz}$				$V_{xy}$							
			$\delta$ , м	$H_1$ , м	$\delta$ , м	$H_1$ , м	$\delta$ , м	$H_1$ , м	$\delta$ , м	$H_1$ , м	$\delta$ , м	$u_2$ , м	$\delta$ , м	$u_2$ , м				
500	Цилиндр $r=10$ , $2l=400$	0	15,0	38,0	11,3	25,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		100	14,0	37,0	11,0	24,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		170	8,0	35,0	—	—	10,0	23,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		200	7,0	30,0	—	—	16,0	34,0	12,6	17,0	5,0	230	—	—	—	—		
		230	—	—	—	—	—	—	—	—	13,0	200	—	—	—	—		
	300	—	—	—	—	—	—	—	—	5,0	170	9,0	200	—	—			
	Шар $r=31$	0	28,0	52,0	22,0	40,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		10	27,6	50,0	22,0	40,0	31,3	31,0	25,3	31,0	19,3	68,0	13,0	49,0	—	—		
		20	26,6	45,0	20,6	40,0	38,7	31,0	30,0	31,0	24,0	54,0	17,0	38,0	—	—		
		30	25,3	42,0	17,0	31,0	38,7	40,0	30,7	31,0	26,0	40,0	17,8	35,0	—	—		
40		22,7	31,0	12,0	31,0	40,0	45,0	30,0	31,0	26,0	32,0	16,0	15,0	—	—			
60		6,0	31,0	—	—	34,0	45,0	20,0	40,0	22,6	16,0	—	—	—	—			
100	—	—	—	—	19,0	50,0	—	—	8,0	2,0	—	—	—	—	—			
100	Цилиндр $r=10$ , $2l=80$	0	13,3	34,0	11,0	24,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		10	13,3	31,1	10,6	24,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
		20	12,6	29,0	10,3	23,0	10,3	26,0	—	—	9,0	60,0	—	—	—			
		40	10,3	25,0	8,3	14,0	17,0	29,0	13,0	22,0	13,0	40,0	9,6	40,0	—			
		60	—	—	—	—	10,7	27,0	—	—	9,0	20,0	—	—	—			
		80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
Шар $r=18$	0	15,5	33,0	12,0	20,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
	10	15,3	30,0	12,0	18,0	21,3	15,0	17,3	11,0	13,7	33,0	10,0	22,0	—				
	18	14,3	28,0	10,0	18,0	23,3	18,0	18,6	16,0	15,0	18,0	11,0	18,0	—				
	30	9,0	18,0	—	—	22,0	28,0	16,0	18,0	14,3	15,0	7,0	5,0	—				
	40	—	—	—	—	17,3	31,0	5,3	26,0	11,0	5,0	—	—	—				
	50	—	—	—	—	6,0	34,0	—	—	—	—	—	—	—				
50	Цилиндр $r=10$ , $2l=40$	0	12,0	23,0	9,6	18,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—			
		10	12,0	22,0	9,3	17,0	16,0	15,0	9,3	10,0	9,0	36,0	6,0	35,0				
		20	10,6	20,0	9,0	17,0	17,0	15,0	12,6	14,0	11,6	20,0	8,3	20,0				
		40	—	—	—	—	10,6	28,0	—	—	7,0	8,0	—	—				
	60	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
	Шар $r=14$	0	12,0	25,0	9,0	14,0	—	—	—	—	—	—	—	—				
10		11,7	20,0	8,3	14,0	18,0	14,0	14,6	14,0	11,0	20,0	8,0	15,0					
20		8,3	18,0	4,0	14,0	17,3	23,0	12,6	14,0	11,0	10,0	7,0	7,0					
40		—	—	—	—	14,6	23,0	6,3	14,0	8,0	4,0	—	—					
10	Цилиндр $r=5$ , $2l=32$	0	7,0	12,0	5,0	10,0	—	—	—	—	—	—	—					
		5	7,0	12,0	5,0	10,0	2,0	10,5	—	—	—	—	—					
		10	7,0	12,0	5,0	10,0	7,0	20,0	3,6	10,0	5,3	23,0	3,3	22,5				
		20	4,0	10,0	2,3	7,0	8,3	15,0	—	—	5,8	15,0	4,3	14,0				
	40	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—					
	Шар $r=8,4$	0	7,0	13,0	6,0	8,4	—	—	—	—	—	—	—	—				
5		7,0	8,4	5,6	8,4	10,6	8,4	8,0	8,4	6,5	14,0	4,6	10,0					
20		6,0	8,4	4,0	8,4	11,0	10,0	8,3	8,4	7,0	10,0	4,3	10,0					
—	—	—	—	—	7,0	15,0	—	—	—	4,0	2,0	—	—					

Таблица 3.4  
Зависимость шага  $\delta_1$  от удаления  $x_1$ , погрешности измерений  $\epsilon$  и массы тела

Масса тела, 10 <sup>3</sup> т	Размеры тела, м		$x_1$ , м	$\epsilon$ , Э							
	r	2l		5		10		5		10	
				$V_{xz}$		$V_{yz}$		$V_{xy}$			
$\delta_1$ , м											
500	10	400	0	—	—	30,0	25,0	—	—	—	—
			10	141,4	141,4	30,0	19,0	23,7	—	—	—
			20	22,4	19,4	20,0	13,3	15,0	14,0	—	—
			40	—	—	—	—	11,0	—	—	—
			60	—	—	—	—	—	—	—	—
100	10	80	0	—	—	24,5	18,0	—	—	—	—
			10	37,0	34,0	13,3	8,0	—	—	—	—
			20	34,3	32,0	8,6	3,0	15,0	11,0	—	—
			40	—	—	—	—	14,0	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	10	40	0	—	—	22,0	18,0	—	—	—	—
			10	23,3	21,0	13,0	7,5	—	—	—	—
			20	21,3	19,0	7,0	2,0	13,0	10,0	—	—
			40	—	—	—	—	11,5	—	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	5	32	0	—	—	12,0	10,0	—	—	—	—
			5	16,0	14,6	7,0	5,0	—	—	—	—
			10	14,9	12,7	5,0	2,0	7,7	5,3	—	—
			20	—	—	—	—	7,0	4,5	—	—
			—	—	—	—	—	—	—	—	—

10 м и длиной 400 м при  $\sigma=0,5$  г/см<sup>3</sup> и эффективной аномалии  $V_{xz}=\epsilon=5$  Э (см. табл. 3.3) будет замечен по квершлагу, проходящему на удалении  $0 < y_1 < 230$  м, т. е. начиная от эпицентра тела до зоны его контакта, в то время как аномалии  $V_{yz}$  и  $V_{xy}$  зафиксируют это тело при  $100 < y_1 < 230$  м.

Предположим, что проведена гравиметрическая съемка шагом 5 м по квершлагам и 10 м по штрекам при эффективной аномалии 0,1 мгал. Как следует из табл. 3.5, составленной на основании табл. 3.1 и 3.2, в этом случае по квершлагам могут быть зафиксированы аномальные тела массой  $\geq 50 \cdot 10^3$  т, а по штрекам цилиндрические тела массой  $\geq 50 \cdot 10^3$  т, шаровидные  $\geq 100 \cdot 10^3$  т. При эффективной аномалии  $\epsilon=0,05$  мгал можно обнаружить при тех же размерах шага наблюдений залежи массой  $50 \cdot 10^3$  т, имеющие как цилиндрическую, так и шарообразную форму.

Все приведенные рассуждения справедливы, если аномальная плотность тел составляет около 0,5 г/см<sup>3</sup>. При отклонении от этого значения соответственно изменятся поисковые возможности съемки. Следовательно, в каждом конкретном случае, основываясь на реальных физико-геологических условиях исследуемого участка, можно и необходимо оценить возможности поисков тех или иных возмущающих тел методом гравirazведки, что позволит заведомо судить о геологической эффективности проектируемой съемки.

Изменение удаления  $y_1$  и глубины  $H_1$  в зависимости от параметров съемки и возмущающего тела По кверш

лагу

Таблица 3.5

Форма тела	Масса тела (залежи), 10 <sup>3</sup> т	Размеры тела, м		$\Delta g$ , мгал				$\Delta g$ , мгал							
				0,05		0,05		0,1							
		r	2l	$\delta_1$ , м		$\delta_1$ , м		$\delta_1$ , м		$\delta_1$ , м					
				2	5	10	2	5	10						
$y_1$ , м	$H_1$ , м	$y_1$ , м	$H_1$ , м	$y_1$ , м	$H_1$ , м	$y_1$ , м	$H_1$ , м	$y_1$ , м	$H_1$ , м						
Цилиндр	500	10	400	205,0	10,0	202,0	12,6	—	—	—	—	—	—		
	100	10	80	46,0	10,0	202,0	12,6	120,0	25,0	200,0	10,0	120,0	10,0		
	50	10	40	26,0	10,0	43,0	10,0	28,0	19,0	40,0	10,0	31,0	10,0		
	10	5	32	14,0	5,0	23,0	10,0	0	15,0	20,0	10,0	10,0	10,0		
Шар	500	31	—	55,5	47,0	55,0	47,0	53,5	47,0	40,0	31,0	39,0	31,0	37,0	31,0
	100	18	—	25,0	18,0	24,0	18,0	20,0	18,0	16,0	18,0	15,0	18,0	7,0	18,0
	50	14	—	17,0	14,0	15,0	14,0	8,0	14,0	10,0	14,0	7,5	14,0	—	—
	10	8,4	—	7,0	8,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Форма тела	Масса тела (запасы), 10 <sup>4</sup> т	Размеры тела, м		$\Delta g$ , мгал			
		r	2l	0,05			
				b, м			
				5		10	
		x <sub>1</sub> , м	H <sub>1</sub> , м	x <sub>2</sub> , м	H <sub>2</sub> , м		
Цилиндр	500	10	400	17,0	32,0	17,0	32,0
	100	10	80	16,5	23,0	16,0	21,0
	50	10	40	14,0	15,0	13,5	15,0
	10	5	32	—	—	—	—
Шар	500	31		55,0	47,0	53,5	47,0
	100	18		24,0	18,0	20,0	18,0
	50	14		15,0	14,0	8,0	14,0
	10	8,4		—	—	—	—

### 3.5. Методика измерений силы тяжести

Основным требованием, предъявляемым к съемке, является надежное выделение слабых аномалий силы тяжести, связанных с влиянием возмущающих объектов (рудных залежей, карстовых зон, тектонических нарушений и т. п.). Аномалия считается достоверной, если ее амплитуда не менее чем в 2,5—3 раза превышает среднюю квадратическую погрешность определения  $\Delta g$ . Для обеспечения этого требования следует методически правильно выполнить съемку. На основании многолетнего опыта (Е. А. Мудрецова и др. [64]; З. Г. Муромцева, 1962—1967 гг.; В. М. Пелюшенко, В. Ф. Полуэктов, 1962—1965 гг.; В. И. Андреев, 1967—1970 гг.; О. Н. Игнатьев, М. В. Макеев, 1968—1975 гг. и др.) и требований инструкции по гравиметрической разведке [60] можно рекомендовать следующую методику подземных гравиметрических наблюдений.

Гравиметрическая съемка должна быть приведена к единому общегосударственному уровню силы тяжести. Для этого все съемки необходимо привязать к опорным пунктам I или II класса. Такая привязка осуществляется через опорную сеть III класса, которая развивается около устьев стволов шахт на дневной поверхности и на горизонтах, где будет выполняться съемка. Эти работы проводятся в два этапа: первый — развитие опорной сети около устьев стволов шахт, второй — на горизонтах. Методика создания опорной сети на первом этапе зависит от количества стволов шахт. Если их не больше трех-пяти, то каждая опорная точка увязывается с пунктами I или II класса тремя независимыми рейсами. Независимыми считаются наблюде-

штреку

$\Delta g$ , мгал							
0,03				0,1			
$\delta$ , м							
20		5		10		20	
$x_1$ , м	$H_1$ , м	$x_{11}$ , м	$H_{11}$ , м	$x_{11}$ , м	$H_{11}$ , м	$x_{11}$ , м	$H_{11}$ , м
16,0	32,0	10,5	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
14,5	19,0	9,5	10,0	9,0	10,0	8,0	10,0
—	—	8,0	10,0	7,0	10,0	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
47,0	47,0	39,0	31,0	37,0	31,0	26,0	31,0
—	—	15,0	18,0	7,0	18,0	—	—
—	—	7,5	14,0	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—

ния, выполненные разными гравиметрами или одним и тем же гравиметром в разное время, т. е. наблюдения, не связанные общим учетом нуль-пункта. При большом количестве стволов выбирают три-четыре шахты, равномерно расположенные на участке, в качестве каркасных пунктов и увязывают их с пунктами I (II) класса. Опорные пункты у остальных стволов наблюдают от каркасных. Уравнивание сети можно выполнить методом полигонов, которые лучше всего образовывать в виде треугольников.

Абсолютное значение силы тяжести с опорного пункта около устья ствола передается на опорные пункты, расположенные на горизонтах. Для этого перед началом работ оператор должен на определенное время получить в распоряжение подъемную клеть. Выполняется два независимых рейса, каждый из которых состоит из прямого и обратного хода со 100%-ным повторением. Затем создается равномерная опорная сеть по всему горизонту. Эта сеть увязывается с пунктом, находящимся на горизонте у ствола шахты. Опорную сеть рекомендуется разбивать в начале работ на данном горизонте. Число опорных пунктов определяется горнотехническими условиями, общей протяженностью выработок и классом применяемого гравиметра. Опорные пункты следует распределять так, чтобы рядовой рейс продолжительностью не более 1 ч при однократной методике измерений опирался бы на три опорных пункта (можно на один и тот же).

На эксплуатационных горизонтах месторождений опорную сеть создают в два-три приема перед началом рядовой съемки. Это связано с необходимостью выполнять наблюдения на рядо-

вой и опорной сети в одних и тех же горно-геологических условиях. Если выемка руды не влияет на результаты измерений, опорную сеть можно развивать сразу по всему горизонту. На участках, где ведется непрерывная добыча руды, ставить опорные пункты нельзя. В этих случаях используют опорные пункты других (спокойных) участков.

Наиболее высокая точность наблюдений на опорной сети достигается при использовании методики отдельных приращений или 100%-ного повторения наблюдений в одинаковой последовательности в двух независимых рейсах. Для контроля точности наблюдений по невязкам внутри полигонов опорную сеть следует строить по системе трех-четырёхугольников. Качество съемки повышается, когда приращения силы тяжести на сторонах полигона получены в независимых рейсах.

Многолетний опыт гравиметрических исследований в горных выработках показывает, что для рядовой съемки наиболее рациональной является однократная методика наблюдений со 100%-ным повторением: в двух независимых рейсах одним гравиметром или в одном рейсе двумя гравиметрами. Каждый рейс должен опираться на три-четыре опорных пункта (можно на один и тот же), измерения на которых проводят через 40—50 мин равномерно во времени рейса. Наблюдения в двух независимых рейсах или двумя разными приборами исключают необходимость специальных контрольных измерений. Точность съемки оценивают по результатам повторных измерений на всех рядовых пунктах.

Если для участка работ характерны резкие изменения температуры воздуха, продолжительность рейса следует уменьшать до 0,5 ч. Наблюдения в рейсе можно начинать лишь после того, как гравиметр войдет в рабочий режим, что определяется по совпадению двух-трех разностей отсчетов на начальном и ближайшем к нему пункте. При наблюдениях гравиметр устанавливают либо на подошве выработки, либо на прочной треноге высотой 20—60 см (одинаковой для всех пунктов с разницей не больше 5—7 см). Пункты наблюдений располагают не ближе 5 м от забоя и от мест пересечения выработок. Не следует проводить измерения вблизи работающих механизмов.

### 3.6. Методика измерений вторых производных гравитационного потенциала

Практическое применение градиенто- и вариометрии в горных выработках значительно ограничивается трудоемкостью процессов измерения и обработки полученных данных. Как правило, вторые производные гравитационного потенциала измеряют только в аномальных зонах, выявленных по наблюдениям силы тяжести. Рядовые измерения выполняют непосредственно на пунктах гравиметрической съемки, что сокращает объем то-

погеодезических работ. В зависимости от характера поля его детализируют, сгущая сеть до 0,5—0,25 шага между гравиметрическими пунктами.

Наблюдения с градиентометром в горных выработках выполняются по общепринятой двухазимутальной системе. Для контроля 20% общего объема наблюдений следует проводить в четырехазимутальном цикле.

К измерениям вторых производных гравитационным вариометром предъявляются аналогичные требования. При работе с вариометром, как правило, применяется четырехазимутальная система наблюдений. При съемке как с градиентометром, так и с вариометром пункты наблюдений следует располагать на удалении от действующих механизмов и участков интенсивной добычи полезного ископаемого. Чтобы ослабить влияние рабочей выработки на измеренные значения поля, измерительную систему градиентометра или вариометра следует устанавливать в центральной части выработки. Особенно это касается выработок со сплошной крепью, когда невозможно изучить, а следовательно, и учесть гравитационное влияние рельефа их стенок. Наблюдения надо начинать и заканчивать не ближе 3—5 м от забоя горной выработки.

Для оценки точности градиенто- и вариометрической съемки выполняют контрольные измерения в объеме 10% общего количества наблюдений. При работе с градиентометром, кроме того, не реже одного раза в месяц необходимо проводить повторные наблюдения на специальном пункте для контроля положения крутильных систем прибора.

### 3.7. Топогеодезические работы

Геофизической рудничной съемке предшествуют топогеодезические работы. Они выполняются для закрепления пунктов наблюдений на местности, выноса их на отчетные планы и разрезы, а также для проведения отдельных операций на этапах обработки и интерпретации материалов. В топогеодезические работы входят: 1) разбивка профилей в горных выработках; 2) закрепление пунктов наблюдений на стенках выработок; 3) определение координат и высотных отметок пунктов наблюдений; 4) обмеры сечений горных выработок.

Профили наблюдений прокладывают на заранее определенных в проекте участках. Все пункты наблюдений закрепляют краской на стенках горных выработок. Пункты разного назначения (рядовые, контрольные, опорные) целесообразно показывать отличными друг от друга знаками. Если сеть пунктов предназначена для использования в течение длительного времени, обозначения на стенках выработок должны периодически обновляться.

При выполнении измерений следует одинаково располагать приборы по отношению к стенкам выработок или рельсовому пути (например, на равном удалении от стенок, между рельсами и т. д.). Все отступления от этого правила должны фиксироваться в полевом журнале. Если условия работ диктуют особо жесткие требования к точности установки приборов, то пункты наблюдений целесообразно закреплять специальными бетонированными площадками, которые следует периодически ремонтировать.

Для определения планового положения пунктов наблюдений каждый из них должен быть надежно увязан с ближайшими маркшейдерскими точками.

Высотные отметки пунктов наблюдений определяются по результатам нивелирной съемки, выполненной в горных выработках. На маркшейдерских выкопировках нередко указываются отметки не почвы горных выработок, а верхней кромки рельсового пути. В таких случаях необходимо измерить рулеткой превышения между ними на всех пунктах наблюдений. В силу различных причин (усадка рыхлого грунта, ремонт рельсового пути) действительное положение верхней кромки рельсового пути может не соответствовать маркшейдерским данным. В этих случаях высотные отметки пунктов наблюдений определяют, увязывая их нивелирными ходами с ближайшими реперами.

Допустимая погрешность пространственного положения пунктов наблюдений должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к точности отчетной графической документации. Средняя квадратическая погрешность высот пунктов не должна превышать 4—9 см, а координат 0,2—0,4 м. Точность топогеодезических работ оценивается в процессе контроля планово-высотной привязки и установки приборов на пунктах наблюдений. При этом объем контрольных измерений не может быть меньше 10% общего количества пунктов наблюдений.

Обмеры сечений горных выработок выполняют для расчета поправок за действие горных выработок и введения их в результаты измерений производных гравитационного потенциала. Обмеры проводят с помощью мерной выдвижной рейки и угломерного круга [В. Н. Страхов, В. М. Березкин, 1962 г.] или с помощью вертикальных пантографов. Чтобы оценить смещение отдельных сечений относительно друг друга, выполняют их привязку к линейным ориентирам, прослеживаемым по всей длине профиля наблюдений (например, к рельсу). Для этого установку обмера сечения располагают строго над выбранным ориентиром (по отвесу).

Важным топографическим материалом при выполнении гравиметрических исследований в горных выработках является абрис. Он должен включать полное описание горной выработки и положения в ней точек измерений. На абрисе должны быть показаны все боковые выработки, крупные вывалы и выступы

в стенках выработки, резкие ее искривления и т. п. Такой материал крайне необходим как при обработке измерений гравитационного поля, так и при его геологическом истолковании.

#### 4. АППАРАТУРА И РАБОТА С НЕЙ

Для выполнения гравиметрических съемок в горных выработках применяются гравиметры, градиентометры и вариометры. При помощи гравиметров измеряется ускорение силы тяжести (ускорение свободного падения)  $\Delta g$ , градиентометров — горизонтальные градиенты силы тяжести  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$ , вариометров — горизонтальные градиенты силы тяжести  $2V_{xy}$  и кривизны  $V_{\Delta}$ . Практический интерес представляют аномалии гравитационного поля порядка 0,1 мгал и первых десятков этвеш. Это предъявляет высокие технические требования к применяемой аппаратуре.

Гравиметры для подземных работ должны удовлетворять следующим требованиям.

Средняя квадратическая погрешность единичного наблюдения силы тяжести . . . . .	Не более 0,03 мгал
Диапазон измерений с перестройкой . . . . .	Не менее 80 мгал
Смещение нуля-пункта . . . . .	Не более 2 мгал/сут
Чувствительность упругой системы . . . . .	Не менее 4 мм шкалы/мгал
Температурный коэффициент в интервале температур $\pm 15^{\circ}\text{C}$ от точки полной компенсации . . . . .	Не более $0,3 \text{ мгал}/^{\circ}\text{C}$
Сохранение технических характеристик при изменении атмосферного давления . . . . .	От 500 до 760 мм рт. ст.
Нелинейность отсчетной шкалы . . . . .	Не выше 0,5% диапазона измерений без перестройки
Время становления отсчета . . . . .	Не более 3 мин
Затухание колебаний чувствительной системы . . . . .	Не более 1 мин
Устойчивая работа и сохранение параметров: в интервале температур окружающего воздуха (от точки полной компенсации) . . . . .	$\pm 15^{\circ}\text{C}$
при относительной влажности . . . . .	До 95%
Порог чувствительности упругой системы . . . . .	Не более 0,01 мгал
Изменение чувствительности при перестройке диапазона измерений . . . . .	Не выше 15% начальной
Масса . . . . .	Не более 5 кг
Высота гравиметра . . . . .	Не более 600 мм
Диаметр . . . . .	Не более 300 мм

Приведем характеристики нескольких марок отечественных гравиметров (табл. 4.1).

Основными недостатками существующих гравиметров с точки зрения их работы в подземных условиях являются:

— недостаточная герметичность корпусов и измерительных блоков;

Технические характеристики некоторых гравиметров

Гравиметры	Диапазон измерений без перестройки, мгал	Погрешность единичного измерения, мгал	Смещение нуля-пункта, мгал/сут	Масса, кг
ГАК-7, „Дельта-2“	До 100	0,06	2,0	5—7,5
ГАК-7Т	80	0,06	2,0	7,5
ГШ-1	25	0,02—0,03	2,0	0,7

— слабая антикоррозийная стойкость покрытий внешних и внутренних узлов и деталей;

— выполнение схемы электропитания без учета взрыво- и пожароопасных условий;

— недостаточный диапазон измерений без перестройки (у гравиметров ГШ-1).

Градиентометры и вариометры в настоящее время не изготавливаются ни в одной стране мира. В прошлые годы было создано несколько типов этих приборов: вариометры Этвеша Е-60 (Венгрия), Швейдара Z-40 (Германия, 30-е годы), S-20 и ВГ-1 (СССР), градиентометр ГРБМ-2 (СССР). Все они с достаточной точностью способны измерять аномальные значения вторых производных гравитационного потенциала, но существенно различаются между собой по времени успокоения крутильной системы в азимуте (табл. 4.2).

Таблица 4.2

Некоторые характеристики вариометров и градиентометра

Параметры	Вариометры				Градиентометр ГРБМ-2
	Е-60	Z-40	S-20	ВГ-1	
Погрешность единичного измерения, Э	1—3	1—3	2—4	2—4	3—6
Время успокоения в азимуте, мин	20	30	20	15	2,5—3

Измерения с вариометром выполняются в трех, четырех, пяти азимутах, и время наблюдений составляет 1 ч и более. Это (помимо других факторов) существенно ограничивает широкое использование их в горных выработках. Наиболее подходящими для работы в подземных условиях являются вариометры S-20 и ВГ-1.

При выборе прибора согласно инструкции по гравиметрической разведке (1975 г.) следует руководствоваться следующими требованиями.

Время успокоения крутильных систем . . . . .	Не более 3 мин
Отклонение от эталонных значений . . . . .	Не выше 2 Э
Отклонение полного вектора каждой системы от эталонного направления . . . . .	Не более 2°
Влияние наклона прибора на отсчет . . . . .	Не выше 1 деления шкалы на 1 деление уровня
Средняя квадратическая погрешность измерения по каждой системе на пункте . . . . .	Не более 5—6 Э
Прилипание коромысел . . . . .	Не более 5%

Перед началом полевых работ вся гравиметрическая измерительная аппаратура должна быть подвергнута тщательному осмотру, поверкам, а при необходимости и регулировкам.

#### 4.1. Регулировка и эталонирование гравиметров

Здесь будут рассмотрены регулировки и эталонирование гравиметра типа ГШ-1 и ему подобных.

4.1.1 Регулировка уровней

При нулевом положении пузырьков уровней угол наклона гравиметра должен быть равен нулю. Известно, что изменение отсчетов гравиметра в зависимости от его наклона описывается параболой, вершина которой отвечает нулевому положению пузырьков уровней. Этим свойством пользуются при проверке и регулировке уровней на минимум чувствительности к наклону.

Установив гравиметр на прочное основание (твердый грунт, цементный пол и т. п.), выводят пузырьки уровней в нулевое положение и берут отсчет по микрометру  $n_0$ . Установочными винтами наклоняют гравиметр на одно деление продольного уровня, сохраняя при этом поперечный в нулевом положении. Если отсчет по микрометру  $n_1$  становится меньше, чем  $n_0$ , сдвигают пузырек продольного уровня на одно деление от нуля в противоположную сторону. Если новый отсчет по микрометру  $n_2$  будет примерно равен  $n_1$ , то продольный уровень установлен правильно. При  $n_1 < n_0 < n_2$ , или  $n_1 > n_0 > n_2$ , или  $n_1 < n_0 > n_2$ , но  $n_1 \gg n_2$  или  $n_1 \ll n_2$  следует путем наклона гравиметра в направлении продольного уровня найти максимальный отсчет по микрометру и в этом положении при помощи регулировочных винтов вывести пузырек на нуль. После этого надо проверить правильность установки уровня по описанной методике.

Регулировка поперечного уровня выполняется аналогично. Поскольку установка уровней нарушается при резком изменении температуры, регулировку их следует выполнять в тем-

пературных условиях, близких к условиям полевых работ. В процессе съемки проверку уровней необходимо проводить ежедневно.

#### 4.1.2 Определение цены деления гравиметра

(рис. 4.1, а). Обычно для подземных наблюдений силы тяжести в пределах одного разведочного горизонта используется небольшой участок диапазона измерений. Поэтому целесообразно

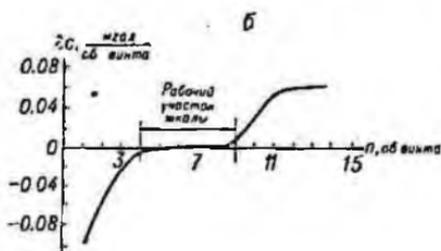
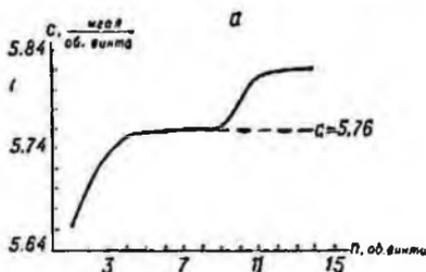


Рис. 4.1. Графики определения цены деления гравиметра ГШ-1 (а) и поправок к цене деления за нелинейность шкалы (б).

$$c = (g_1 - g_2)/(n_1 - n_2). \quad (4.1)$$

Чтобы найти цену деления с высокой точностью, измерения  $g$  выполняют на нескольких пунктах. Среднее значение

$$\bar{c} = [1/(k-1)] \sum_{i=1}^k (g_i - g_{i+1}) (n_i - n_{i+1}), \quad (4.2)$$

где  $k$  — количество определений.

Эта методика применима для гравиметров с линейной шкалой. В противном случае для разных участков шкалы следует вводить поправки [К. В. Веселов, И. У. Сагитов, 1968 г.].

Способ наклона. Определение цены деления гравиметра этим способом основано на зависимости изменения измеренных значений силы тяжести от угла  $\alpha$  наклона гравиметра:

$$c = g\alpha^2 [2(n_0 - n_1)], \quad (4.3)$$

где  $g$  — известное значение силы тяжести в точке эталонирования;  $n_0$  и  $n_1$  — отсчет по микрометру соответственно при горизонтальном положении гравиметра и при наклоне на угол  $\alpha$ .

Точность определения цены деления зависит главным образом от угла наклона и точности его измерения. Относительная погрешность определения  $c$  уменьшается с увеличением угла наклона:

$$\delta \Delta g / \Delta g = 2\delta\alpha, \alpha, \quad (4.4)$$

где  $\delta \Delta g$  и  $\delta \alpha$  — погрешность определения соответственно значения силы тяжести  $\Delta g$  и угла наклона гравиметра  $\alpha$ ;  $\Delta g$  — изменение показания гравиметра, обусловленное его наклоном на угол  $\alpha$ .

У кварцевых гравиметров диапазон измерения силы тяжести составляет 100—150 мгал, поэтому угол наклона не может быть большим. Для повышения точности цены деления следует уменьшить погрешность измерения угла наклона. Определить наклон гравиметра можно на экзаменаторе, оптическим теодолитом, на установочной плите, а также установочными винтами самого прибора.

Наиболее качественно цена деления гравиметров определяется на экзаменаторе. Изменение угла наклона  $\alpha$  экзаменатора зависит от перемещения подъемного винта и может быть выражено следующим отношением:

$$\alpha = dp/D, \quad (4.5)$$

где  $d$  — шаг винта;  $p$  — количество оборотов винта;  $D$  — база экзаменатора.

Учитывая формулу (4.3), можно записать

$$c = gd^2 p^2 / [2D^2 (n_0 - n_1)]. \quad (4.6)$$

Параметры экзаменатора (шаг подъемного винта и база) приводятся в паспорте. Для уточнения базы надо уравнивать высоту подъемных винтов и установить экзаменатор на листе бумаги. Через центры отпечатков винтов следует провести линии, образующие равнобедренный треугольник, высота которого будет базой экзаменатора. Если шаг измерительного винта неизвестен, то проталонировать экзаменатор можно точным угломерным инструментом.

Относительная точность измерения числа оборотов винта экзаменатора должна быть в 2 раза выше, чем цены деления. Чтобы повысить точность эталонирования на экзаменаторе, В. Т. Бу-

данов и Ю. С. Евдокимов [66] предложили использовать для определения угла наклона оптический теодолит. При этом окулярную сетку нитей, отраженную от укрепленного на экзаменаторе зеркала, совмещают с ее изображением. Основной источник погрешностей при эталонировании — непараллельность осей вращения экзаменатора и трубы теодолита. Относительная погрешность определения цены деления составляет  $(1 \div 2) \cdot 10^{-3}$  при предельном угле наклона до  $1^\circ$ .

Часто цену деления гравиметра находят по приближенной формуле

$$c = g (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) \cdot [2 (\Delta n_1 + \Delta n_2)], \quad (4.7)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — углы наклона экзаменатора в противоположные стороны;  $\Delta n_1$  и  $\Delta n_2$  — соответствующие разности отсчетов гравиметра.

Эта формула исключает влияние начального угла наклона гравиметра из-за неточно установленного уровня, параллельного нитям подвеса.

В отличие от экзаменатора установочная плита дает возможность поворачивать гравиметр на небольшой угол около вертикальной оси и тем самым менять его ориентировку по азимуту, что позволяет определить цену деления при разной ориентировке прибора.

Измерение угла наклона гравиметра установочными винтами и соответственно определение цены деления выполняется совершенно так же, как и на экзаменаторе: по шагу и базе установочных винтов, приведенных в паспорте гравиметра. Поскольку база установочных винтов значительно меньше базы экзаменатора, то и точность определения угла наклона этим способом более грубая, им можно воспользоваться только для приближенной оценки цены деления.

В полевых условиях гравиметры могут быть проэталонированы в процессе измерений  $\Delta g$  на пунктах эталонировочного профиля. Твердые значения силы тяжести на этих пунктах определяются с помощью проверенных в работе и уже проэталонированных приборов. Пункты эталонировочного профиля целесообразно располагать таким образом, чтобы перепады силы тяжести на них были одного порядка и позволяли находить цену деления приборов на нескольких отрезках отсчетной шкалы в одном независимом рейсе. Например, для приборов ГШ-1 перепад силы тяжести на пунктах эталонировочного профиля должен составлять около 12—15 мгал.

При высокоточных гравиметрических съемках необходимо выяснить зависимость цены деления  $c$  от температуры  $t$ . Для этого определяют цену деления при нескольких температурах (не менее 10 значений) и строят график  $c(t)$ . По нему составляют таблицу изменения цены деления в зависимости от изменения температуры.

#### 4.1.3

##### Определение температурного коэффициента гравиметра

Изменение суток на улице или в закрытых помещениях при наличии термокамеры. В первом случае, установив гравиметр на твердое основание в горизонтальное положение, через каждые 10—15 мин берут отсчет по микрометру и измеряют температуру. Во втором случае, также приведя гравиметр в горизонтальное положение, повышают или понижают температуру в камере. Обычно в выработках температура не превышает  $22^{\circ}\text{C}$ , поэтому максимальная температура в камере должна быть примерно такая же. Градиент изменения температуры следует поддерживать близким к естественному. На основании испытаний строят зависимость  $\Delta g = f(t)$ . Полученное по кривой в любом интервале температур отношение  $\Delta g/\Delta t$  и есть температурный коэффициент.

#### 4.1.4

##### Регулировка диапазона

Измерения силы тяжести должны выполняться в центральной части диапазона. Если отсчеты приходится на его крайние части, а тем более если изменение силы тяжести уже не может быть скомпенсировано в пределах диапазона, его необходимо перестроить. При этом поступают следующим образом.

1. Вынимают текстолитовую трубку, закрывающую доступ к диапазонной пружине, и в освободившееся отверстие вставляют диапазонный ключ.

2. Счетчик оборотов устанавливают на середину.

3. При изменении диапазона в сторону увеличения силы тяжести внешний стержень диапазонного ключа поворачивают против часовой стрелки, а внутренний — по часовой стрелке до упора. Операцию продолжают до тех пор, пока световой индекс не совместится с центральным штрихом шкалы.

4. При изменении диапазона в сторону уменьшения силы тяжести повороты стержней диапазонного ключа выполняют в противоположные указанным выше стороны.

5. Во всех случаях в конце перестройки диапазона внешний стержень поворачивают по часовой стрелке до упора.

#### 4.1.5

##### Проверка оптико-осветительной системы

Гравиметры, предназначенные для съемки в горных выработках, должны иметь хорошо освещенную приборную панель, чтобы можно было снять уверенный отсчет по микрометру, термометру, видеть пузырьки уровней и т. п. Проверка оптико-осветительной системы гравиметра выполняется регулярно в начале рабочей смены. При этом оператор должен обеспечить: 1) соответствие напряжения на клем-

## Неисправности гравиметра, устраняемые оператором

Неисправность	Причина	Способ устранения
Световой индекс не выходит в поле зрения окуляра, оставаясь в крайнем положении	Уровни прибора не выведены в правильное положение	Установить прибор в строго горизонтальное положение
	Маятник прибора прилип к одному из ограничителей	Мягким пощелкиванием по корпусу прибора вывести световой индекс в поле зрения окуляра
	Резкий скачок нуля-пункта прибора	Вернуться на предыдущий пункт наблюдения и повторить измерение силы тяжести. Если был скачок нуля-пункта, световой индекс не выйдет в поле зрения окуляра; рейс надо прекратить, замкнув его на ближайшей опорной точке
Шкала и световой индекс просматриваются нечетко	Расстроена фокусировка окуляра микроскопа	Отрегулировать фокусное расстояние окуляра, поворачивая его верхнюю часть
	На окуляр микроскопа попала влага	Аккуратно протереть окуляр чистой сухой тряпкой
Шкала и световой индекс не просматриваются	Перегорела электрическая лампочка осветителя	Сменить лампочку. Проверить напряжение на клеммах аккумулятора
	Разъединены контакты на клеммах аккумулятора	Закрепить контакты на клеммах аккумулятора
	На окуляр микроскопа попала грязь	Промыть стекло окуляра и протереть его чистой сухой тряпкой

мах аккумулятора параметрам установленных в осветителях ламп; 2) четкость изображения светового индекса (путем изменения фокусного расстояния окуляра, в процессе съемки делать это не рекомендуется); 3) нормальную освещенность шкалы; если при достаточном напряжении аккумулятора шкала прибора остается затемненной, следует сменить лампочку осветителя.

Для замены лампочки надо вывинтить стопорный винт, крепящий патрон лампочки; вынув патрон из осветителя, вывертывают из него лампочку, вставляют другую и возвращают патрон в осветитель. Наблюдая в окуляр, проверяют, достаточно ли освещен световой штрих. Если освещение слабое, поворачивают патрон в осветителе так, чтобы получить наилучшее освещение штриха, и закрепляют патрон стопорным винтом.

При нарушении фокусировки оптической системы освобождают коммутатор, отвинтив стопорное кольцо трубы. Трубку коллиматора поднимают или опускают плавно до тех пор, пока световой штрих не получит четкое изображение, после чего трубку закрепляют стопорным винтом.

#### 4.1.6

Мелкие  
неисправности  
гравиметра  
и их устранение

Гравиметр — сложный и дорогой прибор, требующий аккуратного обращения. При отказах прибора категорически запрещается вскрывать его на месте. Неисправный прибор должен быть доставлен для ремонта на завод-изготовитель или в ближайшую мастерскую и передан опытным мастерам-гравиметристам. Вместе с тем гравиметр — надежный в работе прибор, при правильном обращении с ним выход прибора из строя практически исключается. Оператор обязан уметь определять и устранять мелкие неисправности (табл. 4.3), что не требует вскрытия прибора.

## 4.2. Регулировка гравитационных вариометров

Перед регулировкой вариометров проводят общий осмотр прибора и проверку механизмов, особенно контактного, ведущего и передаточного, а также арретиров; чистят и смазывают трущиеся части; детали оптической системы протирают чистой замшей. Обнаруженные механические дефекты должны быть устранены опытным механиком.

Регулировка вариометра включает: установку уровней, регулировку крутильных весов и оптической системы, установку коромысел в оптимальное положение. Регулировка крутильных весов состоит из операций навешивания крутильных нитей, уравновешивания коромысел по высоте и их центровки, а также раскручивания крутильных нитей. Регулировка оптической системы включает вывод прямого и обратного луча, бликов от постоянного и температурного зеркал, блика коромысла, а также фокусировку всех бликов. Установка коромысел в оптималь-

ное положение должна максимально уменьшить влияние температуры на показания прибора.

Методика всех перечисленных регулировок подробно описана в инструкциях, прилагаемых к прибору, и в литературе [54]. Учитывая эпизодическое применение вариометров в практике, а также то обстоятельство, что все регулировки должны выполняться только специалистами-механиками в оборудованных мастерских или на заводе, мы не приводим описания методики регулировок.

### 4.3. Регулировка градиентометров

В связи со сложным устройством градиентометров регулировка их должна производиться в лабораториях, оснащенных специальной аппаратурой. Предусматривается регулировка механической части прибора, крутильной и оптической систем. Регулировка механической части заключается в проверке исправности колонки градиентометра (плавности вращения столика), регулировке шарика для фиксации азимутального положения прибора, проверке горизонтальности столика и устранении люфта.

Вследствие раскручивания нити и механических воздействий на прибор положение крутильной системы в его корпусе нарушается, что обуславливает неудовлетворительную сходимость по рычагам. Иногда наблюдается прилипание одного из рычагов к стенкам корпуса. Регулировку крутильной системы в лабораторных условиях выполняют при помощи четырех специальных экранов, расположенных через  $90^\circ$ , на шкалах которых фиксируется положение рычагов. Устанавливают рычаги попарно параллельно и взаимно перпендикулярно, а также по азимуту.

Регулировка оптической системы включает вывод бликов рычагов в поле зрения и обеспечение их четкости. Остальные узлы оптики настраивать приходится редко; при необходимости это должен делать опытный специалист.

### 4.4. Транспортировка гравиметрической аппаратуры и работа с ней

#### 4.4.1 Транспортировка аппаратуры

В связи с высокой чувствительностью приборов условия транспортировки гравиметров, градиентометров и вариометров к стволам шахт, в подъемных клетях и по горным выработкам имеют важное значение. Тряска существенно влияет на часовые, контактные и ведущие механизмы, оптические узлы и т. д. Особенно сильно тряска сказывается на гравиметрах. При транспортировке вся аппаратура должна находиться в чехлах и ящиках с мягкой обивкой. Если расстояние небольшое, приборы в чехлах следует установить на мягкой подстилке (войлок, поролон). При этом их необходимо придержи-

живать, оберегая от толчков, ударов и т. д. В шахту аппаратура спускается оператором и рабочими в клеть. Доставив на соответствующий горизонт, приборы освобождают от чехлов и дают им возможность войти в режим.

Переносит гравиметр от пункта к пункту оператор. Если в выработке горные работы не производятся и движения транспорта нет, впереди оператора на расстоянии 5—7 м идет рабочий (техник-вычислитель), который следит за состоянием пути и в случае необходимости предупреждает оператора. Если горные работы выполняются и движение транспорта есть, оператора сопровождают двое рабочих, один из которых находится впереди, а второй сзади на расстоянии 10—15 м. У обоих рабочих должны быть предупредительные знаки для остановки транспорта и предупреждения оператора.

Гравитационные вариометры в горных выработках переносит вручную бригада, состоящая из оператора и двух рабочих. При наличии движения электровозов бригада укомплектовывается третьим рабочим, который идет сзади оператора и следит за транспортом. Градиентометр переносит оператор и один рабочий. При необходимости второй рабочий следит за безопасностью передвижения. Он идет за оператором на расстоянии 10—15 м.

#### 4.4.2 Работа с гравиметром

Наблюдения с гравиметром в горных выработках можно начинать через 24 ч после спуска его на рабочий горизонт. В течение всего времени съемки на данном горизонте гравиметр должен оставаться на нем. В нерабочее время его следует хранить в сухом и надежном месте, при этом прибор должен быть установлен по уровням, а маятник выведен в исходное положение.

При продолжительных колебаниях системы гравиметра в процессе его транспортировки к участку съемки образуются электрические заряды, для стекания которых требуется определенное время (время становления отсчета, стабилизации хода нуля). Для разных типов приборов это время колеблется от 10 до 30 мин. Вхождение прибора в рабочий режим определяется по совпадению двух-трех разностей отсчетов, полученных на двух соседних пунктах профиля. В период между этими наблюдениями гравиметр носят с той же скоростью и в тех же условиях, что и в самом рейсе. Время становления отсчета необходимо выдерживать перед началом работы, а также после перехода с одного рабочего участка на другой, если расстояние между ними превышает шаг наблюдений в 10—15 раз.

После стабилизации хода нуля гравиметра приступают к съемке.

1. Гравиметр устанавливают на прочном основании. Это может быть непосредственно почва выработки или разного рода подставки: металлические листы, уложенные на рельсы; треноги.

Треноги необходимы в загрязненных и обводненных выработках; они должны быть устойчивыми, иметь постоянную высоту, быть надежными и удобными для установки на них гравиметра.

2. Включают подсветку прибора. Для этого могут использоваться батареи и аккумуляторы различных типов. Наиболее удобен шахтный аккумулятор ЗШКН-10, подвешиваемый оператором на пояском ремне.

3. С помощью винтов и уровней устанавливают прибор строго горизонтально.

4. Наблюдая в окуляр за положением светового индекса, плавным поворотом микрометрического винта совмещают индекс с центральным штрихом шкалы и берут отсчет. Последний поворот микрометра выполняют только по часовой стрелке. Измерение повторяют несколько раз, затем по серии находят средний отсчет.

Для стабильного режима работы прибора скорость передвижения оператора от пункта к пункту и время измерения на нем должны быть постоянными. Если перегорела лампочка, то после ее замены оператор обязан повторить измерение на том же пункте. Если возникает необходимость перестроить диапазон, то рейс следует замкнуть на ближайшей опорной точке, изменить диапазон и выдержать время становления отсчета.

Измерения с гравиметром выполняет бригада из двух человек: техник-оператор и техник-вычислитель. Оператор проводит наблюдения с гравиметром, несет ответственность за качество полевых измерений и ведение полевой документации, отвечает за сохранность гравиметра и другой аппаратуры, выполняет профилактический ремонт и периодические поверки аппаратуры. Вычислитель записывает показания прибора в полевой журнал, выполняет необходимые вычисления, следит за движением транспорта во время снятия оператором показаний гравиметра, освещает в затемненных выработках дорогу оператору и т. д.

Записи в полевом журнале делают карандашом четко и аккуратно. Исправления цифра по цифре и подчистка запрещаются. Неправильную цифру зачеркивают одной линией, над ней записывают правильную. Журналы хранят в водонепроницаемом материале. За состоянием прибора необходимо следить ежедневно, по окончании работы насухо протирать корпус и все наружные части прибора, систематически смазывать подъемные винты, выполнять поверку уровней.

#### 4.4.3 Работа с вариометром

Вариометр (рассматриваются S-20 и ВГ-1) устанавливают на площадку, предварительно очищенную от кусков породы и выровненную так, чтобы диск занял устойчивое положение. Если измерения ведут в горных выработках, имеющих железнодорожное полотно, диск прибора располагают между рельсами. Приблизительно нивелируют прибор,

отжимают азимутальный круг и ставят ведущий механизм в рабочее положение.

Под действием пружины ведущего механизма вариометр начинает вращаться вокруг оси и, встретившись с первым азимутальным винтом, останавливается. Поворачивая прибор по часовой стрелке, оператор ориентирует его на электрический фонарь, находящийся в конце выработки. В искривленных выработках вариометр надо ориентировать вдоль прямолинейных участков, устанавливая фонарь в начале поворота. Точная ориентировка прибора достигается с помощью диоптра; использовать для этого буссоль можно при отсутствии в горных выработках магнитных пород и близких металлических предметов.

После ориентировки азимутальный винт зажимают, ведущий механизм снимают с рабочего хода, заводят контактный и ведущий механизмы, вставляют кассету и вынимают из нее крышку. Затем оператор включает питание, нивелирует прибор, отжимает арретиры, ставит ведущий механизм в рабочее положение, а прибор в последний азимут; поворачивает стрелку контактного механизма до замыкания электрической цепи и наблюдает в глазок появление света от обеих лампочек. После этого медленно поворачивает стрелку часового механизма до автоматического включения ведущего механизма, который вращает прибор и ставит его в нулевой азимут. Оператор делает запись в журнале о пуске прибора.

Выждав 1 мин после окончания экспозиции, оператор подходит к прибору и проверяет, в каком азимуте он находится. Арретирует его, отключает питание, снимает ведущий механизм с рабочего положения и закрывает кассету. Если записывается на фотопластинку только одна точка, то кассета вынимается. Прибор переносят на новый, заранее подготовленный пункт. После пуска вариометра оператор и старший рабочий осматривают следующий пункт, измеряют сечение горной выработки и проявляют фотопластинку. В случае брака оператор обязан установить его причину, что может быть выяснено по характеру изображения на фотопластинке.

1. Пластика без записи: отсутствовал свет (испорчена проводка или вилка штепселя, нет контакта с аккумулятором), остановились контактные часы, недостаточное время проявления, плохой проявитель.

2. Нет записи одного из коромысел и постоянной: перегорела лампочка, испорчен один из реостатов, зажат арретир, оборвана нить.

3. Нет записи температуры: возможны выходы изображения за пределы фотопластинки.

4. Нет записи в отдельных азимутах: прилипание коромысла (если прилипания частые, коромысло установлено неправильно).

5. Неодинаковые расстояния между бликами: сбита нивелировка прибора по высоте.



и при полном успокоении систем, как и раньше, берет отсчеты в новом азимуте. При наблюдениях в четырехазимутальной системе отсчеты снимают попарно: 0, 180° и 90, 270°.

После взятия отсчетов оператор, не арретируя прибор, ждет результаты вычислений по всем шкалам. Если расхождения между рычагами по каждой составляющей превышают 20 Э, то повторяют последние наблюдения, а затем весь цикл до получения допустимых разностей. По окончании наблюдения оператор арретирует систему и отключает аккумулятор.

Если работы ведут в две смены и более, приемку и передачу выполняют непосредственно на профиле. Работа новой смены начинается с повторения наблюдения на последнем пункте, при этом измерения следует проводить в азимутах, противоположных выполненным предыдущей сменой.

#### 4.5. Вспомогательное оборудование и снаряжение

Для успешного выполнения подземных гравиразведочных работ необходимо иметь вспомогательное оборудование и снаряжение: треногу для установки гравиметра, аккумуляторы или батареи для обеспечения осветительной системы приборов и шахтерских лампочек членов бригады, ключи и приспособления для регулировок и поверок приборов, установочную плиту или экзаменатор для определения цены деления гравиметра, мерную ленту для разбивки профиля наблюдений, нивелир для измерения превышений пунктов, теодолит для плановой привязки профиля в пределах горизонта. Все перечисленное оборудование достаточно полно описано в литературе и прилагаемых к нему инструкциях,

При подземных гравиметрических съемках ведется систематическое изучение плотности горных пород в пределах участка работ и всего месторождения. При лабораторных определениях плотности пользуются денситометром Самсонова или техническими весами, а в естественных условиях — гамма-гамма-методом с применением аппаратуры РСР-3.

Денситометр Самсонова. Прибор состоит из коромысла со стрелкой, шкалы, стойки и столика. Шкала проградуирована в значениях плотности. Вначале образец взвешивают в воздухе: с помощью разновесов добиваются, чтобы стрелка коромысла заняла нулевое положение. Затем образец погружают в воду, при этом стрелка отклоняется и показывает соответствующее значение плотности. Работу денситометра необходимо систематически контролировать, проверяя результаты измерениями на технических весах.

Аппаратура РСР-3. В настоящее время эта серийная аппаратура [61, 62] широко применяется на горнодобывающих предприятиях для определения содержания в рудах полезного компонента. Аппаратура РСР-3 имеет ряд технических преимуществ

(меньшие размеры, масса; ближе к линейным характеристики по сравнению с серийными плотномерами, например УГГП-1).

Измерения проводятся как в 2л-геометрии (стенки горных выработок), так и в 4л-геометрии (скважины). Источником гамма-излучения служит изотоп цезий-137 с энергией гамма-квантов 600 кэВ; активность источника  $(1 \div 2) \cdot 10^{-4}$  г-экв радия.

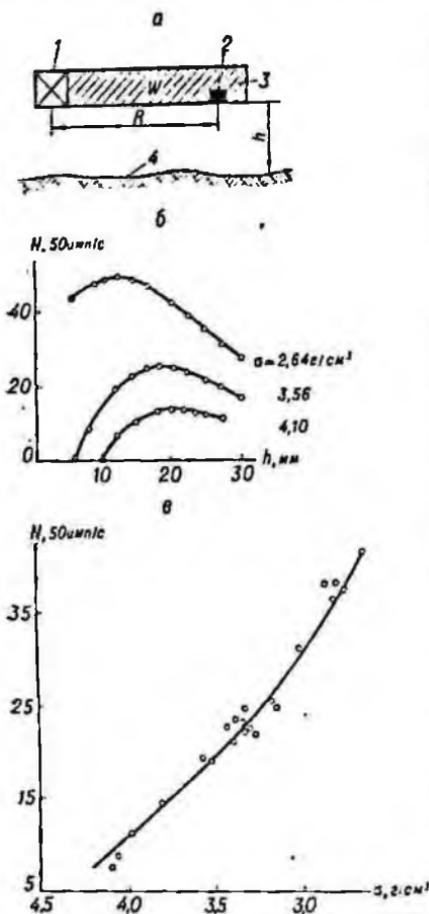


Рис. 4.2. К определению плотности гамма-гамма-методом.

а — принципиальная схема зондового устройства.

1 — детектор NaI(Tl) размером 25×30 мм; 2 — источник гамма-излучения (цезий-137); 3 — защитный экран из вольфрама; 4 — исследуемая поверхность; R=70 мм.

б — влияние воздушного зазора h на показания прибора РСР-3 при разной плотности горных пород; в — график эталонирования РСР-3.

Опробование стенок горных выработок ведется настенным датчиком с зондовым устройством, изготовленным из вольфрама (рис. 4.2, а), что обеспечивает защиту как детектора, так и оператора от прямого облучения. Для подавления мягкой части излучения применяется фильтр из железа толщиной 2 мм, установленный на детекторе.

Эталонирование РСР-3 выполняется на монолитных образцах горных пород и руд. Размеры штафа должны обеспечивать слой насыщения в трех измерениях: толщина не менее 15 см, площадь не менее 25×25 см. Эталоны следует подбирать так, чтобы их плотность менялась ступенями через 0,2—0,3 г/см³, а в эталонных скважинах надо подсекать наиболее характерные для месторождения разновидности горных пород и руд. Для месторождений богатых железных руд обычно готовят 25—30 эталонов в диапазоне плотности 2—5 г/см³. Плотность эталонов опреде-

ляют весовым способом по трем-четырем образцам, сколотым от каждого бута.

Перед эталонированием снимается зависимость скорости сче-та  $N$  от ширины воздушного зазора  $h$  (рис. 4.2, б). На участке кривой, где  $N(h) = \text{const}$ , выбирают в средней части рабочую точку. Затем, установив постоянную времени, измеряют все эталонные пробы. Измерения выполняют дважды: при прямом и обратном ходе. При каждом измерении берут один отсчет. Время эталонирования на 30 образцах составляет 1—1,5 ч. Через каждые 30 мин с помощью контрольных эталонов проверяют стабильность аппаратуры. Результаты измерений заносят в журнал эталонирования; строят график зависимости скорости сче-та от плотности (рис. 4.2, в) и составляют пересчетную таблицу, которая и используется при интерпретации результатов рядовых измерений. Эталонирование проводится не реже одного раза в месяц, а также после каждого ремонта аппаратуры. По окончании эталонирования выполняют привязку аппаратуры в двух, по возможности крайних, точках рабочего диапазона к контрольно-калибровочному устройству (ККУ), представляющему собой набор текстолитовых пластин, обеспечивающих насыщение в трех измерениях.

Опробование горных выработок на плотность выполняется бригадой в составе оператора и рабочего. Непосредственно перед измерениями осуществляют привязку начальной точки измерений к маркшейдерским точкам, разбивку пунктов наблюдений по намеченной геологом линии опробования и настройку аппаратуры с помощью ККУ. Компенсатором фона устанавливают показание прибора при одном из положений ККУ. Если показание при втором положении ККУ отличается более чем на  $0,05 \text{ г/см}^3$  (в эквиваленте плотности) от зафиксированного в процессе эталонирования, то необходимо устранить неисправность аппаратуры и вновь ее проэталонировать.

Оптимальный шаг измерений равен 20—25 см. Прибор устанавливают вкрест слоистости пород как можно плотнее к стенке. При резкой дифференциации пород, особенно по вертикали, целесообразно проводить площадные измерения. На каждой точке берут один отсчет; время измерений на точке 15—20 с; производительность 100—150 м в смену. Измерения обрабатывают непосредственно по окончании опробования, правильность результатов проверяют в лабораторных условиях.

**Измерение сечений горных выработок.** Для этой операции необходимо иметь мерную выдвижную рейку и угломерный круг. Такое устройство состоит из алюминиевого круга, двух измерительных реек длиной 2,5 и 3,5 м и треноги. Алюминиевый круг проградуирован через  $22,5^\circ$ . К нему прикреплен желоб, по которому перемещается измерительная рейка с сантиметровыми делениями. Круг с рейкой укреплен на треноге. Перед работой всю установку строго нивелируют.

Сечение выработки измеряют в такой последовательности: мерный круг устанавливают так, чтобы его ось совпала с пунк-

том наблюдения; затем через каждые 22,5° по 16 лучам находят расстояния от центра круга до стенок, кровли и подошвы выработки (при необходимости количество лучей может быть увеличено). Высота центра круга над подошвой выработки должна составлять 70 см при измерениях с градиентометром и 90 см при измерениях с вариометром. Измеренные расстояния записывают в полевой журнал и строят на кальке сечения выработки, для чего пользуются лучевыми диаграммами.

Были попытки создать для измерения сечений горных выработок специальный вертикальный пантограф (В. А. Казинский, 1959 г.; Н. Р. Бурьян, 1970 г.). Макеты таких пантографов оказались вполне работоспособными: они позволяют измерить и одновременно построить в заданном масштабе полный контур сечения выработки.

## 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Целью обработки результатов подземных наблюдений гравитационного поля является получение аномальных значений, вызванных интересующими нас геологическими неоднородностями. На измеренные значения поля существенное влияние оказывают как общезвестные факторы, так и специфические, характерные только для подземных условий. К первым можно отнести нестабильность работы аппаратуры, температуру окружающей среды, рельеф дневной поверхности, лунно-солнечное притяжение; ко вторым — влияния рабочих (в которых ведутся наблюдения) и прилегающих к ним выработок, пустот (естественных и образовавшихся в результате эксплуатации месторождений), промежуточного слоя и др. Чтобы получить «чистые» аномалии поля, принадлежащие интересующим нас объектам, следует путем введения поправок исключить влияние всех осложняющих факторов.

### 5.1. Обработка измерений с гравиметрами

Гравиметровые наблюдения обрабатывают в процессе съемки в две руки, не отставая от измерений на профиле; в результате должны быть вычислены аномальные значения силы тяжести. Анализируя наблюденные значения поля, руководитель работы в случае необходимости дает указание оператору на выполнение дополнительного контроля, повторных измерений ряда пунктов или звеньев и т. д.

Процесс обработки начинается с вычисления наблюденных значений поля на опорных пунктах участка. При стабильном температурном режиме в шахте и небольшой продолжительностью

сти рейсов (до 1 ч) поправки за температуру и лунно-солнечные притяжения в измеренные значения силы тяжести на опорных пунктах отдельно не вводят, они учитываются совместно с поправкой за смещение нуль-пункта. Эту поправку вычисляют по результатам повторных измерений на опорных пунктах или на каркасных точках, на которые навешиваются звенья опорной сети. Аналогичную операцию выполняют и в случае нестабильной температуры в шахте, но при этом продолжительность рейсов сокращают до 30—40 мин. После введения поправки за смещение нуль-пункта вычисляют приращения силы тяжести между соответствующими опорными пунктами. По независимым значениям приращений одной и той же связи находят среднее арифметическое значение, которое в дальнейшем используют при уравнивании опорной сети.

Все связи опорной сети на одном горизонте объединяют в замкнутые полигоны и для каждого из них вычисляют невязку. Распределение невязок выполняют по способу полигонов или узлов [54]. Если полигоны создать невозможно, то увязку пунктов проводят способом последовательных приближений [67].

После обработки опорной сети в каждое наблюдение на рядовом гравиметрическом пункте совершенно аналогично вводят поправку за смещение нуль-пункта. Эта поправка автоматически учитывает влияние температуры и лунно-солнечных вариаций. При однократной методике наблюдений график смещения нуль-пункта строят по результатам измерений на опорных пунктах в каждом звене. При методике с повторением учитывают и повторные измерения на рядовых точках. Приведя значения на рядовых пунктах к опорной сети, по наблюдаемым значениям силы тяжести  $g_n$  вычисляют аномальные  $g_a$ .

При подземных гравиметрических исследованиях, как правило, аномалии определяют в редукции Буге. Это дает возможность совместного анализа поля, полученного в разных выработках одного горизонта, на разных горизонтах и на дневной поверхности. Аномалия

$$g_a = g_n - \gamma_n - \delta g_c + \delta g_p + \delta g, \quad (5.1)$$

где  $\gamma_n$  — нормальное значение силы тяжести;  $\delta g_c$ ,  $\delta g_p$  и  $\delta g$  — поправки за влияние соответственно промежуточного слоя, рельефа дневной поверхности и других осложняющих факторов (горных выработок, отработанного пространства и др.).

Таким образом, аномальное значение поля равно наблюдаемому с учетом разного рода поправок.

При изложении методики введения поправок будем пользоваться левой системой координат (рис. 5.1).

Рассмотрим вначале поправки за нормальное гравитационное поле и промежуточный слой. Положим, что измерение силы тяжести выполняется в точке  $A$  (рис. 5.1,  $a$ ). Влияние однородных масс, расположенных ниже уровня наблюдения, после уче-



Нормальное гравитационное поле Земли на уровне моря следует вычислять по формуле [60]:

$$\gamma_0 = 978,016 (1 + 0,005302 \sin^2 \varphi - 0,000007 \sin^2 2\varphi), \quad (5.3)$$

где  $\varphi$  — широта пункта определения силы тяжести.

Влияние слоя между уровнем наблюдения и плоскостью относимости

$$\delta g_c = 0,0419 \sigma H_0 = 0,0419 \sigma (H - h), \quad (5.4)$$

где  $h$  — абсолютная отметка (со своим знаком) плоскости относимости.

Учитывая формулы (5.2) и (5.4), выражение (5.1) можно переписать в виде

$$g_a = g_n - \gamma_0 - 0,0838 \sigma H + 0,3086 H + \\ + 0,0419 \sigma h + \delta g_p + \delta g. \quad (5.5)$$

Величину  $(-0,0838 \sigma H + 0,3086 H + 0,0419 \sigma h) = \delta g_B$  называют поправкой Буге, отсюда

$$g_a = g_n - \gamma_0 + \delta g_B + \delta g_p + \delta g. \quad (5.6)$$

Таким образом, введение поправок за нормальное поле и промежуточный слой сводится к учету нормального поля  $\gamma_0$  в проекции пункта наблюдения на уровень моря и поправки Буге  $\delta g_B$ . Аномалии Буге следует вычислять с постоянной, общепринятой для верхних слоев земной коры, плотностью промежуточного слоя. Как показали исследования в пределах Балтийского, Алданского, Анабарского, Украинского и других щитов, эта плотность составляет около  $2,7 \text{ г/см}^3$  [68].

Если измерения проведены на одном горизонте и не предполагается сопоставлять их результаты с данными наземной съемки или съемок на других горизонтах, наблюдаемые значения силы тяжести можно приводить к уровню одного из пунктов (КП), который находится вдали от рудных тел по возможности в однородной вмещающей среде. В этом случае вычисляют относительные аномалии силы тяжести

$$\Delta g_{a \text{ отн}} = \Delta g_{ni} - \Delta \gamma_{0i} + \Delta \delta g_{B_i} + \Delta \delta g_{p_i} + \Delta \delta g_i; \quad (5.7)$$

в формулу входят разности соответствующих величин в  $i$ -м и исходном пункте. Надо подчеркнуть, что изменение нормального поля  $\Delta \gamma_{0i}$  достигает существенных значений и требует обязательного учета. При использовании относительных значений силы тяжести поправка Буге вырождается в поправку за наклон выработки, рассмотрение которой будет приведено ниже. Методика учета влияния рельефа дневной поверхности и других осложняющих факторов также будет описана в специальных разделах.

## 5.2. Обработка измерений вторых производных гравитационного потенциала

По записи положения равновесия крутильной системы вариометров или градиентометров, зафиксированного на фотопластинке, вычисляют наблюдаемые и аномальные значения вторых производных гравитационного потенциала  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ ,  $V$ .<sup>Δ</sup> Вычисление наблюдаемых значений при подземных измерениях ничем не отличается от общепринятых способов в наземных условиях. Эти способы описаны в учебниках и инструкциях и не требуют повторения.

Чтобы получить аномальные значения вторых производных гравитационного потенциала, необходимо в наблюдаемые значения ввести поправки за влияние нормального гравитационного и магнитного поля Земли, за влияние рельефа дневной поверхности и других осложняющих факторов (горных выработок, обработанного пространства, зоны обрушения и др.). При измерении вторых производных гравитационного потенциала поправка за промежуточный слой равна нулю.

Поправку за влияние магнитного поля вводят в измеренные значения градиентов  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  только при использовании градиентометров в условиях высокого магнитного поля ( $H > 2500$  гамм). Указанные поправки равны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_{xz} &= m_0 H \cos(\mu - A_m); \\ \Delta V_{yz} &= m_0 H \sin(\mu - A_m), \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

где  $m_0$  и  $\mu$  — магнитные характеристики систем, приведенные в паспорте прибора;  $H$  — горизонтальная составляющая магнитного поля в точке измерения;  $A_m$  — магнитный азимут ориентировки прибора.

Поправки за нормальное гравитационное поле зависят от географической широты  $\varphi$  района работ и от ориентировки вариометра (градиентометра) на пункте наблюдения относительно северного направления истинного меридиана. Значения этих поправок можно получить из выражений

$$\left. \begin{aligned} \delta V_{xz\alpha} &= V_{xz n} \cos \alpha; & \delta V_{\Delta\alpha} &= V_{\Delta n} \cos 2\alpha; \\ \delta V_{yz\alpha} &= V_{yz n} \sin \alpha; & \delta 2V_{xy\alpha} &= V_{\Delta n} \sin 2\alpha, \end{aligned} \right\} \quad (5.9)$$

где  $V_{xz n}$  и  $V_{\Delta n}$  — нормальные значения при данных  $\varphi$  и  $\alpha$ ;  $\alpha$  — азимут ориентировки прибора.

## 5.3. Поправка за влияние рельефа дневной поверхности

Пересеченный дневной рельеф (наличие карьеров и отвалов) оказывает существенное влияние на результаты подземных гравиометровых измерений. Как показали исследования В. М. Пе-

люшенко и В. Ф. Страшко (1967 г.), карьер глубиной 120 м и размерами в плане  $800 \times 200$  м при наблюдениях на глубине 600 м от дневной поверхности создает эффект до 0,9 мгал (при  $\sigma_{\text{эф}} = -3 \text{ г/см}^3$ ). В то же время влияние такого карьера на измененные значения вторых производных уже на горизонте 400 м превышает 10—15 Э. Если учесть, что при подземной гравиметрической разведке изучаются сравнительно слабые аномалии, становится вполне понятной важность учета рассматриваемых поправок.

Следует иметь в виду, что чем глубже находится горизонт наблюдения, тем равномернее и слабее сказывается влияние рельефа дневной поверхности. На больших глубинах поправку можно вычислять в отдельных пунктах, равномерно распределенных по выработке или горизонту, а в остальных определять ее интерполяцией. На горизонтах, близких к дневной поверхности, влияние рельефа надо рассчитывать во всех пунктах наблюдений. Если используются относительные аномальные значения силы тяжести и по отдельным точкам установлено, что на данном горизонте поправка за рельеф дневной поверхности практически постоянна, то такую поправку можно не вводить.

Учет влияния рельефа дневной поверхности сводится к вычислению прямого эффекта от масс, расположенных между плоскостью относимости и дневной поверхности [29]. За плоскость относимости принимается горизонтальная плоскость, проходящая в зависимости от формы рельефа на уровне его максимальных или минимальных отметок (плоскости  $P$  и  $Q$  на рис. 5.1, б). Выбор соответствующей формам рельефа плоскости относимости позволяет сократить радиус  $R$  области влияния рельефа. Так как площади подземных съемок, как правило, небольшие, следует выбирать одну общую плоскость относимости для всего участка (рудника); причем сделать это надо так, чтобы пришлось учитывать влияние наименьшего объема масс. Как показал опыт, удобнее брать плоскость относимости, проходящую через максимальные отметки рельефа. В этом случае как бы искусственно заполняются все окружающие впадины на дневной поверхности условными массами. Плотность их, учитывая, что последующей операцией будет введение поправки за нормальное поле и промежуточный слой, следует принимать постоянной и равной плотности промежуточного слоя.

В настоящее время известно много способов учета влияния рельефа дневной поверхности на результаты подземных гравиметрических измерений: П. И. Лукавченко [69], Е. А. Мудрецов [29], В. А. Казинского [18, 36, 70], М. В. Копнина и В. Б. Наугольникова [71, 72], Ю. Н. Ващилова [73] и др. Практически все способы основаны на разбивке учитываемой области на отдельные участки, замене действительной поверхности рельефа такой поверхностью, которая имеет аналитическое выражение, и вычислении гравитационных эффектов от каждого участка и суммарного от всей области в пункте наблюдения.

Вычисления проводятся с помощью соответствующих таблиц, номограмм, палеток или с применением ЭВМ. Различие способов заключается в основном в приемах разбивки учитываемой области на элементы.

Широкое применение на практике нашел способ Е. А. Мудрецовой [29]. Специально разработанный для решения поставленной задачи, он может быть применен как при ручных вычислениях (с помощью таблиц), так и на ЭВМ.

Математически определение поправки за рельеф дневной поверхности в точке  $A$  (см. рис. 5.1) сводится к решению известного тройного интеграла:

$$\Delta g_p = k\sigma \int_0^{2\pi} \int_0^{h_2} \int_0^{h_1} \frac{zr dz dr d\varphi}{(r^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (5.10)$$

где  $z, r, \varphi$  — цилиндрические координаты точек дневной поверхности;  $R$  — предельный радиус области учета влияния рельефа;  $\sigma$  — средняя плотность пород;  $h_1$  и  $h_2$  — пределы интегрирования по  $z$ , зависящие от положения плоскости относимости.

Путем интегрирования по  $z$  и использования формул механических квадратур Е. А. Мудрецовой было получено выражение, определяющее поправку за влияние рельефа дневной поверхности к измеренным значениям  $\Delta g$  в горных выработках.

Если плоскость относимости проходит через максимальную отметку рельефа дневной поверхности (плоскость  $P$ ), то при границах интегрирования  $R_0 = H_{об}$  и  $R = 4H_{об}$  поправка записывается в виде

$$\Delta g_p = - \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{12} B_{ki}, \quad (5.11)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B_1 &= \frac{2\pi k\sigma}{n} H_{об} A_1 \left( \frac{1}{\sqrt{x_i^2 + 1}} - \frac{H_{об}}{\sqrt{x_i^2 H_{об}^2 + h^2}} \right); \\ B_7 &= \frac{6\pi k\sigma}{n} H_{об} A_7 \left( \frac{1 + 3x_i}{\sqrt{1 + (1 + 3x_i)^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{(1 + 3x_i) H_{об}}{\sqrt{H_{об}^2 (1 + 3x_i)^2 + h^2}} \right); \end{aligned} \right\} \quad (5.12)$$

$H_{об}$  — расстояние от плоскости относимости до горизонта наблюдений;  $h$  — высота точек дневной поверхности, отсчитываемая от горизонта наблюдений (см. рис. 5.1, б);  $n$  — число лучей, по которым считываются отметки рельефа (8, 12 или 16);  $A_k$  — числовые коэффициенты, приведенные в работе [29];  $x_n$  — значения узлов [29].

Функции  $B_2, B_3, \dots, B_6$  записываются аналогично  $B_1$ , а  $B_8, B_9, \dots, B_{12}$  — аналогично  $B_7$ , отличаясь лишь индексами у коэффициентов  $A$  и узлов  $x$ .

Когда плоскость относимости проходит через минимальную отметку рельефа (плоскость  $Q$ ), при границах интегрирования  $R_0 = 3H_{0н}$  и  $R = 15H_{0н}$  поправка

$$\delta g_p = \sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^{12} C_{kl}, \quad (5.13)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{18\pi k\alpha}{n} H_{0н} A_1 \left( \frac{1}{\sqrt{1+9x_1^2}} - \frac{H_{0н}}{\sqrt{9x_1^2 H_{0н}^2 + h^2}} \right); \\ C_7 &= \frac{72\pi k\alpha}{n} H_{0н} A_7 \left( \frac{1+4x_7}{\sqrt{1+9(1+4x_7)^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{H_{0н}(1+4x_7)}{\sqrt{9H_{0н}^2(1+4x_7)^2 + h^2}} \right). \end{aligned} \right\} \quad (5.14)$$

Функции  $C_2, C_3, \dots, C_6$  записываются аналогично  $C_1$ , а  $C_8, C_9, \dots, C_{12}$  — аналогично  $C_7$ , отличаясь лишь индексами у коэффициентов  $A$  и узлов  $x$ .

Функции  $B_h$  и  $C_h$  рассчитаны на ЭВМ для различных значений  $h$  и  $H_0$  при  $\sigma_n = 2$  г/см<sup>3</sup> и  $n = 16$ . Они сведены в таблицы, которыми и следует пользоваться при ручном вычислении поправки [29]. На основании формул (5.12) и (5.14) составлены программы для ЭВМ типа М-20, что позволяет применять этот способ при машинной обработке данных.

На практике при вычислениях необходимо выполнить следующие операции. В зависимости от сложности рельефа из пункта наблюдения в горизонтальной плоскости проводят 8, 12 или 16 лучей через равный интервал  $\varphi$ . В направлении каждого луча в узловых точках  $x_k$  считывают значения  $h$ . Расстояния между узловыми точками в области  $0 \div R_0 = H_{0н}$  или  $3H_{0н}$  (в зависимости от положения плоскости относимости) принимают равными 10—20 м. С ростом  $H_0$  интервалы между узловыми точками можно несколько увеличить, но в такой мере, чтобы не пропустить детали дневной поверхности над пунктом, для которого определяется поправка. Пользуясь таблицами для заданных  $h, H_0, n$ , получим значения  $B_h$  или  $C_h$  при фиксированной плотности  $\sigma_n = 2$  г/см<sup>3</sup>. Определив  $\sum_{k=1}^{12} B_h$  или  $\sum_{k=1}^{12} C_h$  в направлении

каждого луча, а затем  $\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^{12} B_{kl}$  или  $\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^{12} C_{kl}$  по всем лучам и умножив на  $\sigma_{пст}/\sigma_n$ , найдем гравитационный эффект  $\delta g_p$  в данной точке, обусловленный рельефом дневной поверхности.

В практике подземной гравиразведки нашел применение также способ В. А. Казинского [18, 36]. Он основан на построении произвольной интерполяционной сетки и вычислении разностей подынтегральных функций по координатам узловых точек сетки. Имея на плане изображение рельефа в виде горизонталей и узловые точки (плоскость относимости выбирается на уровне максимальной отметки), можно определить координаты интер-

поляционных точек относительно пункта, для которого вычисляется влияние рельефа. По этим координатам с помощью таблиц [70] находят разности подынтегральной функции  $(\Delta F)_n$ . Используя их, при помощи соответствующих формул (подробное математическое обеспечение приведено ниже, при рассмотрении поправок за рабочие выработки) вычисляют поправку  $\delta g_p$ . Способ может быть использован только при ручном счете. Позволяя определить поправку с требуемой точностью, он является, однако, весьма громоздким.

М. В. Копиня и В. Б. Наугольников [71, 72] предлагают рассчитывать поправки за влияние рельефа дневной поверхности на измеренные значения  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{\Delta}$  с помощью палеток для бесконечно тонких пластин. Массы между плоскостью относительности и поверхностью рельефа рассеиваются на несколько слоев, параллельных этой плоскости (следы сечений контролируются горизонталями топографических карт). С помощью соответствующих палеток находят гравитационный эффект от каждого слоя, а затем суммарный эффект от всех масс. Палетки для бесконечно тонких слоев (пластин) предложены Е. А. Мудрецовою [26, 64].

#### 5.4. Поправка за наклон выработки

Известно, что выработки из горнотехнических соображений делают негоризонтальными. Как правило, их наклон составляет 0,003—0,005 рад. Поэтому нередко возникает необходимость приведения подземных гравиметрических наблюдений к одному уровню, например к уровню наивысшей точки выработки (плоскость  $Q$  на рис. 5.1, а). Это можно выполнить путем учета поправки за наклон выработки  $\delta g_{n, в}$ . В отличие от поправки Буге, поправка за наклон выработки должна аналитически продолжить наблюдаемые значения силы тяжести на некоторый уровень без какого-либо смещения масс. Поэтому при ее вычислении необходимо учитывать реальное распределение масс в околовыработанном пространстве. Нарушение этого требования приведет к ошибкам, рассмотренным Р. Вайком [74] и другими авторами для наземных условий гравиметрических исследований.

Поправку за наклон выработки можно вычислить различными способами.

При известном градиенте силы тяжести в пункте наблюдения В. А. Казинский [36] рекомендует вычислять поправку по формуле

$$\delta g_{n, в} = V_{zz} \Delta H, \quad (5.15)$$

где  $V_{zz}$  — градиент силы тяжести в пункте наблюдения (точка  $A$  на рис. 5.1, а);  $\Delta H$  — превышение точки  $A$  относительно плоскости приведения (плоскость  $Q$ ).

При известной кажущейся плотности в точке наблюдения для учета данной поправки можно воспользоваться уравнением

$$\delta g_{н.в} = (0,3086 - 4\pi k\sigma_n) \Delta H, \quad (5.16)$$

где  $\sigma_n$  — кажущаяся плотность горных пород в околоразработанном пространстве.

Учитывая, что превышения  $\Delta H$  малы (первые метры) и наблюдения выполняются в небольших интервалах рудовмещающих структур, можно воспользоваться среднезвешенным значением плотности встреченных выработкой горных пород.

### 5.5. Поправка за влияние рабочей горной выработки

Пространственное распределение влияния выработки на различные элементы гравитационного поля можно представить, воспользовавшись расчетами Г. Рише [7], Л. С. Прицкера и др. [75] или В. М. Пелюшенко и В. Ф. Страшко [76]. Расчеты в работе [76] выполнены для выработки правильной геометрической формы прямоугольного сечения размером  $2 \times 3$  м при аномальной плотности  $-1$  и  $-3$  г/см<sup>3</sup>. По простиранию размеры выработки были приняты равными 10, 20 и 200 м.

Рассмотрим распределение поля в сечении выработки, удаленном на 5 м от забоя (рис. 5.2) и вдоль ее простирания (рис. 5.3), профиль наблюдения проходит в центре I квадранта выработки. Для одних элементов поля влияние выработки (независимо от местоположения линии наблюдения) достигает значений, превышающих в несколько раз погрешность измерений, а для других — даже искомые аномалии. Расчеты влияния реальных горных выработок показали, что общепринятой закономерности их распределения близки к вышеприведенным.

Абсолютные значения влияний находятся в прямой зависимости от степени и характера неровностей стенок выработки, от их формы и размеров. Установлено [77], что шероховатости выработки, занимающие до 25% площади ее сечения, при средних размерах  $2 \times 2$  м создают эффект  $\Delta g \leq 0,02$  мгал. Это позволяет при расчете влияния выработки на аномалии  $\Delta g$  считать ее гладкой и на блоки не разбивать. Однако если выработка пересекает неоднородные по плотности слоистые среды, ее влияние необходимо учитывать по блокам. Особенно чувствительными к влиянию шероховатостей стенок являются вторые производные гравитационного потенциала.

Таким образом, следует обязательно учитывать влияние горной выработки на измеренные в ней значения элементов гравитационного поля. Эта проблема сводится к решению прямой задачи гравиразведки для тел сложной формы при условии, что точка наблюдения находится внутри масс. В настоящее время стало совершенно ясно, что аппроксимировать выработку двумерным однородным телом подобно тому, как это делал Г. Рише

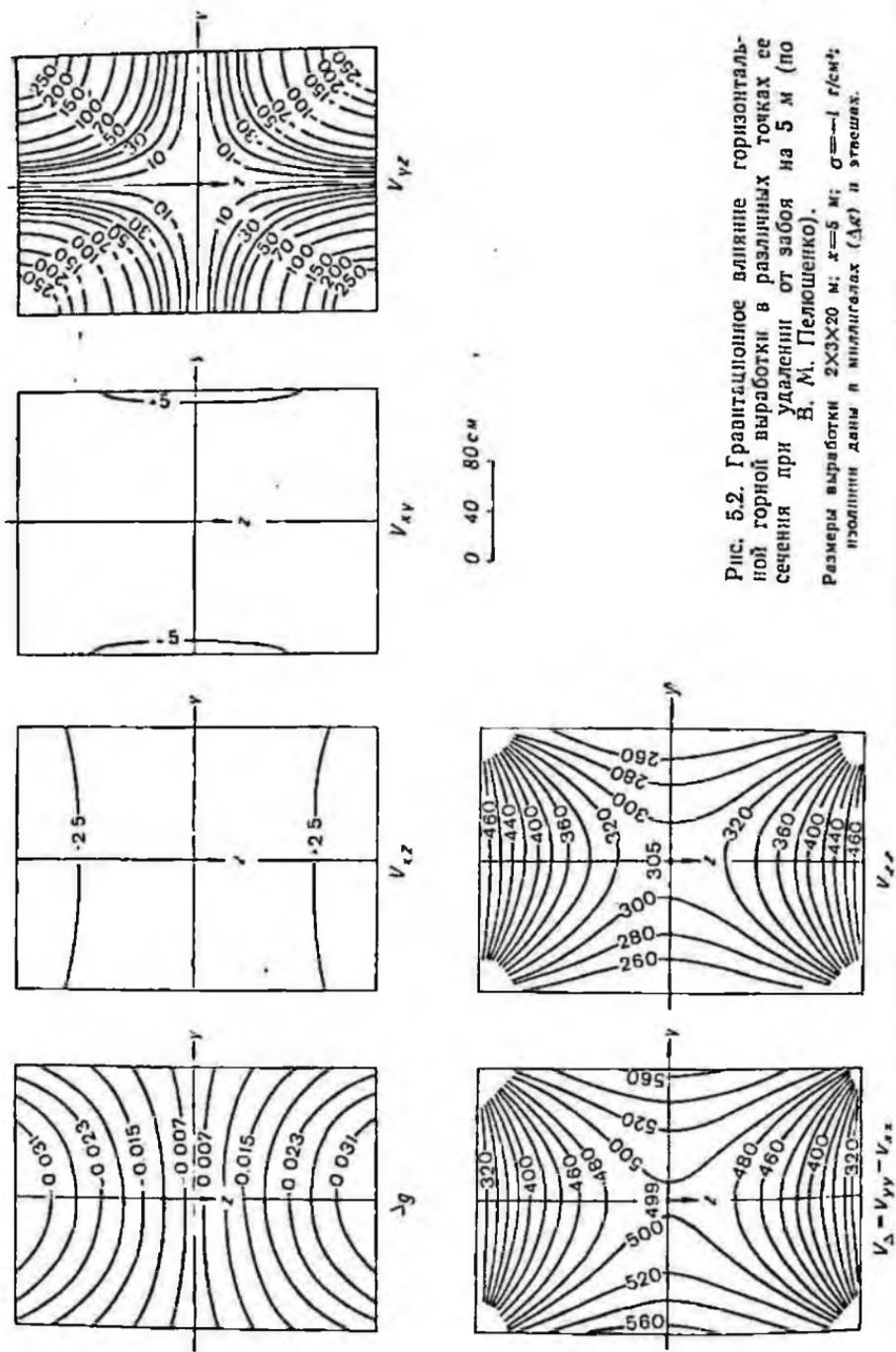


Рис. 5.2. Гравитационное влияние горизонтальной горной выработки в различных точках сечения при удалении от забоя на 5 м (по В. М. Пелюшенко).  
 Размеры выработки 2X3X20 м;  $x=5$  м;  $\sigma=1$  г/см<sup>3</sup>; изолинии даны в миллигалах ( $\Delta g$ ) и этвешах.

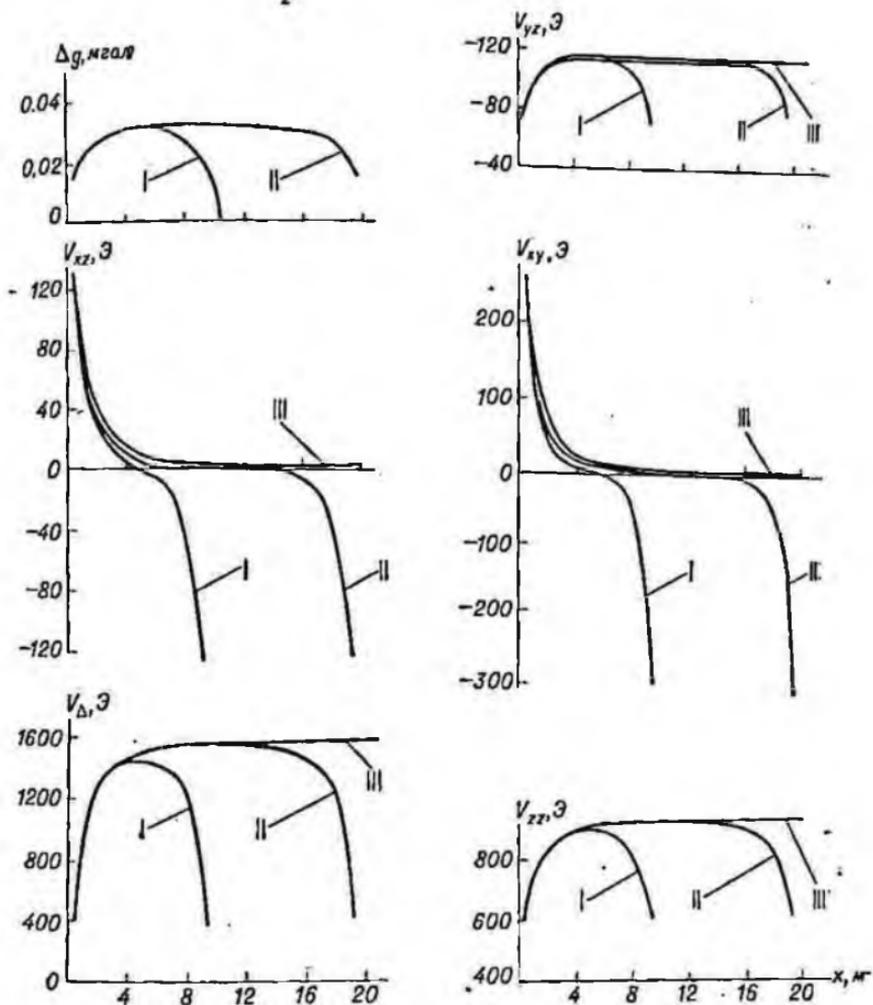
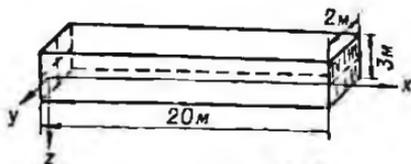


Рис. 5.3. Зависимость гравитационного влияния горной выработки от ее размеров по простиранию (по В. М. Пелюшенко).  
 $\sigma = -3 \text{ г/см}^3$ ; длина выработки, м: I — 10, II — 20, III — 200.

[7], неприемлемо. Требуется способы, позволяющие учитывать ограниченность выработок и все детали рельефа их стенок. Содержание таких способов излагается ниже.

Б.Б.1  
Способ  
В. А. Казинского

Для учета локальных неровностей в горной выработке предлагается способ, основанный на полиномиальном приближении интеграла, распространяемого на объем  $V$  неоднородного тела произвольной формы [36]. Под объемом  $V$  понимается объем промежуточных гравитирующих масс, находящихся между поверхностями референц-параллелепипеда и подземной выработки. За референц-параллелепипед условно принят параллелепипед, ось и грани которого совпадают с гладкой стандартной поверхностью выработки. Применение метода полиномов для вычисления полей геологических тел называется, по мнению автора, особенно рациональным при разбиении тела  $V$  на малые части с помощью ортогональных плоскостей  $(x \pm \mu \Delta x)(y \pm \nu \Delta y)(z \pm \gamma \Delta z) = 0$ , образующих интерполяционную сетку ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$  и  $\Delta z$  — расстояния между плоскостями;  $\mu$ ,  $\nu$  и  $\gamma$  — число плоскостей, пересекающих тело  $V$ ).

Параметры референц-параллелепипеда и расстояние между плоскостями подбирают исходя из размеров выработки, степени ее искривления и характера неровностей стенок. В результате разбиения тела плоскостями на его поверхности образуется система узловых (коррелирующих) точек, в которых фиксируются координаты горной выработки. Используя координаты узловых точек, при помощи математических таблиц [70] вычисляются разности  $(\Delta F_x)_{ik}$ ,  $(\Delta F_{xz})_{ik}$ ,  $(\Delta F_{yz})_{ik}$ ,  $(\Delta F_{xy})_{ik}$ ,  $(\Delta F_{\Delta})_{ik}$ . Полученные разности умножают на соответствующие интерполяционные коэффициенты  $b_k$  и вычисляют простые суммы, которые в свою очередь умножают на второй интерполяционный коэффициент  $a_l$  и полученные произведения складывают. Двойные суммы подставляют в формулы суммирования (5.17), которые и дают приближенные значения элементов гравитационного поля, обусловленные рельефом стенок подземной горной выработки:

$$\left. \begin{aligned} \Delta g &= k\sigma \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{2 \cdot 2} \sum a_l \sum b_k (\Delta F_x)_{ik}; \\ V_{xz} &= 3k\sigma \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{2 \cdot 2} \sum a_l \sum b_k (\Delta F_{xz})_{ik}; \\ V_{yz} &= -k\sigma \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{2 \cdot 2} \sum a_l \sum b_k (\Delta F_{yz})_{ik}; \\ V_{xy} &= -k\sigma \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{2 \cdot 2} \sum a_l \sum b_k (\Delta F_{xy})_{ik}; \\ V_{\Delta} &= 3k\sigma \frac{\Delta x_0 \Delta z_0}{2 \cdot 2} \sum a_l \sum b_k (\Delta F_{\Delta})_{ik}; \end{aligned} \right\} (5.17)$$

где  $\Delta x_0, \Delta z_0$  — начальные интервалы интерполирования;  $\sigma$  — аномальная плотность; 2.2 — числа, соответствующие линейному интерполированию.

Если выработка имеет сложную конфигурацию, следует выполнять параболическое интерполирование вдоль осей, при этом в формулы (5.17) вводят соответственно коэффициенты  $\Delta x_0 \Delta z_0 / (3 \cdot 3)$ ; в отдельных случаях надо проводить и комбинированное интерполирование, тогда в формулы (5.17) вводят коэффициенты  $\Delta x_0 \Delta z_0 / (2 \cdot 3)$ .

Чтобы вычислить эффект от неровностей стенок горной выработки для составляющей  $V_A$ , необходимо учесть влияние референц-параллелепипеда (для остальных функций оно равно нулю). Это влияние находят по формуле  $2k\sigma$  для параллелепипеда с квадратным сечением и  $2k\sigma(\alpha + \beta)$  — для прямоугольного; величины  $\alpha$  и  $\beta$  являются углами видимости боковых граней сечения горной выработки.

Следует заметить, что способ В. А. Казинского позволяет учесть эффект выработки в направлении ее простирания в пределах  $\pm 4$  м от пункта наблюдения. За этими пределами, считает автор, выработка оказывает незначительные влияния и ими можно пренебречь. Достоинством метода является то обстоятельство, что влияние выработки можно учитывать как угодно детально (в пределах  $\pm 4$  м). Недостаток его заключается в громоздкости математического аппарата, который приспособлен только для ручного счета.

### Б.5.2

#### Способ

А. А. Юнькова

Этот способ учета влияния рабочей горной выработки [37—39, 77—79 и др.] является развитием способа З. Загорака [15] и А. П. Казанского (1936 г.). Он

позволяет рассматривать горную выработку как трехмерное тело произвольной формы, произвольно расположенное относительно пункта измерения. Сначала элементы гравитационного потенциала вычисляют для двумерного тела, а затем умножением результатов на соответствующие коэффициенты учитывают конечность выработки.

В общем случае при расчетах используют следующие формулы:

$$\Delta g = N\Pi \sin \alpha + \frac{1}{2} N_1 \Pi_1 \cos \alpha;$$

$$V_{xz} = \frac{1}{8} (6N_2 \Pi_2 - N_4 \Pi_5) \sin 2\alpha + N_3 \Pi_3 \cos 2\alpha;$$

$$V_{yz} = N_3 \Pi_1 \sin \alpha - \frac{1}{4} N_4 \Pi_6 \cos \alpha;$$

$$V_{xy} = N_3 \Pi_1 \cos \alpha - \frac{1}{4} N_4 \Pi_6 \sin \alpha;$$

(5.18)

$$V_3 = \frac{3}{2} N_2 \Pi_2 \cos^2 \alpha - N_3 \Pi_4 \sin 2\alpha + \frac{1 + \sin^2 \alpha}{4} N_4 \Pi_5, ]$$

где  $\alpha$  — угол в плоскости  $xOz$  между положительным направлением оси  $x$  и осью выработки;  $N, N_1, \dots, N_4$  — коэффициенты трехмерности блоков выработки;  $\Pi, \Pi_1, \dots, \Pi_5$  — выражения соответствующих палеток для двумерных и полубесконечных возмущающих тел произвольной формы поперечного сечения;

$$N = 1/\bar{R}' - 1/\bar{R}'';$$

$$N_1 = \overline{\sin \theta''} - \overline{\sin \theta'};$$

$$N_2 = (\overline{\sin^3 \theta''} - \overline{\sin^3 \theta'}) - (\overline{\sin^3 \theta''} - \overline{\sin^3 \theta'});$$

$$N_3 = \overline{\cos^3 \theta''} - \overline{\cos^3 \theta'};$$

$$N_4 = (3 \overline{\sin \theta''} - \overline{\sin^3 \theta''}) - (3 \overline{\sin \theta'} - \overline{\sin^3 \theta'});$$

$$\Pi = (1.2) k\sigma (\varphi_{i+1} - \varphi_i) (r_{n+1}^2 - r_n^2);$$

$$\Pi_1 = -2k\sigma (\cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i) (r_{n+1} - r_n);$$

$$\Pi_2 = k\sigma (\varphi_{i+1} - \varphi_i) \ln (r_{n+1}/r_n);$$

$$\Pi_3 = k\sigma (\cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i) \ln (r_{n+1}/r_n);$$

$$\Pi_4 = k\sigma (\sin \varphi_{i+1} - \sin \varphi_i) \ln (r_{n+1}/r_n);$$

$$\Pi_5 = -k\sigma (\sin 2\varphi_{i+1} - \sin 2\varphi_i) \ln (r_{n+1}/r_n);$$

$$\Pi_6 = -k\sigma (\cos 2\varphi_{i+1} - \cos 2\varphi_i) \ln (r_{n+1}/r_n);$$

$$\overline{\sin \theta''} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sin \theta_i'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n b_n'' R_i'';$$

$$\overline{\cos \theta''} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos \theta_i'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i R_i'';$$

$$\bar{R}'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i'' = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{(b_n'')^2 + r_i^2};$$

$$r_i = \sqrt{y_i^2 + z_i^2};$$

$$b_n' = x_i - b_n;$$

$$b_n'' = x_i + b_n;$$

$b_n$  — полудлина в направлении оси  $x$  элементарного  $n$ -го блока выработки;  $x_i, y_i, z_i$  — текущие координаты центра масс элементарного блока;  $\varphi_i, \varphi_{i+1}, r_n, r_{n+1}$  — координаты элементарных площадок палетки.

При  $\alpha=0^\circ$  из формул (5.18) получим выражения элементов гравитационного поля для горизонтальных горных выработок, а при  $\alpha=90^\circ$  — для вертикальных.

Процесс вычисления поправки за влияние горной выработки способом А. А. Юнькова сводится к следующему.

В зависимости от сложности рельефа стенок выработки ее разбивают на серию блоков ( $b'_n - b''_n$ ). В каждом блоке изменяют характерное сечение выработки. В нулевом сечении (через пункт измерения элемента поля) определяют местоположение точки стояния измерительного прибора (точка  $O$  на рис. 5.4, б), а в остальных сечениях — ее проекцию. В сечение выработки

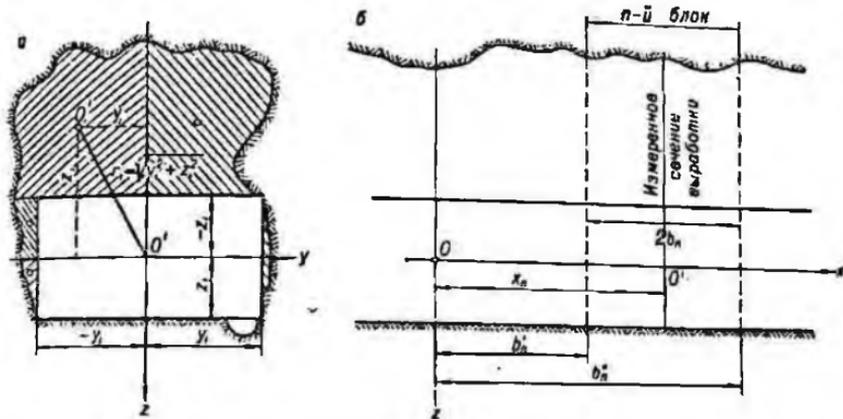


Рис. 5.4. К учету гравитационного влияния горной выработки по способу А. А. Юнькова.

Сечение горной выработки: а — в плоскости  $x=x_n$ , б — в плоскости  $y=0$ .

вписывается сечение референц-параллелепипеда (по В. А. Казинскому) с параметрами  $\pm z_1, \pm y_1$ , а по простиранию  $b''_n$  и  $b'_n$ . Влияние референц-параллелепипеда на все производные в точке  $O$  равно нулю. Исключением является составляющая  $V_z$ , для которой это влияние равно  $8k\sigma\alpha\text{arctg}(z_1/y_1)$  [36].

Пользуясь соответствующими палетками  $\Pi, \Pi_1, \dots, \Pi_6$ , определяют влияние масс, расположенных за пределами референц-параллелепипеда, в предположении, что они бесконечны или полубесконечны по простиранию. Затем для каждого блока вычисляют коэффициенты  $N, N_1, \dots, N_4$ . Это самая трудоемкая операция в данном способе, что несколько снижает его эффективность. В настоящее время разработан графический способ определения указанных коэффициентов [80]. Для этого с графика сечения выработки  $n$ -го блока снимают значения  $r_i = \sqrt{y_i^2 + z_i^2}$  (рис. 5.4, а) и вычисляют отношения  $b'_n/r_i$  и  $b''_n/r_i$ . По этим отношениям при помощи графика, показанного на рис. 5.5, сразу определяют необходимые коэффициенты. В за-



ключение по формулам (5.18) вычисляют поправки к элементам гравитационного поля за влияние горной выработки, в которой ведутся исследования.

### 5.5.3

#### Палеточные способы

Рассчитано несколько разновидностей специальных палеток для учета гравитационного влияния горных выработок (В. Н. Страхов, Е. А. Мудрецова [64]; Л. С. Прицкер, Е. И. Ищук [81]; В. М. Юрков, З. Г. Муромцева [82]; В. З. Фурсов [65] и др.).

Л. С. Прицкер и Е. И. Ищук [81] представляют выработки как вертикальные цилиндрические тела постоянной мощности, расположенные в плоскости наблюдения или ей параллельной (выше либо ниже горизонта наблюдений). Палетки рассчитаны для  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$ . Они позволяют одновременно учитывать все имеющиеся на горизонте выработки. Однако допущение постоянства их вертикальной мощности вносит существенные погрешности. Наклон и шероховатости стенок горных выработок учитываются этим способом весьма приближенно.

В. М. Юрков и З. Г. Муромцева [82] предлагают разбивать выработку на продольные секторы. В каждом секторе строится продольное сечение выработки (на основании вертикальных измерений сечений выработки) и определяется гравитационное влияние такого сектора по специальным палеткам. Авторы считают достаточным делить выработку на 8 секторов. Следовательно, для каждого пункта наблюдения необходимо измерить справа и слева несколько сечений выработки, построить 8 продольных сечений и выполнить 8 определений поля. Сумма влияний всех секторов составит общую поправку.

Заслуживает внимания способ В. Н. Страхова и Е. А. Мудрецовой [64], позволяющий вычислить поправки к измеренным значениям  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$  и  $V_{\Delta}$ . Авторы считают, что выработку достаточно учитывать в пределах  $\pm (4 \div 5)$  м от пункта наблюдения. Указанную часть выработки следует разбить на блоки и определить гравитационное влияние каждого из них. Сумма влияний блоков составит искомую поправку. Остальная часть выработки, по мнению авторов способа, создает эффект, не превышающий погрешности измерений. Влияние отдельного фиксированного блока вычисляют по специальным палеткам. Учитывая особенности формул для элементов поля, авторы рекомендуют измерять следующие сечения выработки (для них построены палетки):  $x=0; \pm (0,25; 0,5; 1,0; 1,5; 2; 3; 4)$  м.

Достоинством способа является простота и удобство его применения. Кроме того, имеются программы, позволяющие выполнить расчет поправок этим способом на ЭВМ. К недостаткам следует отнести ограниченность учитываемой части выработки и обязательное измерение 15 сечений.

В. З. Фурсов [65] представляет выработку в виде отдельных цилиндрических блоков с произвольной формой сечения, имеющих фиксированные размеры по простиранию. Для каждого блока согласно формулам А. П. Казанского (1936 г.) строят палетки. Расчет палеток выполнен для  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$ . Автор способа рекомендует учитывать выработку в пределах  $\pm 4$  м и делить этот участок на следующие интервалы: 0—0,25; 0,25—0,50; 0,5—1,0; 1—2 и 2—4 м. Достоинством способа является простота и удобство применения, недостатком — фиксация размеров блоков.

Как показали исследования А. А. Юнькова, И. В. Вдовина [78] и В. М. Пелюшенко, В. Ф. Страшко [76], при измерении вторых производных нельзя брать определенное наперед заданное количество блоков. Оно должно устанавливаться по степени шероховатости выработок в каждом конкретном случае. Особенно это касается учета влияния выработки на элемент  $V_{\Delta}$ . Так как способы А. А. Юнькова и В. А. Казинского не предъявляют жестких требований к размерам блоков, их следует считать более приемлемыми для практики.

### 5.6. Поправка за влияние боковых выработок

При анализе фактических материалов подземных гравиразведочных исследований можно встретить локальные аномалии, пространственно тяготеющие к боковым горным выработкам. Более четко такие аномалии фиксируются при наблюдениях по штрекам и практически отсутствуют при наблюдениях в ортах и квершлагах. Выработки могут встречаться друг с другом под прямым и острым углом (очень редко), а чаще всего они плавно входят одна в другую (сопряженные выработки). Были выполнены расчеты эффекта от зоны сопряжения выработок; радиус сопряжения принят равным 20 м, размеры сечения  $x \times z = 3 \times 2$  и  $3 \times 3$  м, плотность  $\sigma = -3,0$  г/см<sup>3</sup>. В результате расчетов определены интервалы  $\Delta x$  (табл. 5.1), в пределах которых боковая выработка создает эффект, превышающий погрешность измерений или равный ей (0,02 мгал для  $\Delta g$ ; 10 Э для вторых производных).

Таблица 5.1

Интервалы влияния боковой выработки

Размеры выработки, м	$\Delta x$ , м				
	$\Delta g$	$V_{xz}$	$V_{yz}$	$V_{xy}$	$V_{\Delta}$
3×2	—	—	—	9	14
3×3	4	12	13	9	16

На измеренных значениях  $\Delta g$  боковая выработка сказывается незначительно и локализовано. Это позволяет при измерениях силы тяжести такую поправку не вводить, однако пункты измерения желательно в зонах сочленения не ставить. Влияние на вторые производные более существенное. Боковые выработки могут вызвать аномалии, соизмеримые с рудными.

Вопросами учета влияния боковых выработок занимались многие исследователи [27, 83 и др.]. Как показал опыт, эту операцию можно успешно выполнить при помощи палеток для вертикальных цилиндрических тел. Такие палетки рассчитали Л. С. Прицкер и Е. И. Ищук [81] для  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  и Н. Р. Бурьян (1971 г.) для  $V_{xy}$  и  $V_{\Delta}$ . Уравнения палеток в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  имеют вид

$$\left. \begin{aligned}
 V_{xz} &= k\sigma \sin \varphi \left[ \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \ln (r + \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{r^2 + z^2}) \right] \left| \frac{\varphi_{l+1}}{\varphi_l} \right| \frac{r_{n+1}}{r_n} \left| \frac{H}{h} \right|; \\
 V_{yz} &= k\sigma \cos \varphi \left[ \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} - \ln (r + \right. \\
 &\quad \left. + \sqrt{r^2 + z^2}) \right] \left| \frac{\varphi_{l+1}}{\varphi_l} \right| \frac{r_{n+1}}{r_n} \left| \frac{H}{h} \right|; \\
 V_{xy} &= \frac{1}{4} k\sigma \cos 2\varphi \left[ \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \right. \\
 &\quad \left. + \ln \frac{\sqrt{r^2 + z^2} + z}{\sqrt{r^2 + z^2} - z} \right] \left| \frac{\varphi_{l+1}}{\varphi_l} \right| \frac{r_{n+1}}{r_n} \left| \frac{H}{h} \right|; \\
 V_{\Delta} &= -\frac{1}{2} k\sigma \sin 2\varphi \left[ \frac{z}{\sqrt{r^2 + z^2}} + \right. \\
 &\quad \left. + \ln \frac{\sqrt{r^2 + z^2} + z}{\sqrt{r^2 + z^2} - z} \right] \left| \frac{\varphi_{l+1}}{\varphi_l} \right| \frac{r_{n+1}}{r_n} \left| \frac{H}{h} \right|,
 \end{aligned} \right\} (5.19)$$

где  $\sigma$  — аномальная плотность (при построении палетки  $\sigma = 1 \text{ г/см}^3$ );  $h$  и  $H$  — расстояния от центра системы измерительного прибора соответственно до подошвы и до потолка выработки;  $\varphi_{l+1}, \varphi_l, r_n, r_{n+1}$  — координаты элементарных площадок палетки.

Палетки строятся по общепринятой методике. Следует заметить, что выражения  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  различаются лишь тем, что в первом имеется разность синусов ( $\sin \varphi_{l+1} - \sin \varphi_l$ ), а во втором — разность косинусов. Это позволяет построить палетку для  $V_{xz}$  и использовать ее при вычислении  $V_{yz}$ , предварительно повернув на  $90^\circ$  по часовой стрелке. Аналогично можно применить и палетку  $V_{xy}$  для вычисления  $V_{\Delta}$ , повернув ее предварительно на  $45^\circ$  против часовой стрелки и увеличив цену деления клетки вдвое.

По предложенной методике можно с достаточной для практики точностью учитывать влияние боковой выработки криво- и прямолинейной формы в плане.

### 6.7. Графическое изображение результатов гравиметрических исследований

Подземные гравиметрические исследования, как правило, выполняются по разобленным разведочно-эксплуатационным горным выработкам, расположенным друг от друга на расстоянии 40—60 м и более. Такую съемку согласно существующей классификации [60] можно отнести к профильной, откуда результаты съемки в основном представляют в виде аномальных кривых и векторов поля вдоль профиля наблюдения. Результаты гравиметрических съемок изображают на геологической основе планов горизонтов и разрезов. При перерисовке сохраняют геологическую ситуацию на момент съемки, маркшейдерские оси и местоположение горных выработок, что помогает ориентироваться в содержании планов или разрезов.

На отчетные планы и разрезы наносят графики и векторы элементов поля, а также пункты наблюдений с их порядковыми номерами. Особыми условными знаками выделяют опорные пункты. Для разгрузки графиков при последовательной нумерации рядовых пунктов допускается оцифровывать только каждый пятый. Номера опорных пунктов приводятся обязательно.

Главной задачей при графическом изображении результатов съемки является выбор масштабов. При составлении графиков изменения элементов поля горизонтальный масштаб можно оценить, пользуясь соотношением [84]

$$M = l : L, \quad (5.20)$$

где  $l$  и  $L$  — расстояния между пунктами наблюдений (шаг сети наблюдений), взятые соответственно на графике и на местности (по топографической терминологии — заложения).

При промежуточных построениях — на этапах обработки, выделения локальных аномалий и их интерпретации — шаг  $l$  выбирают так, чтобы все аномалии в пределах профиля изображались в наглядном и удобном для работы виде. Критерием является облик аномального поля и его горизонтальный градиент. Добиваются такого положения, чтобы при заданном  $l$  достаточно четко, с сохранением всех особенностей была показана самая узко локализованная с наибольшим горизонтальным градиентом аномалия профиля. Тогда все остальные, естественно, также изобразятся согласно предъявляемым требованиям. Окончательные результаты съемки следует представлять в масштабе отчетных геологических материалов, принятом на данном руднике.

Вертикальный масштаб кривых и масштаб векторов выбирают в зависимости от погрешности наблюдений и интенсивности поля. На графиках должны подчеркиваться все особенности измеренного поля без пропусков и подавления полезной информации. Из опыта работ наиболее удобными вертикальными масштабами являются 0,1 и 0,2 мгал/см при измерении силы тяжести; 20; 50 и 100 Э/см при измерении вторых производных. Следует считать обязательным строить графики как наблюдаемых значений гравитационного поля, так и исправленных за влияние осложняющих факторов. Все графики представляют в одной системе координат и в одном масштабе.

При определенных условиях, когда имеется густая сеть горных выработок, результаты наблюдений гравитационного поля можно представить в виде плана изоаномал. Требования к построению плана (карты) изоаномал подробно описаны в работах [60, 85]. Здесь заметим только, что при интерполяции поля от выработки к выработке, как правило, появляются существенные погрешности и могут потеряться особенности поля, принадлежащие искомым возмущающим телам. Так как привлекаются материалы, полученные в разное время в условиях эксплуатации месторождения, в результаты построений вносятся нерегулируемые погрешности. Все это требует при геологическом истолковании карты тщательно учитывать условия как измерения, так и построения поля.

План изоаномал следует строить в масштабе отчетных геологических материалов, принятом на данном руднике. Сечение изоаномал выбирают с учетом градиента поля, но оно не должно быть меньше утроенной средней квадратической погрешности определения аномалии. Оценить сечение изоаномал  $\Delta$  можно с помощью известного выражения [85]:

$$\Delta = (l/M) G, \quad (5.21)$$

где  $l$  — расстояние между двумя точками, лежащими на соседних изолиниях;  $M$  — масштаб плана (карты) изоаномал;  $G$  — максимальный горизонтальный градиент силы тяжести на участке съемки.

Расстояние  $l$  обычно принимают равным 2 мм, что обеспечит для зоны максимального градиента силы тяжести проведение изолиний не ближе чем через 2 мм.

На всех отчетных материалах по подземной гравиметрической съемке указывают: масштабы (численные и линейные); условные обозначения; дату составления; организацию, выполнившую работы; адрес участка работ (рудник, шахта, горизонт, выработка) и другие необходимые сведения. Отчетные материалы подписывают руководитель геофизического подразделения и составитель. Кроме того, могут быть поставлены подписи лиц, ответственных за оформление графических материалов.

## 5.8. Технический контроль и оценка качества работ

Технический контроль гравиметрических исследований в горных выработках осуществляется вышестоящей организацией. Он заключается в проверке выполнения требований технической инструкции по гравиметрической разведке [60], методического руководства и проекта работ. Проверяется методика и точность работ, правильность привязки опорных и рядовых пунктов наблюдения по выработке; контролируется работа оператора.

Точность опорной и рядовой сети при измерении с гравиметром оценивается по каждому рейсу. Рейс считается качественным, если независимые контрольные наблюдения имеют допустимую сходимость.

В первую очередь оценивается качество опорной сети [60].

При центральной системе измерений, когда каждый опорный пункт имеет непосредственную связь с пунктом, принятым за центральный (например, у ствола шахты на исследуемом горизонте), точность опорной сети оценивают по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \varepsilon / \sqrt{N_{\text{ср}}}, \quad (5.22)$$

где  $\varepsilon$  — средняя квадратическая погрешность единичного измерения;  $N_{\text{ср}} = N/n$  — среднее количество наблюдений на одном опорном пункте;  $N$  — общее число измерений;  $n$  — количество опорных пунктов (не считая центрального).

Погрешность

$$\varepsilon = \sqrt{(\sum \delta^2) / (N - n)}, \quad (5.23)$$

где  $\delta$  — отклонение измеренных значений  $\Delta g$  от средних.

При двухступенчатой системе развития опорной сети (каркасной, а затем заполняющей) точность оценивают по формуле

$$\varepsilon_{\text{оп}} = \sqrt{\varepsilon_k^2 + [n_3 / (n_k + n_3)] \varepsilon_3^2}, \quad (5.24)$$

где  $n_k$ ,  $n_3$  — количество соответственно каркасных и заполняющих опорных пунктов;  $\varepsilon_k$ ,  $\varepsilon_3$  — средние квадратические погрешности определения силы тяжести соответственно на каркасных и заполняющих опорных пунктах, вычисляемые по формуле (5.22).

При развитии опорной сети по системе полигонов вначале выполняют уравнивание. Качество опорной сети, образующей систему полигонов, предварительно оценивают по их невязкам.

Допустимая невязка в полигоне

$$\omega_{\text{доп}} = \varepsilon' \sqrt{k \cdot m}, \quad (5.25)$$

где  $\varepsilon'$  — средняя квадратическая погрешность определения единичного приращения  $\Delta g$ ;  $k$  — число сторон в полигоне;  $m$  — среднее для данного полигона число независимых приращений между двумя смежными пунктами (сюда не должны входить приращения из одного и того же рейса).

Средняя квадратическая погрешность определения единичного приращения  $\Delta g$  до уравнивания опорной сети определяется по формуле

$$\epsilon' = \sqrt{(\sum \delta^2) / (N - S)}, \quad (5.26)$$

где  $\delta$  — отклонение отдельных значений  $\Delta g$  от среднего;  $N$  — общее число измерений приращений;  $S$  — общее число сторон полигонов.

Погрешность определения силы тяжести на опорных пунктах полигональной системы

$$\epsilon_{оп} = \epsilon' \sqrt{M/m}, \quad (5.27)$$

где  $\epsilon'$  — средняя квадратическая погрешность определения единичного приращения  $\Delta g$ , вычисляемая по формуле (5.26);  $M$  — средняя удаленность опорных пунктов от ближайших исходных, выраженная числом приращений;  $m$  — среднее для данного полигона число наблюдений  $\Delta g$  между двумя смежными пунктами.

Основным критерием качества наблюдений с гравиметром на рядовых пунктах служит средняя квадратическая погрешность единичного наблюдения  $\epsilon_p$ , вычисленная на основании сходимости контрольных измерений с первичными по формуле (5.23), где  $n$  — количество контрольных пунктов.

Если повторные измерения выполнялись на всех пунктах, то

$$\epsilon_p = \sqrt{(\sum d^2) / (2n)}, \quad (5.28)$$

где  $d$  — разность между первичным и вторичным наблюдениями;  $n$  — число разностей.

Средняя квадратическая погрешность определения наблюдаемых значений силы тяжести на пункте вычисляется по формуле

$$\epsilon_g = \epsilon_p / \sqrt{N_{cp}}, \quad (5.29)$$

где  $N$  — среднее число наблюдений на пункте.

Средняя квадратическая погрешность аномального значения силы тяжести определяется по следующим формулам:

если аномалия  $\Delta g$  вычислялась по формуле (5.6), то

$$\epsilon_a = \sqrt{\epsilon_{оп}^2 + \epsilon_g^2 + \epsilon_B^2 + \epsilon_p^2 + \sum \epsilon_n^2}; \quad (5.30)$$

если относительная аномалия  $\Delta g$  вычислялась по формуле (5.7), то

$$\epsilon_a = \sqrt{\epsilon_{оп}^2 + 2(\epsilon_g^2 + \epsilon_B^2 + \epsilon_p^2 + \sum \epsilon_n^2)}. \quad (5.31)$$

В эти формулы входят средние квадратические погрешности определения  $\Delta g$  на рядовых ( $\epsilon_g$ ) и на опорных ( $\epsilon_{оп}$ ) пунктах, определения поправок Буге ( $\epsilon_B$ ), за рельеф дневной поверхности ( $\epsilon_p$ ) и за другие осложняющие факторы ( $\epsilon_n$ ).

Качество варно- и градиентометрических наблюдений каждой составляющей поля оценивается по контрольным измерениям. Средняя квадратическая погрешность единичного измерения определяется по формуле (5.23), а наблюденного значения — по формуле (5.29).

## 6. ПОДГОТОВКА ГРАВИТАЦИОННЫХ АНОМАЛИЙ К ИНТЕРПРЕТАЦИИ

### 6.1. Общие положения

При интерпретации материалов подземных гравиметрических исследований стоит весьма сложная проблема — выявить и выделить локальные аномалии, принадлежащие интересующим нас геологическим неоднородностям. Существует целая серия способов разделения суммарных гравитационных полей. Эти способы разработаны как в двумерном, так и в трехмерном варианте. Все их можно отнести к двум большим группам.

К первой принадлежат различные трансформации потенциальных полей: сглаживание, пересчет в более высокие производные, вариации, аналитическое продолжение. Весьма подробный анализ этих способов дан в работе К. Ф. Тяпкина и Г. Я. Голлздры [86] и не требует повторения. Заметим только, что при подземных гравirazведочных исследованиях их применить затруднительно, а подчас и невозможно. Причинами этого являются главным образом профильный характер съемки, весьма ограниченная протяженность горных выработок, наблюдение поля внутри аномальных масс. Были попытки использовать некоторые из названных способов (вариаций — В. М. Юрков, Г. Г. Грекова, 1965 г.; аналитического продолжения — К. И. Соколовский [87, 88]; осреднения — И. Н. Капцова [89]), но практического применения они пока не нашли.

Ко второй группе относятся способы разделения суммарных гравитационных полей с учетом физико-геологической характеристики района работ (в литературе их часто называют «способы геологического редуцирования»). Разработкой этих способов занимались Э. Э. Фотиади, И. Г. Клушин, К. Ф. Тяпкин и ряд других авторов. Сущность их заключается в следующем: на основании имеющихся геофизических и геологических данных создают физические модели геологических структур; вычисленный от них гравитационный эффект вычитают из наблюденного поля и остаточную аномалию рассматривают как локальную. Следует заметить, что остаточная аномалия по своему классу ничем не отличается от исходной функции. Кроме того, при таком разделении попутно выполняется первый этап качественной и количественной интерпретации. Как показали исследования

[90], эти способы наиболее приемлемы для условий съемки в подземных горных выработках.

Интересующие нас возмущающие тела, как правило, приурочены к определенным геологическим структурам или отдельным толщам горных пород, которые в свою очередь сами являются аномальными по отношению к некоторым вмещающим породам, имеющим большое распространение в пространстве и сравнительно выдержанную плотность. Поэтому гравитационные аномалии от отдельных возмущающих тел проявляются на фоне влияния всей структуры или толщи, которое также прослеживается на фоне некоторого регионального поля. Учитывая, что профили наблюдений в горных выработках, особенно в ортах и квершлагах, весьма ограничены, региональное поле в их пределах можно принять линейным, а часто и постоянным. Чтобы получить в таких условиях рудную аномалию, необходимо в первую очередь исключить гравитационное влияние структуры. Для этого следует задаться ее моделью и решить прямую задачу. Вычтя влияние структуры из наблюдаемого поля, получим локальные аномалии, принадлежащие неучтенным неоднородностям. Заметим, что многие исследователи считают отдельным этапом обработки учет известных рудных тел, пустот, зон обрушений и т. д. При учете влияния структуры параллельно надо исключать влияние и названных осложняющих факторов.

При рекомендуемой методике главным является составление модели и выбор методов решения прямой задачи.

Естественно, не исключается весьма благоприятная ситуация, когда возмущающие тела находятся в однородной толще. В таких условиях учет как регионального влияния, так и эффекта структуры не представляет трудностей. Проведение асимптоты к ветвям аномалии в достаточной мере ослабляет эти влияния. При наблюдениях в штреках, пройденных в линейно-вытянутых структурах параллельно контактам их отдельных элементов, локальные аномалии также выявляются сравнительно легко. Однако такие условия на практике встречаются весьма редко.

## 6.2. Возможности аппроксимации элементов структур двумерными моделями

Рудовмещающие структуры, как правило, состоят из отдельных элементов, разных по плотности и форме. В нормальных к простиранию структур разрезах чаще всего можно наблюдать пластовую схему. Учесть гравитационное влияние структур такого типа можно было бы, аппроксимируя их элементы двумерными телами. Однако каждый пласт в отдельности или вся серия пластов, как правило, изменяет свое простирание, а иногда и полностью выклинивается. Освободившееся пространство заполняется другим комплексом пород с иными физическими па-

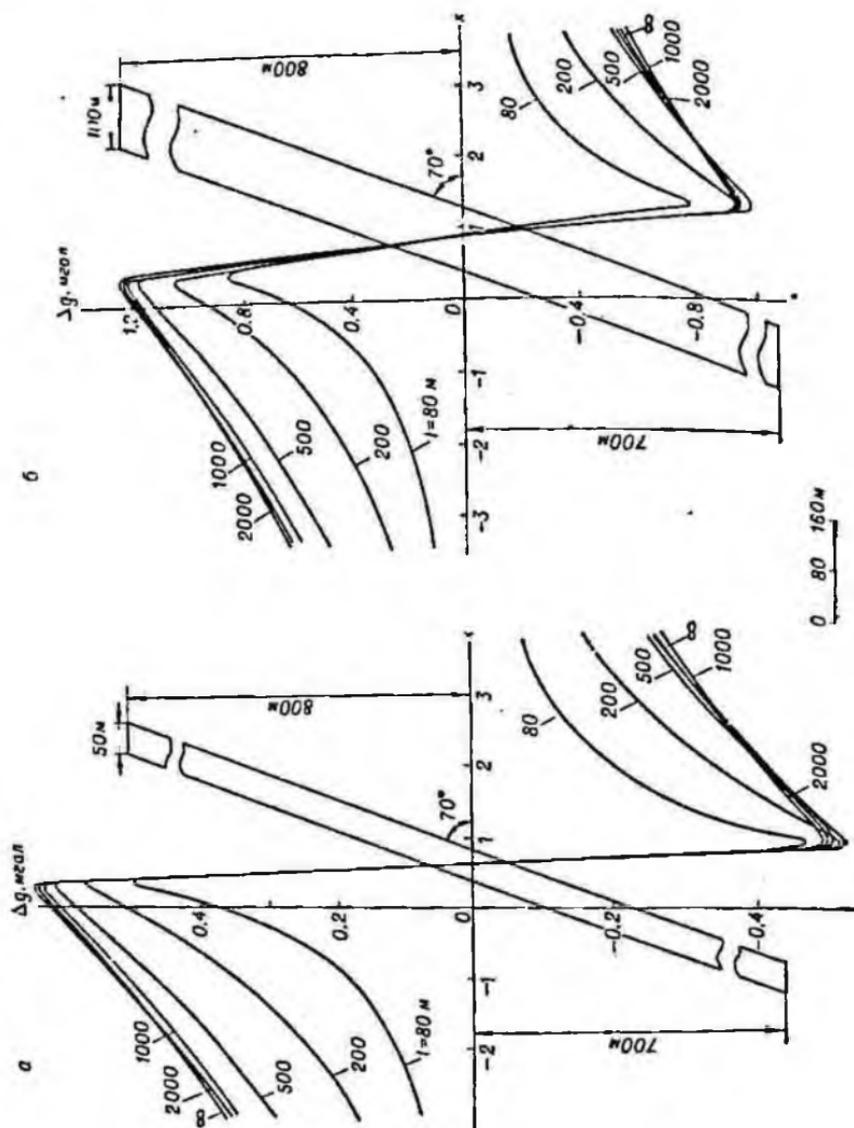


Рис. 6.1. К аппроксимации ограниченного по простиранию наклонного пласта малой (а) и большой (б) мощностями двумерным телом.  
 $\sigma = 1 \text{ г/см}^2$ .

раметрами. Естественно, это будет проявляться и в гравитационном поле.

Чтобы оценить характер и абсолютное значение погрешностей, вносимых при аппроксимации трехмерных произвольной формы тел двумерными, выполним расчеты поля над разными моделями. Вначале покажем возможность аппроксимации отдельных ограниченных по простиранию наклонных пластов двумерными (рис. 6.1). Анализ кривых  $\Delta g$  позволяет сделать вывод, что считать пласты заданного сечения двумерными в пределах допустимых погрешностей (0,02 мгал) можно только при их значительной вытянутости по простиранию ( $l > 1000$  м;  $l$  — половина длины пласта). С увеличением мощности пласта при прочих одинаковых параметрах погрешность, вносимая такой аппроксимацией, растет. Опыт показывает, что даже при линейной вытянутости пластов, если их протяженность меньше 2000 м, задачу следует решать в трехмерном варианте.

В реальных геологических условиях линейное простирание элементов структур встречается очень редко. Как правило, они периодически отклоняются от некоторого основного направления. Приведем модель двумерного пласта, изменившего первоначальное направление простирания (при постоянной горизонтальной мощности), зона изгиба пласта аппроксимирована набором наклонных призм (рис. 6.2, а). Разность поля  $\Delta g$  (при  $y=0$ ) двумерного линейного пласта и трехмерного изогнутого значительна (до 0,16 мгал), причем разностная кривая имеет характер локальной аномалии (рис. 6.2, б). С увеличением мощности пласта эта разность полей растет. По мере удаления профиля от зоны изгиба в сторону прямолинейной части пласта значения разности поля резко уменьшаются, а характер их изменения приближается к линейному (рис. 6.2, в, табл. 6.1).

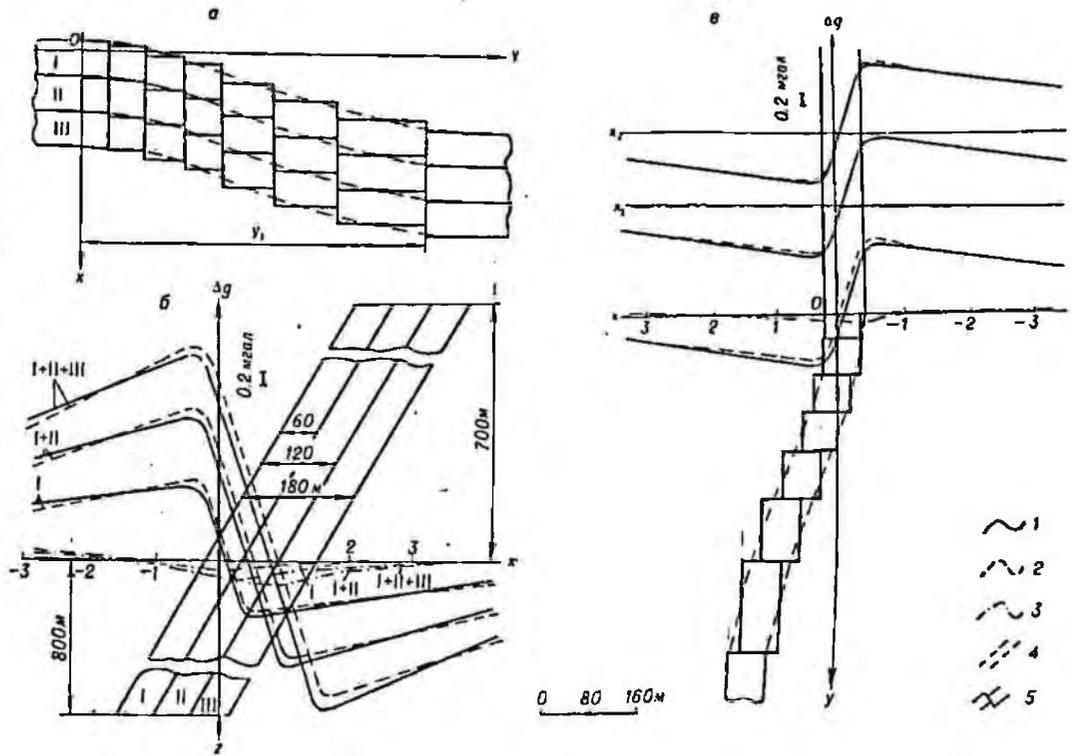
Таблица 6.1

Изменение разности поля (мгал) двумерной и трехмерной модели с удалением от зоны изгиба пласта

x, м	y, м		
	0	-180	-300
-300	0,026	0,010	0,007
-200	0,003	0,003	0,002
-100	-0,042	-0,015	-0,002
0	-0,157	-0,023	-0,006
100	-0,064	-0,020	-0,005
250	-0,008	-0,007	-0,004
400	0,016	0,008	0,006

Выше был рассмотрен отдельный изолированный пласт. Предполагалось, что от начала изгиба по направлению простирания

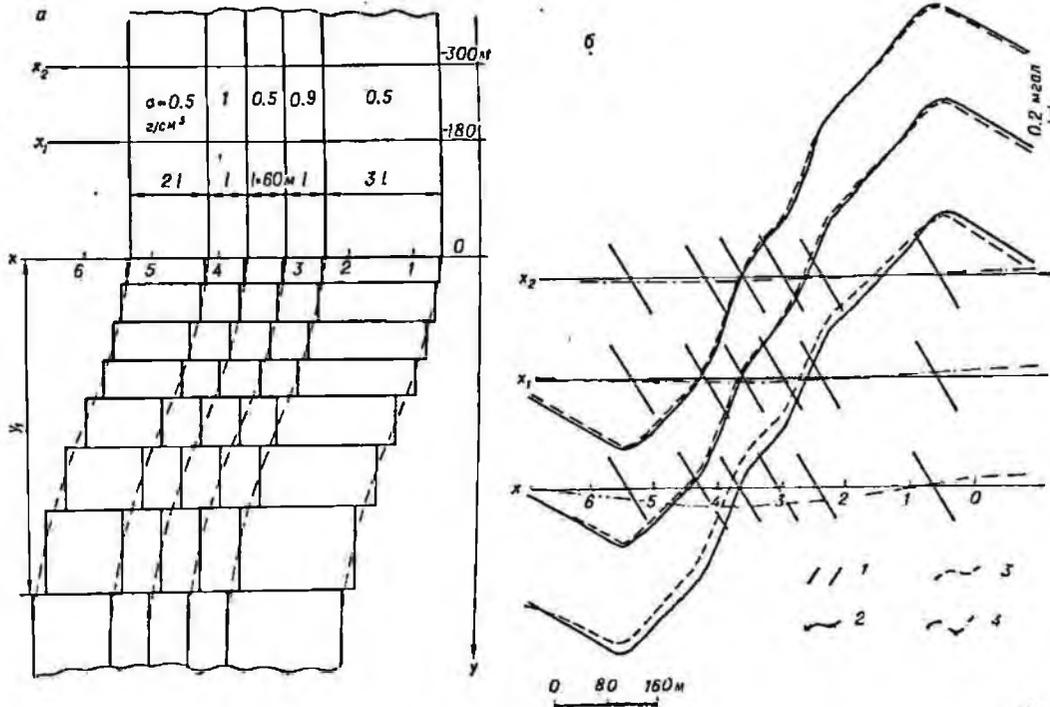
Рис. 6.2. К оценке возможности аппроксимации сложных в направлении простирания тел более простыми.



а — модель пласта; поведение разности поля  $\Delta g$  двумерного линейного и трехмерного изогнутого пласта; б — с изменением мощности пласта, в — с удалением профиля от зоны изгиба.

Кривая  $\Delta g$ : 1 — двумерного линейного пласта, 2 — трехмерного изогнутого пласта; 3 — разность поля  $\Delta g$  двумерного и трехмерного вариантов модели; контур трехмерной модели пласта: 4 — изогнутой формы, 5 — аппроксимированного наклонными призмами.

Рис. 6.3. Аппроксимация серии сложных пластов более простыми.



а — модель серии пластов; б — поведение разности поля  $\Delta g$  двумерной и трехмерной модели при удалении профиля от зоны изгиба пластов.

1 — контуры пластов трехмерной модели, аппроксимированных наклонными призмами; кривые  $\Delta g$ : 2 — трехмерной модели, 3 — двумерной; 4 — разность поля  $\Delta g$  двумерной и трехмерной модели.

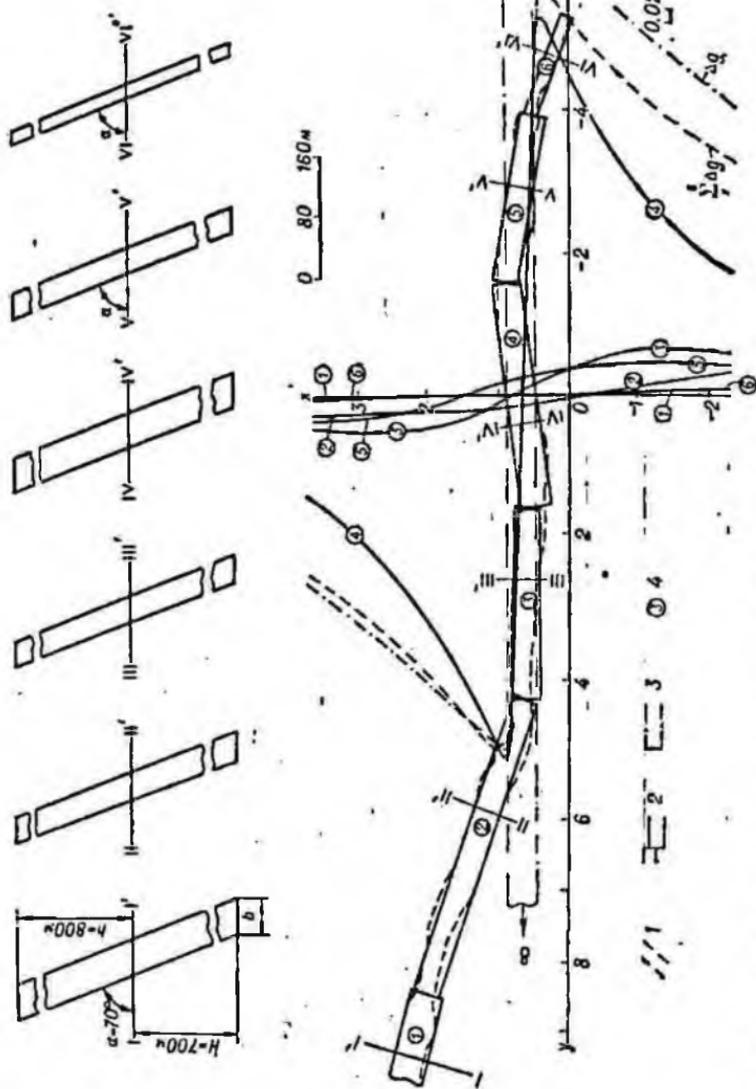


Рис. 6.4. К оценке возможности аппроксимации реального пласта сложной формы набором наклонных призм. Контакты: 1 — реального пласта, 2 — трехмерной модели, 3 — двумерной модели; 4 — номер элемента модели и соответствующий ему кривой  $\Delta\alpha$

массы постепенно выклиниваются и исчезают совсем. В реальных условиях это пространство, как правило, заполняется другими массами, более или менее плотными, т. е. пласт продолжает существовать, но с другой, чаще с переменной, плотностью (рис. 6.3, а). Расчеты показывают, что характер поля  $\Delta g$  для серии пластов при использовании двумерной и трехмерной модели остается соответственно таким же, как и для одного пласта. На границе изгиба пластов ( $y=0$ ) разность двумерных и трехмерных полей тоже достигает больших значений (до 0,3 мгал). С удалением линии наблюдения от зоны изгиба (рис. 6.3, б) абсолютные значения разности уменьшаются, а характер их изменения приближается к линейному (профили  $x_1$  и  $x_2$ ). Таким образом, при удалении профиля наблюдений на 300—500 м от изгибов структуры, ее можно считать двумерным телом.

Рассмотрим возможность аппроксимации двумерным телом пластов сложной конфигурации (рис. 6.4) — наиболее вероятной формы в реальных геологических условиях. Сделаем допущение, что в вертикальной плоскости пласт не подвергнут каким-либо нарушениям и имеет наклон  $70^\circ$ . Для оценки гравитационного влияния такого пласта разобьем его на шесть участков с относительно выдержанным простираньем, которые аппроксимируем пластообразными телами с осредненными параметрами. Поле  $\Delta g$  для такой модели по профилю  $x$  значительно отличается от полученного для пласта бесконечного простиранья (с сечением по линии  $IV-IV'$ ). Таким образом, двумерный вариант является весьма приближенным. Оценивая эффект каждого отрезка пласта, видим, что основную часть суммарного поля составляет влияние ближайшего к профилю (четвертого) участка. Это позволяет сделать вывод, что на значительном удалении от исследуемой выработки ( $>500$  м) как пластообразные, так и другие тела сравнительно сложной формы можно аппроксимировать более простыми геометрическими фигурами.

### 6.3. Учет детального строения структуры в вертикальной плоскости

Геологическое строение структуры в вертикальной плоскости, как правило, также весьма сложное. Наблюдаются пережимы пластов, смещения, выклинивания и т. д. Это усложняет решение прямой задачи, так как сечения пластов приходится задавать многочисленными элементарными фигурами. Требуются большие затраты времени для подготовки числового материала и машинного счета. Оценим возможности аппроксимации сложных сечений пласта более простыми моделями при расчете поля  $\Delta g$  с необходимой для практики точностью.

Возьмем пласты, имеющие одинаковые поперечные сечения, с размерами по простиранью  $\pm 80$  м и  $\pm \infty$  (рис. 6.5). Сечение пластов разделим на 12 частей, как показано на рисунке. Для



каждого элемента пласта вычислим поле  $\Delta g$  до и после смещения их в плоскости  $xOz$ . По кривым видно, что удаленные элементы пласта даже при малых размерах по простиранию (до  $\pm 80$  м) создают нелинейные аномалии  $\Delta g$  интенсивностью 0,015—0,02 мгал. При смещении элементов пласта в плоскости  $xOz$  смещаются и создаваемые ими гравитационные аномалии. Это не относится к элементам, удаленным от горизонта исследований по вертикали на 200 м и больше при  $y = \pm 80$  м и на 300 м и больше при  $y = \pm \infty$ ; здесь смещение практически не сказывается на аномальных полях. В то же время соответствующие суммарные эффекты от всех элементов пласта различаются от 0,03 мгал (при  $y = \pm 80$  м) до 0,045 мгал (при  $y = \pm \infty$ ). Приведенные расчеты показывают, что при моделировании структуры следует детально задавать каждый ее пласт в пределах  $\pm 300$  м от горизонта исследований, а ниже и выше ее можно аппроксимировать более простыми формами.

#### 6.4. Учет влияния удаленных частей структуры

Под удаленными будем понимать элементы структуры, находящиеся относительно профиля наблюдения по вертикали не ближе  $\pm (500 \div 700)$  м и по горизонтали не ближе 300—500 м. Указанные пределы в зависимости от контрастности аномальных плотностей, а также от морфологических особенностей структуры, могут изменяться в ту или иную сторону. Влияние удаленных частей покажем на примере одного из участков рудника им. Коминтерна (Криворожская структура). Этот участок расположен в центральной части Саксаганской полосы, протяженность которой достигает 40 км при горизонтальной мощности до 6 км, что позволяет считать данную структуру двумерным телом.

Общее геологическое строение участка [91] характеризуется геолого-геофизическим разрезом, представленным на рис. 6.6; здесь близко расположенные массы (контур  $abcd$ ) не детализированы. Их физико-геологическая модель показана на рис. 6.7. Аномальные плотности отдельных комплексов пород взяты по отношению к плотности вмещающих структуру гранитов и мигматитов ( $\sigma = 2,60$  г/см<sup>3</sup>). Вычислены аномалии силы тяжести на разных горизонтах, обусловленные близко расположенными массами и структурой в целом. Эти поля различаются как по градиенту, так и по характеру изменения вдоль профиля. Гравитационное влияние удаленных частей структуры, которым, как правило, стремятся пренебречь, на всех горизонтах непостоянное и даже нелинейное. В пределах криворожской серии пород (границы  $abcd$ ), мощность которой составляет 1250 м, оно изменяется от 0,6 мгал на горизонте 307 м до 1,74 мгал на горизонте 815 м. Даже в пределах ортов, длина которых, как правило, 200—300 м, изменение поля нелинейное и колеблется от

0,08 мгал на горизонте 307 м до 0,25 мгал на горизонте 815 м (имеется в виду, что орты пройдены в пределах  $K_2^{3-4c} - K_2^{6ж}$ ).

Результаты расчетов показывают, что необходимо учитывать влияние не только близко расположенных частей структуры, но и удаленных. Если пренебречь удаленными элементами, то значительно уменьшится градиент поля; в этом случае вычисленные

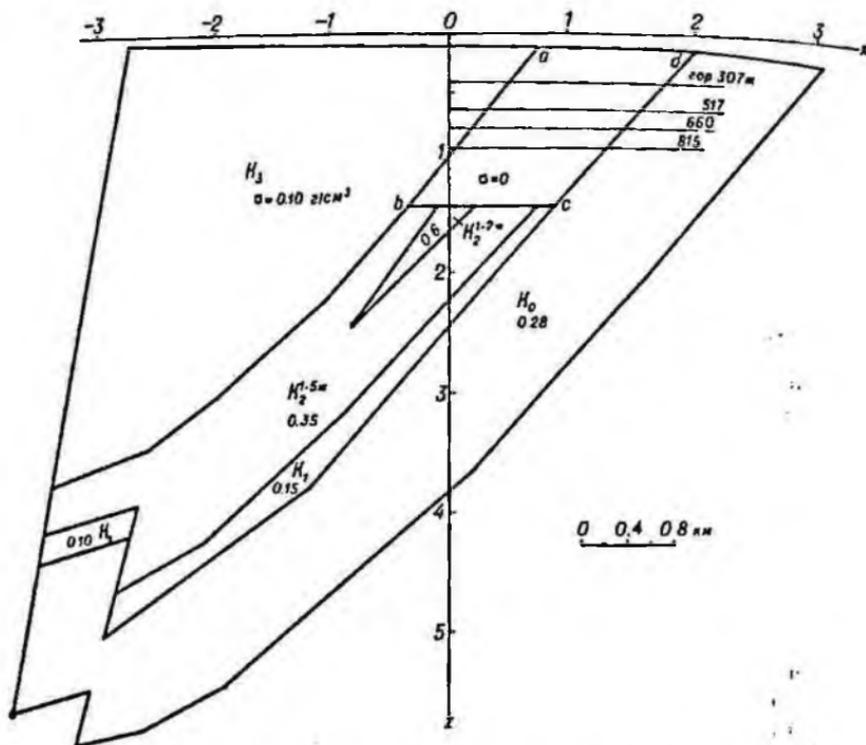


Рис. 6.6. Разрез модели Криворожской структуры на участке рудника им. Коминтерна.

аномалии модели структуры и наблюдаемые в горных выработках будут практически несопоставимы. К подобному эффекту приводит также неправильный выбор аномальных плотностей элементов структуры (точнее, плотности вмещающих пород, относительно которой они определяются). В качестве вмещающего следует брать такой комплекс пород, который включает всю структуру, контролирующую интересующие нас геологические неоднородности.

Надо заметить, что аналогичным образом сказывается влияние структуры на вторые производные гравитационного потенциала. Так, поле  $V_{xz}$  и  $V_{zz}$  модели Криворожской структуры, рассчитанное для нескольких горизонтов, имеет весьма сложный

характер (рис. 6.8). Влияние удаленной части модели в пределах существующих горных выработок составляет 5—20 Э для  $V_{xz}$  и 10—20 Э для  $V_{zz}$ ; изменяется оно линейно. Поэтому эффект удаленных частей структур можно не учитывать, а близко

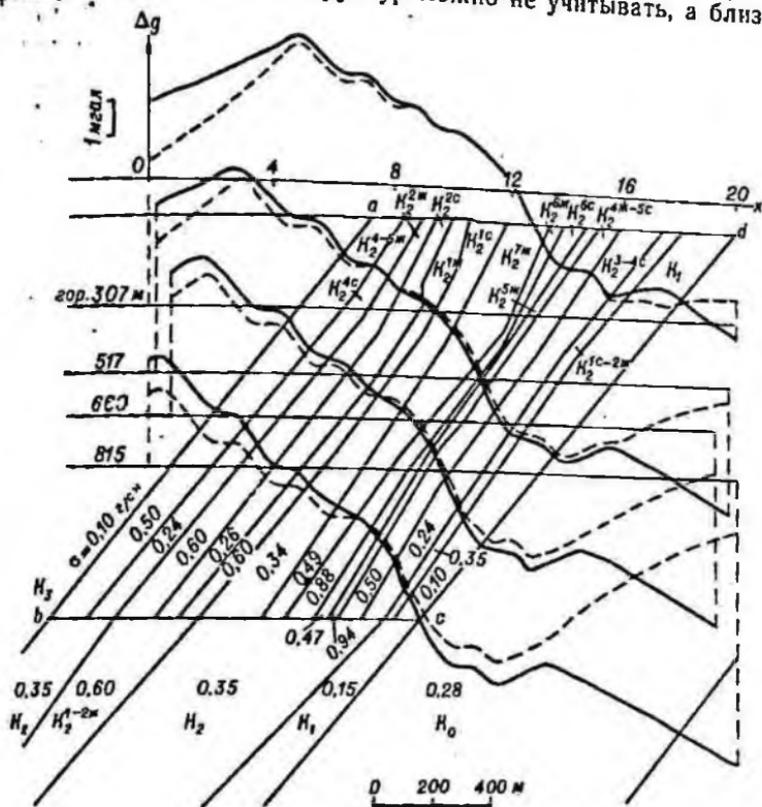


Рис. 6.7. Аномалии  $\Delta g$  модели Криворожской структуры.

Кривые  $\Delta g$ : 1 — для структуры в целом, 2 — для контура  $abcd$ .

расположенных — вычислять со всей детальностью. В зависимости от сложности структуры в направлении простирания следует ожидать ее существенного влияния на функции  $V_{xy}$  и  $V_{yz}$ .

### 6.5. Расчет гравитационного влияния модели структуры

При учете гравитационного влияния структур, контролируемых искомыми возмущающими телами, требуется максимально приблизить их модели к фактическому геологическому строению.

При этом надо использовать все имеющиеся геологические и геофизические данные о строении структуры, как ее глубинной части, так и близко расположенной к исследуемым выработкам. Особое внимание следует уделять всем известным особенностям детального геологического строения в радиусе  $\sim 500$  м от пункта наблюдений. На основании анализа указанных данных выби-

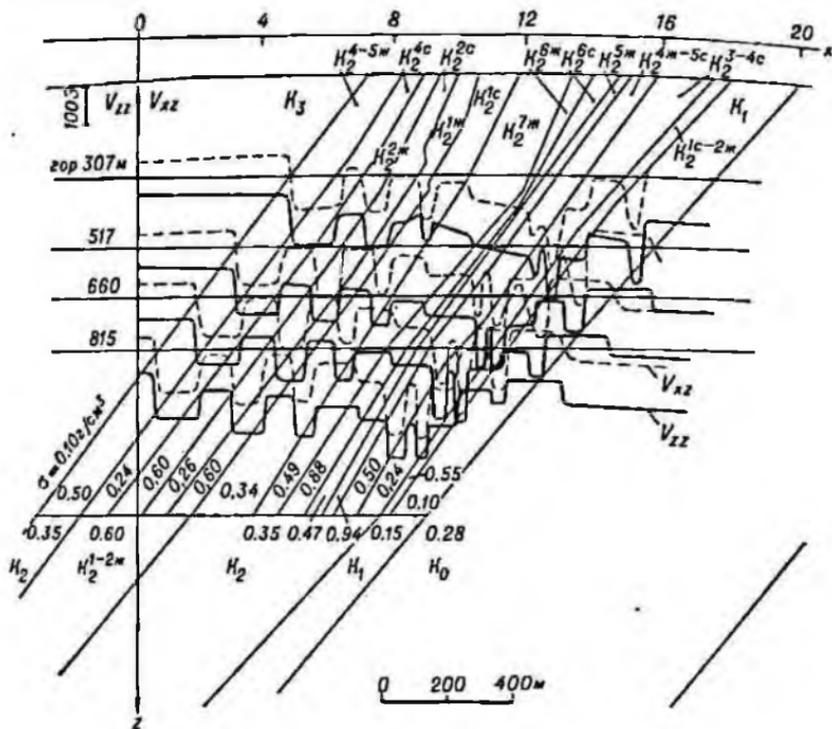


Рис. 6.8. Поле  $V_{xx}$  и  $V_{zz}$  модели Криворожской структуры.

рают форму, размеры и аномальную плотность тел, которыми аппроксимируются отдельные элементы структуры. Их классифицируют на двумерные и трехмерные. При этих операциях следует руководствоваться выводами о возможности аппроксимировать морфологически сложные элементы структуры телами правильной геометрической формы.

В зависимости от выбранной формы принимают соответствующий способ вычисления гравитационного влияния всей структуры, который позволил бы получить поле тел, произвольно расположенных в пространстве, по секущим эти массы профилям. Из практики известно, что при поисках возмущающих тел в подземных условиях приходится иметь дело с аномалиями силы тяжести  $0,05-0,10$  мгал, а вторых производных — первые

десятки этвеш. Это требует расчета поля  $\Delta g$  с погрешностью не выше 0,02 мгал, а вторых производных — не больше 10 Э. Учитывая большой объем вычислений, желательно выбирать методы решения прямой задачи с применением ЭВМ.

Как показал опыт, наиболее приемлемыми являются методы, в основу которых заложено численное интегрирование. На практике хорошо зарекомендовал себя способ решения прямой задачи, разработанный Г. Я. Голиздрой [92, 93]. Сущность этого способа заключается в следующем. В качестве элементарной массы принят цилиндр, у которого образующие параллельны оси  $y$ , а сечение имеет форму  $n$ -угольника (рис. 6.9). Уравнение стороны  $n$ -угольника (полигона), проходящей через точки с координатами  $x_i, z_i$  и  $x_{i+1}, z_{i+1}$  имеет вид

$$x' = a_i z' + c_i, \quad (6.1)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_i &= (x_{i+1} - x_i) / (z_{i+1} - z_i); \\ c_i &= (x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) / (z_{i+1} - z_i). \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Если массы ограничены по простиранию плоскостями  $y' = b_1$  и  $y'' = b_2$ , то поле силы тяжести  $\Delta g$  таких трехмерных масс можно записать в виде

$$\Delta g = k \sum_{i=1}^n \sigma_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} \left[ \operatorname{arctg} \frac{(x - a_i z' - c_i)(y - b_2)}{(z - z') \sqrt{(x - a_i z' - c_i)^2 + (y - b_2)^2 + (z - z')^2}} - \operatorname{arctg} \frac{(x - a_i z' - c_i)(y - b_1)}{(z - z') \sqrt{(x - a_i z' - c_i)^2 + (y - b_1)^2 + (z - z')^2}} \right] dz'. \quad (6.3)$$

Если массы двумерные (при  $b_2 \rightarrow -\infty, b_1 \rightarrow +\infty$ ), то выражение поля  $\Delta g$  принимает вид

$$\Delta g = 2k \sum_{i=1}^n \sigma_i \int_{z_i}^{z_{i+1}} \operatorname{arctg} \frac{x - a_i z' - c_i}{z - z'} dz'. \quad (6.4)$$

Интегралы в (6.3) и (6.4) решаются численно при фиксированном числе ординат или автоматическом выборе числа узлов, пока не будет достигнута необходимая (заданная) точность вычисления. Достоинство формул (6.3) и (6.4) заключается в том, что они пригодны для вычисления поля  $\Delta g$  не только вне масс, но и на поверхности и внутри их.

Пусть необходимо вычислить поле  $\Delta g$  по профилю с аппликатой  $z$ , проходящему внутри масс. Для ликвидации особенностей подынтегральных функций в формулах (6.3) и (6.4) из пласта вырезаются массы в виде горизонтального слоя толщиной  $2\Delta$  (см. рис. 6.9). При малом  $\Delta$ , например равном 1 м, выбрасываемая часть масс не вносит заметных искажений в вычисленное поле  $\Delta g$ . Алгоритм разработан таким образом, что

эта операция осуществляется автоматически с учетом всех возможных ситуаций. Программы для вычисления поля по формулам (6.3) и (6.4) записаны на алголе и получили название

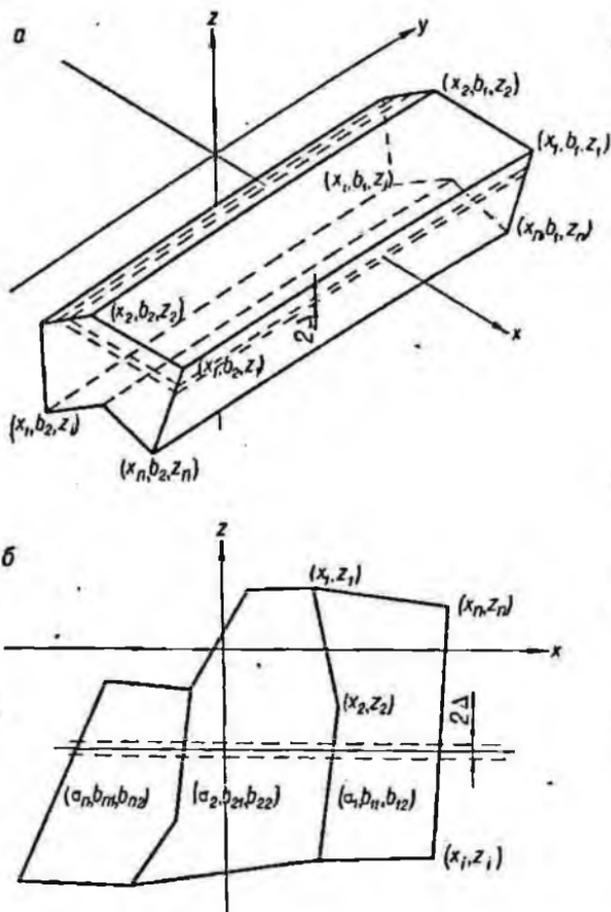


Рис. 6.9. К решению прямой задачи на ЭВМ по программам «Полигон-2» и «Полигон-3» (по Г. Я. Голлздре).

а — схема полигона в пространстве; б — схема сечения системы полигонов плоскостью  $xOz$ .

«Полигон-3» (для трехмерных тел) и «Полигон-2» (для двумерных). При подземных измерениях не исключена ситуация, при которой профиль проходит под некоторым углом  $\alpha$  к образующим цилиндра. Это можно учесть поворотом системы координат.

При учете влияния структуры приходится вычислять поле мелких пластов. В этом случае бывает удобно выдавать на печать поле не только каждого полигона, но и их группы — так называемого «слоя». Сумма полей отдельных «слоев» дает поле всего разреза. Исходными данными для вычисления поля разреза являются: координаты углов  $(x_i, y_i, z_i)$  каждого полигона, плотность  $\sigma$ , погрешность  $\epsilon$  вычисления поля, величина  $\Delta$ , количество полигонов и «слоев» в разрезе, начальные и конечные точки расчета на каждом профиле и шаг вычислений  $\Delta x, \Delta y$  и  $\Delta z$ . При наличии ограниченных по простиранию масс в исходные данные для каждого полигона включаются размеры тел по простиранию  $b_1$  и  $b_2$ .

## 6.6. Методика выделения локальных аномалий

Для выделения локальных гравитационных аномалий рекомендуемым способом необходимо выполнить следующие операции.

1. Составить модель структуры, контролирующей искомые возмущающие тела. В качестве исходных данных следует принимать геологические и геофизические результаты исследований глубинной и околосформированной части структуры.

2. Используя данные о плотности горных пород на участке исследований и в пределах всей структуры, установить аномальные плотности отдельных ее элементов. Аномальные плотности следует определять по отношению к комплексу пород, вмещающих всю структуру в целом.

3. Вычислить гравитационный эффект от модели структуры и нанести в виде графика на ее разрез.

4. Перемещая полученную кривую элемента поля параллельно самой себе в вертикальной плоскости, найти наилучшее ее совмещение с наблюдаемой, предварительно привязанной к фактическому геологическому разрезу. При совмещении надо следить за соответствием характерных для отдельных участков структуры особенностей поля, а также литологических (петрографических) и стратиграфических контактов модели и реальной структуры.

5. При удовлетворительном совмещении наблюдаемого и теоретического полей вычислить их разность. Анализируя характер разностной аномалии, устанавливают соответствие отдельных особенностей поля различным геологическим неоднородностям. При этом учитывают геологические факторы, а также физико-геологические поисковые критерии и признаки для данного месторождения. Детально изучают и принимают во внимание все известные рудные тела, горные сооружения, зоны обрушения, пустоты, образовавшиеся в результате эксплуатации месторождения, и другие факторы, которые могут найти отражение в разностном поле.

В качестве примера рассмотрим выделение локальных аномалий в орте оси 7 на горизонте 410 м шахты «Центральная» рудника им. Фрунзе (Кривбасс). По геофизическим и геологическим данным [91], а также по результатам эксплуатационной разведки построена модель структуры на данном участке, представляющая собой двумерное тело (рис. 6.10). Аномальные плотности элементов разреза определены по отношению к вмещающим структуру горным породам.

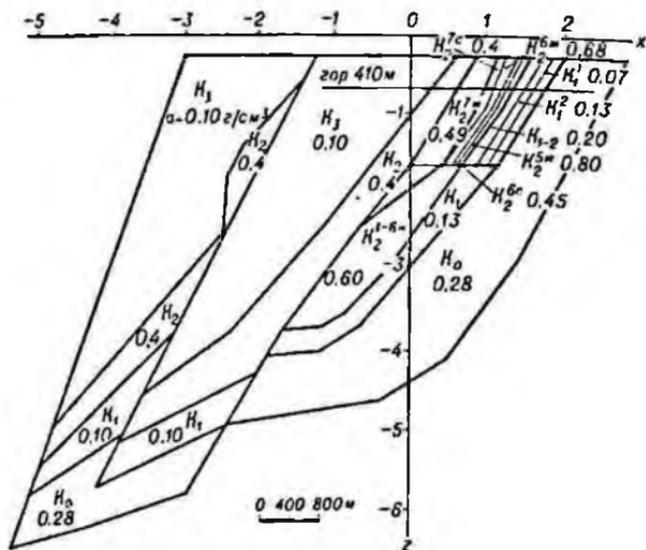


Рис. 6.10. Разрез модели Криворожской структуры по оси 7 шахты «Центральная» (рудник им. Фрунзе).

По программе «Полигон-2» вычислена теоретическая кривая  $\Delta g$  от выбранной модели для оси 7 на горизонте 410 м (рис. 6.11). Особенностью поля является резкая смена его градиента на границе слоев  $K_{1-2}$  и  $K_2^{5c}$ . Кроме того, начиная с  $K_2^{5ж}$  в западном направлении на фоне возрастающего поля видны заметные площадки, контролируемые  $K_2^{6c}$  и  $K_2^{7c}$ . Эти особенности были в первую очередь использованы при сопоставлении наблюдаемых аномалий и поля от модели структуры. После совмещения полей была найдена разностная кривая  $\Delta g$ . В результате интерпретации ее методом подбора получен геологический разрез, показанный на рис. 6.11. Выяснилось, что стратиграфические контакты модели структуры в основном соответствуют фактическому разрезу. Разностная аномалия полностью объясняется влиянием следующих неоднородностей, не учтенных в модели: 1) зона окисления роговиков  $K_2^{7ж}$ ; 2) рудная залежь «Северная-1» в



ным влиянием структуры и по направлению штреков. Методика разделения полей по штрекам аналогична вышеописанной.

Локальные аномалии вторых производных выявляют так же, как и поля  $\Delta g$ .

## 7. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Источниками осложнений гравитационного поля являются, как известно, геологические неоднородности земной коры, форма, размеры и глубина залегания которых весьма разнообразны. В соответствии с этим и аномалии гравитационного поля имеют разнообразный облик, размеры и интенсивность. Обычно измеренные аномалии имеют «шероховатый» вид и принадлежат сразу нескольким телам. Все это не позволяет предложить единственный, универсальный, способ их интерпретации. Как правило, каждая аномалия, наблюдаемая даже на поверхности Земли, требует индивидуального подхода. Тем более это относится к аномалиям, измеренным в горных выработках, поскольку они имеют ряд особенностей.

1. Измерения часто выполняются на одном профиле, поэтому нельзя полностью проследить аномалию возмущающего тела.

2. Направление профиля определяется направлением выработки, поэтому линия наблюдений может располагаться относительно возмущающего тела не самым эффективным образом.

3. Профили, как правило, не выходят за пределы аномальных участков поля, поэтому задачу приходится решать по отдельным фрагментам аномалий.

4. Возмущающее тело может располагаться в любой точке пространства, поэтому появляются дополнительные (по сравнению с наземными) параметры тела, подлежащие определению (местоположение и знак аномальной плотности).

5. Однозначное указание положения возмущающего тела и знака его аномальной плотности требует измерения одного элемента поля в нескольких выработках, определенным образом расположенных относительно предполагаемых масс, или нескольких элементов в одной выработке, что не всегда возможно.

6. Возмущающее тело может одновременно находиться выше и ниже или справа и слева от выработки. Значит, аномалиеобразующей массой будет не все тело, а разность его частей, расположенных по разные стороны от выработки.

Различают качественную и количественную интерпретацию аномалий гравитационного поля. На определенном этапе эксплуатационной разведки требуется установить хотя бы наличие возмущающих тел в околоразработанном пространстве, указать их местоположение (квадрант или полупространство) и знак ано-

мальной плотности. В этом случае достаточно воспользоваться способами качественной интерпретации. Если необходимо дополнительно определить форму и размеры возмущающих тел, количество масс и удаленность их от горной выработки, следует прибегнуть к количественной интерпретации.

## 7.1. Качественная интерпретация

Эта операция должна установить наличие возмущающих тел в околывыработанном пространстве, по общему виду и характерным особенностям аномалий определить их геометрическую форму, местоположение в пространстве и знака аномальной плотности. Процесс качественной интерпретации заключается, как правило, в сравнении облика поля, измеренного по линии тел правильной геометрической формы. В качестве моделей обычно выбирают шар, параллелепипед, круговой цилиндр, наклонный пласт и т. д. [17, 36, 40, 41, 43, 45—47, 94 и др.]. Несмотря на сложность аномалий, измеряемых в горных выработках, всегда можно выявить общий характер их изменения вдоль линии наблюдения и сопоставить его с теоретическим. Если они подобны, можно утверждать, что по знаку плотности и местоположению реальное возмущающее тело соответствует модели. Более детальный анализ облика аномальных кривых позволяет судить о форме возмущающих тел.

В разделе 2 настоящей работы были приведены аномальные кривые  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ ,  $V_{\Delta}$ ,  $V_{zz}$  цилиндрических ограниченных по простиранию тел, оси которых наклонены к осям  $x$  или  $y$  (см. рис. 2.2, 2.3), а также векторы  $V_{ax}$ ,  $V_{ay}$ ,  $V_{az}$  (см. рис. 2.4); дано описание характера изменения элементов поля по линии наблюдения в зависимости от положения и ориентировки тел в пространстве. При обсуждении поисковых возможностей элементов гравитационного поля было показано, какую информацию может дать каждый элемент в отдельности и в комплексе с другими. Эти выводы можно считать рекомендациями для практического выполнения качественной интерпретации.

## 7.2. Количественная интерпретация

Способы количественной интерпретации опираются на определенный математический аппарат, обеспечивающий выявление связей между параметрами возмущающего тела и обусловленным им гравитационным эффектом по профилю или на некоторой площади. В зависимости от ограничений, накладываемых на форму объектов и на распределение масс внутри них, обычно все известные способы количественной интерпретации подразделяют на две группы: для тел правильной геометрической формы и для тел сложной (произвольной) формы. В зависимости от

математического обеспечения различают пять способов: характерных точек (или аналитический), прямой (или интегральный), сопоставления, подбора и сеток.

Ниже изложена методика применения некоторых модификаций указанных способов, получивших наиболее широкое распространение при истолковании результатов подземных гравиметрических исследований.

### 7.2.1 Способ

характерных точек

Интерпретация способом характерных точек возможна при наличии «чистых» и «гладких» единичных аномалий, из-за чего область его применения ограничена. Этот способ опирается на определенные формулы, полученные для конкретных форм возмущающих тел. Используя характерные точки аномального поля, по формулам или номограммам, построенным на основании этих формул, можно быстро вычислить параметры возмущающего тела. Достоинством способа является и то обстоятельство, что он не требует знания аномальной плотности. К недостаткам способа надо отнести априорное использование тел правильной геометрической формы.

Рассмотрим содержание этого способа для некоторых форм возмущающих тел.

**Шар.** По аномалиям гравитационного поля над шаром можно в первую очередь определить удаление его центра от профиля наблюдения. Предполагается, что массы расположены вне горизонтальной плоскости наблюдения (рис. 7.1, а).

При измерении  $\Delta g$  по оси  $x$  расположение плоскости  $yOz$ , проходящей через центр шара, устанавливают по максимальному значению поля; удаление тела в этой плоскости определяют из соотношения [95]

$$\rho = \sqrt{y^2 + z^2} = 1,305x_{0,5}, \quad (7.1)$$

где  $x_{0,5}$  — координата точки, в которой  $\Delta g = 0,5 \Delta g_{\max}$  (рис. 7.1, б).

При измерении  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$  и  $V_{xy}$  расстояние до плоскости  $yOz$  находят по координатам точек  $V_{xz} = V_{xy} = 0$  или  $V_{yz \max}$  (рис. 7.1, в), а удаление в этой плоскости от профиля определяют из соотношений:

$$\left. \begin{array}{l} \text{по } V_{yz} \quad \rho = 1,767x_{0,5} \\ \text{по } V_{xz} \text{ и } V_{xy} \quad \rho = 2x_e \end{array} \right\} \quad (7.2)$$

где  $x_{0,5}$  — координата точки, в которой  $V_{yz} = 0,5 V_{yz \max}$ ;  $x_e$  — координата точки, в которой  $V_{xz} = V_{xz \max}$  и  $V_{xy} = V_{xy \max}$ .

Совместное рассмотрение аномалий  $\Delta g$  и  $V_{xz}$  позволяет получить простое соотношение для определения  $\rho$ :

$$\rho^2 = 3x \Delta g / V_{xz} - x^2, \quad (7.3)$$

где  $\Delta g$  и  $V_{xz}$  — значения поля в произвольной точке профиля с координатой  $x$ .

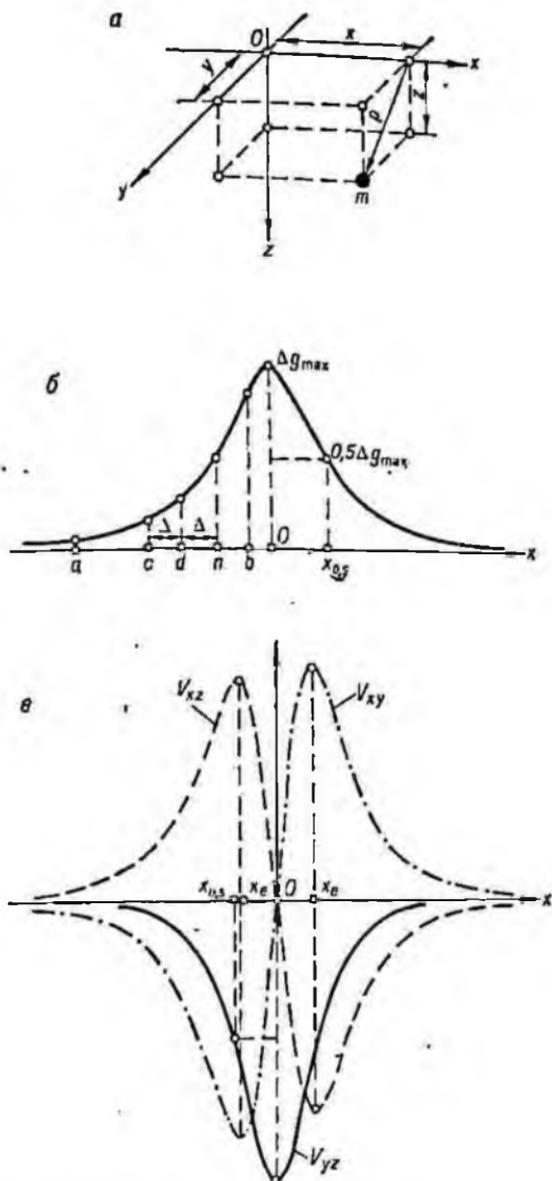


Рис. 7.1. К аналитическому способу интерпретации гравитационного поля над шаром.

$a$  — схема расположения тела в пространстве; характерные точки:  $b$  — аномалии  $\Delta g$ ,  $c$  — аномалий  $V_{xz}$ ,  $V_{xy}$ ,  $V_{yz}$ .

При известных расстояниях  $\rho$  и значениях аномалий  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$  и  $V_{xy}$  в соответствующих точках легко определить направление на центр масс в пространстве:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= V_{xz}/V_{xy}; & \sin \varphi &= xV_{xz}/(\rho V_{xy}); \\ \cos \varphi &= \rho V_{yz}/(3 \Delta g_{\max}); & \cos \varphi &= xV_{yz}/(\rho V_{xz}). \end{aligned} \right\} \quad (7.4)$$

Зная  $\varphi$ ,  $\rho$  и значение одного из элементов поля ( $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ ) в произвольной точке профиля, можно определить массу возмущающего тела. По значениям поля в нескольких точках профиля находят радиус шара и его аномальную плотность.

В практике подземных гравиметрических исследований бывают случаи, когда профиль измерений не пересекает аномальную зону поля, а только входит в нее, т. е. наблюдается лишь фрагмент одной из ветвей аномальной кривой. По этому фрагменту требуется определить параметры возмущающей массы, расположенной в зазбойном пространстве. При известном значении аномальной плотности сравнительно просто разрешается задача о местоположении шарообразного тела. Пусть на участке выработки  $ab$  шар создает аномалию  $\Delta g$ , показанную на рис. 7.1, б. Значения  $\Delta g$  в точках профиля  $c$ ,  $d$  и  $n$  с координатами  $x$ ,  $x-\Delta$  и  $x-2\Delta$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Delta g_c &= \frac{kmz}{(x^2 + \rho^2)^{3/2}}; & \Delta g_d &= \frac{kmz}{[(x - \Delta)^2 + \rho^2]^{3/2}}; \\ \Delta g_n &= \frac{kmz}{[(x + 2\Delta)^2 + \rho^2]^{3/2}}, \end{aligned} \quad (7.5)$$

где  $m$  — масса шара;  $\Delta$  — интервалы между точками  $c$ ,  $d$ ,  $n$ ;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  — текущие координаты центра шара.

Взяв отношения  $\Delta g_c/\Delta g_d$  и  $\Delta g_c/\Delta g_n$  и выполнив некоторые преобразования, получим

$$\left. \begin{aligned} x &= \Delta [(A - 1)/(2A - B - 1) + 1/2]; \\ \rho^2 &= [(x - \Delta)^2 - Ax^2]/(A - 1), \end{aligned} \right\} \quad (7.6)$$

где

$$A = (\Delta g_c/\Delta g_d)^{2/3}; \quad B = (\Delta g_c/\Delta g_n)^{2/3}.$$

Таким образом определяется расстояние  $x$  от точки  $c$  до плоскости  $yOz$ , проходящей через центр тела, и удаление  $\rho$  тела в этой плоскости от линии профиля (см. рис. 7.1).

Если имеется вторая горная выработка, нормальная по отношению к рассмотренной, то аналогично можно найти координату  $y$  — расстояние до центра масс по оси  $y$  и величину  $\rho^2 = x^2 + z^2$  — удаление центра масс от профиля наблюдений в плоскости  $xOz$ . По известным координатам  $x$  и  $y$  легко определить координату  $z$ , а следовательно, положение тела в пространстве и другие его параметры (массу, а при известной плотности — радиус шара).

Пластообразные наклонные тела. При измерении гравитационного поля по выработкам, пересекающим такие тела, можно определить их видимую мощность, а при известном угле наклона  $\alpha$  истинную мощность  $d$ . Положения экстремальных значений поля  $\Delta g$  и значений  $V_{xz}=0$  соответствуют контактам значений  $a$  и расстоянию между ними — видимой мощности  $L$ . Истинная мощность пласта определяется из соотношения  $d=L \sin \alpha$ .

Это относится также и к наклонным телам других форм, например к наклонным цилиндрам. Заметим только, что эти соотношения справедливы, когда возмущающее тело пересекается выработкой. В противном случае параметр  $L$ , а следовательно, и  $d$ , будет завышен. Степень завышения зависит от расстояния между телом и профилем наблюдения и от угла наклона тела.

Пласт бесконечного простираения. При наличии аномалий  $\Delta g$  и  $V_{xz}$ , принадлежащих единичному пласту, можно воспользоваться соотношениями, позволяющими определять его аномальную плотность [96]:

$$\left. \begin{aligned} a &= \frac{\Delta g_{\max} - \Delta g_{\min}}{2\pi k L \sin 2\alpha \cdot [1 - (1/\tau) L \sin^2 \alpha \cdot (1/H_n - 1/H_b)]}; \\ a &= \frac{V_{xz \max}}{2\pi k \sin 2\alpha \cdot [1 - (1/\tau) L \sin^2 \alpha \cdot (1/H_n - 1/H_b)]} \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

где  $H_n$  и  $H_b$  — глубина соответственно до нижней и верхней границы пласта.

Приведенные соотношения могут быть использованы и для слоистых структур, состоящих из серии пластов. При этом будут получены кажущиеся аномальные плотности отдельных пластов относительно соседних вмещающих, но не аномальные плотности пластов по отношению к средневзвешенной плотности всей серии, как утверждают авторы работы [96]. Это следует учитывать при истолковании полученных результатов.

Горизонтальный ограниченный по простираению круговой цилиндр. Если возмущающее тело поддается аппроксимации таким цилиндром, то по измеренным значениям  $\Delta g$  можно определить его удаление  $\rho$  от профиля и размеры по простираению  $\pm b$  [97].

По экстремальному значению  $\Delta g_c$  и еще трем значениям поля  $\Delta g_m$ ,  $\Delta g_n$ ,  $\Delta g_k$ , взятым через равный интервал  $\Delta$  в направлении простираения тела, на основании выражения (5.18) составлены отношения

$$\left. \begin{aligned} A &= (\Delta g_c - \Delta g_m) / (\Delta g_c - \Delta g_n); \\ B &= (\Delta g_m - \Delta g_n) / (\Delta g_m - \Delta g_k) \end{aligned} \right\} \quad (7.8)$$

и построена их зависимость от размеров тела по простираению  $\pm b$  и удаления его  $\rho^2 = y^2 + z^2$  от профиля наблюдения (рис. 7.2).

Для решения задачи достаточно вычислить значения  $A$  и  $B$ , а затем при помощи рис. 7.2 найти величины  $\rho_0 = \rho/\Delta$  и  $b_0 = b/\Delta$ ,

откуда  $\rho = \rho_0 \Delta$  и  $b = b_0 \Delta$ . Результаты будут более достоверными, если их найти как средние по нескольким определениям  $\rho$  и  $b$  при разных  $\Delta$ .

Аналогичные вычисления можно выполнить по составляющей  $V_x$ , воспользовавшись разработками А. А. Юнькова [98].

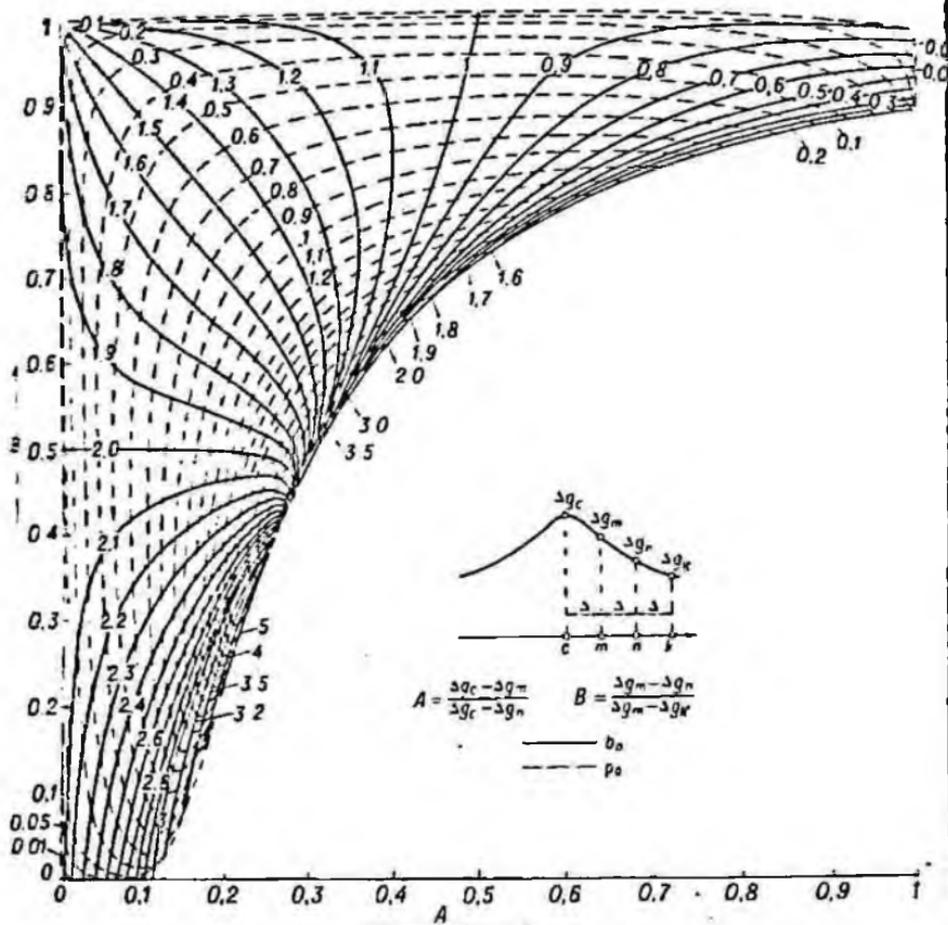


Рис. 7.2. Номограмма для определения параметров горизонтального ограниченного кругового цилиндра.

### 7.2.2 Способ подбора

Для сложных геологических разрезов способ подбора является одним из наиболее распространенных при количественной интерпретации гравитационных аномалий, измеренных в горных выработках. К его достоинствам следует отнести простую форму ввода дополнительной информации об изучаемом объекте в процессе интерпретации. Кро-

не того, исключаются требования о «чистых» единичных аномалиях. Аномалии, описывающие произвольное распределение масс в околывыработанном пространстве, могут быть любой сложности. Не является помехой и наличие нескольких возмущающих объектов.

Следует заметить, что из-за ограниченности профилей при подземных гравиметрических исследованиях выделить абсолютные значения аномалий не всегда возможно. Поэтому подбор в том понимании, в каком это принято при наземных съемках, выполнить трудно. В подземных условиях больше подходит термин «качественно-количественная оценка» гравитационных аномалий. Суть такой оценки заключается в следующем.

Максимально используя имеющиеся геологические факты и характер выделенных аномалий, предлагают варианты моделей возмущающих тел, т. е. задают их форму, размеры, положение в пространстве. Для каждой модели выбирают способ подбора, вычисляют гравитационный эффект и сопоставляют его с наблюдаемой аномалией. Особое внимание при этом обращают на характер наблюдаемого и вычисленного поля и в меньшей мере на их абсолютные значения. С большей достоверностью описываются все возмущающие тела в радиусе приблизительно 300 м и с меньшей — те массы, которые находятся дальше. Как правило, такие результаты вполне удовлетворяют требованиям эксплуатационной разведки.

Естественно, что при наблюдениях в длинных выработках, когда удастся получить абсолютные значения аномального поля, возможности гравиразведки резко возрастают.

При подборе возмущающих тел на их форму накладывается ряд ограничений, например, рассматривают горизонтальные цилиндрические тела произвольного сечения, ограниченные или бесконечные по простиранию; вертикальные или наклонные цилиндрические тела произвольного сечения, ограниченные по вертикали; тела произвольной формы, состоящие из горизонтальных или наклонных дисков, и др. В зависимости от формы возмущающих тел выбирают метод решения прямой задачи. Вводимые ограничения упрощают вычисление гравитационного эффекта. Однако ими можно пользоваться только при условии, если по профилю наблюдений разность гравитационных полей от реального тела и его модели не превышает погрешности измерения этих полей. Наилучшие совпадения гравитационных эффектов следует ожидать для моделей произвольной формы. Это не совсем подходит при ручном счете (по палеткам), но под силу любым современным ЭВМ.

Рассмотрим те способы подбора, которые опробованы и могут быть рекомендованы для практического использования в условиях подземных гравиметрических исследований. Все они основаны на вычислении прямого гравитационного эффекта от заданной модели возмущающего тела.

Линзообразные тела. Для подбора гравитационного эффекта возмущающих тел такой формы при интерпретации измерений в подземных выработках Е. А. Мудрецовой [26] предложены палетки. Возмущающее тело заменяется наклонным материальным листком с теми же контурами по падению, что и реальное тело, и с поверхностной плотностью  $\mu = \sigma d$ , где  $d$  — средняя толщина тела,  $\sigma$  — аномальная плотность. Предполагается, что масса равномерно распределена внутри контура листка. Способ удобно применять при вычислении гравитационного эффекта тела малой мощности; в противном случае возмущающий объект разбивается на ряд слоев, каждый из которых может быть заменен материальным листком.

Аномалия силы тяжести наклонного к горизонту на угол  $\alpha$  материального листка

$$\Delta g = V_z \cos \alpha + V_x \sin \alpha, \quad (7.9)$$

где  $V_x$  и  $V_z$  — составляющие соответственно по падению тела и по нормали к сечению тела (плоскости листка).

Составляющие  $V_x$  и  $V_z$  — определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} V_x &= k\mu (\sin \varphi_{i+1} - \sin \varphi_i) \left[ \ln \frac{r_{n+1} + \sqrt{r_{n+1}^2 + z_0^2}}{r_n + \sqrt{r_n^2 + z_0^2}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{r_{n+1}}{\sqrt{r_{n+1}^2 + z_0^2}} + \frac{r_n}{\sqrt{r_n^2 + z_0^2}} \right]; \\ V_z &= k\mu (\varphi_{i+1} - \varphi_i) \left[ \frac{z_0}{\sqrt{r_n^2 + z_0^2}} - \frac{z_0}{\sqrt{r_{n+1}^2 + z_0^2}} \right], \end{aligned} \right\} \quad (7.10)$$

где  $z_0$  — расстояние по нормали до плоскости листка;  $\varphi_i, \varphi_{i+1}, r_n, r_{n+1}$  — координаты площадок равного действия.

Принимая в этой формуле  $z_0 = 1$ , можно построить палетки для вычисления  $V_x$  и  $V_z$ . Контур изучаемого тела изображают на прозрачной бумаге в масштабе  $z_0$  и подсчитывают площадки равного действия палетки, попавшие в контур тела. Умножив на цену площадки, находят значения  $V_x$  и  $V_z$ . Следует заметить, что расстояние  $z_0$  от точки к точке профиля меняется, т. е. для каждой точки расчета поля следует строить контур в новом масштабе.

Достоинством способа является возможность при помощи материальных листков описать тела сколь угодно сложной формы и определить их гравитационное влияние, а недостатком — громоздкость его реализации.

В. В. Суворов [100] усовершенствовал способ Е. А. Мудрецовой. Он заменил палетки номограммами, построенными на основании тех же выражений (7.10). На рис. 7.3, а, б показаны номограммы (шаблон и номограмма) для вычисления  $V_x$ ; номограммы  $V_z$  имеют аналогичный вид.

Порядок вычисления  $\Delta g$  при помощи номограмм следующий.

1. Линзообразное тело заменяют материальным листком, совпадающим по падению и простираению с сечением линзы, и вычерчивают в произвольном масштабе на прозрачной бумаге.
2. На контуры листка наносят проекции расчетных точек.
3. Шаблон  $V_x$  (или  $V_z$ ) его центром совмещают с проекцией расчетной точки на материальном листке (точка  $O$ ), как пока-

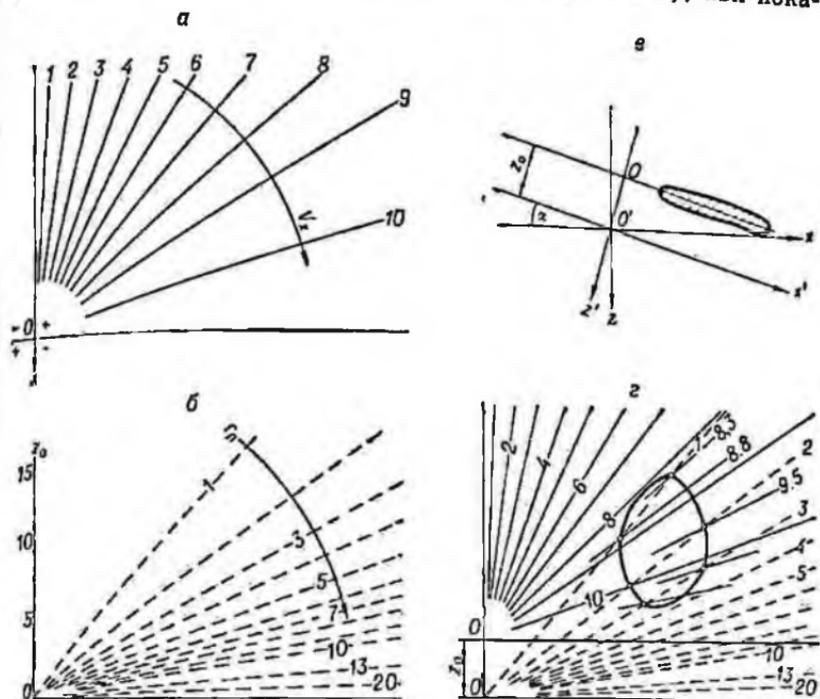


Рис. 7.3. К вычислению гравитационного эффекта по способу В. В. Суворова. а—шаблон  $V_x$ ; б—номограмма  $V_x$ ; в—схема расположения материального листка в плоскости  $xOz$ ; г—пример совмещения шаблона и номограммы с контуром листка при вычислении его гравитационного влияния.

зано на рис. 7.3, а, г (ориентировка осей шаблона  $V_x$  произвольная; ось  $x$  шаблона  $V_x$  должна быть направлена по падению возмущающего тела).

4. Номограмму точкой на оси  $z_0$ , соответствующей расстоянию до сечения линзы (в масштабе разреза), прикладывают к центру шаблона и по каждому его лучу снимают разность  $\Delta V_x$  (или  $\Delta V_z$ ) в точках пересечения луча  $r_n$  с контуром линзы.

5. По формуле  $V_x = 10^{-3} \sigma d \sum \Delta V_x$  вычисляют составляющую  $V_x$  (мгал) и аналогично  $V_z$  (здесь  $d$ —толщина листка в десятках метров).

6. По формуле (7.9) рассчитывают  $\Delta g$  с учетом положения точки относительно возмущающего тела.

Преимущество такого способа заключается в том, что расчет поля  $\Delta g$  возможен для точек, расположенных на любом расстоянии от плоскости листка, без перестройки шаблона, номограммы и разреза. Необходимая точность вычисления достигается изменением числа лучей шаблона.

Если возмущающие тела имеют сложную форму и значительную мощность, их можно аппроксимировать серией вертикальных материальных пластин. В этом случае для каждого элемента тела эффект  $\Delta g$  в точке вычисляется только по номограмме  $V_x$ .

Для вычисления градиентов Е. А. Мудрецов предлагает аналогичный метод, изложенный в работах [64, 99].

**Цилиндрическое ограниченное по простиранию тело.** Если такое возмущающее тело имеет простирание в плоскости наблюдения  $xOz$  или ей параллельной, то его гравитационное влияние можно вычислить по способу А. А. Юнькова [37—39, 77—79]. Методика расчета и формулы для этого случая приведены выше — при изложении методики учета влияния рабочей горной выработки. Используя формулы (5.18), график для вычисления коэффициентов трехмерности (см. рис. 5.5), а также соответствующие палетки для двумерных и полубесконечных тел (их уравнения приведены выше), можно вычислить влияние цилиндрических тел с произвольным поперечным сечением, образующие которых ориентированы параллельно оси  $x$  ( $\alpha=0^\circ$ ), параллельно оси  $z$  ( $\alpha=90^\circ$ ) или наклонно к оси  $x$ .

Достоинством способа является возможность вычислить поле тел любых размеров по простиранию и произвольного поперечного сечения; недостатком — его некоторая громоздкость.

При вычислении гравитационного эффекта от горизонтальных и вертикальных цилиндрических тел с произвольным поперечным сечением можно зафиксировать их размеры по простиранию и построить специальные палетки.

Для подбора поля  $\Delta g$  и  $V_{xz}$  над горизонтальными цилиндрическими телами такие палетки были построены К. Ф. Тяпкиным [101]. Рабочие формулы для расчета палеток имеют вид

$$\left. \begin{aligned} V_{xz} &= \frac{k\gamma}{2} (\cos 2\varphi_{i+1} - \cos 2\varphi_i) \left[ \ln \frac{\sqrt{r_{n+1}^2 + b^2} + b}{\sqrt{r_{n+1}^2 + b^2} - b} + \right. \\ &\quad \left. + \ln \frac{\sqrt{r_n^2 + b^2} - b}{\sqrt{r_n^2 + b^2} + b} + \frac{b}{\sqrt{r_{n+1}^2 + b^2}} - \frac{b}{\sqrt{r_n^2 + b^2}} \right]; \\ \Delta g &= 2k\gamma b (\cos \varphi_{i+1} - \cos \varphi_i) \ln \frac{r_{n+1} + \sqrt{r_{n+1}^2 + b^2}}{r_n + \sqrt{r_n^2 + b^2}}, \end{aligned} \right\} (7.11)$$

где  $b$  — полудлина тела в направлении его простирания;  $r$ ,  $\varphi$  — координаты элементарных площадок палетки.

Когда  $b \rightarrow \infty$ , эти выражения преобразуются в рабочие формулы известных палеток для двумерных тел (Г. Юнга, Г. А. Гамбурцева и др.).

Для интерпретации  $\Delta g$  над вертикальными ограниченными цилиндрическими телами можно воспользоваться палетками К. Ф. Тяпкина [102], рабочая формула которых в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\Delta g = k\sigma (\varphi_{l+1} - \varphi_l) (r_{n+1} - r_n - \sqrt{r_{n+1}^2 + H^2} + \sqrt{r_n^2 + H^2}), \quad (7.12)$$

где  $H$  — глубина нижней границы тела (глубина верхней границы полагается равной нулю);  $r$ ,  $\varphi$  — координаты элементарных площадок палетки.

Чтобы по таким палеткам рассчитать  $\Delta g$  над телом с параметрами  $H_v$  (глубина верхней границы тела) и  $H_n$  (глубина нижней границы тела), следует выполнить подбор по двум палеткам с соответствующими параметрами  $H=H_v$  и  $H=H_n$ , взять разность полученных результатов и умножить их на реальную аномальную плотность.

Аналогичные палетки для подбора  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  предложили Л. С. Прицкер и Е. И. Ишук [81], а для  $V_{xy}$  и  $V_{\Delta}$  — Н. Р. Бурьян [рабочие формулы представлены выражениями (5.19)].

Как следует из формул (5.19) и (7.12), для вычисления гравитационных эффектов от вертикальных цилиндров требуются серии палеток при различных глубинах до их верхних и нижних границ. Это создает определенные трудности, так как маловероятно, чтобы параметры палеток точно соответствовали действительным глубинам возмущающего тела. Аналогичные трудности возникают и при использовании палеток для горизонтальных цилиндрических ограниченных по простиранию тел.

В практике встречаются весьма сложные по форме возмущающие объекты; аппроксимирование их более простыми телами вносит существенные ошибки, а разбиение на элементарные формы резко повышает объем вычислительных операций. В этих случаях, как и в более простых, целесообразно использовать ЭВМ. Преобладающее большинство машинных методов интерпретации разработано в предположении, что массы находятся только в одном полупространстве. Незначительные доработки по расчету поля внутри масс позволяют использовать эти методы при решении задач подземной гравиразведки.

Интерпретация гравитационного поля на ЭВМ выполняется в два этапа. На первом по совокупности геологических и геофизических данных предлагается схема геологического строения района. Для подтверждения правильности этой схемы на втором этапе решается прямая задача гравиразведки и полученное поле модели сопоставляется с наблюдаемым. При недопустимом их расхождении оба этапа повторяются вновь, т. е. все исходные геологические и геофизические данные пересматриваются.

В различных научных и производственных организациях разработан ряд алгоритмов и программ решения прямых задач

гравirazведки. Условно их делят на аналитические и аппроксимационные методы. При аналитических методах расчет поля над моделью выполняется по формулам для тел правильной формы. Более широкое распространение получили аппроксимационные методы, так как они позволяют определить поле от тел произвольной формы путем замены их суммой элементарных объектов простой формы. Различие множества аппроксимационных методов, по существу, заключается в выборе формы элементарной ячейки (трехмерная или двумерная призма, тонкий пласт, многоугольная пластина, уступ и т. д.). К аппроксимационным относится описанный выше и хорошо зарекомендовавший себя в условиях подземных гравиметрических исследований способ Г. Я. Голцдры [92].

В последнее время развиваются методы минимизации в приложении к решению обратной задачи гравirazведки; их обзор приведен в работе [103]. Эти методы позволяют создать замкнутую автоматизированную систему количественных расчетов. В систему включаются этапы рекогносцировочного характера (решение прямой задачи), поиск фонового эффекта и нового варианта геологической схемы. Заметим, что эти методы разработаны для случая расположения масс только в одном полупространстве; для применения в подземной гравirazведке они требуют соответствующей корректировки.

Широко используются ЭВМ при расчетах палеток, номограмм, таблиц и других средств интерпретации, что может повысить эффективность известных методов и способствовать разработке новых.

**7.2.3**  
**Способы интегральной интерпретации составлений в сетке**

**Интегральный (прямой) способ.** Этот способ основан на существовании связи между площадью, ограниченной аномальной кривой и ее горизонтальной асимптотой и некоторыми параметрами возмущающих тел (масса, координаты центра тяжести и др.). К его достоинствам следует отнести малые ограничения, накладываемые на форму тел, и возможность обойтись без данных об аномальной плотности. Основным недостатком способа является получение таких параметров объектов, переход от которых к конкретным особенностям геологического строения не всегда возможен. В первую очередь это касается объектов, состоящих из нескольких разоблаченных тел. Разработкой интегральных способов интерпретации результатов подземной гравirazведки занимались В. И. Андреев, К. И. Соколовский [104], Л. С. Прицкер, В. И. Шадхин [103] и др.

Л. С. Прицкер и В. И. Шадхин предлагают с помощью специальных номограмм определять глубину нижней границы наклонного двумерного пласта и массу единицы его длины. Предполагается, что горная выработка пересекает пласт, а его истин-

ная мощность и глубина верхней границы известны. Номограммы построены на основании формулы

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta g dx = 2\pi kM, \quad (7.13)$$

где  $\Delta g$  — поле над наклонным двумерным пластом;  $M$  — масса единицы длины пласта.

Существенную трудность при реализации данного способа в условиях подземных исследований представляет ограниченность профилей наблюдений (горных выработок). Практически площадь  $S = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g dx$  определяется не в бесконечных, а в весьма

ограниченных пределах. Учитывать остаточные интегралы авторы не предлагают, что снижает эффективность метода.

Ограниченность профилей наблюдений, кроме того, сказывается как на изучении характера аномалии, так и на выборе уровня регионального поля. Для ослабления влияния указанных факторов В. И. Андреев и К. И. Соколовский [104] предлагают использовать для решения задачи не сами кривые аномального поля, а их отображение в полярной системе координат. Отображение, например аномалии  $\Delta g$ , строят следующим образом.

По общим соображениям определяют уровень регионального поля. Из выбранного начала координат через интервал  $\Delta\varphi$  проводят лучи до пересечения с аномальной кривой. В проекции точки пересечения на линию наблюдения снимают значения  $\Delta g_i$  и  $\Delta g_{\max} - \Delta g_i = \delta\Delta g_i$  и откладывают их в выбранном масштабе по направлению луча. Полученные точки соединяют соответственно плавными кривыми  $R = \Delta g(\varphi)$  и  $R_1 = \delta\Delta g(\varphi)$ . Авторами получены математические связи между площадями, ограниченными кривыми  $R$  и  $R_1$ , и глубиной до центра масс, а также массой тела. Способ разработан в двух- и трехмерном вариантах.

Способ сопоставления. Основан на сравнении наблюденного поля с рассчитанным для некоторой модели, обычно правильной геометрической формы. Существует целая серия комплектов теоретических кривых (палеток) для самых разных моделей (шар, цилиндр, пласт и др.). Благодаря успешному применению при наземных исследованиях, этот метод привлек внимание и подземной гравиразведке [106].

При наличии изолированной аномалии, принадлежащей возмущающему телу, расположенному в нижнем или верхнем полупространстве, метод применяется так же, как в наземных условиях. Если массы секутся горной выработкой, то при интерпретации аномалий  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  для вертикальных тел будут получены параметры, соответствующие разности масс, находящихся выше и ниже плоскости наблюдения. Аномалии, принадлежащие наклонным телам, следует сначала преобразовать к случаю вертикального падения [106], а затем выполнить интерпретацию.



горизонтов. Богатые руды приурочены к железистым горизонтам, сложенным роговиками и джеспилитами. Руды, как правило, имеют нечеткий контакт с вмещающими породами и сложную морфологию. Размеры и форма рудных залежей самые разнообразные.

Аномальная плотность руд относительно вмещающих их горных пород составляет 0,2—1,0 г/см<sup>3</sup>, а перепад плотности между сланцевыми и железистыми горизонтами — около 0,2 г/см<sup>3</sup>. Таким образом, имеются благоприятные предпосылки для подземных гравиметрических исследований.

Задачей съемки было выявление новых залежей железной руды в горизонте К<sub>2</sub><sup>2ж</sup>, не обнаруженных разведочными работами, а также изучение морфологии известной залежи «Скв. 2408».

Гравиметрические наблюдения выполнены с гравиметром ГАК-4В и градиентометром ГРБМ-2. Шаг измерений 10 м со сгущением в аномальных зонах до 5 и 2,5 м. Погрешность  $\Delta g$  составляет 0,03 мгал, а градиентов  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$  20 Э.

В аномальной зоне  $\Delta g$  проводились повысотные измерения силы тяжести ( $\Delta h=1$  и 1,2 м) с целью вычислений  $V_{zz}$ . На пункте выполнялась серия из пяти измерений  $\Delta g$  на высокой и низкой треногах. Вся серия обрабатывалась как один рейс. Средняя квадратическая погрешность в таких рейсах не превышала 0,015 мгал.

Результаты гравиметрических наблюдений изображены в виде графиков  $\Delta g$ ,  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{zz}$  и плана векторов  $V_{xz}$  (рис. 7.4). В направлении с севера на юг по штреку поле  $\Delta g$  плавно увеличивается и достигает максимального значения в районе пикетов 48—60. Далее аномалия  $\Delta g$  резко убывает, что может быть обусловлено влиянием столбообразной залежи «Скв. 2408». Так как эта залежь создает отрицательную аномалию  $\Delta g$ , то следует считать, что ее центр тяжести расположен выше плоскости наблюдений. Позже это было подтверждено горными работами, которые показали, что залежь «Скв. 2408» выклинилась на глубине 254 м.

Большой интерес представляет аномальная зона в пределах пикетов 48—60. Наблюдается резкое изменение значений и направлений векторов  $V_{xz}$ , что указывает на присутствие в этом районе аномальных масс. Пренебрегая мелкими локальными осложнениями поля, можно считать, что на данном участке профиля поле  $\Delta g$  положительное,  $V_{xz}$  в направлении север-юг меняет знак с плюса на минус,  $V_{yz}$  — отрицательное,  $V_{zz}$  — положительное. Такое распределение элементов поля, согласно рис. 2.2—2.5, может быть обусловлено избыточными массами, расположенными к востоку от штрека, с центром тяжести ниже горизонта наблюдения. Для проверки гравиметрических данных в аномальной зоне были пройдены скважины и горные выработки, которые вскрыли новую мощную залежь, названную «Геофизическая-2».

Как уже указывалось, при известной аномальной плотности возмущающих тел в пределах участка исследований задачу их поисков можно решить и ограниченным комплексом элементов гравитационного поля, например при помощи градиентов  $V_{xz}$  и  $V_{yz}$ . Это можно проиллюстрировать результатами подземных градиентометрических исследований на Ачисайском полиметаллическом руднике в Казахстане, выполненных в 1956—1957 гг. [25]. Шаг наблюдений был принят 5 м.

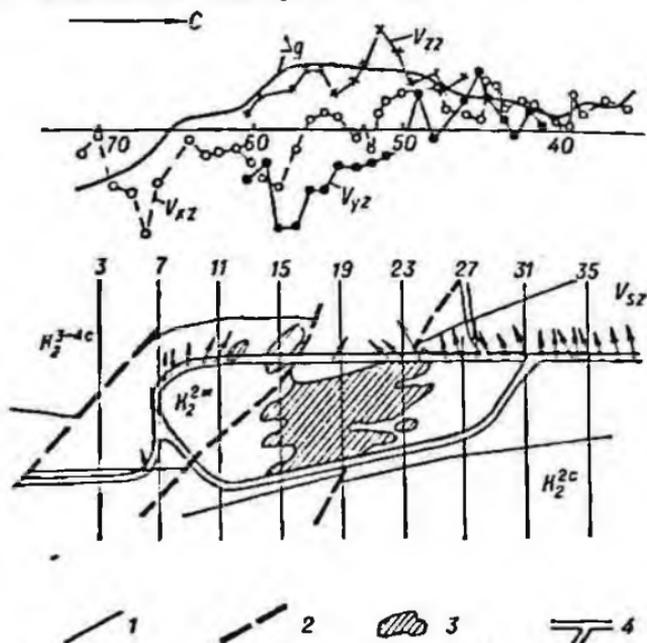


Рис. 7А. Результаты гравиметрических исследований на горизонте 312 м шахты «Комсомольская-2» рудника им. К. Либкнехта (по З. Г. Муромцевой).

1—границы стратиграфических подразделений; 2—тектонические нарушения; 3—контуры рудных тел; 4—горные выработки.

Рудные тела Ачисайского месторождения залегают в известняках и доломитах нижнего карбона, в основном на глубине 200—400 м от поверхности. Они имеют сложную форму и контролируются системами разрывных нарушений. Мощность рудных тел изменяется от 0,2 до 35 м при средней 0,5—3 м. На месторождении имеется два типа руд: сульфидные и окисленные. По отношению к известнякам и доломитам сульфидные руды имеют положительную избыточную плотность 1,4—1,8 г/см<sup>3</sup>, окисленные—отрицательную 0,5—0,9 г/см<sup>3</sup>. Гравитационные аномалии вызываются трещинами и карстовыми пустотами, заполненными глинами, сульфидной и окисленной рудой. Из перечисленных объектов только сульфидная руда имеет положительную избыточную плотность.

Рассмотрим результаты градиентометрических измерений в квершлагах 80 (рис. 7.5, а). Работы выполнены по общепринятой методике. На участке *ab* исследуемой выработки наблюдается положительная аномалия  $V_{yz}$  интенсивностью 40 Э и знакопеременная аномалия  $V_{xz}$  амплитудой около 50 Э. На основании анализа поля было сделано заключение, что сульфидная руда находится в нижнем полупространстве справа от профиля наблюдения.

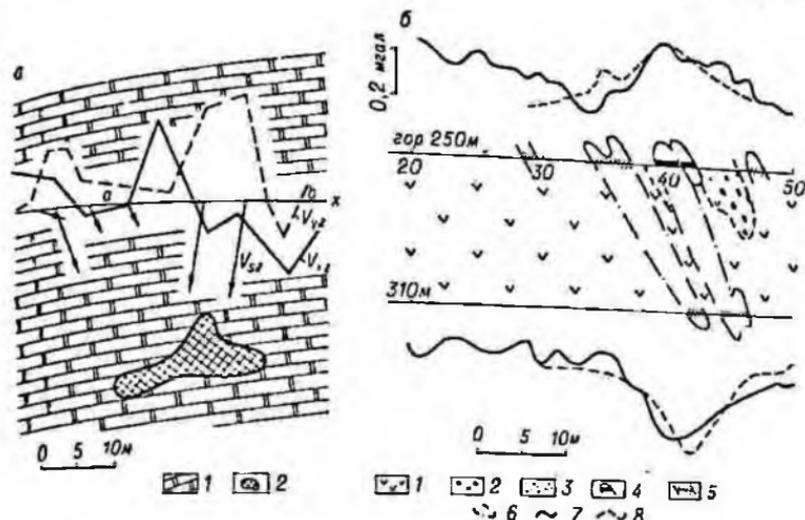


Рис. 7.5. Результаты подземных гравиметрических исследований.

а — по квершлагу 80 на Ачсайском полиметаллическом руднике в Казахстане (по В. З. Фурсову).

1 — известняки; 2 — сульфидная руда.

б — по западному квершлагу на горизонтах 250 и 310 м Зюзельского медного рудника на Урале (по В. М. Степанову и И. В. Борейскому).

1 — порфиры диабазового состава; 2 — хлорито-серпичитовые сланцы; 3 — вкрапленность сульфидов; подсечения: 4 — с кондиционными рудами, 5 — с сульфидной иннервацией; 6 — контур рудного тела по геофизическим данным; кривая  $\Delta g$ : 7 — наблюдаемая, 8 — расчетная.

дений. Буровые работы, проведенные позже и независимо от результатов градиентометрических исследований, подтвердили это заключение.

Нередко бывают случаи, когда на основании качественной интерпретации одного элемента поля, измеренного только по двум горизонтам, можно уверенно выдать прогноз о местоположении возмущающих тел и знаке их аномальной плотности. Так, на Зюзельском медном месторождении Урала были выполнены измерения силы тяжести  $\Delta g$  по двум горизонтам: 250 и 310 м [111]. В задачу входили поиски и разведка рудных залежей. Рудные тела имеют линзо- и жиллообразную форму и залегают среди глубинных изверженных пород. Руды приурочены к контакту порфиритов диабазового состава и хлорито-серпичитовых сланцев.

На горизонте 250 м выявлен четкий максимум силы тяжести интенсивностью 0,3 мгал (рис. 7.5, 6). На горизонте 310 м в интервале этих же пикетов отмечается отрицательная аномалия до 0,4 мгал. Такое распределение гравитационного поля свидетельствует о локализации возмущающего объекта в пространстве между горизонтами. По геологическим данным при проходке квершлага на горизонтах 250 и 310 м в эпицентре обеих аномалий встречены рудные подсечения. При избыточной плотности руды 1,2 г/см<sup>3</sup>, определенной по образцам с обоих горизонтов, аномалия силы тяжести объясняется рудным телом в виде двух крутопадающих линз, располагающихся в межгоризонтном пространстве. Суммарная мощность тел около 20 м при размерах по простиранию и падению до 60 м. Эти выводы подтверждаются результатами количественной интерпретации.

В 1974 г. были выполнены подземные гравиметрические исследования на участке «Центральный» Зодского сульфидного месторождения (Армения). Задачей исследований была оценка глубины распространения кварц-сульфидных рудных тел. Решение данной задачи представляло повышенный интерес, так как месторождение было практически не разведано.

В геологическом строении месторождения участвуют габбро ( $\sigma = 2,75$  г/см<sup>3</sup>), перидотиты (2,61 г/см<sup>3</sup>) и серпентиниты, в которых проходит зона разлома. В ней выделяются линейно-вытянутые кварц-сульфидные рудные жилы крутого падения мощностью 10—60 м. Рудные тела сложены кварцем, халькопиритом, пиритом, арсенопиритом и другими минералами; они образуют жильные зоны и полосы частых прожилков.

Гравиметрические наблюдения выполнены на трех горизонтах по штольням 1, 98 и 5 (рис. 7.6). Измерения проводились гравиметром ГРК-2 по общепринятой методике шагом 5 м. Средняя квадратическая погрешность единичных наблюдений не превышает 0,02—0,03 мгал.

Рассмотрим вертикальный геологический разрез месторождения в плоскости штолен 1, 98 и 5 и аномальные кривые  $\Delta g$  по этим выработкам. В центральной части разреза в районе рудных зон по всем горным выработкам выделяются четкие локальные аномалии. По штольне 1 в пределах пикетов 40—50 на фоне плавно убывающего к востоку поля  $\Delta g$  наблюдается слабая знакопеременная аномалия. Она уверенно коррелируется на горизонтах штолен 98 и 5 (соответственно в пределах пикетов 180—200 и 250—300). С глубиной интенсивность аномалии резко возрастает. Такое поле объясняется наличием кварц-сульфидной жилы, причем на глубине предполагаются более богатые сульфидные руды. Этому не противоречат геологические факты, полученные при проходке штолен.

По штольне 1 в пределах пикетов 200—280 отмечается положительная аномалия до 0,3 мгал. Аномалия прослеживается и на нижележащих горизонтах, причем ее интенсивность с глуби-

ной быстро затухает. Видимо, рудная залежь, приуроченная к данному аномальному участку, имеет ограниченное распространение на глубину. На горизонте штольни 5 эта аномальная зона существенно расширяется, что может быть обусловлено увеличением мощности рудного тела в результате его слияния с ранее рассмотренным.

Начиная с пикета 370 и до забоя штольни 1 на фоне обширной положительной аномалии наблюдается серия локальных аномалий малой интенсивности. Они четко согласуются с встре-

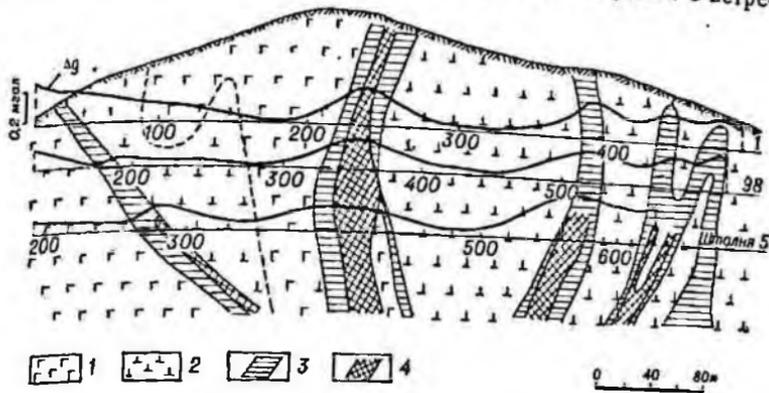


Рис. 7.6. Результаты гравиметрических исследований на участке «Центральный» Зодского сульфидного месторождения в Армении (по Ф. М. Фиданяну). 1 — габбро; 2 — перидотиты; сульфидные руды: 3 — бедные, 4 — богатые.

ченными выработкой участками бедных сульфидных руд. С глубиной (штольни 98 и 5) общее положительное поле растет и аномальная зона расширяется. Локальные аномалии четко коррелируются от горизонта к горизонту. Предполагается значительное увеличение мощности рудных тел с глубиной, а возможно, даже слияние их в одну богатую залежь.

Этот пример качественной интерпретации подтверждает, что при определенной геологической обстановке наблюдения одного элемента поля на нескольких горизонтах позволяют выдать достаточно обоснованный геологический прогноз.

### 7.3.2

Пример количественной интерпретации

Рассмотрим результаты гравиметрических исследований по орту оси 118 на горизонтах 815 и 890 м шахты «Октябрьская» рудника им. Коминтерна (Кривбасс).

Общее геологическое строение участка до геофизических исследований характеризовалось разрезом, показанным на рис. 7.7, а. В результате эксплуатационной разведки было установлено положение стратиграфических границ до глубины с отметкой —1000 м. Разведочными скважинами и горными выра-

боткам были выявлены богатые рудные залежи в пластах  $K_2^{5ж}$  и  $K_2^{6ж}$ , обнаружено полное замещение пласта  $K_2^{6с}$  красковыми рудами ниже горизонта 815 м. Однако прогноз о распространении рудных залежей в околорудном пространстве базировался на отдельных геологических фактах и требовал дополнительного обоснования.

Перед геофизическими исследованиями ставились задачи: изучить геологическое строение структуры в пределах оси 118 горизонтов 815, 890 м и ниже, установить наличие и пространственное положение рудных тел, детализировать морфологию рудных залежей в районах данных горных выработок. Для этого в 1973 г. в ортах оси 118 на указанных горизонтах было измерено поле силы тяжести (рис. 7.7, б). Наблюдения выполнялись двумя гравиметрами ГШ-1 в двух независимых рейсах со 100%-ным повторением шагом 5 м [112].

Локальные гравитационные аномалии выделялись по методике, изложенной в разделе 6. Разностную аномалию, как показали расчеты, обуславливают следующие причины.

1. Толща  $K_2^{7с-7ж}$  мощностью до 40 м, о которой раньше не было никаких данных (впоследствии она была встречена при проходке выработки на горизонте 815 м). Влияние этой толщи учитывалось при плотности  $-0,4$  г/см<sup>3</sup>, поскольку в модели структуры на ее месте предполагались породы  $K_2^{6ж}$ , имеющие аномальную плотность 0,78 г/см<sup>3</sup>. По форме она была аппроксимирована двумерным пластом; подбор осуществлялся по палетке Юнга.

2. Рудная залежь I, встреченная выработкой на горизонте 815 м. Как показали расчеты, залежь имеет форму гнезда — ограниченного по вертикали эллиптического цилиндра, наклоненного к оси  $x$  (направление выработки). По оси  $x$  ее размеры составляют около 10 м, по оси  $y$  15 м, по оси  $z$  40 м. Большая часть залежи расположена в верхнем полупространстве. Расчет поля при подборе выполнялся по способу А. А. Юнькова с использованием формул (5.18).

3. Рудная залежь II, встреченная выработкой на горизонте 815 м и скв. 2. По расчетам эта залежь представляет собой наклоненный к оси  $x$  цилиндр, его сечение в плоскости  $xOy$  близко к эллипсу. По оси  $x$  размеры залежи составляют 20 м, по оси  $y$  40—50 м, по оси  $z$  примерно 100 м. Расчет поля также выполнен по формулам (5.18).

4. Залежь III, в оси 118 геологами не обнаруженная. Судя по характеру гравитационного поля, в верхнем полупространстве существуют массы с избытком плотности. Расчеты показали, что такое изменение поля можно объяснить известным рудным телом в пласте  $K_2^{5ж}$ , расположенным к северу от исследуемой оси. Форма тела была задана в виде ограниченного по протяжению цилиндра, расположенного справа по оси 118. Расчет поля выполнялся по формулам (5.18) при  $\alpha=0^\circ$ .

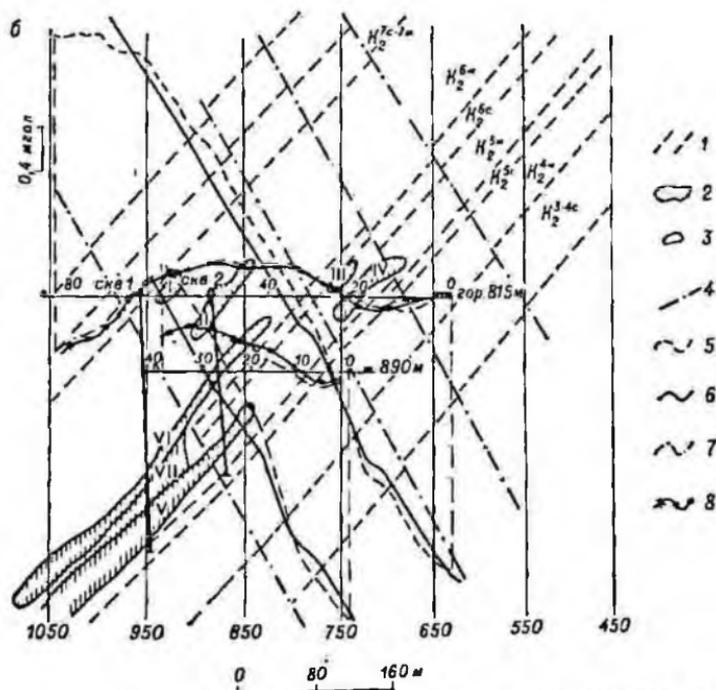
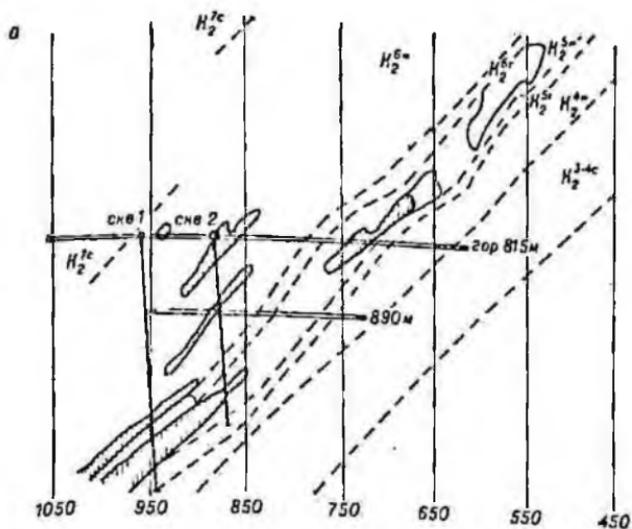


Рис. 7.7. Геологический разрез по оси 118 шахты «Октябрьская» (рудник им. Коминтерна), построенный по геологическим (а) и геофизическим (б) данным.

1 — стратиграфические границы; контуры: 2 — рудных тел, 3 — отработанного пространства; 4 — тектонические нарушения; кривая  $\Delta E$ : 5 — наблюдаемая, 6 — теоретическая, 7 — разностная, 8 — подобранная.

5. Залежь *IV*, известная на горизонте 815 м и выше. По геофизическим данным эта залежь распространена также ниже горизонта примерно на 30—35 м при бесконечных размерах по простиранию. Ее гравитационный эффект вычислялся с помощью двумерной палетки.

6. Залежь *V*, известная по скв. 1 и 2. По геофизическим данным залежь начинается примерно на 30 м ниже горизонта 890 м и при значительных размерах по простиранию (не менее  $\pm 300$  м) продолжается на глубину до отметок —(1100÷1200) м.

7. Две залежи в пласте  $K_2^{6ж}$ , встреченные одна скв. 2 и выработкой на горизонте 890 м и другая — скв. 1. Согласно гравиметрическим данным они объединяются в одну залежь *VI*, что существенно меняет геологический прогноз. Кроме того, существенно уточнено положение контактов  $K_2^{6с}$ .

8. Залежь *VII*, встреченная скв. 1. Гравиметрическими данными подтверждено наличие красковых руд, которые распространены в оси 118 и имеют бесконечное простирание.

Залежи *V*, *VI* и *VII* при подборе были аппроксимированы наклонными бесконечными по простиранию цилиндрическими телами, сечения которых показаны на рис. 7.7, б. Расчет поля осуществлялся при помощи палеток.

## 8. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПОДЗЕМНОЙ ГРАВИРАЗВЕДКИ

Перед подземной гравиразведкой кроме поисковых и разведочных задач все чаще ставится целый ряд других проблем, для решения которых существуют реальные предпосылки.

Обнаружение на больших глубинах крупных рудных залежей, непрерывное увеличение темпов добычи полезных ископаемых, углубление действующих шахт и строительство новых — все это требует изучения глубинного строения месторождений. Решение этой проблемы важно как для оценки перспектив месторождений, так и для выяснения многих генетических вопросов. Реальную помощь здесь могут оказать совместные наземные и подземные гравиметрические исследования. Измерения силы тяжести на различных уровнях с целью изучения глубинного строения месторождений представляются весьма перспективными.

Многие годы перед геофизиками стоит задача определения средней плотности слоев Земли, знание которой имеет важное значение при редуцировании и интерпретации гравитационных полей. Установление средней плотности слоя по результатам наблюдений силы тяжести на разных глубинах в скважинах или шахтах требует меньших затрат времени и средств по сравнению с лабораторными измерениями на образцах. Кроме того, существенным достоинством такого метода является определение плотности в естественном залегании горных пород.

Непосредственно по измерениям силы тяжести в скважинах или шахтах получают так называемую кажущуюся плотность  $\sigma_k$ , которая включает среднюю истинную плотность слоя  $\sigma_k$  и поправку к ней  $\Delta\sigma_a$  за гравитационное влияние однородных масс на различных уровнях [113]. Трудность состоит в том, что по результатам гравиметрического каротажа или наблюдений в шахте не удается определить поправку  $\Delta\sigma_a$ . Для этого необходимо знать конкретную геологическую обстановку, привлекать соответствующие методы обработки полей и интерпретации, что представляет сложную, а иногда и неразрешимую задачу. Чтобы ослабить влияние  $\Delta\sigma_a$ , надо тщательнейшим образом учитывать гравитационное влияние аномальных масс как внутри слоя, так и за его пределами; ограниченность простираения слоя; влияние дневного рельефа, горных выработок или скважин, в которых ведутся измерения, и многое другое. Методика учета названных факторов разработана недостаточно и требует дальнейшего совершенствования. Дополнительные трудности заключаются в том, что применяемая измерительная аппаратура дает существенные погрешности при определении  $\sigma_k$ . Особенно это касается скважинной гравиметрии.

Перспективным направлением является изучение вертикального градиента силы тяжести  $V_{zz}$  на различных глубинах земной коры и в пределах различных регионов. Знание вертикального градиента может оказать существенную помощь при редуцировании гравитационного поля как в наземных, так и в подземных условиях. Уже накоплен некоторый опыт использования функции  $V_{zz}$  и в поисковых целях. Особо следует отметить возможность этого элемента при решении структурных задач. Перспективность этого направления подтверждается опытными работами на рудниках Абаканского (М. В. Макеев, 1974—1975 гг.) и Криворожского (И. В. Плишко, 1975 г.) железорудных месторождений. Следует еще раз подчеркнуть необходимость создания специального вертикального градиентометра, так как высотные измерения силы тяжести гравиметрами не дают достаточной точности. Опытные работы выявили также ряд вопросов теоретического и методического характера на этапе обработки измерений, подготовки аномалий к интерпретации и самой интерпретации.

На основании разницы между средними плотностями слоев Земли, определенными гравиметрическим и лабораторным методами, некоторые авторы [114, 115 и др.] делают вывод, что в ряде районов нормальный вертикальный градиент силы тяжести отличается от среднего для земного шара. Вполне возможно, что незначительные несоответствия (в пределах точности измерения) и имеют место. Однако если нормальный градиент отличается от общепринятого значения на 100—150 Э (Абаканский рудник [114]), то напрашивается вывод о необходимости его уточнения для различных районов земного шара.

Аналогичные работы были выполнены в Кривбассе [116]. Полученные значения плотности слоев Земли на различных глубинах и участках месторождения оказались близкими к средневзвешенной плотности пород криворожской серии, слагающих структуру ( $2,9-3,0 \text{ г/см}^3$ ), что существенно отличается от средней плотности верхних слоев земной коры в пределах Украинского кристаллического массива ( $2,7 \text{ г/см}^3$  [68]). Найденной плотности соответствует вертикальный градиент силы тяжести  $2875 \text{ Э}$ . Если ввести поправку за влияние Криворожской структуры (за аномальный градиент), которая согласно расчетам на моделях (см. рис. 6.8) составляет в пределах ствола шахты «Октябрьская» около  $150 \text{ Э}$ , то плотность слоя станет равной  $2,7 \text{ г/см}^3$ . Это значение соответствует нормальному градиенту  $3086 \text{ Э}$ . Естественно, что единичные опыты не решают проблемы. Исследования в этом направлении необходимо продолжить в других районах, причем убедительные доказательства можно получить только при высокоточных подземных гравиметрических измерениях.

На стадии промышленной отработки месторождения стоят задачи по контролю за ходом отдельных технологических операций, сопровождаемых перемещением или выпуском из очистного пространства значительных масс горных пород (отработка камер, массовое обрушение эксплуатационных блоков, выпуск сырой руды). Прослеживание границ, разделяющих обрушенные горные породы и руды, определение участков скопления пережатых разрушенных руд и направления основных потоков рудных масс в контурах очистного пространства позволяют значительно снизить эксплуатационные потери, найти оптимальные режимы выпуска. Фиксирование и слежение за ростом пустот повышает технику безопасности добычных работ. Своевременное обнаружение неразрушенных массивов горных пород и руд должно сокращать разубоживание рудной массы при ее выпуске из некачественно обрушенных эксплуатационных блоков. Основой для решения перечисленных задач является изучение пространственно-временных вариаций силы тяжести, наблюдаемых на участках добычи в процессе отработки месторождения. Вариации силы тяжести  $\delta \Delta g$  на пункте наблюдения определяются как разность двух измеренных с заданными интервалами времени значений  $\Delta g$ , отнесенных к некоторому контрольному пункту.

Существует ряд предпосылок, позволяющих судить о перспективах использования вариаций силы тяжести для решения горнотехнических задач.

1. Вариации силы тяжести, наблюдаемые на участках добычи, характеризуются значительной интенсивностью. Например, на Абаканском железном руднике они достигали  $0,2-0,3 \text{ мгал/месяц}$ . Особенно значительные изменения (до  $0,6-0,7 \text{ мгал}$ ) отмечались при массовом обрушении блоков.

2. Положение границ очистного пространства, как правило, всегда определяется с точностью, достаточной для достоверной интерпретации вариаций  $\delta\Delta g$ .

3. Густота сети горных выработок на участках добычи позволяет проводить наблюдения вариаций в непосредственной близости от границ очистного пространства.

4. Вариации силы тяжести полностью обусловлены перемещением горных пород в блоке и не искажаются помехами. Это позволяет определять аномальные значения  $\delta\Delta g$  с высокой точностью.

5. Первоначальное распределение масс в очистном пространстве (до обрушения) известно с достаточной достоверностью по материалам эксплуатационной разведки и опробования вещественного состава.

Для интерпретации пространственно-временных вариаций силы тяжести пригодны все известные методы геологического истолкования гравитационных аномалий.

Первые опытные работы по контролю за массовыми обрушениями эксплуатационных блоков и за выпуском рудной массы из очистного пространства были выполнены в 1975—1976 гг. на Абаканском железорудном месторождении и в Кривбассе. Эти работы показали, что существует принципиальная возможность решения всех перечисленных выше горнотехнических задач. Успех во многом зависит от правильного выбора горных выработок, методики наблюдений, а также от изученности плотности горных пород в массиве до обрушения и после. Объем исследований по применению подземной гравиразведки в этом безусловно перспективном направлении пока совершенно недостаточен, требуется серьезное продолжение этих работ.

Вне всяких сомнений, область применения подземной гравиразведки будет расширяться, охватывая все новые и новые задачи. Поэтому конструкторским лабораториям и заводам-изготовителям следует приложить максимум усилий для создания в ближайшее время современной гравиметрической аппаратуры. Крайне необходимы серийные высокоточные шахтные и скважинные гравиметры. Следует ускорить разработку вертикальных градиентометров. Создание высокопроизводительного вариометра позволит реализовать эффективный поисковый комплекс элементов гравитационного поля  $V_{xz}$ ,  $V_{yz}$ ,  $V_{xy}$ . Аппаратура для подземных работ должна обеспечивать достаточную точность измерений, обладать высокой помехоустойчивостью, быть транспортабельной, герметичной, взрывобезопасной.

Решение рассмотренных здесь проблем и широкое внедрение в практику уже накопленного опыта по использованию подземной гравиразведки при решении самых разных геологических и инженерных задач позволят ей занять должное место в геолого-разведочной службе и горном деле и будут способствовать повышению ее геологической и экономической эффективности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Meisser O., Wolf F. Geophysikalische Messungen unter Tage. — Z. Geophysik, 1930, N 6, S. 100—103.
2. Benfield R. Note on the variation of gravity with depth. — Z. Geophysik, 1937, Bd 13, H. 4/5.
3. Hammer S. Terrain correction for gravimeter stations. — Geophysics, 1939, N 4, p. 184—194.
4. Hammer S. Density determination by underground gravity measurements. — Geophysics, 1950, v. 15, N 4, p. 637—652.
5. Jung H. Dichtebestimmungen im anstehenden Gestein durch Messung der Schwerebeschleunigung in Verschieden Tiefen unter Tage. — Z. Geophysik, 1939, N 15, p. 56—65.
6. Rogers G. Subsurface gravity measurements. — Geophysics, 1952, v. 17, N 2, p. 365—377.
7. Rische H. Dichtebestimmungen im Gesteinsverband durch Gravimeter- und Drehwaagemessungen unter Tage. Akad. Verl. Berlin, 1957, N 35. 83 S.
8. Domsalski W. Gravity measurements in a vertical schacht. — Bull. Inst. Min. Met., 1954, v. 63, p. 429—445.
9. Domsalski W. Relative determination of the density of surface rocks and the mean density of the earth from vertical gravity measurements. — Geophys. Prospect., 1955, v. 3, N 3, p. 212—227.
10. Bodemuller H. Der Schwereunterschieden in korrespondierenden Punkten über und unter Tage. — Z. Verm., 1954, Bd 79.
11. Faikiewicz Z. O podziemnych Pomiarach Gravimetrycznych w Zastosowaniu do Gornichurva Wegloweys. 1956, N 1, p. 4.
12. Faikiewicz Z. Podsimne pomiary grawimetryczne w kopalniach Gornego Slaska. — Geodezya i kartografia, 1957, v. 6, N 3, p. 161—178.
13. Лукавченко П. И. К вопросу об измерениях силы тяжести в буровых скважинах. — Прикл. геофизика. 1948, вып. 4, с. 159—167.
14. Лукавченко П. И. Наблюдения с гравиметрами в буровых скважинах и шахтах. — Развед. и промысл. геофизика, 1962, вып. 43, с. 52—64.
15. Zagorac Z. C. Contribution to the method of torsion balance surveying in underground. — Geophysics, 1953, v. 23, N 2, с. 448—458.
16. Казинский В. А. К основам теории рудиничной гравиметрии. — Докл. АН СССР, 1956, вып. 6, т. 109, с. 1126—1128.
17. Казинский В. А. О геологической интерпретации гравитационных аномалий в выработках рудных месторождений. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 6, с. 803—807.
18. Казинский В. А. Об учете влияния топографических масс на подземные гравитационные измерения. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1957, № 1, с. 30—38.
19. Казинский В. А. Об учете гравитационного эффекта локальной неоднородности горной породы. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1959, № 8, с. 1226—1230.
20. Казинский В. А. О путях развития и способах решения задач подземной гравиметрии. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1963, № 5, с. 748—765.

21. *Казинский В. А.* К вопросу исследования внутреннего гравитационного поля Земли. Ч. 1, 2. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964, № 11, 12, с. 1608—1621, 1832—1835.
22. *Казинский В. А.* Основные черты и особенности задачи подземной гравиметрии. — Изв. вузов. Сер. геодезия и аэрофотосъемка, 1964, № 3, с. 63—69.
23. *Фурсов В. З.* Рудничная гравиметрия. — В кн.: Опытные работы геологов-разведчиков Казахстана. Алма-Ата, 1957, с. 53—56.
24. *Фурсов В. З.* К вопросу рудничной геофизики. — В кн.: Геофизические методы разведки в Казахстане. Алма-Ата, 1958, с. 62—66.
25. *Фурсов В. З.* Применение подземной гравиметрии на полиметаллическом руднике Ачисай. — Вестн. АН КазССР, Алма-Ата, 1958, т. 7, с. 74—80.
26. *Мудрецова Е. А.* К интерпретации аномалий силы тяжести при подземных гравиметрических измерениях. — Труды Моск. геол.-развед. ин-та. Разведочная геофизика, 1959, т. 36, с. 103—111.
27. *Мудрацова Е. А.* Подземные гравиметрические работы на медноколчеданных месторождениях Среднего Урала. — Геофиз. разведка, 1960, вып. 2, с. 31—59.
28. *Мудрецова Е. А.* Подземные гравиметрические работы на колчеданных и железорудных месторождениях. — Учен. зап. Среднеаз. ин-та геологии и минерал. сырья, Ташкент, 1962, вып. 8, с. 183—198.
29. *Мудрецова Е. А.* Учет влияния рельефа местности при высокоточных измерениях с гравиметрами в шахтах, штольнях и на дневной поверхности. — Изв. вузов. Сер. геология и разведка, 1963, № 3, с. 93—112.
30. *Мудрецова Е. А.* Методика подземных гравиметрических работ с гравиметрами на рудных месторождениях. М., 1963. 29 с.
31. *Техническая инструкция по гравиметрической разведке.* М., 1961. 69 с.
32. *Юньков А. А., Бурьян Н. Р., Анищенко Н. М.* О выборе наиболее эффективных горных выработок и участков в них для поисков пропущенных рудных тел. Реферат. информация о законченных науч.-исслед. разработках в вузах УССР. Угольн. и горнорудн. пром-сть, Киев, 1972, вып. 6. 62 с.
33. *Юньков А. А., Бурьян Н. Р., Анищенко Н. М.* Выбор оптимальных размеров поисковой сети шахтной градиентометрической съемки. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1972, вып. 45, с. 20—27.
34. *Юньков А. А., Бурьян Н. Р.* О геологической эффективности гравиметрической разведки. — Геофиз. разведка, 1972, № 54, с. 116—124.
35. *Юньков А. А., Бурьян Н. Р., Анищенко Н. М.* Выбор оптимальных размеров поисковой сети при измерении в горных выработках. — Изв. вузов Горн. журн., Свердловск, 1975, № 1, с. 3—8.
36. *Казинский В. А.* Вопросы гравиметрии и методы ее применения в горном деле. М., 1969. 201 с.
37. *Юньков А. А.* Учет влияния горных выработок и неровностей их стенок на измерения  $\Delta g$ . — Геофиз. разведка, 1962, вып. 10, с. 28—34.
38. *Юньков А. А.* Вычисление поправки к гравитационным измерениям в горной выработке. — Изв. Днепропетровск. горн. ин-та, 1964, т. 42, с. 94—98.
39. *Юньков А. А.* Учет влияния горных выработок на измерения с гравитационным вариометром. — Развед. геофизика, 1965, вып. 4, с. 59—65.
40. *Пелюшенко В. М.* О поисках слепых железорудных залежей в Кривбассе. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1964, вып. 8, с. 69—80.
41. *Пелюшенко В. М.* Использование производных потенциала силы тяжести для определения рудных залежей в окрестностях горных выработок. — Развед. геофизика, 1966, № 10, с. 81—89.
42. *Пелюшенко В. М.* Использование гравитационных вариометров для определения местоположения пустот в горных выработках Кривбасса. — Развед. геофизика, 1965, вып. 4, с. 75—79.
43. *Пелюшенко В. М.* Об определении местоположения гравитационных объектов по отношению к горной выработке. — В кн.: Вопросы обработки и интерпретации геофиз. наблюдений, Пермь, 1969, вып. 8, с. 138—140.
44. *Пелюшенко В. М.* Особенности некоторых производных потенциала силы тяжести. — Изв. Днепропетровск. горн. ин-та, 1971, т. 54, с. 133—136.

45. Юньков А. А. Некоторые особенности поисков гравитирующих тел в окрестностях горных выработок. — Геофиз. разведка, 1963, № 11, с. 47—50.
46. Юньков А. А. К интерпретации гравитационных аномалий в горных выработках. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1965, вып. 3 (14), с. 99—106.
47. Юньков А. А. Интерпретация аномалий  $\Delta g$  в подземных выработках. Определение местоположения возмущающего тела. — Развед. геофизика, 1965, № 7, с. 29—35.
48. Юньков А. А. Об аномалиях  $\Delta g$ , измеренных в горных горизонтальных выработках. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1969, вып. 32, с. 39—44.
49. Юньков А. А. Об аномалиях  $\Delta g$ , измеренных в вертикальных выработках. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1971, вып. 42, с. 15—19.
50. Муromцева З. Г., Юрков В. М. Выбор величины, подлежащей измерению при производстве гравиразведочных работ в горных выработках. — В кн.: Вопросы подземной и открытой разработки железных руд в Криворожском бассейне, М., 1967, с. 230—238. (Труды Науч.-исслед. горнорудн. ин-та, № 12).
51. Юньков А. А. Принцип расчета сети при поисках хромистого железняка методом гравиразведки. — Труды Свердл. горн. ин-та, 1937, вып. 2, с. 126—147.
52. Андреев Б. А. Применение геофизических методов при поисках и разведке хромитовых месторождений. М., 1938. 35 с. (Труды Центр. науч.-исслед. горноразвед. ин-та цвет., редк. и благородн. металлов. Вып. 100).
53. Лукавченко П. И. Определение плотности поисковой сети при гравиметрических и магнитных съемках. — Развед. и промысл. геофизика, 1952, вып. 4, с. 18—25.
54. Справочник геофизика. Т. 5. М., 1968. 509 с.
55. Копин М. В., Бур'ян М. Р. Про деякі особливості гравітаційних вимірювань в кваршлагах. — Доповіді АН УРСР, Сер. Б, Київ, 1972, № 12, с. 1076—1078.
56. Беловцев Я. Н., Бура Г. Г. Генезис железных руд Криворожского бассейна. Киев, 1962. 308 с.
57. Погребницкий Е. О. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. М., 1968. 459 с.
58. Магакили Н. Г. Рудные месторождения. Ереван, 1961. 547 с.
59. Дортман Н. Б., Озерская М. Л. Методическое руководство по определению физических свойств горных пород и полезных ископаемых. М., 1962. 453 с.
60. Инструкция по гравиметрической разведке. М., 1975. 87 с.
61. Гамма-методы в рудной геологии/Под ред. А. П. Очкура, Л., 1976. 407 с.
62. Вищенко Н. И., Лукьянов А. Ф., Очкур А. П. Методическое руководство по опробованию железных руд Кривбасса и КМА гамма-гамма-методом с аппаратурой РСР. Белгород, 1975. 75 с.
63. Юньков А. А. Поиски хромистого железняка методом гравиметрии. М., 1937. 114 с.
64. Подземная геофизика/А. Г. Тархов, В. М. Бондаренко, В. Ф. Коваленко и др. М., 1972. 310 с.
65. Фурсов В. З. Применение подземной гравиметрии на полиметаллическом руднике Ачсай. — Вестн. АН КазССР, Алма-Ата, 1958, т. 7, с. 74—80.
66. Буданов В. Г., Евдокимов Ю. С. Эталонирование кварцевых астазирированных гравиметров методом наклона. — Бюл. науч.-техн. информации. М., 1965, № 2, с. 74—79.
67. Мудрецова Е. А., Боярский Э. А. Уравнивание и оценка точности результатов гравиметрических измерений в подземных горных выработках месторождений. — Изв. вузов. Сер. геология и разведка, 1962, № 4, с. 97—104.
68. Голицдра Г. Я., Ахметшина А. К. Пространственное распределение плотности кристаллических пород Украинского щита. — Сов. геология, 1973, № 8, с. 151—155.
69. Лукавченко П. И. О влиянии рельефа дневной поверхности на результаты измерений силы тяжести в скважинах. — Прикл. геофизика, 1965, вып. 12, с. 141—154.

70. Казимский В. А. Математические таблицы для аппроксимации геофизических аномалий и редукций интерполяционными многочленами. М., 1959.

90 с.  
71. Копнин М. В., Наугольников В. Б. Об учете влияния дневного рельефа при подземных измерениях с гравиметром. — В кн.: Материалы по вопросам горного дела. Харьков, 1964, с. 134—136.

72. Копнин М. В., Наугольников В. Б. Учет влияния дневного рельефа на  $V_{\text{гг}}$  и  $V_{\Delta}$ , измеренных в горных выработках. — Там же, с. 137—138.

73. Ващилов Ю. Н. Учет влияния рельефа местности при гравиметрических наблюдениях в подземных горных выработках и скважинах. — Развед. геофизика, 1964, вып. 51, с. 71—75.

74. Vajk R. Bouguer correction varying surface density. — Geophysics, 1956, v. 21, N 4, p. 1004—1020.

75. Прицкер Л. С., Кузьмин Ю. И., Шадкин В. И. Внутреннее гравитационное поле подземных горных выработок стандартного сечения. — В кн.: Вопросы рудной геофизики в Казахстане, Алма-Ата, 1971, № 3, с. 233—236.

76. Пелюшенко В. М., Страшко В. Ф. Влияние горизонтальных выработок на элементы гравитационного поля. — Изв. Днепропетровск. горн. ин-та, 1972, т. 58, с. 166—177.

77. Юньков А. А. Учет неровностей стенки горизонтальной выработки при гравитационных измерениях в ней. — Изв. Днепропетровск. горн. ин-та, 1971, т. 54, с. 114—122.

78. Юньков А. А., Вдовин И. В. Учет неровностей стенок выработки при гравитационных измерениях в ней. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1967, вып. 22, с. 85—90.

79. Юньков А. А. Учет влияния горизонтальной выработки (штрековая поправка) на измерения  $V_{\text{гг}}$ . — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1967, вып. 3 (14), с. 111—120.

80. Бурьян Н. Р., Гончаренко В. А. Ускоренный способ вычисления поправки за влияние горных выработок по способу А. А. Юнькова. Труды Днепропетровск. горн. ин-та, 1971, т. 58, с. 162—165.

81. Прицкер Л. С., Ищук Е. И. Учет влияния горных выработок при подземных исследованиях с гравиметрами и градиентометрами. — В кн.: Вопросы рудной геофизики в Казахстане, Алма-Ата, 1966, № 1, с. 140—143.

82. Юрков В. М., Муромцева Э. Г. Методика вычисления поправок для исключения влияния горной выработки при гравитационных измерениях под землей. — Труды Криворожск. науч.-исслед. горнорудн. ин-та, Кривой Рог, 1968, № 9, с. 231—243.

83. Андреев В. И., Миненко П. А. К методике учета влияния криволинейной горной выработки на измеренные значения  $V_{\text{гг}}$ . — Труды Всесоюз. ин-та осушения, геологии, маркшейдерии, Белгород, 1968, № 11, с. 87—89.

84. Юньков А. А., Бурьян Н. Р. О выборе рациональной сети гравиметрических съемок. — Геофиз. сб. АН УССР, Киев, 1974, вып. 61, с. 12—17.

85. Маловичко А. К. Основной курс гравиразведки. Ч. 1. 2-е изд. Пермь, 1966. 326 с.

86. Тякин К. Ф., Голыздра Г. Я. Краткий обзор современных методов ослабления регионального фона гравитационного и магнитного полей. М., 1963. 51 с.

87. Соколовский К. И., Запольська Г. В. Про один метод розділення підземних гравітаційних аномалій. — Доповіді АН УРСР. Сер. Б., Київ, 1969, № 6, с. 510—513.

88. Соколовский К. И., Запольська Г. В. Про унітарний метод розділення тривимірних підземних гравітаційних та магнітних полів. — Доповіді АН УРСР. Сер. Б., Київ, 1971, № 1, с. 37—41.

89. Капцова И. Н. О применении гравиметров в подземных горных выработках для изучения рудных месторождений. — Разведка и охрана недр, 1958, № 11, с. 36—40.

90. Врахування впливу Криворізької структури на гравітаційні вимірювання в гірничих виробках/Н. М. Аніщенко, М. Р. Бур'ян, М. В. Копнін, Я. А. Юньков. — Доповіді АН УРСР. Сер. Б., Київ, 1973, № 8, с. 725—729.

91. Юньков А. А., Наугольников В. Б., Колпин М. В. Изучение глубинного строения Криворожской структуры по геофизическим данным. М., 1973. 135 с.
92. Голштра Г. Я. Решение прямой задачи гравиметрии для трехмерных масс. — В кн.: Материалы геофизических исследований на Украине, Киев, 1972, с. 54—66.
93. Голштра Г. Я., Попов В. М. Вычисление на ЭВМ поля гравитирующих масс. — Развед. геофизика, 1973, вып. 56, с. 83—91.
94. Казинский В. А. Интерпретация гравитационных полей, порождаемых крутопадающими геологическими телами. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 4, с. 595—601.
95. Кочкин М. В., Педюшенко В. М. О количественной интерпретации материалов подземной гравразведки. — В кн.: Поиски и находки. Днепропетровск, 1970, с. 68—71.
96. Мінченко П. О., Михайличенко О. Ф., Нікішин П. П. Визначення середньої густини похилних пластів за даними підземної гравіроздавки. — Доповіді АН УРСР. Сер. Б, Київ, 1971, № 7, с. 623—625.
97. Юньков А. А. Интерпретация аномалий  $\Delta g$  в подземных выработках. Вычисление удаленности и размеров возмущающего тела. — Развед. геофизика, 1965, вып. 5, с. 56—62.
98. Юньков А. А. Интерпретация аномалий  $V_{zz}$  над трехмерными телами. — В кн.: Вопросы теории и методики геофизических исследований. Киев, 1963, вып. 5 (7), с. 49—59.
99. Мудрцова Е. А. Метод расчета градиентов силы тяжести при подземных измерениях. — Изв. вузов. Сер. геология и разведка, 1964, № 1, с. 116—125.
100. Суворов В. В. Номограммы для вычисления аномалий силы тяжести в условиях подземной съемки. — Труды Свердл. горн. ин-та. Вопр. развед. геофизики, 1972, вып. 83, с. 80—84.
101. Тяпкин К. Ф. Интерпретация гравитационных аномалий, обусловленных конечными по простиранию геологическими объектами. Ч. 1. М., 1961. 80 с.
102. Тяпкин К. Ф. Палетка для вычисления аномалий  $\Delta g$ , обусловленных вертикальными цилиндрическими телами произвольного сечения. — Геофиз. разведка, 1961, вып. 4, с. 23—31.
103. Булах Е. Г., Ржищев В. А., Маркова М. Н. Применение метода минимизации для решения задач структурной геологии по данным гравразведки. Киев, 1976. 219 с.
104. Андреев В. И., Соколовский К. И. Интерпретация материалов подземных гравитационных и магнитных наблюдений. Киев, 1971. 153 с.
105. Прицкер Л. С., Шадхин В. И. Номограммы для интерпретации аномалий силы тяжести в подземной гравиметрии. — В кн.: Вопросы рудничной геофизики в Казахстане, Алма-Ата, 1973, № 6, с. 193—196.
106. Прицкер Л. С. Количественная интерпретация аномалий  $\Delta g$  при подземной гравразведке. — В кн.: Вопросы рудной геофизики в Казахстане, Алма-Ата, 1966, с. 135—139.
107. Юньков А. А., Булах Е. Г. Возможности использования метода сеток для интерпретации аномалий горизонтального градиента силы тяжести. — Труды Ин-та геол. наук АН УССР. Сер. геофиз., Киев, 1958, вып. 2, с. 94—97.
108. Суворов В. В., Верещин В. С. Решение обратной задачи гравиметрии по пространственному распределению поля силы тяжести с применением ЭВМ. — Труды Свердл. горн. ин-та, 1975, вып. 107, с. 110—116.
109. Суворов В. В., Верещин В. С. Решение прямой задачи гравиметрии в условиях подземной съемки с применением ЭВМ. — В кн.: Геофизические методы поисков и разведки, Свердловск, 1975, вып. 1, с. 132—137.
110. Эффективность применения гравитационных методов в шахтных условиях Криворожского железорудного бассейна/З. Г. Муромцева, С. С. Алешин, А. П. Витовтова и др. — Труды Криворожск. горнорудн. науч.-исслед. ин-та, 1968, т. 9, с. 244—247.
111. Степанов В. М., Борецкий И. В. Применение подземных гравитационных исследований на стадии детальной разведки и эксплуатации медных

месторождений Урала. — В кн.: Применение гравиметрических и магнитных съемок при геол. картировании, поисках и разведке рудных месторождений. М., 1971, с. 157—160.

112. Некоторые результаты подземных гравитационных исследований на рудниках Кривбасса/Н. Р. Бурьян, Г. Ф. Борисова, Л. И. Вищенко и др. — Горн. журн., 1975, № 10, с. 4—8.

113. Луквченко П. И., Михайлов И. Н., Попов В. А. Использование гравитационного каротажа для оценки перспективности структур на нефть и газ. — Развед. геофизика, 1970, вып. 39, с. 90—96.

114. Стогний В. В. Редуцирование аномалий силы тяжести в горных выработках Абаканского месторождения. — Изв. Сиб. отд-ния АН СССР. Сер. геология и геофизика, Новосибирск, 1975, № 1, с. 128—130.

115. Ehrismann W., Rosenbach O., Steinhauser P. Vertikalgradient und Gesteindichte im Schlegeisgrund (Zillertaler Alpen) auf Grund von Stollenmessungen. — S. B. Osterr. Akad. Wiss. Mathnaturwiss Kl., 1969, Abt. 1, Bd 178, N 9—10, S. 261—270.

116. Пелющенко В. М., Полуэтов В. Ф., Грекова Г. Г. Результаты измерений силы тяжести по стволам шахт Криворожского железорудного бассейна. — Геофиз. сб. АН УССР. Киев, 1969, вып. 27, с. 28—31.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
1. Краткая история подземной гравиразведки . . . . .	5
2. Возможности метода при решении поисковых и разведочных задач . . . . .	7
2.1. Гравитационное поле тела, произвольно расположенного в околоразведанном пространстве . . . . .	8
2.2. Предельно изученные области пространства для разных элементов гравитационного поля . . . . .	18
2.3. Поисковые возможности элементов поля, измеренных в одной и нескольких горных выработках . . . . .	22
2.4. Рациональный комплекс элементов гравитационного поля при решении поисковых задач . . . . .	28
3. Методика подземной гравиметрической съемки . . . . .	35
3.1. Требования, предъявляемые к горным выработкам при гравиразведочных исследованиях . . . . .	—
3.2. Геологические предпосылки при выборе эффективной горной выработки . . . . .	38
3.3. Определение плотности горных пород и полезных ископаемых . . . . .	39
3.3.1. Лабораторные методы . . . . .	40
3.3.2. Корреляционная связь между физическими параметрами пород . . . . .	42
3.3.3. Гамма-гамма-метод . . . . .	44
3.4. Выбор рационального поискового шага наблюдений в горных выработках . . . . .	45
3.4.1. Предельные и оптимальные размеры шага наблюдений . . . . .	—
3.4.2. Методика расчета шага наблюдений . . . . .	48
3.4.3. Оценка возможности обнаружения возмущающих тел при оптимальном шаге наблюдений . . . . .	55
3.5. Методика измерений силы тяжести . . . . .	62
3.6. Методика измерений вторых производных гравитационного потенциала . . . . .	64
3.7. Топогеодезические работы . . . . .	65
4. Аппаратура и работа с ней . . . . .	67
4.1. Регулировка и эталонирование гравиметров . . . . .	69
4.1.1. Регулировка уровней . . . . .	—
4.1.2. Определение цены деления гравиметра . . . . .	70
4.1.3. Определение температурного коэффициента гравиметра . . . . .	73
4.1.4. Регулировка диапазона . . . . .	—
4.1.5. Проверка оптико-осветительной системы . . . . .	—
4.1.6. Мелкие неисправности гравиметра и их устранение . . . . .	75
4.2. Регулировка гравитационных вариометров . . . . .	—
4.3. Регулировка градиентометров . . . . .	76

4.4. Транспортировка гравиметрической аппаратуры и работа с ней . . . . .	76
4.4.1. Транспортировка аппаратуры . . . . .	—
4.4.2. Работа с гравиметром . . . . .	77
4.4.3. Работа с вариометром . . . . .	78
4.4.4. Работа с градиентометром ГРБМ-2 . . . . .	80
4.5. Вспомогательное оборудование и снаряжение . . . . .	81
5. Обработка результатов измерения гравитационного поля . . . . .	84
5.1. Обработка измерений с гравиметрами . . . . .	—
5.2. Обработка измерений вторых производных гравитационного потенциала . . . . .	88
5.3. Поправка за влияние рельефа дневной поверхности . . . . .	—
5.4. Поправка за наклон выработки . . . . .	92
5.5. Поправка за влияние рабочей горной выработки . . . . .	93
5.5.1. Способ В. А. Казицкого . . . . .	96
5.5.2. Способ А. А. Юнькова . . . . .	97
5.5.3. Палеточные способы . . . . .	101
5.6. Поправка за влияние боковых выработок . . . . .	102
5.7. Графическое изображение результатов гравиметрических исследований . . . . .	104
5.8. Технический контроль и оценка качества работ . . . . .	106
6. Подготовка гравитационных аномалий к интерпретации . . . . .	108
6.1. Общие положения . . . . .	—
6.2. Возможности аппроксимации элементов структур двумерными моделями . . . . .	109
6.3. Учет детального строения структуры в вертикальной плоскости . . . . .	115
6.4. Учет влияния удаленных частей структуры . . . . .	117
6.5. Расчет гравитационного влияния модели структуры . . . . .	119
6.6. Методика выделения локальных аномалий . . . . .	123
7. Интерпретация гравитационного поля . . . . .	126
7.1. Качественная интерпретация . . . . .	127
7.2. Количественная интерпретация . . . . .	—
7.2.1. Способ характерных точек . . . . .	128
7.2.2. Способ подбора . . . . .	132
7.2.3. Способы интегральный, сопоставления и сеток . . . . .	138
7.3. Практические примеры интерпретации . . . . .	140
7.3.1. Примеры качественной интерпретации . . . . .	—
7.3.2. Пример количественной интерпретации . . . . .	145
8. Перспективы развития подземной гравиразведки . . . . .	148
Список литературы . . . . .	152

ИБ № 3360

*Николай Романович Бурьян, Аким Арсентьевич Юньков,  
Нонна Матвеевна Анисенко, Николай Игнатьевич Виценко,  
Иван Владимирович Плишко*

**ПОДЗЕМНАЯ ГРАВИРАЗВЕДКА**  
(МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО)

Редакторы издательства Т. А. Филимонов, Л. Г. Ермолаева  
Технический редактор И. Г. Сидорова  
Корректоры М. И. Витис, В. Н. Малахова  
Обложка художника Н. М. Сенского

Сдано в набор 18.08.78. Подписано в печать 26.01.79. М-25525.  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная.  
Печать высокая. Печ. л. 10. Уч.-изд. л. 10,31. Тираж 1600 экз.  
Заказ 737/515. Цена 55 коп.

Издательство «Недра», Ленинградское отделение.  
193171, Ленинград, С-171, ул. Фарфоровская, 12.  
Ленинградская картографическая фабрика объединения «Аэрогеология».

1971. 480 с.

# НЕДРА

