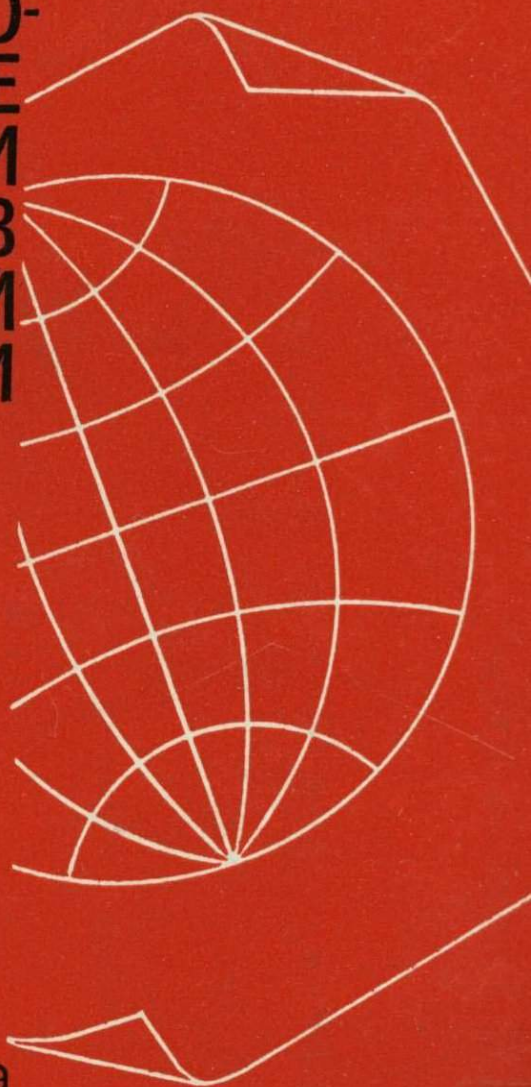


И. А. Очеретенко
В. В. Трощенко

**СТЕРЕО-
ГРАФИЧЕСКИЕ
ПРОЕКЦИИ
В
СТРУКТУРНОЙ
ГЕОЛОГИИ**



Недра

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ДОНБАССКАЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ
ЛАБОРАТОРИЯ

И. А. Очеретенко,
В. В. Трощенко

СТЕРЕО-
ГРАФИЧЕСКИЕ
ПРОЕКЦИИ
В
СТРУКТУРНОЙ
ГЕОЛОГИИ



ЛЕНИНГРАД «НЕДРА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
1978



2489

Очеретенко И. А., Трощенко В. В.
Стереографические проекции в структурной геологии. Л., «Недра», 1978. 136 с. (М-во геологии СССР. Донбасс. науч.-исслед. лаб.).

В книге изложены сущность стереографической проекции и общие правила проектирования прямых и плоскостей, измерения углов между ними, преобразования координат геометрических объектов, статистико-графической обработки массовых замеров ориентировки плоскостей при помощи сеток.

Рассмотрены методические приемы решения типичных структурных задач, связанных с обработкой полевого геологического материала. Они представлены в виде небольшого количества групп задач, являющихся частными случаями определения элементов залегания пласта, ориентировки геометрических элементов складок и разрывных смещений, интерпретации полевых замеров мелких структурных форм в керне и в обнажениях, тектонофизических реконструкций механизма образования структурных форм, использования данных шахтной геологии для прогнозирования тектоники месторождений и др.

Книга предназначена для геологов, занимающихся изучением структурных месторождений и желающих повысить свою квалификацию в области геометризации структурных форм угольных месторождений.

Ил. 76, список лит. 63 назв.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Стереографическая проекция является особой разновидностью перспективной проекции, когда прямые и плоскости трехмерного пространства изображаются на чертеже без искажения направлений и угловых соотношений между собой. Благодаря этому свойству стереографическая проекция часто применяется в географии, астрономии, кристаллографии и структурной геологии, занимающейся, в частности, изучением и картографическим отображением форм залегания горных пород и их нарушений.

При производстве поисковых, геологоразведочных и эксплуатационных работ на угольных месторождениях геологам редко удается наблюдать складки и разрывные смещения в трех измерениях и, следовательно, приходится судить о них на основании того, что можно видеть в обнажениях. Однако направления и углы плоскостных образов структурных форм часто оказываются здесь искаженными за счет влияния экспозиции стенок обнажений. К таким же искажениям приводит измерение углов в керне наклонных или искривленных скважин. Поэтому, для того чтобы определить истинные значения углов, а по ним и форму структурных элементов, приходится прибегать к сложным, а подчас и весьма громоздким аналитическим преобразованиям полевых данных. Применение стереографической проекции в значительной мере облегчает и упрощает решение возникающих в подобных случаях структурных задач и в то же время дает достаточно точные результаты. Оно оказывает неоценимую помощь геологам при статистической обработке массовых измерений элементов залегания трещин, разрывных смещений, линейности петрографических структур и т. п., преследующей цель выявления среди них господствующего направления. В тектонофизике на стереографической проекции определяется положение осей критических нормальных напряжений, явившихся причиной тектонической

деформации пород и углей. Применение стереографической проекции дает эффективный результат при геологическом дешифрировании контактной печати аэрофотосъемки, анализе данных палеомагнитных исследований, проектировании разведочных выработок, исследовании горно-геологических условий разработки и др.

Сtereoграфическое проектирование является, таким образом, одним из тех важнейших способов графической интерпретации полевых данных, без которого трудно обойтись при решении задачи прогнозирования тектоники разведываемых угольных месторождений. Совершенно очевидно, что в целях повышения точности картирования структурных форм этот вид проектирования должен явиться в угольной геологии таким же популярным, как и построение проекций с числовыми отметками. К сожалению, приходится констатировать, что теория и техника применения стереографической проекции еще не в достаточно полной мере освещена в методической геологической литературе. Это в значительной мере задерживает ее широкое внедрение в практику геологоразведочных работ на угольных месторождениях.

Очень краткое изложение методических приемов использования стереографической проекции в геологии дано в брошюре Н. К. Разумовского [42], которая по давности издания стала теперь большой библиографической редкостью. В существующих курсах горной геометрии И. Н. Ушакова, П. А. Рыжова, В. А. Букринского об этом виде проектирования приводятся лишь самые общие сведения, а в руководствах по микроструктурному анализу пород Н. А. Елисеева, Л. И. Лукина, В. Ф. Чернышева, И. П. Кущнарева, X. В. Ферберна и других освещаются только вопросы статистической обработки микроскопических замеров ориентировки зерен минералов или их оптических осей при помощи различного рода сеток. Более полное изложение приемов использования стереографической проекции при тектонических построениях на угольных месторождениях дано в работе А. С. Забродина [17]. Но в ней основное внимание уделяется решению специальных горно-геологических задач по данным наблюдений в горных выработках шахт.

Только один А. И. Родыгин [43] обратился к решению на стереографической проекции непосредственно геологоразведочных задач. В иностранной литературе подобным методическим пособием является работа Ф. К. Филлипса [61].

Нужно также отметить, что описанием отдельных приемов пользования стереографической проекцией нередко сопровождаются публикации результатов целого ряда оригинальных геологических исследований. Такие отрывочные сведения о стереографической проекции содействуют ее популяризации в геологии. Но в большей части они являются лишь своеобразным разъяснением читателям, каким образом получены те или иные геологические выводы. Причем методическая ценность таких очень интересных в геологическом отношении работ зачастую снижается тем, что их авторы прибегают без достаточного на то основания к различного рода «рационализациям» стереографического проектирования, которые нередко приводят к ошибочным заключениям и искажению сущности этого вида проектирования.

Настоящая работа преследует цель обобщить имеющийся опыт применения стереографической проекции для решения тех геометрических задач, которые встречаются главным образом при изучении тектоники разведываемых угольных месторождений. Поэтому ее можно рассматривать как дополнение к существующим методическим руководствам по геологической документации и камеральной обработке материалов для целей их использования при картографическом отображении структурных форм. Она написана с расчетом на то, чтобы ее могли использовать геологи, незнакомые со стереографической проекцией. Поэтому в начале работы излагается сущность стереографической проекции и техника проектирования прямых и плоскостей при помощи специальных сеток. Знание таких элементарных приемов построений оказывается вполне достаточным для решения большинства возникающих при разведке практических геологических задач.

Вторая глава посвящена методике статистико-графической обработки массовых измерений элементов ориентировки структурных плоскостей. Уместность специального рассмотрения этого вопроса обусловлена существованием в геологической литературе различных, а подчас и ошибочных методических подходов к его решению.

Третья глава содержит описание графических приемов определения истинных элементов залегания пласта по данным измерения его видимых элементов залегания в естественных и искусственных обнажениях, в керне, на контактной печати аэрофотосъемки, а также по вектору естественной остаточной намагниченности пород, определяемому лабораторным путем. Она занимает цент-

ральное место в работе и в большей своей части излагает собственные методические разработки авторов.

Последующая четвертая глава является систематическим изложением методов геометрического анализа на стереографической проекции складок и разрывных смещений. Совместно с изображением структурных форм на проекции с числовыми отметками результаты такого анализа могут быть широко использованы при изучении и прогнозировании тектоники разведываемых угольных месторождений.

Пятая глава посвящена описанию геометрических приемов определения истинных элементов залегания трещин в керне наклонных скважин и пространственных соотношений трещин между собой и с пластами углей, что может быть полезным при изучении внутрипластовых тектонических нарушений.

Разведка и изучение тектоники месторождений угля в последние годы сопровождается широким комплексом специальных тектонофизических исследований. Поэтому в шестой главе даются практические рекомендации по решению ряда задач, связанных с реконструированием физико-механических условий образования трещин, разрывных смещений и складок.

В заключительной седьмой главе дано решение при помощи стереографической сетки некоторых горно-геометрических задач, встречающихся в практике производства геологоразведочных работ.

Освещение методики решения всех этих вопросов в книге оказалось возможным благодаря тому, что ее авторы в течение многих лет занимались геометризацией структурных форм при выполнении тектонических исследований в Донецком, Карагандинском и Печорском угольных бассейнах, широко используя для этой цели стереографическую проекцию.

В ходе подготовки книги использованы также многочисленные опубликованные работы, авторы которых упоминаются в тексте и в списке литературы.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ

История стереографической проекции

Стереографическая проекция (от греческого «стереон» — пространственный и «графейн» — писать, термин введен в 1831 г. математиком Л. И. Магнусом) предложена основоположником астрономии Гиппархом (II в. до н. э.), но главные ее свойства открыты Птоломеем (II в. н. э.). В своем знаменитом труде «Планисферий» Птоломей описал устройство астролябии для определения координат звездного неба, основанное на применении стереографической проекции.

Первое дошедшее до нас изложение теории стереографической проекции с доказательством ее свойств принадлежит узбекскому ученому Ахмаду ал-Фергани (IX в.). Применению стереографической проекции для составления географических карт посвящены работы Л. Эйлера (1707—1783) («О представлении сферической поверхности на плоскости», «О географической проекции сферической поверхности» и др.), в которых решается вопрос о наиболее общем преобразовании сферы на плоскость, сохраняющем углы между линиями. А. Кейли (1821—1895) открыл связь между различными горизонтальными и экваториальной стереографическими проекциями.

Стереографическая проекция совместно с другими способами построения проекции сферы на плоскости (перспективной, зенитальной, цилиндрической, конической, условной) описана в ряде фундаментальных работ по картографии, среди которых особое внимание заслуживают работы К. Гаусса, Н. Тиссо, В. В. Витковского и других. Геометрические вопросы этой проекции изложены в специальных разделах математики (в курсах сферической геометрии, в теории функций комплексного переменного и др.).

В геологии стереографическая проекция впервые была применена Е. С. Федоровым и К. Ф. Беккером для изображения на плоскости измеряемых в шлифах под микроскопом трехмерных оптических и кристаллографических элементов минеральных зерен. В дальнейшем разработанная система изображения элементов геометрической кристаллографии была перенесена А. А. Полкановым, Г. Клоосом, В. Зандером, А. В. Пэком и другими в практику макро- и

I.1

I.2

микроструктурного исследования анизотропии строения магматических, метаморфических и осадочных пород.

При этом выявилось два направления практического приложения стереографической проекции. Одно из них связывается с проблемой количественного изучения степени совершенства ориентировки минералов в породах, сланцеватости, трещин, плоскостных элементов тектонических структур и др. Значительный вклад в развитие методики статистико-графической обработки ориентированных величин с помощью стереографической и других проекций внесли Г. В. Вульф, В. Шмидт, А. К. Болдырев, Г. Фишер, А. В. Пронин и другие. Описание этого метода содержат работы Х. В. Ферберна [52], Н. А. Елисеева [16], А. Б. Вистелиуса [5], Д. В. Постникова [39], Л. И. Лукина, В. Ф. Чернышева и И. П. Кушнарева [24].

Второе направление использования стереографической проекции охватывает вопросы методики измерения пространственного положения линейных и плоскостных элементов складчатых, разрывных и трещинных структурных форм. Интересными в этой области являются работы О. Зайца [63], А. С. Забродина [18], М. В. Гзовского [12] и других.

Вопросам практического применения стереографической проекции в геологии посвящены специальные работы Н. К. Разумовского [42], Ф. К. Филиппса [61], А. С. Забродина [17] и А. И. Родыгина [43].

Сущность стереографической проекции

1.3 Стереографическая проекция является одним из видов перспективного изображения сферы на плоскости, когда точка зрения (центр проектирования) располагается на поверхности сферы, а картинная плоскость — в центре, перпендикулярно к радиусу, идущему к точке зрения. В зависимости от положения точки зрения на сфере (на экваторе, в полюсе или под некоторой промежуточной широтой) различаются экваториальная (картинная плоскость совпадает с плоскостью какого-нибудь меридиана), полярная (картинная плоскость совпадает с плоскостью экватора) и горизонтальная (картинная плоскость параллельна горизонту какой-либо заранее выбранной точки) стереографические проекции.

Главные отличительные свойства стереографической проекции состоят в том, что:

а) окружности, лежащие на сфере, проектируются на картинную плоскость в виде окружностей или, если окружности на сфере проходят через центр проекции, в виде прямых;

б) углы между дугами, лежащими на сфере, изображаются равными им углам между дугами, спроектированными на кар-

тинную плоскость (каждый угол на сфере проектируется на плоскость без искажений).

Стереографическая проекция, как любая другая проекция сферы, сохраняет угловые расстояния между проектируемыми прямыми или плоскостями при любой перемене положения картинной плоскости. Внутри круга проекции может быть изображена вся полусфера, т. е. построены проекции практически любого количества прямых или плоскостей.

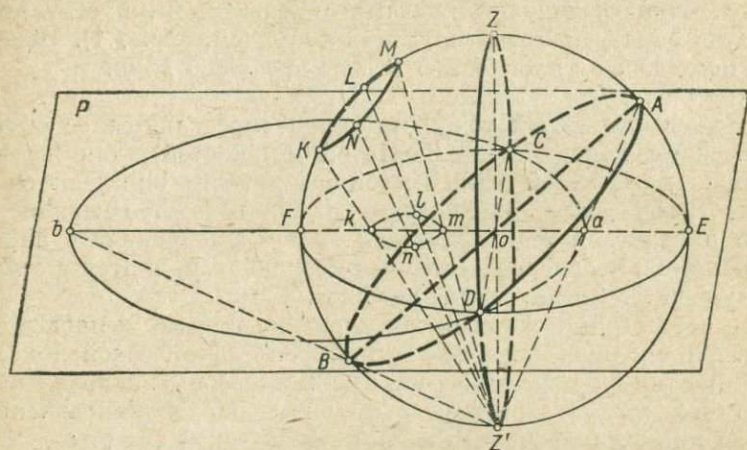


Рис. 1.1. Стереографическая проекция точек верхней полусферы.

Благодаря этим замечательным свойствам стереографическая проекция используется для решения самых разнообразных геометрических задач, связанных с определением в трехмерном пространстве углов между различными направлениями, плоскостями или теми и другими. Для этого прямые или плоскости параллельно самим себе переносятся в одну точку o , около которой описывается некоторым радиусом сфера (рис. 1.1). Последняя с прямыми и плоскостями дает пересечения в виде точек и сферических линий. Плоскости, проходящие через центр сферы, дают на ее поверхности большие круги, а плоскости, проходящие вне центра сферы, — малые круги.

Эти следы пересечения, будучи перенесенными пучками проектирующих лучей из центра проектирования Z' на картинную плоскость P , будут изображаться на ней в виде точек, линий и окружностей, т. е. дадут стереографические проекции прямых и плоскостей. Так, например, направление AB изобразится в стереографической проекции точкой a .

Плоскость, пересекающая сферу по большому кругу $ADBC$, проектируется на плоскость P в виде окружности $adbC$. Но если рассматривать только верхнюю полусферу, стереографической проекцией плоскости $ADBC$ является дуга CaD , лежащая внутри

круга проекции $EDFC$. С нижней полусферы та же плоскость $ADBC$ проектируется на плоскость P в виде дуги DbC . Стереографическими проекциями больших кругов вертикальных плоскостей $ZEZ'F$ и $ZCZ'D$ являются диаметры круга проекции EF и CD . Их изображения на картинной плоскости можно представить как окружности бесконечно большого радиуса.

Стереографические проекции малых кругов строятся аналогичным образом. Для построения проекции малого круга $KLMN$ все его точки соединяются лучами с полюсом Z' , в результате чего лучи образуют проектирующий конус (см. рис. I.4). Пересечение последнего с плоскостью P дает проекцию $klmn$.

- I.4 Положение любой точки на сфере определяется ее сферическими координатами (долготой и широтой), так же как положение любой точки земной поверхности определяется ее географическими координатами. Однако сходство меридианов и параллелей географической системы координат с параллелями и меридианами системы координат, принятой в структурной геологии, чисто внешнее.

При стереографическом проектировании прямых и плоскостей для целей тектонических построений роль сферической долготы выполяет азимут падения — угол между северным направлением магнитного или географического меридиана и направлением наклона прямой (плоскости), а роль сферической широты — угол наклона прямой (плоскости) относительно горизонта земной поверхности, за которую принимается картинная плоскость, проходящая через центр сферы. Для удобства и точности построения стереографических проекций прямых и плоскостей, заданных азимутом и углом падения, поверхность сферы разбивают сетью условных меридианов и параллелей.

Стереографическая сетка

- I.5 Эта сетка представляет собой проекцию на плоскость градусной сети меридианов и параллелей верхней или нижней полусферы. В геологии распространение получили экваториальная и полярная сетки стереографической проекции верхней полусферы. Прообразом этих сеток является комбинированная (совмещенная проекция градусной сети сферы на три взаимно перпендикулярные плоскости) сетка Федорова [51].

Экваториальная стереографическая сетка, известная в геологической литературе как сетка Вульфа, строится по следующему принципу. Сфера диаметром 20 см (реже 10 см) с меридианами и параллелями, нанесенными через 2° , проектируется лучами из нижней точки сферы на плоскость одного из меридианов (рис. I.2).

Для построения проекций на сетке имеются цифровые обозначения. Внешний ее круг разбит на 360° и представляет собой ази-

мугальную шкалу, нулевое направление которой совпадает с верхним концом центрального меридиана. Меридианы (дуги больших кругов) обозначаются цифрами от 0 до 90, отмечающими значения угла наклона прямых или плоскостей к горизонту. При построении полюсов плоскостей направление оцифровки меридианов

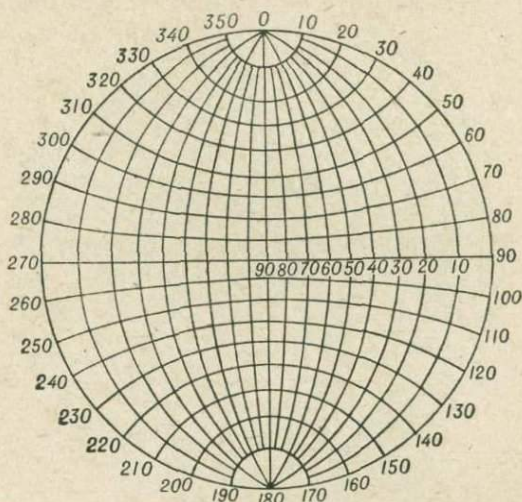


Рис. 1.2. Экваториальная стереографическая сетка Вульфа.

принимается от центра к периферии, при построении проекций прямых и плоскостей — наоборот.

В силу свойств стереографической проекции (см. пункт 1.3) экваториальная сетка передает действительные угловые соотношения прямых и плоскостей, т. е. является конформной (равноугольной). Однако она дает значительные искажения площадей. Одинаковые по размеру площади на поверхности полусферы после их проектирования на плоскость изображаются меньшими площадями ближе к центру сетки и большими около ее периферии. Об этом свидетельствует существенное различие промежутков градусных делений меридианов и параллелей сетки. Поэтому экваториальная стереографическая сетка используется в основном для решения геометрических задач.

Полярная стереографическая сетка, впервые использованная в геологии А. К. Болдыревым, строится путем проектирования градусной сети сферы на плоскость экватора, совмещенную с горизонтальной плоскостью. Эта сетка состоит из радиально расходящихся лучей (меридианов) и концентрических окружностей (параллелей), общий центр которых расположен в точке пересечения меридианов (рис. 1.3).

1.6

Меридианы полярной сетки обозначены на ее внешней окружности цифрами от 0 до 360 по ходу часовой стрелки, а параллели — от 0 до 90. Направление оцифровки зависит от способа проектирования.

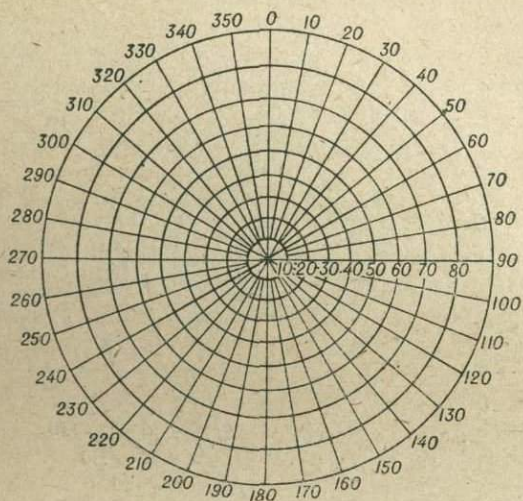


Рис. 1.3. Полярная стереографическая сетка Болдырева.

Каждый меридиан объединяет проекции всех прямых, имеющих один и тот же азимут падения (сферическую долготу), а каждая параллель — проекции всех прямых, имеющих один и тот же угол наклона к горизонту (сферическую широту). Таким образом, градусная сеть полярной сетки является отображением системы сферических координат, по которой легко строить проекции прямых простым координированием. Недостатком данной сетки является сложность построения проекций плоскостей и измерения углов между прямыми и плоскостями.

Равноплощадная и равнопромежуточная сетки

1.7 Наряду с сетками стереографической проекции в геологии используются также сетки зенитальной (сфера проектируется по определенным правилам на плоскость, касающуюся сферы в произвольной точке) проекции. Равнопромежуточная сетка, предложенная для геологической цели В. В. Каврайским, представляет собой зенитальную проекцию градусной сети сферы на плоскость одного из меридианов (проекцию Постеля).

Особенность этой проекции состоит в том, что она сохраняет одинаковый линейный масштаб изображений во всех частях круга проекции. Градусные деления центрального меридиана и экватора в центральной части сетки и у ее периферии равны между собой (рис. 1.4). Но она не сохраняет подобия фигур на плоскости соответствующим фигурам на сфере. Вследствие этого масштаб

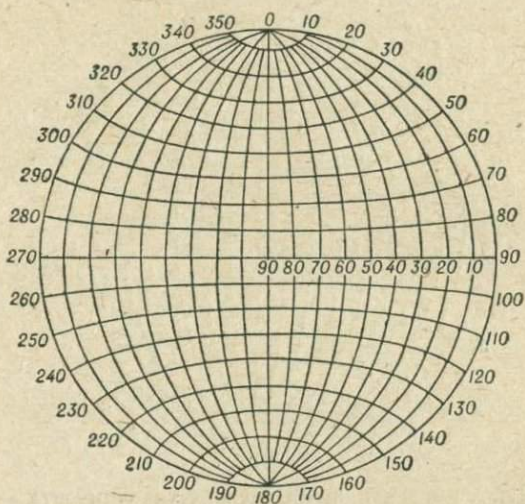


Рис. 1.4. Равноплощадная сетка Каврайского.

площадей в пределах круга проекций разный. У периферии сетки площади фигур в 1,571 раза больше площади тех же фигур у центра сетки (в стереографической проекции — в 4 раза).

Сетка Каврайского имеет те же градусные деления меридианов и параллелей, что и стереографическая сетка Вульфа. Она удобна для решения стереографических задач, обеспечивает одинаковую точность измерения угловых величин в любой части круга проекции, но непригодна для статистико-графической обработки ориентированных величин.

Экваториальная равноплощадная сетка, предложенная для геологических целей В. Шмидтом, представляет собой зенитальную проекцию Ж. Ламберта, построенную таким образом, что равным площадям фигур на сфере соответствуют равные площади проекций тех же фигур на плоскости (рис. 1.5).

Она дает небольшое искажение линейного масштаба по площади круга проекции; искажение масштаба изображения градусных делений центрального меридиана и экватора у периферии равноплощадной сетки составляет всего лишь 0,707. Эти ценные особенности равноплощадной сетки выдвигают ее в качестве очень

удобного инструмента для статистико-графической обработки массовых измерений ориентированных в трехмерном пространстве величин. Ею можно также пользоваться для графического измерения углов. Но она дает при этом несколько пониженную точность изображения угловых величин по периферии.

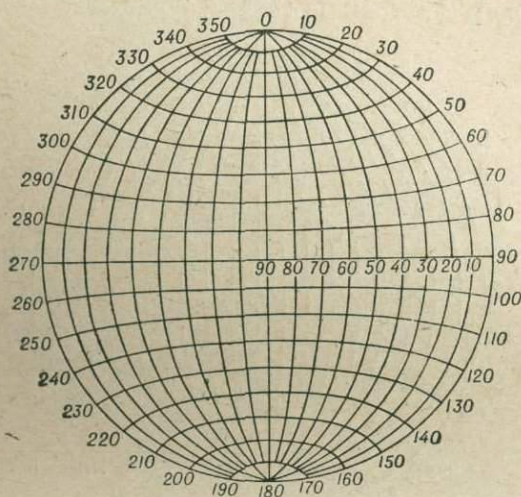


Рис. 1.5. Равноплощадная сетка Ламберта — Шмидта.

1.9 Сетки стереографической или зенитальной проекции используются в качестве транспарантов для решения геометрических и статистико-графических задач.

Построение обычно выполняется на чистых листах бумажной или лавсановой кальки, накладываемой сверху на сетку. Листы кальки подготавливаются к работе следующим образом. Обрезаются размером несколько большим, чем диаметр сетки, на каждом из них прочерчивается круг диаметром, равным кругу сетки, отмечается крестиком центр и черточкой на окружности северное направление центрального меридиана. Все построения на кальке должны выполняться аккуратно тонко отточенным карандашом, а сами сетки должны быть вычерчены правильно, без искажения проекций меридианов и параллелей.

Для построения стереографической проекции прямых и плоскостей наиболее удобно пользоваться экваториальной стереографической сеткой диаметром 20 см.

Проекция прямых и плоскостей

1.10 Построить стереографическую проекцию прямой, заданной азимутом наклона 298° и углом наклона к горизонту 48° .

Наложив кальку на сетку* так, чтобы их центры и отметки N (север) совпали, отсчитаем по наружной шкале сетки в направлении движения часовой стрелки 298° и отметим это направление на окружности точкой a_0 . Для того чтобы найти стереографическую проекцию прямой (проекцию точки пересечения прямой

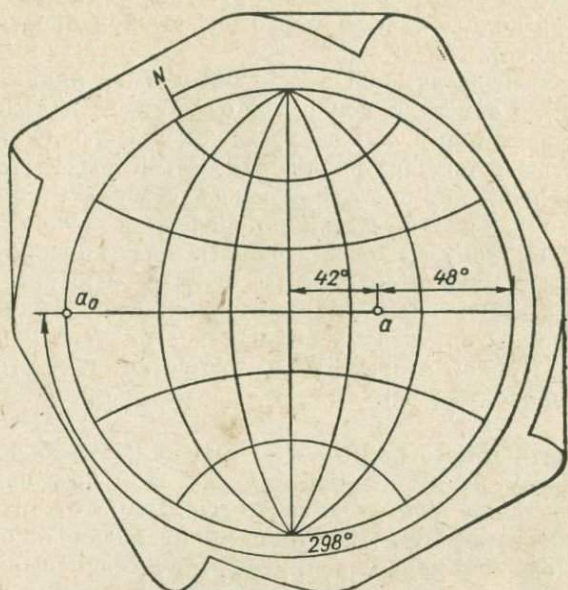


Рис. 1.6. Построение проекции прямой по ее азимуту и углу наклона.

с поверхностью верхней полусферы), вращением кальки вокруг центра совместим точку a_0 с любым концом горизонтального диаметра сетки, а затем на его противоположной половине отсчитаем по градусным делениям угол 48° в направлении от окружности к центру сетки (рис. 1.6). Найденная таким образом точка a является искомой стереографической проекцией прямой. Аналогичным образом находится стереографическая проекция прямой, заданной географическим азимутом наклона и углом наклона к вертикали (зенитным углом). Угол наклона откладывается

* В решении данной и всех последующих геометрических задач использована экваториальная стереографическая сетка. При пользовании другими экваториальными сетками (равнопромежуточной, равноплощадной) порядок построений не изменяется. Все геометрические и практические задачи, для которых в нижеследующем изложении предложены приемы решения в стереографической проекции, можно решать и в других видах проекции сферы на плоскость (равноплощадной и равнопромежуточной), пользуясь теми же приемами без изменения.

в этом случае на горизонтальном диаметре от центра сетки в направлении периферии. На рис. 1.6 показано построение проекции прямой, заданной азимутом наклона 298° и углом наклона по отношению к вертикали 42° .

- 1.11** Определить азимут наклона и угол наклона прямой к горизонту по положению ее стереографической проекции (обратная задача).

Пусть стереографической проекцией прямой является точка a (см. рис. 1.6). Совместив центры и отметки N кальки и сетки, прочертим через точку a и центр сетки прямую до пересечения с окружностью и по наружной шкале сетки определим значение азимута наклона прямой (угол между северным направлением центрального меридиана сетки и направлением наклона прямой a_0 , измеренный по ходу часовой стрелки). Затем поворотом кальки вокруг центра нужно совместить отметку азимута наклонной прямой (точку a_0) с горизонтальным диаметром сетки и по градусным делениям определить количество градусов между проекцией прямой (точкой a) и окружностью сетки, т. е. угол наклона прямой к горизонту (48°).

- 1.12** Построить стереографическую проекцию плоскости, заданной азимутом линии падения 38° и углом падения 37° .

От направления N центрального меридиана отсчитаем по наружной шкале сетки 38° и отметим это направление на окружности точкой a_0 . Повернем кальку вокруг центра до совмещения точки a_0 с одним из концов горизонтального диаметра сетки и, убедившись в том, что центры кальки и сетки совпадают, найдем проекцию линии падения плоскости, точку a (рис. 1.7). Для этого требуется отсчитать на противоположной половине горизонтального диаметра значение угла линии падения 37° в направлении от окружности к центру сетки. Поскольку отсчет падает в нашем примере между двух дуг (сетка градуируется обычно через 2°), положение проекции определяется на глаз, путем интерполяции, что следует иметь в виду при решении всех последующих задач.

Как известно, все плоскости, проходящие через центр сферы, пересекают ее по дугам больших кругов. Последние изображены на стереографической сетке в виде меридианов. Поэтому стереографической проекцией нашей плоскости является дуга P , проведенная через точку a между двумя соседними меридианами с четными градусными делениями.

- 1.13** По положению стереографической проекции плоскости определить ее элементы залегания — азимут и угол падения (обратная задача).

Пусть стереографической проекцией плоскости является дуга P . Для решения задачи, совместив эту дугу с соответствующим меридианом сетки и следя за тем, чтобы центры кальки и сетки

этом совпадать). Затем поворотом кальки вокруг центра нужно совместить точку a_0 с любым концом горизонтального диаметра и от центра сетки в направлении отметки азимута падения (точки a_0) отсчитать значение угла падения плоскости 37° (см. рис. I.7). Точка p является полюсом нашей плоскости. Нужно помнить, что полюс всегда располагается на продолжении линии падения плоскости, а его угловое расстояние от проекции дуги данной плоскости, измеряемое на горизонтальном диаметре сетки, равно 90° . Поэтому, в случае необходимости построения проекции дуги плоскости P по ее полюсу p , достаточно отсчитать на горизонтальном диаметре от точки p через центр сетки 90° и провести через полученную точку a соответствующую дугу большого круга.

Когда требуется найти полюс p по заданной проекции дуги плоскости P , необходимо совместить эту дугу с соответствующим меридианом сетки и, отсчитав 90° по горизонтальному диаметру, отметить на кальке искомую точку p .

I.15 По положению полюса плоскости определить азимут и угол ее падения (обратная задача).

Пусть точка p является полюсом плоскости P . Поворотом кальки вокруг центра сетки o поместим точку p на экватор. Отсчитав количество градусных делений между точкой p и центром сетки, получим значение угла падения плоскости (см. рис. I.7). Не сдвигая кальку, отметим на ней положение ближайшего от точки p конца экватора точкой a_0 . Затем, повернув кальку до совмещения ее северной отметки N с нулем внешней шкалы сетки, отсчитаем азимут падения плоскости — угол между северным концом центрального меридиана и точкой a_0 .

I.16 Построить проекцию плоскости P по азимутам и углам наклона двух лежащих в ней прямых NO (124° , $\angle 24^\circ$) и MO (36° , $\angle 37^\circ$)*.

После совмещения отметок кальки и сетки построим вначале проекции прямых n и m (рис. I.8). Напомним как это делается. Пользуясь наружной шкалой сетки, отметим на окружности кальки точкой n_0 азимут наклона прямой NO (124°) и, не меняя положения кальки, отметим точкой m_0 азимут наклона прямой MO (36°). Далее следует совместить точку n_0 с концом горизонтального диаметра и с противоположной стороны отсчитать по его градусным делениям в направлении к центру значение угла наклона первой прямой (24°), что определит положение ее стереографической проекции, точку n . Таким же способом нужно найти проекцию второй прямой, точку m .

* В данной и последующих задачах принята сокращенная запись элементов залегания плоскостей и прямых: первое значение отвечает азимуту падения (наклона), второе — углу падения (наклона).

Поскольку прямые лежат в одной плоскости, то и проекции их должны совпадать с проекцией данной плоскости. Поэтому решение задачи состоит в подборе на сетке дуги большого круга (стереографической проекции плоскости), которая проходила бы через обе проекции прямых, точки m и n . Такую процедуру нужно выполнять медленным поворотом кальки вокруг центра до тех

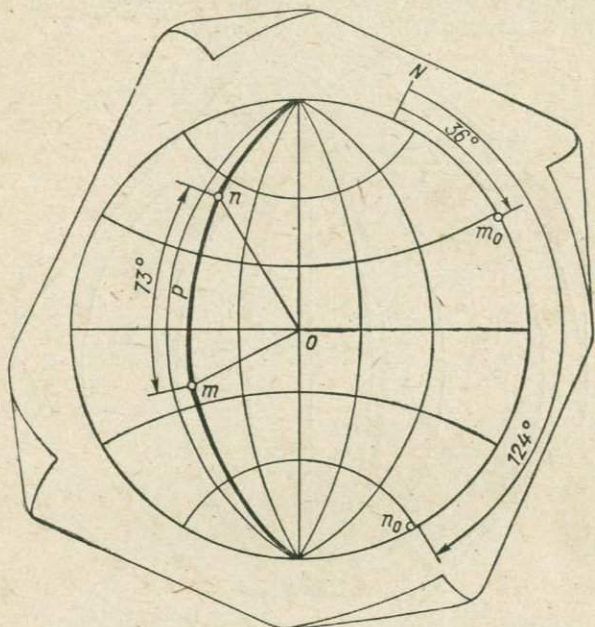


Рис. 1.8. Построение проекции плоскости по азимутам и углам наклона двух лежащих в ней прямых.

пор, пока точки m и n не окажутся на одной меридиональной дуге сетки или на равном расстоянии от ближайших дуг, если по условиям задания прямых угол падения искомой плоскости оказался равным нечетному количеству градусов. Остается лишь прочертить карандашом через точки m и n дугу большого круга, которая и является стереографической проекцией искомой плоскости P . Азимут и угол падения плоскости P найдем, как указано в пункте 1.13.

Углы между прямыми и плоскостями

Определить угол между прямыми NO (124° , $\angle 24^\circ$) и MO (36° , $\angle 37^\circ$). I.17

Нужно построить проекции прямых, провести через них плоскость и по ее дуге определить значение искомого угла. Первая

часть решения задачи уже знакома нам из пункта I.16. Подобрать вращением кальки вокруг центра дугу плоскости, в которой лежат обе прямые, остается отсчитать по градусным делениям меридиана количество градусов между их проекциями, точками m и n (см. рис. I.8). В приведенном примере этот угол равен 73° .

- I.18 Проверить компланарность (параллельность одной плоскости) трех прямых по их проекциям.

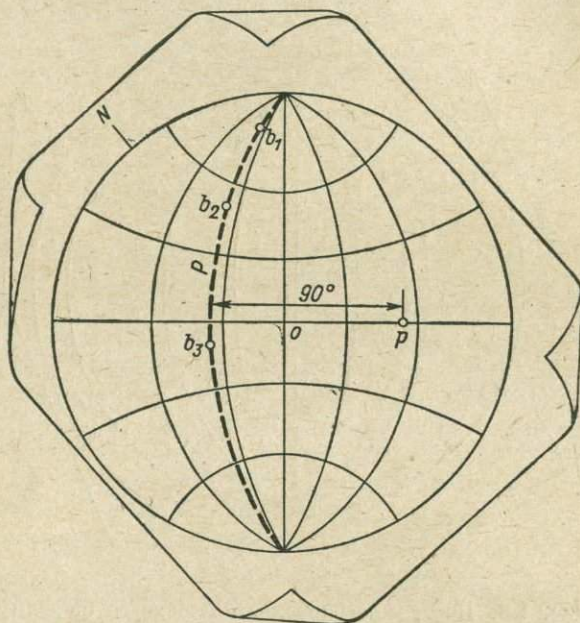


Рис. I.9. Определение компланарности прямых.

Пусть b_1 , b_2 и b_3 — проекции прямых (рис. I.9). Поворотом кальки вокруг центра совместим две ближайшие проекции (точки b_1 и b_2) с дугой большого круга сетки (через две пересекающиеся прямые всегда можно провести плоскость) и прочертим ее. Если третья прямая компланарна двум первым, то ее проекция (точка b_3) тоже окажется на данной дуге. В приведенном примере все три прямые компланарны плоскости P .

- I.19 Построить к трем компланарным прямым, проекции которых изображены на диаграмме, перпендикуляр.

Пусть b_1 , b_2 и b_3 — проекции компланарных прямых (см. рис. I.9). Проведем дугу компланарной плоскости P и, не меняя положения кальки, отсчитаем от нее через центр сетки на горизонтальном диаметре 90° , т. е. найдем полюс данной плоскости (точку p). Он является проекцией перпендикуляра к заданным прямым.

Определить угол между прямой (308° , $\angle 58^\circ$) и плоскостью (65° , $\angle 40^\circ$) I.20

При совмещении отметок N кальки и сетки отложим на окружности кальки азимуты прямой (точку c_0) и плоскости (точку a_0) и построим уже знакомым способом их проекции — точку c и дугу большого круга P (рис. I.10). Искомый угол лежит в апсидальной плоскости, проходящей через прямую перпендикулярно

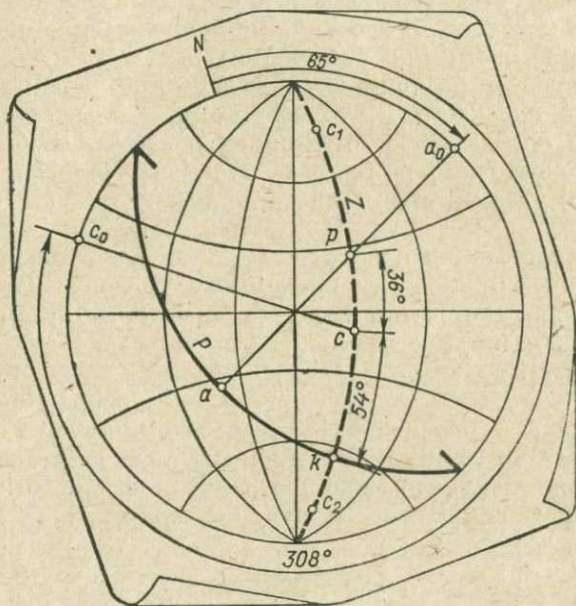


Рис. I.10. Определение апсидального угла между прямой и плоскостью.

к заданной плоскости. Поэтому решение задачи сводится к построению проекции апсидальной плоскости и простому измерению по ее дуге искомого значения угла. Делается это следующим образом. Построим полюс p плоскости P (см. пункт I.14), после чего вращением кальки вокруг центра добьемся совмещения точек p и c с одной и той же дугой большого круга сетки (в приведенном примере дугой Z). Остается определить по этой дуге Z , пользуясь ее градусными делениями, количество градусов между проекцией прямой (точкой c) и точкой пересечения k дуг больших кругов заданной P и апсидальной Z плоскостей. Искомый угол оказался равным 54° .

Поскольку точка p является проекцией перпендикуляра к заданной плоскости P , решение поставленной задачи можно упростить, определив вначале дополнительный угол, а по нему искомый. Для этого нужно построить только проекцию полюса

плоскости и проекцию прямой, подобрать вращением кальки соответствующую дугу большого круга сетки и определить по ней значение дополнительного угла — угла между полюсом плоскости (точкой p) и проекцией прямой (точкой c).

В данной задаче дополнительный угол равен 36° . Следовательно угол между прямой и плоскостью равен $90 - 36 = 54^\circ$. Но таким способом вычисляется действительный угол наклона прямой к плоскости только в том случае, когда на проекции апсидальной плоскости Z проекция прямой c располагается между проекцией плоскости P и ее полюсом p .

Если полюс p располагается между проекцией прямой c_1 и проекцией плоскости P , то острый угол α наклона прямой к плоскости определяется вычитанием дополнительного угла γ , отсчитанного от точки p до точки c_1 , из 90° , или вычитанием смежного (тупого) угла α_1 , отсчитанного по дуге Z от точки c_1 до дуги P , из 180° .

Если дуга-проекция плоскости P располагается между полюсом и проекцией прямой c_2 , то искомый угол α определяется либо непосредственным отсчетом между точкой c_2 и дугой P , либо вычитанием 90° из тупого угла, отсчитанного по дуге Z между точками p и c_2 .

- I.21 Построить в плоскости (130° , $\angle 50^\circ$) прямую в заданном направлении (азимут 70°) и определить ее угол наклона. При решении задачи нужно построить по заданным элементам залегания проекцию плоскости (дугу большого круга P), а затем,

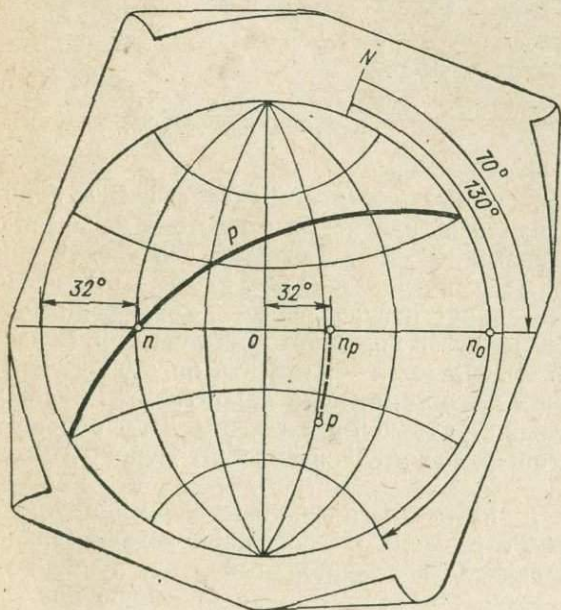


Рис. I.11. Построение в плоскости прямой в заданном направлении.

совместив отметки N кальки и сетки, отсчитать от северного направления центрального меридиана по наружной шкале сетки угол 70° (рис. I.11). Найденная таким образом точка n_0 отметит заданный азимут наклона прямой. Остается совместить точку n_0 с горизонтальным диаметром сетки и найти проекцию данной прямой. Ее отметит точка n пересечения горизонтального диаметра с дугой плоскости P . Не сдвигая кальку, можно определить угол наклона прямой к горизонту. Для этого нужно отсчитать на горизонтальном диаметре количество градусов между точкой n и окружностью сетки (32°).

Решение данной задачи возможно также построением полюсов. Нужно построить полюс плоскости p и отметить точкой n_0 на окружности сетки азимут наклона прямой (см. рис. I.11). Затем следует совместить точку n_0 с концом горизонтального диаметра и спроектировать на него по направлению ближайшей дуги большого круга сетки полюс плоскости (точку p). Остается определить по градусным делениям диаметра сетки угол наклона прямой к горизонту. Поскольку мы имеем дело с полюсами, то этот угол равен расстоянию между точкой n_p и центром сетки (32°).

Определить азимуты наклона прямых, лежащих в плоскости (60° , $\angle 35^\circ$) под заданным углом 18° к горизонту. (При решении задачи следует иметь в виду, что в любой наклонной плоскости только две прямые могут быть наклонены под одинаковым углом к горизонту.) I.22

Вначале построим по элементам залегания проекцию плоскости (дугу большого круга P). Затем поворотом вокруг центра приведем кальку в положение, при котором промежуток на горизонтальном диаметре сетки между ее окружностью и дугой P окажется равным 18° (рис. I.12). Тогда точка n пересечения диаметра с дугой P отметит положение проекции одной из искомых прямых. Ее азимут наклона можно определить по положению противоположного конца горизонтального диаметра, воспользовавшись градусной оцифровкой внешней окружности. В рассматриваемом примере прямая имеет азимут наклона 122° . Продолжая поворачивать кальку вокруг центра, можно тем же путем найти проекцию второй искомой прямой (точку m). Ее азимут наклона оказался равным 358° .

Решение этой задачи посредством построения полюсов производится следующим образом. Построим по заданным элементам залегания полюс p данной плоскости. Поместим вращением кальки вокруг центра полюс p на дугу Z_n большого круга сетки, отстоящую от центра сетки на 18° , и от точки n_p отсчитаем через центр на горизонтальном диаметре 90° (см. рис. I.12). В результате найдем проекцию прямой n . Таким же путем найдем проекцию прямой m , для чего полюс p необходимо поместить на дугу Z_m в соседнем квадранте сетки. Вернув кальку в исходное положение (совместив отметки N), определим азимуты наклона прямых (122 и 358°).

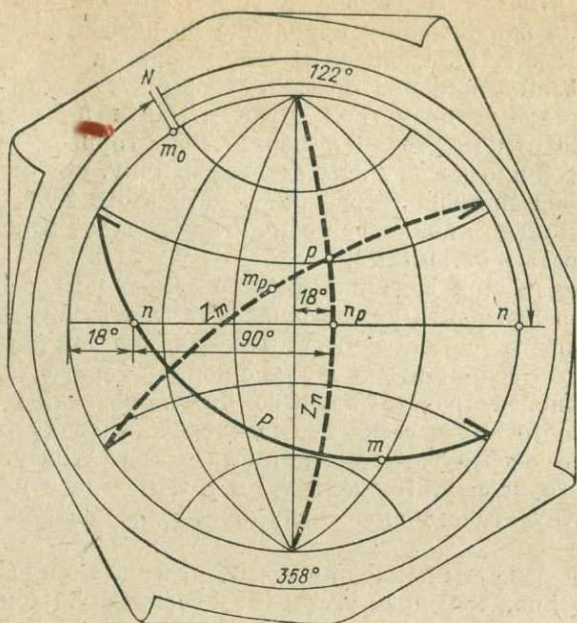


Рис. 1.12. Построение прямых в плоскости под заданным углом к горизонту.

1.23 Найти геометрическое место прямых (образующих конуса), заданных к плоскости P (50° , $\angle 40^\circ$) под углом наклона 60° .

Эта задача сводится к построению проекции малого круга радиусом, равным по длине значению дополнительного угла к заданному углу наклона прямых (прямая, составляющая с плоскостью определенный угол, образует с перпендикуляром к данной плоскости дополнительный угол). Согласно условиям задачи этот дополнительный угол равен $90 - 60 = 30^\circ$.

Построим по элементам залегания плоскости полюс p , поворотом кальки переведем его на горизонтальный диаметр сетки и, отсчитав 30° от него по обе стороны диаметра и по дуге большого круга, проходящей через точку p , получим четыре точки искомой окружности (рис. 1.13). Последнюю можно также построить циркулем. Центр окружности, получающейся на проекции, не совпадает с проекцией центра окружности на сфере. Нужный геометрический центр окружности на проекции находим, разделив пополам расстояние между точками n и m искомой окружности, лежащими на горизонтальном диаметре.

Здесь уместно заметить, что при решении подобной задачи возможен случай, когда угловой радиус малого круга больше, чем расстояние от центра последнего до внешней окружности сетки (часть малого круга может оказаться на нижней полу-

сфере). Предположим, что дополнительный угол равен 60° . Для построения малого круга с помощью циркуля сначала нужно решить обычную геометрическую задачу построения окружности по трем точкам (одна на горизонтальном диаметре и две на внешней окружности сетки), причем линию окружности следует провести до внешней окружности (см. рис. I.13). После этого точки

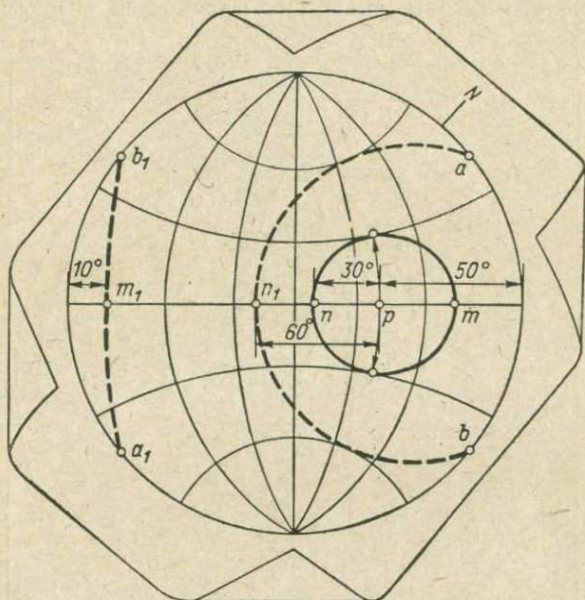


Рис. I.13. Нахождение геометрического места прямых, заданных под углом к плоскости.

пересечения полученного малого круга (на рисунке он изображен штриховой линией) с внешней окружностью переносят в диаметрально противоположные пункты, для чего точки a и b поочередно совмещают с концом горизонтального диаметра сетки. Для второй части малого круга теперь тоже будем иметь три точки: две на внешней окружности (a_1 и b_1) и одну (m_1), полученную ранее, при отсчете углового радиуса на диаметре. Однако радиус для этой дуги будет совершенно иным (он будет больше), и геометрический центр нужно отыскивать снова по трем точкам.

В заключение следует указать, что построение малых кругов (геометрического места проекций прямых, наклоненных к плоскости под определенным углом) с помощью циркуля возможно только на равноугольной сетке, где все окружности на сфере проектируются на плоскость в виде окружностей.

Пространственное соотношение плоскостей

I.24. Построить линию пересечения плоскостей P (332° , $\angle 60^\circ$) и Q (195° , $\angle 39^\circ$) и определить элементы ее залегания.

Отметим на кальке точками p_0 и q_0 азимуты падения плоскостей и, поочередно совместив эти точки с горизонтальным диаметром сетки, построим дуговые проекции плоскостей P и Q (рис. I.14).

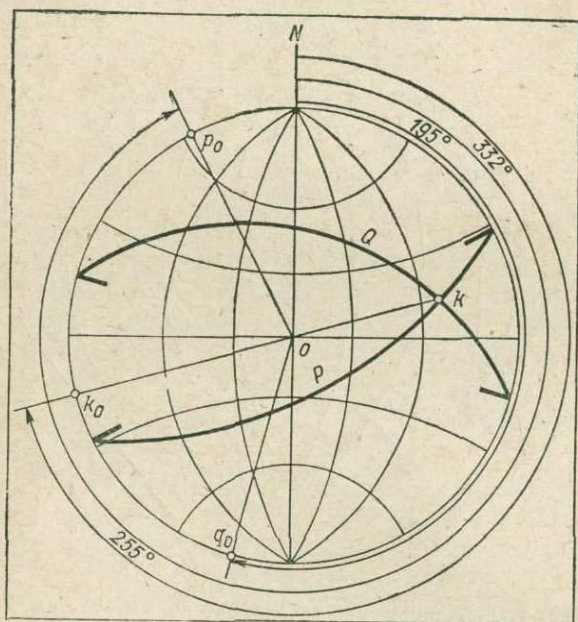


Рис. I.14. Построение линии пересечения двух плоскостей, изображенных дуговыми проекциями.

Точка k скрещения дуг P и Q является проекцией линии пересечения заданных плоскостей. Ее азимут наклона фиксирует на окружности точка k_0 , а угол наклона к горизонту определяется расстоянием от точки k до окружности сетки, измеряемым по градусным делениям горизонтального диаметра.

Эту же задачу можно решить, задавая плоскости полюсами. Построим по элементам залегания плоскостей P и Q их полюсы p и q (см. пункт I.14). Поворотом кальки вокруг центра подберем на сетке дугу большого круга Z , проходящую через обе точки p и q (рис. I.15). В этом же положении кальки нужно от точки пересечения дуги Z с горизонтальным диаметром отсчитать по его градусным делениям через центр сетки 90° . Найденная точка k является проекцией искомой линии пересечения (проекцией точки

пересечения прямой ok с поверхностью верхней полусферы). Угол наклона этой прямой к горизонту определяется расстоянием точки k до окружности сетки (23°), а азимут наклона — дирекционным углом между нулевой отметкой сетки и направлением наклона прямой, точкой k_0 (255°).

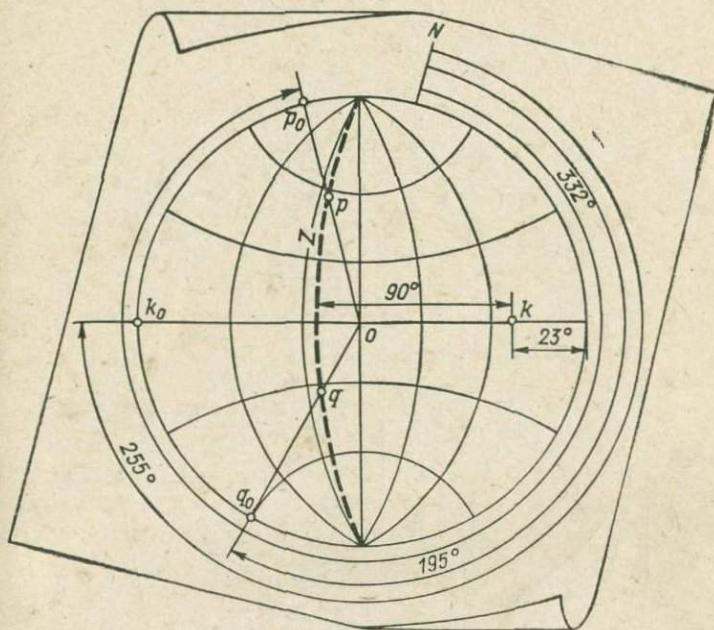


Рис. 1.15. Построение линии пересечения двух плоскостей, изображенных полюсами.

Определить двугранный угол между плоскостями.

I.25

Пусть имеем плоскости P (190° , $\angle 48^\circ$) и Q (225° , $\angle 28^\circ$). Как известно, двугранный угол между плоскостями измеряется плоским углом, образованным их следами в плоскости, перпендикулярной к линии их пересечения. Поэтому решение задачи состоит в построении проекции такой плоскости к двум заданным P и Q и в измерении по ее дуге искомого двугранного угла. Делается это следующим образом. Нужно построить проекции заданных плоскостей (дуги P и Q), найти проекцию линии их пересечения (точку k), а затем поворотом кальки совместить точку k с горизонтальным диаметром и отсчитать от нее через центр сетки 90° (рис. 1.16). Прочертив через эту отметку соответствующую дугу большого круга сетки, получим проекцию плоскости Z , перпендикулярной к линии пересечения заданных плоскостей P и Q . Не меняя положения кальки, отсчитаем по градусным

делениям дуги Z значение двугранного угла между точками пересечения дуги Z с дугами P и Q (29°).

Если плоскости заданы полюсами p и q , та же задача по определению двугранного угла решается следующим образом. Нужно поворотом кальки поместить оба полюса на одну и ту же дугу большого круга сетки (см. рис. 1.16). Скопировав ее на кальку,

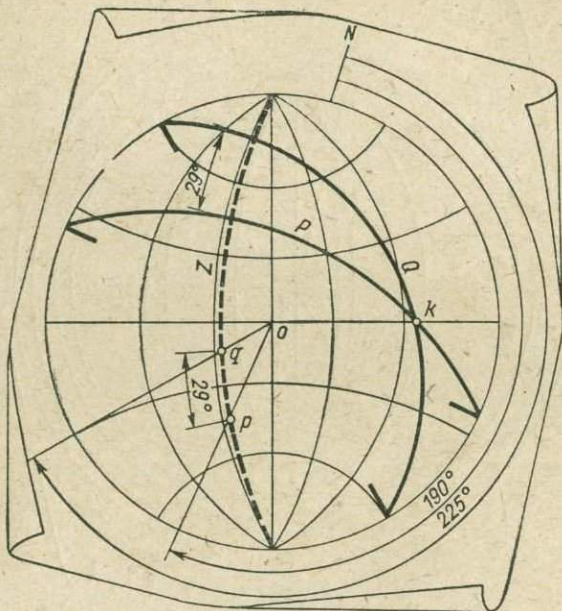


Рис. 1.16. Построение двугранного угла между плоскостями, заданными дуговыми проекциями и полюсами.

получим проекцию плоскости Z , перпендикулярной к линии пересечения заданных плоскостей P и Q (полюс плоскости перпендикулярен к любой лежащей в ней линии, в том числе к линии пересечения с другой плоскостью). Остается измерить по дуге Z значение угла между полюсами p и q , который и является искомым двугранным углом между плоскостями P и Q . Нужно иметь в виду, что при пересечении двух плоскостей образуются два смежных двугранных угла, в сумме составляющих 180° (один острый, другой тупой). Поэтому обычно в задаче имеется дополнительное условие, указывающее, какой из этих углов нужно определить. В том случае, если измерение заданного угла неудобно, так как приходится вести отсчет через полюсы сетки, определяют дополнительный угол и для получения искомого угла вычитают его из 180° .

Построить биссектрису двугранного угла между плоскостями P (325° , $\angle 51^\circ$) и Q (205° , $\angle 34^\circ$) и определить ее элементы залегания. I.26

Построим проекции плоскостей P и Q и найдем их линию пересечения (рис. I.17). Установив, как и в предыдущем случае, точку k на горизонтальный диаметр и приняв ее за полюс, построим проекцию вспомогательной плоскости Z . Затем измерим

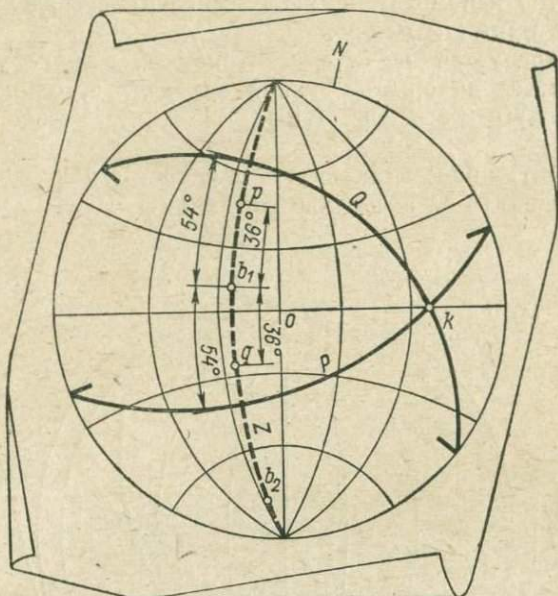


Рис. I.17. Построение биссектрисы двугранного угла между плоскостями, заданными дуговыми проекциями и полюсами.

по дуге Z двугранный угол между точками пересечения с заданными дугами P и Q . В нашем примере этот угол оказался тупым и равным 108° . Следовательно, проекцией биссектрисы угла является точка b_1 , найденная делением двугранного угла на две равные части (54°).

Азимут направления наклона биссектрисы b_1 можно определить по отметке b_0 , продолжив отрезок b_1o до пересечения с окружностью, а угол наклона — по градусным делениям горизонтального диаметра между точкой b_1 и окружностью сетки. Элементы залегания биссектрисы: азимут наклона 101° , угол наклона 64° . Биссектрису острого двугранного угла (точку b_2) легко определить, отсчитав от точки b_1 по градусной сети дуги большого круга Z угол 90° .

При построении биссектрисы по проекциям полюсов p и q плоскостей P и Q двугранный угол определяется по угловому

расстоянию между полюсами таким же способом, как изложенный в пункте I.25. При этом следует иметь в виду, что на проекции изображены в данном случае не сами плоскости, а перпендикуляры к ним. Поэтому между полюсами измеряется смежный двугранный угол. Для нахождения проекции b_1 биссектрисы заданного двугранного угла между плоскостями P и Q (в рассматриваемой задаче тупого угла 108°) необходимо, проведя через полюсы p и q вспомогательную плоскость Z , разделить острый угол между ними (72°) пополам.

Если потребуется найти биссектрису b_2 острого угла между плоскостями, ее положение можно определить, отсчитав 90° от точки b_1 по дуге Z (см. рис. I.17).

- I.27 Построить биссектральную плоскость двугранного угла и определить ее элементы залегания.

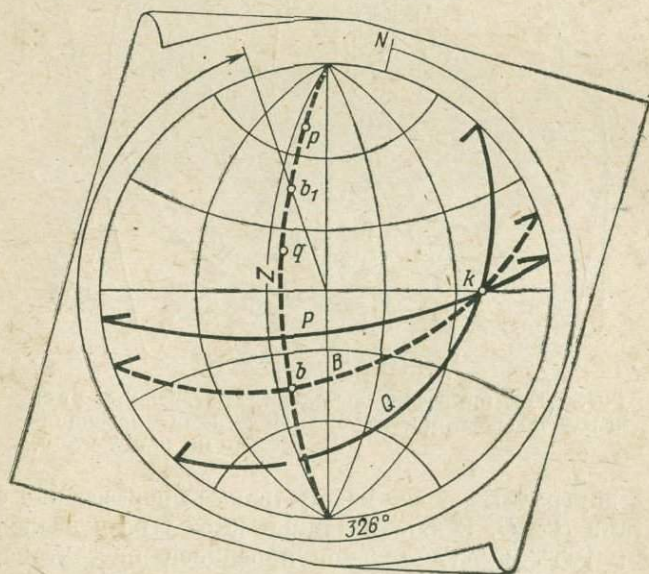


Рис. I.18. Построение биссектральной плоскости острого и тупого угла между плоскостями.

Пусть на рис. I.18 плоскости P (338° , $\angle 71^\circ$) и Q (298° , $\angle 32^\circ$) образуют острый двугранный угол 52° (этот угол можно определить на дуговых проекциях плоскостей P и Q по правилам, изложенным в пункте I.23). Как известно, биссектральная плоскость двугранного угла проходит через его ребро (линию пересечения плоскостей) и биссектрису. Поэтому задача сводится к построению проекций этих линий и нахождению плоскости, в которой они лежат. Для этого совместим линию пересечения плоско-

стей (точку k) с горизонтальным диаметром и на дуге вспомогательной плоскости Z найдем проекцию биссектрисы (точку b). Затем поворотом кальки вокруг центра найдем на сетке ту дугу большого круга, которая проходит через проекции обеих линий (точки k и b). Она и является проекцией биссектральной плоскости B заданного острого двугранного угла. Вернув кальку в исходное положение, можно определить азимут падения биссектральной плоскости (326°), а затем после соответствующего поворота кальки — угол падения.

Проще решается эта задача, если плоскости проектировать полюсами. Известно, что биссектриса острого двугранного угла совпадает с полюсом биссектральной плоскости смежного, тупого угла между плоскостями, а биссектриса тупого угла — с полюсом биссектральной плоскости острого угла. Поэтому, разделив пополам острый угол между полюсами p и q , мы найдем полюс b_1 биссектральной плоскости острого двугранного угла между плоскостями P и Q . При необходимости построить полюс b биссектральной плоскости смежного (тупого) двугранного угла мы нашли бы его, отсчитав 90° по дуге Z от точки b_1 (см. рис. I.18).

Преобразования системы проекций

При сравнении пространственной ориентировки прямых или плоскостей, изображенных на стереографической проекции, часто оказывается необходимым повернуть одну из проекций таким образом, чтобы ее оси совпали с теми, какие имеются на другой проекции. Иными словами, возникает необходимость изменения положения координатных осей (преобразования системы координат) одной проекции относительно другой при неизменном пространственном положении самих геометрических объектов*.

I.28

Поскольку в стереографической проекции оси координат всегда проходят через центр сферы, любое преобразование системы координат можно выполнить поворотом сферы вокруг избранной оси до совмещения с нужным направлением. Техника преобразования стереографических координат основывается на следующих представлениях. Проекция прямых и плоскостей остаются неизменно ориентированными относительно первоначальных координат, как бы мы ни изменяли систему стереографических координат — положение плоскости проекции и нулевое направление азимутального круга. При повороте системы координат вокруг оси, проходящей через центр сферы, точки пересечения ее поверхности с неподвижными прямыми перемещаются по полусфере в направлении, противоположном вращению сферы. Поворот сферы может

* Эта же задача также может быть решена посредством поворота геометрического объекта при неизменном положении координатных осей.

осуществляться вокруг вертикальной, горизонтальной или любой наклонной оси. При этом все точки поверхности сферы перемещаются на один и тот же угол поворота по дугам малых кругов, центры которых совпадают с осью поворота. Остаются на месте только точки, совпадающие со следом оси поворота.

При горизонтальном положении оси поворота малые круги совмещаются с параллелями сетки, а при повороте вокруг вертикальной оси траекториями движения точек поверхности сферы являются окружности, концентрические внешнему кругу проекции. В случае наклонного положения оси поворота сферы траектории движения ее точек не совпадают с линиями стереографической сетки. Повороты сферы осуществляются в этом случае посредством последовательных частных поворотов вокруг вертикальной и горизонтальной осей. Технику осуществления перечисленных операций рассмотрим на конкретных примерах.

- 1.29 Повернуть сферу по ходу часовой стрелки вокруг вертикальной оси на угол 120° и определить элементы залегания плоскости (50° , $\angle 30^\circ$) в новой системе координат.

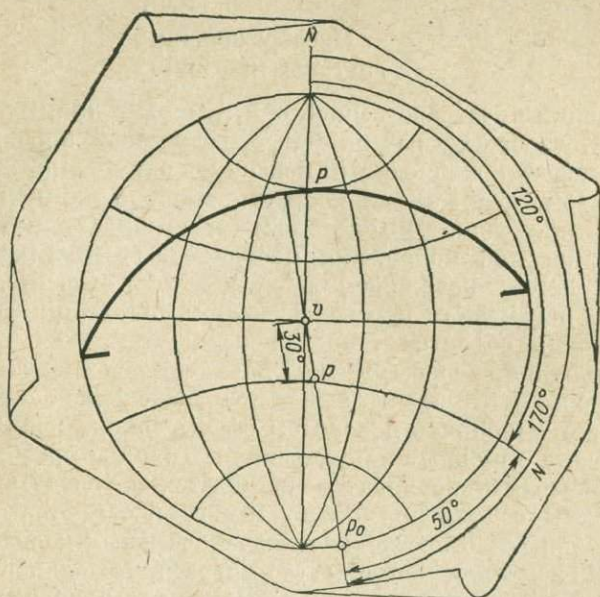


Рис. 1.19. Поворот сферы вокруг вертикальной оси.

Задача легко решается аналитически: $50 + 120 = 170^\circ$. Для графического ее решения необходимо построить на кальке проекцию данной плоскости (дугу большого круга P или полюс p), а затем поворотом кальки вокруг центра в направлении движения часовой стрелки совместить отметку N с делением наружной

и проекция прямой L , так как они с ней жестко связаны единой системой координат. В стереографической проекции подобные повороты осуществляются по дугам малых кругов (параллелям сетки).

Рис. I.20 показывает, как это делается в условиях нашей задачи. Необходимо отсчитать от точки q (полюса плоскости Q) и точки l (проекции прямой L) вправо по градусным делениям проходящих через них параллелей сетки угол 40° . Точка q' отметит положение проекции полюса плоскости Q после поворота сферы. Несколько сложнее определяется новое положение проекции прямой L . Так как мы имеем дело с проекцией верхней полусферы, то перемещение по параллели точки l вправо на тот же угол 40° дает вначале промежуточную точку l_1 , а затем на диаметрально противоположном краю сетки окончательное положение проекции прямой — точку l' . Значение ll_1 равно 16° , а l_1l' 24° . Эту особенность поворота сферы можно сформулировать следующим образом. Если при отсчете угла поворота на параллель сетки приходится только некоторая его часть, то остающаяся до полного значения часть отсчитывается по параллели, удаленной на 180° от первоначальной параллели.

После построения проекций q' и l' легко определить по ним элементы залегания плоскости Q и прямой L в положении, когда плоскость P заняла горизонтальное положение. Необходимо вернуть кальку в исходное положение (совместить отметки N) и, пользуясь градусными делениями сетки, найти значение азимутов и углов падения данной плоскости и прямой. Ответ: после поворота сферы плоскость Q имеет азимут падения 45° , угол падения 81° , а прямая L — азимут наклона 336° , угол наклона 18° .

- I.31 Повернуть (по ходу часовой стрелки) жестко связанную систему плоскостей P (176° , $\angle 31^\circ$), Q (48° , $\angle 19^\circ$) и R (358° , $\angle 39^\circ$) вокруг наклонной оси V (250° , $\angle 60^\circ$) на угол $\omega = 56^\circ$ и определить элементы залегания этих плоскостей в новом положении.

Для решения задачи вначале построим полюсы заданных плоскостей P , Q и R и проекцию оси вращения V . На рис. I.21, а эти проекции отмечаются точками p , q , r , v . Путем вспомогательного поворота сферы приведем ось вращения V в горизонтальное положение, т. е. повторим, по существу, те же построения, что и в предыдущем примере (пункт I.30). Поворачиваем кальку вокруг центра сетки до тех пор, пока проекция v не окажется на экваторе сетки, а затем перемещаем ее на ближайший конец экватора в точку v' , т. е. производим поворот сферы вокруг горизонтальной оси W , перпендикулярной к заданной оси V , на угол 60° . В результате этого поворота изменится, естественно, и положение полюсов p , q , r . Они переместятся по соответствующим параллелям в точки p' , q' , r' .

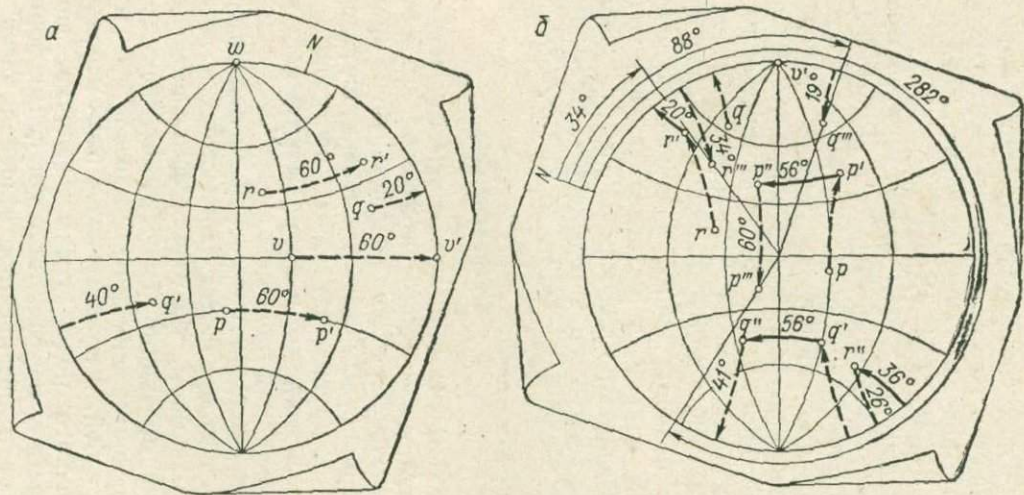


Рис. 1.21. Поворот сфeры вокруг наклонной оси.

а — построение полюсов плоскостей, проекции оси поворота и приведение ее в горизонтальное положение; б — поворот сфeры вокруг заданной оси.

Далее произведем поворот сферы вокруг основной оси V на угол $\omega = 56^\circ$. Для этого точку v' необходимо совместить с одним из концов центрального меридиана и по соответствующим параллелям сетки переместить на значение угла ω полюсы p', q', r' . Так как ось вращения V мы совместили с северным концом центрального меридиана, то повороту сферы в направлении движения часовой стрелки будет соответствовать перемещение проекций p', q', r' справа налево. При этом полюсы могут переходить через линию горизонта. Прделав такую операцию, найдем положение проекций p'', q'', r'' (рис. 1.21, б).

Остается обратным поворотом сферы вернуть проекцию оси вращения в первоначальное положение. Для этого поворотом кальки вокруг центра необходимо совместить точку v' с горизонтальным диаметром сетки и переместить ее в исходное положение v . Одновременно по параллелям сетки следует переместить в обратном направлении на угол 60° также и проекции p'', q'', r'' . В результате полюсы плоскостей P, Q, R займут новое положение p''', q''', r''' , фиксируя пространственную ориентировку этих плоскостей после поворота вокруг заданной наклонной оси V . Остается вернуть кальку в исходное положение (совместить отметки N) и определить по полюсам p''', q''', r''' элементы залегания повернутых вокруг оси V плоскостей. Новые их элементы залегания имеют значения: P ($282^\circ, \angle 21^\circ$), Q ($88^\circ, \angle 72^\circ$), R ($34^\circ, \angle 61^\circ$).

Стереогаммы

1.32 Стереогаммой называется геометрическая модель плоскостей или прямых в стереографической (или зенитальной) проекции, наглядно и объемно передающая их пространственное соотношение между собой без искажения углов. Этим она отличается от других наглядных построений плоскостей и прямых, выполненных в аксонометрической, в аффинной или в перспективной проекции.

В структурной геологии стереогаммы являются одним из средств наглядного изображения плоскостных и линейных элементов структурных форм. Благодаря оригинальным свойствам стереографической проекции стереогаммы передают действительные угловые соотношения этих плоскостных и линейных элементов между собой, и поэтому могут быть использованы для измерения различного рода угловых величин, дополняющих обычно характеристику морфологии структурных форм. Решению такого рода задач и посвящается основная часть материала, изложенного в последующих частях книги.

1.33 Построение стереогаммы производится обычно при помощи экваториальной равноугольной стереографической сетки с соблюдением всех правил стереографического проектирования плоскостей и прямых по их стереографическим коор-

динатам. Можно пользоваться также равнопромежуточной или равноплощадной сеткой, но они менее удобны в работе, так как меридианы и параллели этих сеток имеют сложную геометрическую форму и вычерчивание их на демонстрационных чертежах составляет определенную трудность.

Техника построения стереограммы состоит в следующем. На листе кальки с пометками центр и север производится построение дуг больших кругов всех интересных для исследования плоскостей способом, изложенным в пункте I.12. Затем проводятся линии пересечения плоскостей между собой (соединяются прямыми линиями точки пересечения дуг больших кругов с центром кальки) и диаметры, соединяющие концы дуговых проекций плоскостей. В заключение остается лишь отделить сплошными и штриховыми линиями видимые части плоскостей от невидимых при условии, что точка зрения находится над проекцией (рассматривается верхняя полусфера). Для достижения наибольшей наглядности изображения каждая из плоскостей может быть выделена особым обозначением (см. рис. V.1).

Стереограмма позволяет осуществить переход к проекции с числовыми отметками, если последняя имеет общую с ней картинную плоскость и одно и то же направление меридиана. Главной задачей в этом случае является отображение и геометрическая интерпретация угла наклона плоскости (прямой).

I.34

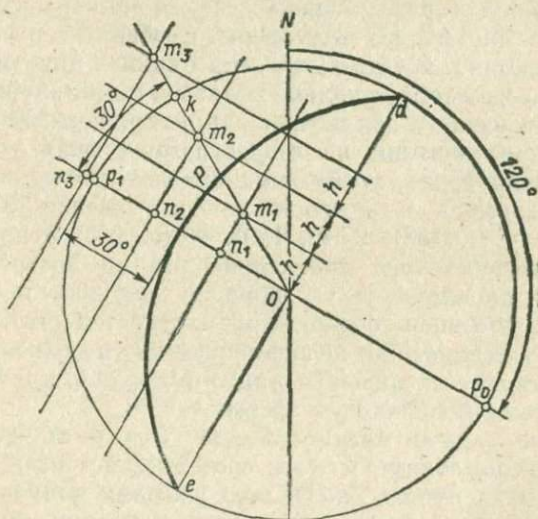


Рис. I.22. Построение горизонталей плоскости.

На рис. I.22 в стереографической проекции по элементам залегания построена плоскость P (120° , $\angle 30^\circ$). Необходимо спроектировать эту плоскость также с числовыми отметками.

Для решения этой задачи проведем диаметр p_0p_1 , отложим от точки p_1 на внешней окружности сетки угол 30° и через полученную точку k проведем радиус ok , продолжив его за пределы внешнего круга проекции. Затем проведем параллельно диаметру p_0p_1 ряд прямых с интервалом h , равным сечению горизонталей в избранном масштабе построения проекции с числовыми отметками. В результате получим ряд точек m_1, m_2, m_3 пересечения параллельных прямых с прямой, проведенной из центра проекции через точку k .

Поскольку горизонтали плоскости, изображаемой в проекции с числовыми отметками, параллельны диаметру, стягивающему концы дуги большого круга стереографической проекции данной плоскости, мы вправе провести через точки m_1, m_2, m_3 параллельные диаметру ed линии — горизонтали плоскости P . Последние дадут на линии p_0p_1 точки n_1, n_2, n_3 , которые и являются искомыми числовыми отметками нашей плоскости P .

Будет грубой ошибкой эти же числовые отметки находить на стереографической проекции путем деления расстояния между центром и максимумом дуги большого круга на равные промежутки.

1.35 Стереограмма правильно передает угловые соотношения плоскостей или прямых только в том случае, если они из пространства параллельно самим себе переносятся в центр полусферы. В связи с этим следует отметить несостоятельность попыток использования этого вида перспективной проекции также для демонстрации и измерения угловых величин плоскостей (прямых), искусственно помещаемых на стереограмме вне центра полусферы. Особенно серьезные ошибки появляются, когда такие «проекции» приспособляются для определения не только угловых, но и линейных величин.

Подобные ошибки допущены, например, в книге А. С. Забродина [18] при решении на стереограммах целого ряда горногеометрических задач, требующих определения амплитуды перемещения разрывов и ее составляющих [задачи № 92 (с. 132), 95 (с. 137), 96 (с. 138), 97 (с. 139), 99 (с. 143) и др.]. Переносы приемы ортогонального проектирования на построение стереографической проекции, А. С. Забродин допускает искажение действительных угловых соотношений плоскостей, что, естественно, приводит к искажению значений длины отрезков. Такую же путаницу вносят и перемещения по параллелям сетки точек, не лежащих на поверхности сферы.

Подобные задачи могут быть решены в стереографических проекциях, если будут учтены особенности способа проектирования сферы на плоскость. Однако решения получаются в большинстве случаев очень громоздкими и запутанными. Поэтому при решении подобных задач удобнее пользоваться проекцией полусферы на плоскость для определения одних только угловых величин, а необходимые линейные размеры определять на других проекциях (ортогональной, с числовыми отметками и т. п.).

ПОСТРОЕНИЕ
СТАТИСТИЧЕСКИХ
ДИАГРАММ

Общие положения

II.1

С целью выявления закономерностей пространственной ориентировки различного рода плоскостных и линейных элементов структурных форм (трещин, сместителей разрывов, осевых плоскостей складок, микроскопических плоскостей в породах, оптических осей минералов и т. д.) массовые измерения их азимутов и углов падения подвергаются статистической обработке, выполняемой при геологических исследованиях обычно графическим методом, путем построения статистических диаграмм. Несмотря на широкую известность статистико-графического метода [40, 52, 15, 1, 27 и др.], все же оказывается необходимым повторить его основные положения и просуммировать имеющиеся данные по этой проблеме.

Этот метод статистики не противопоставляет себя обычному методу математического (вероятностного) анализа случайных величин. В сущности, это тот же математический метод интерпретации случайных величин (нахождение реально существующих закономерностей распределения случайных величин и определение моды — вероятностного значения случайных величин, около которого группируются возможные ее значения), но только выполняемый графическим путем.

Если плоскости или прямые заданы азимутом падения или простирания, т. е. рассматриваются как одномерные случайные величины, приобретающие значения в диапазоне углов от 0 до 360° , статистико-графическая обработка измерений производится путем построения роз-диаграмм или гистограмм. Для графической интерпретации распределения результатов измерений в пространстве окружность розы-диаграммы разбивается на равные интервалы (обычно 5 или 10°) и в каждом из них по радиусам в определенном масштабе откладывается частота (статистическая вероятность) «попаданий», равная отношению количества измерений азимута падения (простирания) в пределах интервала к общему количеству произведенных измерений. Это отношение часто выражается в процентах.

На практике необходимость в статистической обработке одномерных характеристик ориентировки плоскостей или прямых

встречается сравнительно редко. Обычно приходится учитывать оба элемента залегания плоскостей — азимут и угол их падения, т. е. рассматривать результаты измерений плоскостей (прямых), как двумерные дискретные случайные величины, изменяющиеся в диапазоне углов от 0 до 360° (азимут падения) и от 0 до 90° (угол падения). Для графической статистической обработки таких измерений удобно пользоваться проекцией сферы на плоскость. Интерпретация результатов измерений направлений сводится в этом случае к определению статистической вероятности их распространения в трехмерном пространстве, численно равной отношению количества направлений, оказавшихся в пределах определенного телесного угла, к общему числу направлений. На проекции, вмещающей площади всех телесных углов сферы, численной оценкой статистической вероятности распределения измерений азимутов и углов падения плоскостей или прямых является отношение числа точек (стереографических проекций плоскостей или прямых), приходящихся на единицу площади полусферы, к общему количеству точек, по которым построена диаграмма. Обычно эта оценка выражается в процентах. В связи с этим следует отметить несостоятельность попыток выделить системы ориентировок, попадающих в равные градусные интервалы сферической системы координат, посредством построения диаграммы на квадратной сетке, где по горизонтальной оси откладывается азимут падения (простираения) плоскостей, а по вертикальной — углы падения. На площади такой сетки происходит искажение реальных плотностей измерений в направлении вертикальной оси, пропорциональное синусу угла падения. Следовательно, значения плотностей, близкие к действительным, могут быть получены только для вертикальных и крутопадающих плоскостей, значения синуса угла падения которых близки к единице, т. е. в узком поясе вдоль горизонтальной оси сетки. На остальной площади квадратной сетки значения плотности распределения измерений будут в различной степени заниженными. Выделенные таким образом узлы скопления точек, естественно, не отражают никаких реальных закономерностей распределения ориентировок.

II.2 Статистико-графический метод основан на законе больших чисел. Чем большее количество измерений элементов залегания привлекается для построения диаграмм, тем меньше оказывается вероятность выделения случайных, несвойственных для изучаемой структуры систем ориентировок.

Поэтому при обработке малого количества полевых данных сделать определенные выводы об ориентировке сложной сети плоскостных структур невозможно. Для этого необходимо располагать по крайней мере одной-двумя сотнями измерений азимутов и углов падения. Небольшим количеством измерений можно ограничиться только в том случае, если плоскостные структуры имеют геометрически правильную и простую сеть.

Графический метод статистики довольно трудоемок и менее точен, чем аналитический, где в качестве критерия, определяющего принадлежность отдельных элементов к системе, принимается распределение Фишера [21]. Но он остается пока наиболее распространенным методом обработки ориентированных величин в геологии.

Построение статистических диаграмм при помощи равноплощадной сетки

Правильное, хотя и не вполне безупречное, графическое решение статистической задачи возможно при помощи экваториальной равноплощадной сетки Ламберта—Шмидта, сохраняющей равенство площади участков на поверхности сферы и соответствующих им участков на плоскости проекции.

П.3

Графическая интерпретация массовых измерений элементов залегания плоскостей сводится в этом случае к выполнению двух последовательных операций. Первая состоит в построении проекций полюсов всех учитываемых плоскостей, а вторая — в выделении на точечной диаграмме систем ориентировок. Выполняются эти построения на чистых листах кальки с отметками центр и север сетки.

Приемы построения полюсов плоскостей по их азимутам и углам падения подробно рассмотрены выше (см. пункт Г.14). Поэтому здесь можно ограничиться лишь общими замечаниями. Отсчет азимута падения плоскости должен производиться по наружной шкале сетки от северного направления ее центрального меридиана в направлении движения часовой стрелки, а отсчет угла падения — по градусным делениям горизонтального диаметра (экватора) в направлении от центра сетки к периферии. Трудоемкость операций по построению проекций полюсов можно несколько снизить, если изменить порядок оцифровки наружной шкалы сетки; отсчет азимутов производится в этом случае от северного направления центрального меридиана против хода часовой стрелки. Полюс каждой плоскости строится путем поворота кальки вокруг центра до совмещения ее отметки север с делением наружной шкалы сетки, отвечающим азимуту плоскости. В этом же положении кальки угол падения плоскости отсчитывается по градусным делениям центрального меридиана в направлении от центра сетки к периферии.

Трудоемкость процедуры построения проекций полюсов плоскостей еще в большей мере снижается, если пользоваться полярной сеткой, основанной на принципе проекции Ламберта. Она представляет собой, как и полярная сетка Болдырева, систему концентрических окружностей и радиально расходящихся лучей. Однако расстояния между концентрическими окружностями у нее увеличиваются к центру. Для построения полюсов плоскостей

внешняя окружность равноплощадной полярной сетки разбивается по ходу часовой стрелки на 360° , а радиусы — на 90° с 0 в центре. Для построения проекций прямых оцифровка радиусов меняется на обратную с 0 на периферии и 90° в центре. Рис. II.1 показывает, каким образом производится построение полюсов плоскостей P (300° , $\angle 40^\circ$) и Q (140° , $\angle 60^\circ$). Эта процедура состоит в простом координировании точек p и q по градусным делениям сетки.

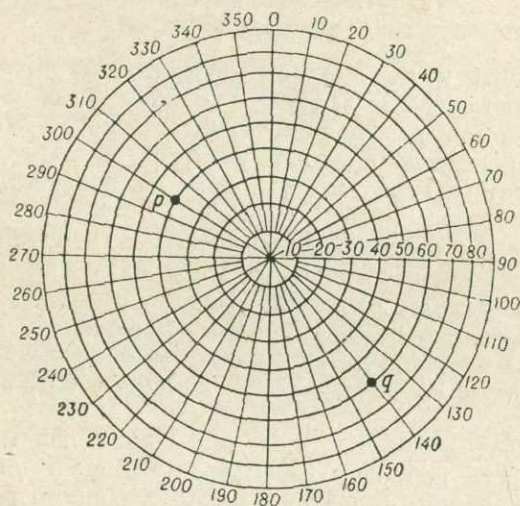


Рис. II.1. Построение полюсов плоскостей на полярной равноплощадной сетке.

Некоторые авторы ошибочно полагают, что более удобным способом изображения на диаграмме множества плоскостей является построение проекций точек пересечения их линий восстания с верхней (или нижней) полусферой [47 и др.]. Нужно заметить, что линии восстания (или падения) неоднозначно определяют положение в пространстве плоскостей; между ними нет строгого соответствия. Вертикальная линия может соответствовать, например, вертикальной плоскости любого простирания. Горизонтальной плоскости соответствует бесконечное число проекций.

При проектировании линий восстания точность отсчета азимутов падения оказывается высокой в области пологих углов падения, и в то же время она резко снижается по мере возрастания углов падения. Между тем реальная точность измерения этой величины изменяется в противоположном направлении. Углы между линиями восстания плоскостей не равны двугранным углам между самими плоскостями и не сохраняют своего значения при преобразовании системы координат.

Следует также отметить, что плотность распределения ориентировок плоскостей при данном способе их проектирования оказывается искаженной прямо пропорционально тангенсу угла падения, т. е. в пределах от 0 до ∞ . Поэтому диаграммы линий восстания не отражают реальных закономерностей распределения ориентировок. В области крутых падений они дают ложные максимумы, не поддающиеся расшифровке, а в области пологих падений приводят к потере реально существующих систем плоскостей.

Нужно также отметить и слабую выразительность диаграмм линий восстания. Точки-проекции плоскостей с углами падения, большими 60° , сливаются вблизи центра такой диаграммы в одну сплошную массу, в которой бывает очень трудно различать какие-либо узлы их скопления, соответствующие системам плоскостей (рис. II.2). Между тем в структурной геологии наибольший интерес представляет статистика именно крутопадающих плоскостей (например, различного рода естественных трещин, подавляющее большинство которых имеет крутое падение не только в платформенных, но и в геосинклинальных условиях залегания пород).

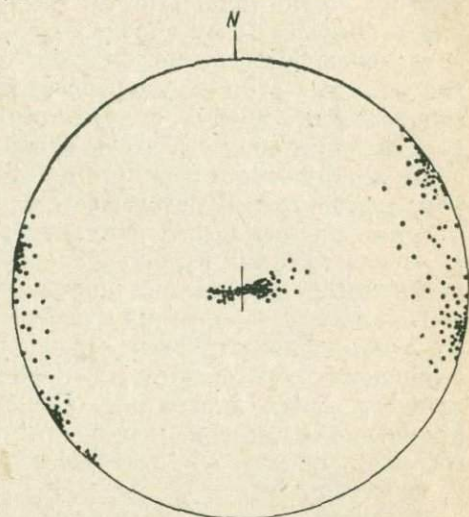


Рис. II.2. Два варианта построения точечной ориентировочной диаграммы одних и тех же плоскостей.

Точки вблизи центра диаграммы являются проекциями линий восстания плоскостей, а точки вблизи окружности — полюсами этих плоскостей.

Точечные диаграммы (проекция полюсов) отражают общую картину пространственной ориентировки плоскостей. О закономерности ориентировки последних позволяют судить полученные на диаграмме узлы скопления точек-полюсов. II.4

При геометрически правильной ориентировке исследуемых плоскостей такие узлы (системы ориентировок) образуют очень плотные скопления точек, а при отсутствии какой-либо закономерности ориентировки точки оказываются беспорядочно рассеянными по всей площади диаграммы. Но точечные диаграммы раскрывают только качественную сторону закономерности ориентировки плоскостей. С целью выявления количественных различий ориентировок плоскостей на этих диаграммах строятся изолинии относительной плотности распределения точек-проекций

на 1% площади круга. На специально разграфленную сантиметровую сетку накладываем точечную диаграмму и покрываем сверху чистым листом кальки. Последовательно перемещая по сетке квадратов специальный кружок-трафарет диаметром, равным 0,1 диаметра круга диаграммы, подсчитываем количество попавших в него точек и цифры (индексы) проставляем на перекрестиях сетки (рис. II.3, а). Следует обратить внимание на порядок подсчета точек вблизи окружности, где их количество уже невозможно учесть, не сместив кружка-трафарета за пределы диаграммы. В этом случае подсчет точек производится при помощи специальной линейки с двумя кружками на концах, накладываемой таким образом, чтобы центры кружков совпали с ближайшими к окружности перекрестиями сетки, а ее середина — с центром диаграммы. Подсчитывается число точек в обоих кружках и сумма проставляется в их центрах.

После того как будет обработана таким образом вся площадь диаграммы, составляется таблица отметок изолиний относительной плотности заполнения в процентах. Это означает, что каждая из отметок представляет собой количество точек, выраженное в процентах от общего их количества, приходящееся на 1% площади круга диаграммы. Поскольку в данном случае имеем отношение процентов к процентам, представляется возможным говорить просто об относительной плотности в градации 1, 2, 3 и т. д.

Полученное ранее в каждом статистическом окне количество точек заменяется на диаграмме соответствующей отметкой относительной плотности и однозначные среди них соединяются плавными линиями (изолиниями), подобно тому как производится построение топографической поверхности (рис. II.3, б). При этом необходимо следить за тем, чтобы все изолинии были замкнутыми, и концы изолиний, упирающиеся в окружность диаграммы, имели продолжение в диаметрально противоположных точках. Особенно большая детальность изолиний нежелательна. Полезно даже упрощать их рисунок путем уменьшения площади, ограниченной изолинией наименьшей плотности. Для этого площади диаграммы, содержащие только одну или даже две точки, следует относить к нулевой плотности.

Таким образом, получается план с количественной характеристикой распределения ориентировок исследуемых плоскостей. Области плана, оконтуренные изолиниями наибольшей относительной плотности заполнения, соответствуют системам ориентировок плоскостей, а центры их тяжести — средним элементам залегания этих систем, значения которых можно легко определить по градусным делениям сетки (см. решение сходной задачи в пункте I.15).

С точки зрения статистики эти наиболее плотно заполненные области (системы) тождественны понятию «чаще всего встречающихся значений», количественно оценивающих вероятность

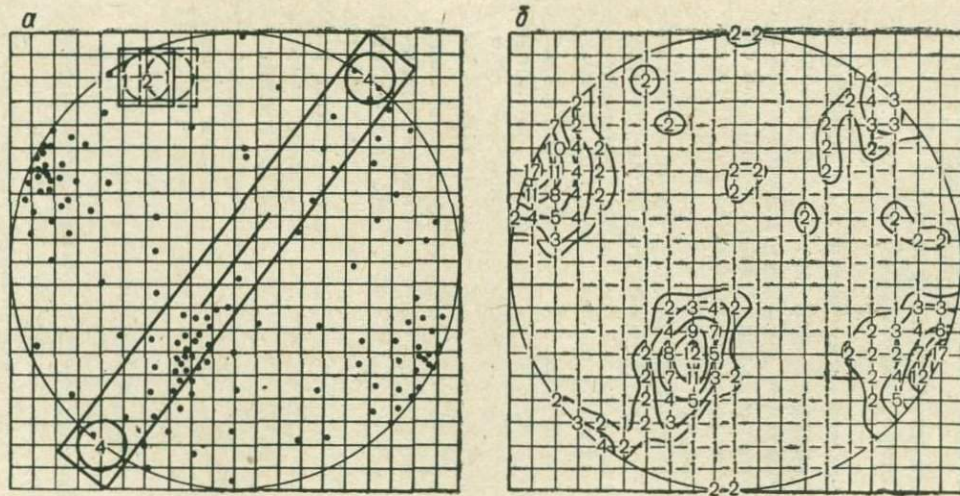


Рис. 11.3. Схема, показывающая способ подсчета точек-полюсов с помощью сетки квадратов и кружков-графаретов (а) и способ проведения изолиний относительной плотности распределения измеренных азимутов и углов падения плоскостей (б).

Цифры показывают количество точек, попавших в кружок-графарет.

встречи среди множества измерений залегания плоскостей наибольшего их количества в данных областях сферических углов.

Статистические (плотностные) диаграммы позволяют установить сходство или различие ориентировок одних и тех же плоскостей при неодинаковом количестве измерений в пунктах наблюдений.

Построение статистических диаграмм при помощи стереографической сетки

II.5 Построение статистических диаграмм возможно и на равноугольной стереографической сетке. Но необходимо иметь в виду, что одинаковые по размеру площади на поверхности сферы после проектирования на плоскость этой сетки изображаются меньшими площадями ближе к центру сетки и большими на периферии.

Поэтому для правильной оценки плотности распределения ориентировок размер статистических окон должен меняться

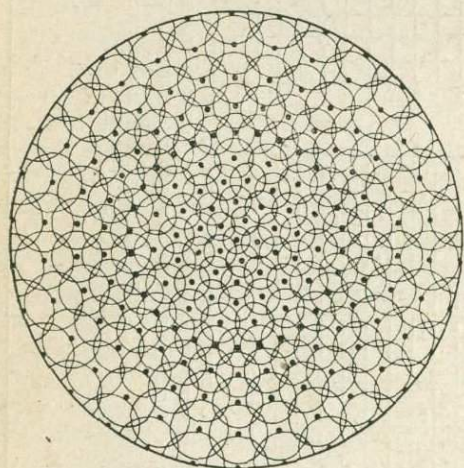


Рис. II.4. Планисфера Пронина.

по площади диаграммы пропорционально искажению площади стереографической проекции. Учитывая это обстоятельство, А. В. Пронин [38] предложил для подсчета точек (стереографических проекций плоскостей) специальную планисферу. Последняя состоит из множества кружков (статистических окон) разного диаметра, покрывающих равные по площади участки полушферы (рис. II.4). Для определения плотности распределения ориентировок точечная диаграмма

накладывается на планисферу и подсчитывается количество точек, попавших в каждое ее статистическое окно.

Дальнейший переход к выражению относительной плотности распределения и построение изолиний производят тем же способом, что и при построении описанной выше статистической диаграммы на сетке Ламберта—Шмидта.

Д. В. Постников предложил другую технику подсчета точек на стереографической сетке, путем разбивки ее по параллелям на равновеликие шаровые пояса [39]. Преимуществом этого метода является возможность работы прямо на сетке, без каких-

либо вспомогательных трафаретов. Однако вследствие того, что статистические ячейки имеют в этом случае неодинаковую форму и неравномерное распределение, этот метод дает погрешности, связанные с нивелированием значений плотности в одних направлениях при излишней детализации в других.

Планисферы Ю. К. Митюнина [25] и Ю. К. Митюнина и А. Л. Кудлаевой [26] по принципу построения сходны с сеткой Постникова. Для равнопромежуточной сетки Каврайского еще не разработана методика уравнивания площадей. Поэтому для целей статистико-графической обработки результатов измерений ориентировки плоскостей она непригодна.

Примеры статистико-графической обработки полевых данных

В керне пяти разведочных скважин (Карагандинский бассейн, северо-западное крыло Тентекской синклинали) были произведены методом угломерной палетки [32] измерения азимутов и углов падения 130 трещин отдельности в породах долинской свиты. Поскольку все эти трещины однотипны по генезису и располагаются на моноклинали (азимут падения слоев пород 150° , угол падения 18°), результаты измерений их элементов подвергались статистико-графической обработке.

Вначале были построены при помощи равноплощадной сетки Ламберта—Шмидта полюсы всех трещин, при этом они были подразделены условными знаками по принадлежности к литологическим разностям пород (рис. II.5, а). Образование узлов скопления точек на диаграмме свидетельствует о том, что эти трещины имеют не беспорядочную, а закономерную ориентировку в данном районе, которая сохраняется по всему разрезу отложений и не зависит от литологического состава пород (в одних и тех же узлах скоплений встречаются полюсы трещин песчаников, алевролитов и аргиллитов).

Затем с целью количественной оценки этих систем трещин по всей площади диаграммы производился подсчет точек способом кругового скользящего статистического окна в каждом узле прямоугольной сантиметровой сетки. Поскольку равноплощадная сетка имела диаметр 20 см, а статистическое окно 2 см, все полученные при подсчете цифровые индексы оказались равны количеству точек, приходящихся на 1% площади круга диаграммы. Поэтому при составлении таблицы отметок изолиний относительной плотности распределения ориентировок трещин каждый такой индекс выражался в процентах к общему количеству замеров: 2, 4, 6, 8 и 10% соответствуют 2,6; 5,2; 7,8; 10,4 и 13 точкам.

Можно было бы дать и более дробные отметки. Однако большая густота изолиний в данном случае лишь затруднила бы построение

II.6

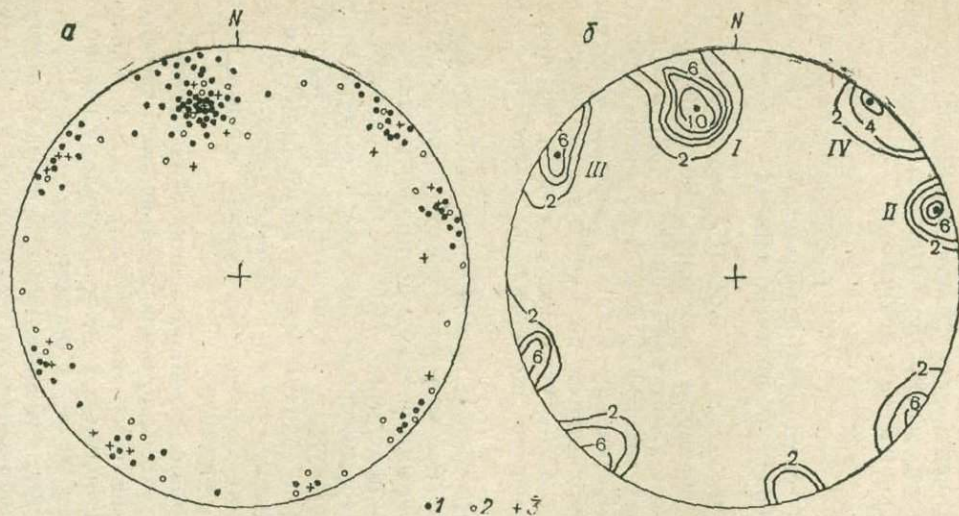


Рис. 11.5. Статистическая обработка результатов измерений трещин.

a — точечная диаграмма ориентировки трещин отдельности в различных литологических горизонтах пород; *б* — плотностная диаграмма (индексы изолиний — количество трещин, выраженное в процентах от общего их числа, приходящееся на 1% площади круга диаграммы).
 1 — аргиллиты; 2 — алевролиты; 3 — песчаники.

статистической диаграммы. После перенесения отметок на кальку была построена плотностная диаграмма (рис. II.5, б). Анализ ее показал, что трещины отдельности образуют на крыле складки четыре неравнозначные по степени выраженности системы: I (348° , $\angle 66^\circ$), II (72° , $\angle 83^\circ$), III (303° , $\angle 85^\circ$) и IV (37° , $\angle 88^\circ$). Значения элементов залегания этих систем были определены на статистической диаграмме по положению центров тяжести участков наибольшей относительной плотности распределения ориентировок (указаны на рис. II.5, б точками).

С целью определения закономерности ориентировок разрывных смещений Калиновского синклиория (северная зона мелкой складчатости Донбасса) массовые измерения в горных выработках шахт их амплитуд, азимутов и углов падения подвергались статистико-графической обработке [34].

Рис. II.6, а представляет собой проекции полюсов плоскостей сместителей 1300 разрывных смещений синклиория с одновременным фиксированием их морфологии и амплитуды. Рис. II.6, б изображает статистическую диаграмму этих нарушений, построенную тем же способом, что и диаграмма трещин отдельности в предшествующем примере (пункт II.6). Рассмотрение точечной и плотностной диаграмм приводит к целому ряду практически важных выводов относительно пространственной ориентировки разрывных смещений.

1. Мельчайшие, мелкие, средние и крупные разрывные смещения связаны между собой общностью ориентировки; в одни и те же «узлы скопления» полюсов на точечной диаграмме входят самые разнообразные по амплитуде разрывные смещения.

2. Системы ориентировок составляют определенные морфологические группы разрывных смещений. Наиболее выраженными являются: система надвигов, взбросов, поддвигов и подбросов со средним азимутом падения 185° и углом падения 22° , система надвигов и взбросов с азимутом падения 186° и углом падения 69° , а также система тех же разрывных нарушений с диаметрально противоположным направлением падения сместителей (средний азимут падения 355° , угол падения 28°). Сдвиги и сбросы ориентированы по отношению к надвигам и взбросам поперечно и составляют две неравнозначные по степени выраженности системы: азимут падения 105° , угол падения 70° и азимут падения 275° , угол падения 67° . Наименее выраженные системы составляют встречающиеся совместно взбросо-сдвиги и сбросо-сдвиги (система с азимутом падения 75° , углом падений 61° , система с азимутом падения 221° , углом падения 64° и система с азимутом падения 300° , углом падения 70°).

3. По отношению к оси Калиновского синклиория (на статистической диаграмме она изображена штриховой линией) подавляющая часть разрывных смещений ориентирована продольно (надвиги, взбросы, подвиги, подбросы) и поперечно (сдвиги,

II.7

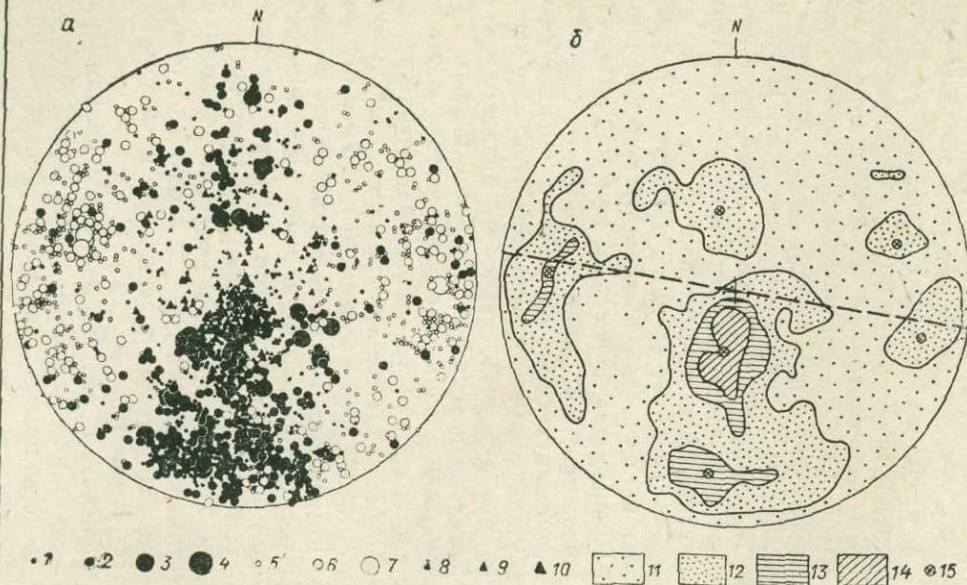


Рис. 11.6. Статистическая обработка массовых измерений элементов залегания плоскостей сместителей разрывных нарушений в Калиновском синклиналии Донбасса.

a — точечная диаграмма разрывных нарушений; *б* — плотностная диаграмма.

1—4 — разрывные смещения с перекрытием одноименных пластов на крыльях (надвиги, взбросы, взбросо-сдвиги) с амплитудой соответственно до 1 (мельчайшие), 1—10 (мелкие), 10—100 (средние) и более 100 м (крупные); 5—7 — разрывные смещения с «расхождением» одноименных пластов (сдвиги, сбросо-сдвиги, сбросы растяжения) с амплитудой соответственно до 1, 1—10 и 10—100 м; 8—10 — разрывные смещения с падением сместителей более пологим, чем слой пород на крыльях (подвиги, подбросы) с амплитудой соответственно 1, 1—10 и 10—100 м; относительная плотность распределения ориентировок (в процентах, причём 1% плотности соответствует 13 точкам-полюсам в 1% площади круга диаграммы): 11 — менее 1, 12 — 1—2, 13 — 2—4, 14 — более 4; 15 — центр тяжести узла скопления точек-полюсов.

имеющие в поперечном сечении форму сбросов и взбросов). Менее распространены диагональные разрывные смещения (взбросо-сдвиги и сбросо-сдвиги).

Интересным примером графической статистики может явиться построение точечной и плотностной диаграмм ориентировки поверхностей косых слоек пачки песчаников каменной свиты K_1Sk_1 (по номенклатуре донецких геологов) по данным измерений* их азимутов и углов наклона в ряде обнажений на северном и южном крыльях Главной антиклинали Донбасса.

II.8

Результатом этих исследований явилось выяснение направления донных течений в период накопления песчаного материала пачки, что представляет теоретический интерес в связи с выдвинутым Н. С. Шатским [53] предположением о конседиментационном образовании Главной антиклинали.

При помощи равноплощадной сетки были построены диаграммы полюсов поверхностей косых слоек, одна для северного крыла (340 измерений слоек), другая для южного крыла антиклинали (220 измерений слоек). Затем производилась обычная статистическая обработка точечных диаграмм путем построения изолиний относительной плотности распределения ориентировок.

В результате было установлено, что серии косых слоек имеют на северном крыле антиклинали средний азимут наклона 20° и угол наклона 64° , а на южном крыле — азимут наклона 204° и угол наклона 43° (рис. II.7). При этом наибольшая плотность распределения их ориентировок достигает 59 точек на 1% площади диаграммы, что следует расценивать как проявление хорошо ориентирующего процесса.

Следующим этапом обработки данных явилось приведение всей пачки песчаников в первично-горизонтальное положение, при котором косые слои примут положение, соответствующее первоначальной их ориентировке (до складчатости). Для этого потребовалось повернуть каждую из диаграмм вокруг линии простирания пачки песчаников на значение ее угла падения в направлении, при котором она оказалась бы в горизонтальном положении. Такой поворот проекции осуществлялся следующим образом. На обеих диаграммах были дополнительно построены по средним элементам залегания пачки песчаников полюсы ее поверхности (порядок выполнения подобных построений см. в пункте I.14). Затем производился поворот проекций в том порядке, как это изложено в пункте I.30. Полюс поверхности пачки совмещался с горизонтальным диаметром сетки и перемещался в ее центр. Одновременно в том же направлении на значение угла

* Полевые измерения и обработка данных выполнены авторами настоящей работы в период проведения ими научно-исследовательских работ по теме ДонбассНИЛ «Тектоника Донецкого бассейна».

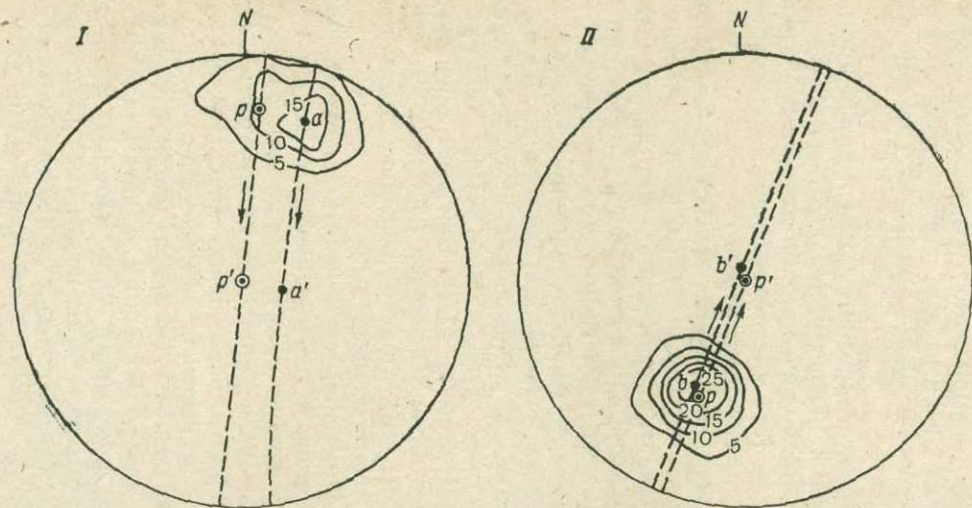


Рис. II.7. Построение плотностной диаграммы ориентировки косых слоев и определение их ориентировки до момента образования складки.

Крыло антиклинали: I — северное, II — южное.
a и *b* — центры тяжести узлов скопления точек-полюсов поверхностей косых слоев соответственно северного и южного крыла; *p* — полюсы плоскостей крыльев складки; *p'* — полюсы плоскостей крыльев складки после редукции элементов залегания.

падения пачки песчаников перемещался по соответствующим параллелям сетки и центр тяжести системы косых слоев. На диаграмме северного крыла последний занял новое положение a' , а на диаграмме южного крыла — b' (см. рис. II.7). Таким образом, было установлено, что в естественном положении при седиментации направление наклона косых слоев в общем согласуется; в песчаниках северного крыла косые слои наклонены на восток по азимуту 104° (угол наклона 14°), а в песчаниках южного крыла на северо-запад по азимуту 340° (угол наклона 4°). Они отражают направление донных течений песчаного материала единой области седиментации. Ясно, что здесь не присутствовали какие-либо сингенетичные тектонические поднятия, которые можно было бы принять за эмбрионы современной структуры Главной антиклинали.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ
ЗАЛЕГАНИЯ ПЛАСТА
И ЕГО СТРУКТУРНЫХ
КОМПОНЕНТОВ

В данной главе и в последующих главах приняты следующие наиболее употребительные условные обозначения:

- P, Q — плоскости пластов (крыльев складок)
- R, S — плоскости сместителей разрывных нарушений
- T, U — плоскости стенок трещин
- V — осевые, биссектральные плоскости
- Z — плоскости, в которых лежит несколько прямых
- o — центр проекции
- p, q, s, r, t, u, b, z — проекции полюсов плоскостей
- a — проекции линий падения
- e — проекции линий простираия
- d, k, l — проекции линий скрещения плоскостей
- m, n, f — проекции прямых, лежащих в плоскости
- c — проекции осей скважин
- v, w — оси поворота сферы
- α — истинные углы падения пластов (плоскостей сместителей, трещин)
- δ — видимые углы падения пластов (плоскостей сместителей, трещин)
- φ — углы между направлением падения пласта и направлением косога разреза
- γ — двугранные углы
- σ — зенитные углы скважин
- ω — углы поворота

Интерпретация
результатов измерений
в обнажениях

- III.1 Пространственное положение пласта однозначно определяется элементами залегания: азимутом линии падения (углом в плане между направлением линии наибольшего ската плоскости пласта и северным направлением меридиана) и углом падения (углом наклона линии наибольшего ската к горизонтальной плоскости) или же азимутом линии простираия (углом между горизонтальной линией, лежащей в плоскости пласта, и северным направлением меридиана) и углом падения, если при этом указывается направление наклона пласта относительно стран света.

Существуют различные способы определения элементов залегания пласта. Если в обнажении пород наблюдается достаточно ровная площадка поверхности кровли или первично-горизонтальной седиментационной слоистости пласта, можно приложить к ней горный компас и прочесть по шкалам значения азимута и угла падения пласта. Однако непосредственное определение элементов залегания часто бывает затруднительным или даже невозможным. В этом случае в обнажении определяются другие, доступные для измерения угловые величины, с которыми элементы залегания пласта находятся в определенной функциональной зависимости. Значения элементов залегания пласта в этом случае определяются по формулам аналитической геометрии или при помощи геометрических построений.

В настоящей главе рассматриваются графические способы решения такого рода задач с применением стереографической проекции, обеспечивающей не только достаточно высокую точность получаемых результатов определения элементов залегания пласта, но и большую наглядность его изображения при различной экспозиции обнажения. Задачи подобраны таким образом, чтобы они соответствовали запросам геологов, занимающихся прогнозированием тектоники разведываемых угольных месторождений.

Способ определения элементов залегания пласта по углам и азимутам наклона двух линий, расположенных в плоскости напластования. III.2

Поверхности напластования пласта лучше всего различимы на вертикальном разрезе; именно здесь удается установить его общий угол наклона к горизонту, избегая погрешностей за счет малых вариаций угла падения, обычных в дислоцированных зонах. Поэтому наиболее представительными оказываются измерения элементов залегания пласта в вертикальных разрезах, например в двух смежных стенках шурфа или в таких же стенках горизонтальной горной выработки и естественного обнажения на поверхности. Если компасом измерены азимуты простирания смежных стенок и видимые в них углы наклона пласта, задача по определению элементов залегания сводится к построению и определению сферических координат стереографической проекции плоскости по двум заданным прямым (см. пункт I.16).

Поясним этот способ на конкретном примере. Допустим, в стенках шурфа компасом измерены видимые углы наклона пласта 28° и 15° (рис. III.4, а). Сами же стенки ориентированы одна по азимуту 107° , другая 17° . В данном случае мы имеем азимуты и углы наклона двух прямых, расположенных в одной и той же плоскости пласта (107° , $\angle 28^\circ$ и 17° , $\angle 15^\circ$). Для того чтобы определить элементы залегания последней, необходимо построить стереографические проекции данных прямых n и m (см. пункт I.10), затем вращением кальки вокруг центра подобрать на сетке дугу

большого круга P , проходящую через обе точки n и m и, оставляя кальку в этом же положении, отметить на кальке точкой p_0 положение противоположного конца горизонтального диаметра сетки (рис. III.1, б). Угол, отсчитываемый по ходу часовой стрелки между отметкой N на кальке и точкой p_0 , является искомым

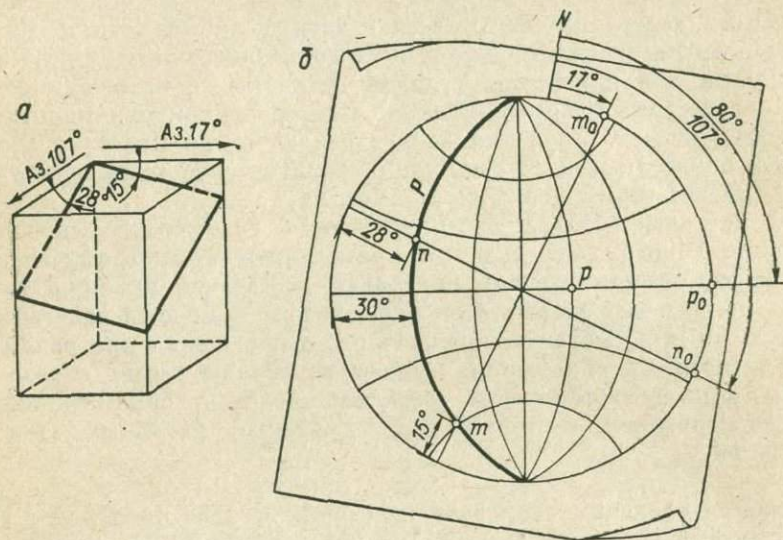


Рис. III.1. Определение элементов залегания пласта по углам и азимутам падения двух линий, расположенных в плоскости напластования.

а — общий вид стенок шурфа со следами напластования; б — построение проекции плоскости пласта.

азимутом падения пласта (80°). Угол падения пласта определяется на горизонтальном диаметре сетки по дуговой проекции P или полюсу p . В рассматриваемом случае он равен 30° .

III.3 Способ определения элементов залегания линейных структурных компонентов (штрихов, знаков скольжения и др.), расположенных в плоскости пласта, азимут и угол падения которого известен. Такого рода задача возникает в связи с необходимостью выяснения преимущественной ориентировки, например, борозд скольжения на поверхностях напластования или осей наибольшего удлинения деформации инородных включений, подвергшихся воздействию тектонических напряжений.

Для определения ориентировки любой линейности на поверхности седиментационной слоистости пласта обычным транспортиром или специальным угломером (например, угломером ДонбассНИИ) измеряется так называемый «угол склонения» — угол между линией падения пласта и линией, ориентировку которой

надлежит определить. На рис. III.2, *a* он обозначен через λ . Затем производится построение дуговой проекции *P* плоскости пласта по его элементам залегания, отмечается точкой *a* проекция линии его восстания и от нее откладывается значение угла склонения, помня при этом, что измерение угла склонения производилось между линией падения пласта и линией наклона структурного компонента; на стереографической проекции этот угол должен

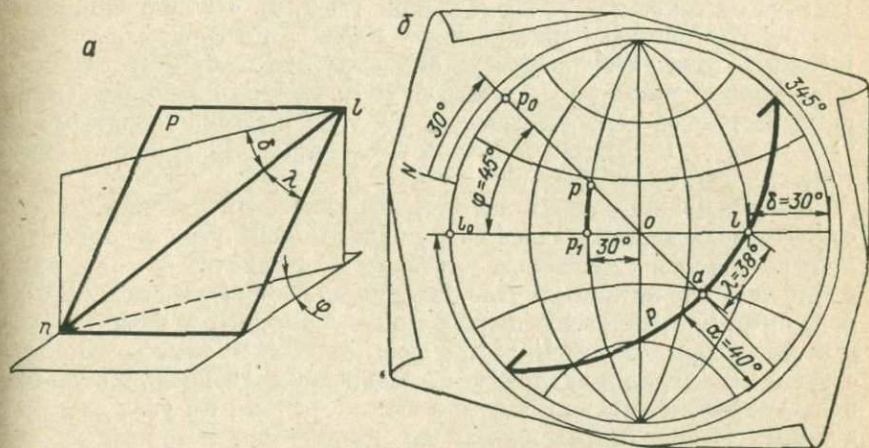


Рис. III.2. Определение элементов залегания линейности пласта по углу скольжения λ и видимому углу падения пласта δ в косом сечении.
a — общий вид наклонного пласта; *b* — стереограмма.

отсчитываться в диаметрально противоположном секторе, т. е. между линией восстания пласта и линией восстания компонента (рис. III.2, *b*).

Получив таким образом проекцию *l*, легко определить азимут и угол падения исследуемой линейности. Необходимо повернуть кальку вокруг центра до совмещения точки *l* с горизонтальным диаметром сетки; отметить точкой *l*₀ на противоположном его конце направление наклона линейности и по наружной шкале сетки прочесть дирекционный угол — азимут наклона. В рассматриваемом примере (плоскость пласта задана азимутом 30° и углом падения 40°) азимут наклона линейности оказался 345°, а угол наклона $\delta = 30^\circ$.

Этим же геометрическим способом можно воспользоваться для определения угла наклона пластов в косом сечении (проекция угла на плоскость, составляющую с плоскостью проектируемого угла некоторый угол). Такая задача возникает, например, при построении геологических разрезов, ориентированных под некоторым углом к простиранию свиты пород, при проектировании пластовых горных выработок с заданным уклоном и др. При этом должен измеряться угол в плане между направлением линии

падения пласта и направлением линии геологического разреза (на рис. III.2, а угол φ). Видимый в плоскости разреза угол наклона пласта δ аналитически определяется по формуле $\text{tg } \delta = \text{tg } \alpha \cos \varphi$ (где α — истинный угол падения пласта).

Решение по данной формуле можно заменить графическим построением. На стереограмме необходимо провести диаметр l_0 , считая его линией разреза, и отложить на окружности стереограммы от точки l_0 угол φ (см. рис. III.2, б). Приняв направление op_0 за направление падения пласта, построить проекцию плоскости пласта P по известному углу его падения α . Точка l пересечения диаметра l_0 с дугой P является проекцией линии наклона пласта в косом сечении. Ее угол наклона можно отсчитать между краем сетки и точкой l , совместив последнюю с экватором сетки.

Задачу можно решить и в стереографической проекции полюсов. Проведя диаметр через точку l_0 и отложив угол φ , построим проекцию полюса плоскости p , отсчитав на радиусе op_0 от центра сетки значение истинного угла падения плоскости пласта α . Затем поворотом кальки вокруг центра нужно совместить с горизонтальным диаметром сетки точку l_0 и спроектировать на него по соответствующему меридиану точку p . Найденная точка p_1 является полюсом линии наклона пласта в косом сечении. Ее угол наклона в этом сечении определяется по градусным делениям между центром сетки и точкой p_1 . На рис. III.2, б дано решение структурной задачи, в которой $\varphi = 45^\circ$, $\alpha = 40^\circ$, $\delta = 30^\circ$.

III.4 Способ определения элементов залегания пластов после приведения в горизонтальное положение дислоцированных более молодых, трансгрессивно залегающих отложений. Решение такого рода задачи преследует цель установления характера тектонической деформации пластов до того, как началось образование молодых отложений, что является, несомненно, важным вопросом при тектонических исследованиях.

Предположим, что в геологическом разрезе наблюдается угловое несогласие двух разновозрастных толщ (рис. III.3, а). Древние отложения Q имеют азимут падения 244° и угол падения 65° , а более молодые P — азимут падения 210° и угол падения 30° . Для того чтобы определить начальную ориентировку пластов толщи Q , необходимо построить по современным элементам залегания их плоскостей напластования полюсы q и p , а затем поворотом сферы вокруг горизонтального диаметра перевести полюс плоскостей напластования молодых отложений p в центр сетки и одновременно переместить по соответствующей дуге малого круга на то же значение угла поворота также полюс плоскостей напластования древних отложений q (рис. III.3, б). Подробно о производстве подобных построений см. в пункте I.30. После того как будет найдено положение полюса q' после поворота сферы, можно

найти по нему начальные элементы залегания плоскостей напластования древних отложений. Для этого необходимо совместить отметки N кальки и сетки, прочертить через точку q' радиус и по наружной шкале сетки против точки q_0' прочесть значение

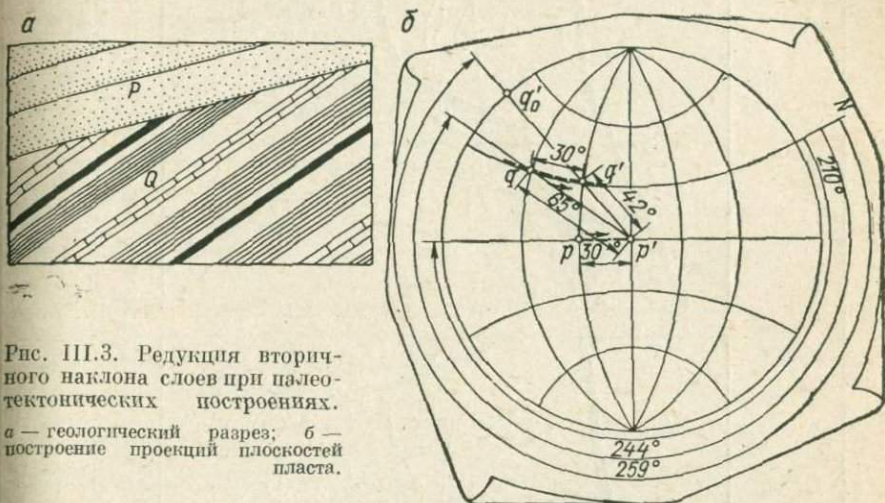


Рис. III.3. Редукция вторичного наклона слоев при палеотектонических построениях.

а — геологический разрез; б — построение проекций плоскостей пласта.

азимута падения 259° . Начальный угол падения пластов древней толщи определяется на горизонтальном диаметре сетки по количеству градусов между ее центром и точкой q' (42°).

Способ определения элементов залегания пласта по аэро- III.5
фотоснимкам (по М. Н. Петрусевичу [37]).

При наличии стереопары плановых аэроснимков элементы залегания пласта определяются по двум линиям выходов, образующим наклонный «пластовый треугольник». На рис. III.4, а положение плоскости «пластового треугольника» ABC определяется положением двух выходов пласта BA и BC . Последние в свою очередь определяются пересечением двух плоскостей (для правого и левого снимков), каждая из которых содержит линию видимого выхода пласта и линию луча зрения на одну из его точек. На рис. III.4, а пространственное положение линии выхода BA определяется пересечением проектирующих плоскостей $S_1B_1A_1$ и $S_2B_2A_2$, а положение линии выхода BC — пересечением плоскостей $S_1B_1C_1$ и $S_2B_2C_2$.

Исходными данными для решения задачи на плановых аэроснимках являются:

1) азимут проектирующего луча (луча зрения) на заранее выбранную точку линии выхода пласта (например, в месте его перегиба в долине или, наоборот, на вершине водораздела);

2) угол наклона проектирующего луча к горизонту (тангенс этого угла равен отношению фокусного расстояния объектива

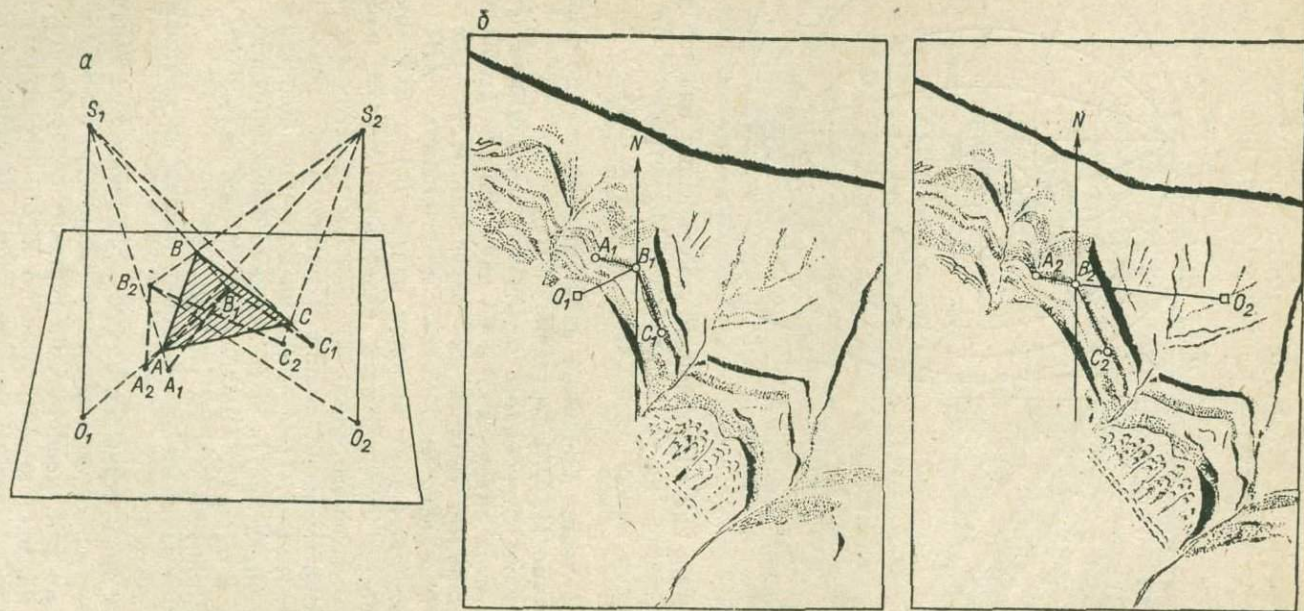


Рис. III.4. Определение элементов залегания пласта на аэрофотоснимках.

а — схема проектирования «пластового треугольника»; б — положение «пластовых треугольников» на стереопаре плановых аэрофотоснимков.

аэросъемочной камеры к расстоянию на аэроснимке проектируемой точки от главной точки аэроснимка);

3) азимуты видимых на аэроснимках направлений выхода пласта в точке перегиба.

Для получения этих данных стереопара аэроснимков подвергается следующей обработке (рис. III.4, б). Вначале находим главные точки аэроснимков O_1 и O_2 , лежащие на пересечении линий, соединяющих координатные метки снимков, и проводим на каждом снимке линию меридиана путем ориентирования снимка по карте, фотосхеме, фотоплану или непосредственно на местности. Поместив снимки под стереоскоп, выбираем на линии выхода пласта три точки, одна из которых должна находиться на изгибе выхода пласта. Последнюю соединяем с главной точкой аэроснимка прямой линией и с помощью транспортира определяем ее азимут (азимут проектирующего луча). На рис. III.4, б азимут линии O_1B_1 равен 60° , а линии O_2B_2 276° .

Для определения угла наклона проектирующего луча измеряем в миллиметрах расстояние от главной точки снимка до выбранной точки на выходе пласта. Тангенс этого угла, как уже упоминалось, равен отношению фокусного расстояния объектива камеры к расстоянию между данной точкой и главной точкой снимка. Для точки B_1 при фокусном расстоянии объектива 200 мм угол наклона проектирующего луча равен 86° , для точки B_2 81° .

Следующим приемом является определение азимутов видимых линий выхода пласта. Через выбранные точки прочерчиваем обобщенные прямые линии и измеряем транспортиром азимуты этих линий B_1A_1 (283°), B_1C_1 (160°), B_2A_2 (285°) и B_2C_2 (153°). После этого переходим к графическим построениям на экваториальной стереографической сетке (рис. III.5), введя обозначения: прямую B_1A_1 обозначим буквой a_1 , B_2A_2 — a_2 , B_1C_1 — c_1 , B_2C_2 — c_2 , BA — a , BC — c , S_1B_1 — b_1 , S_2B_2 — b_2 , плоскость $S_1B_1A_1$ — буквой Q_1 , $S_2B_2A_2$ — Q_2 , $S_1B_1C_1$ — R_1 , $S_2B_2C_2$ — R_2 , а плоскость «пластового треугольника» ABC — буквой P .

Вначале по азимутам и углам наклона строим проекции лучей зрения b_1 и b_2 , затем по азимутам строим проекции видимых выходов пласта a_1 , a_2 , c_1 и c_2 (поскольку выходы пласта спроектированы на горизонтальную плоскость снимка, линии видимых выходов являются горизонтальными и их проекции располагаются на внешней окружности сетки).

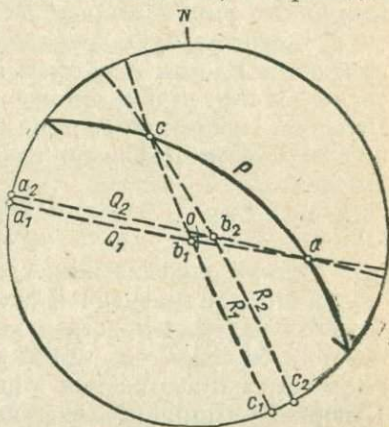


Рис. III.5. Построение проекции плоскости пласта по данным измерений на аэрофотоснимках.

Производим построение проектирующих плоскостей и линий выходов пласта. Последовательно совмещая точки a_1 и a_2 с одним из концов центрального меридиана сетки, копируем дугу большого круга Q_1 , проходящую через точки a_1 и b_1 , и дугу Q_2 , проходящую через точки a_2 и b_2 . Пересечение этих дуг (точка a) является проекцией линии выхода пласта BA . Аналогичным образом строим дуги R_1 и R_2 , проходящие через точки c_1 , b_1 и c_2 , b_2 и находим их пересечение — точку c . Последняя является проекцией линии выхода BC .

Заключительную операцию составляет построение проекции плоскости пласта P — дуги большого круга, проходящей через точки a и c (ее подбираем вращением кальки вокруг центра сетки). Пользуясь указаниями пункта I.13, определяем элементы залегания плоскости P : азимут падения 220° , угол 53° .

Измерения в керне буровых скважин

III.6 Способ определения угла падения пласта в керне произвольно наклоненной (или искривленной) скважины.

Угол падения пласта в керне отмечает перпендикуляр к оси керна и большая ось эллипса, являющегося следом пересечения плоскости напластования с цилиндрической поверхностью керна. В вертикальной скважине видимый угол падения равен истинному углу падения пласта, а в произвольно наклоненной (искривленной) скважине он отличается от истинного на значение, зависящее от ее азимутального и зенитного углов наклона.

Согласно исследованиям П. М. Леонтовского [23], функциональная зависимость всех этих углов выражается уравнением $\cos \delta = \sin \alpha \sin \sigma \cos \varphi + \cos \sigma \cos \alpha$ для случая, когда скважина отклоняется от отвеса в сторону восстания пласта, и $\cos \delta = \cos \sigma \cos \alpha - \sin \alpha \sin \sigma \cos \varphi$, когда скважина отклоняется в сторону падения пласта. При этом следует иметь в виду, что в обоих случаях возможно двойственное решение геометрической задачи, так как остается неизвестным положение керна в забое скважины.

Аналитическое определение истинного угла падения пласта требует анализа соотношений заданных углов δ , σ и φ и выполнения действий, обусловленных структурой приведенных формул, т. е. выполнения довольно трудоемких операций. Между тем эту же задачу можно решить достаточно точно простым и нетрудоемким графическим способом на стереографической проекции.

Этот способ заключается в следующем. На листе кальки производится построение стереографической проекции оси скважины по ее азимутальному и зенитному углам наклона в месте отбора керна. Отмечается радиусом общее направление падения вскрываемой скважиной толщи пород (азимут падения толщи определяется на структурной карте района или при помощи специальных приборов — керноскопов). После нанесения исходных данных

определяется положение полюса плоскости пласта. Для этого медленным поворотом кальки вокруг центра подбирается на сетке такая дуга большого круга, которая стягивала бы угол между проекцией скважины и линией направления падения толщи пород, равный видимому в керне углу падения пласта.

Геометрический смысл этой графической процедуры уясняется при рассмотрении рис. III.6, а, изображающего вскрытие пласта P произвольно наклоненной скважиной os . При любом направлении φ и угле наклона σ скважины видимый в ее керне угол падения пласта δ всегда лежит в плоскости R , проходящей через ось скважины перпендикулярно к плоскости пласта (видимый угол падения пласта является углом между перпендикуляром к оси скважины и большой осью эллипса-следа, или, что одно и то же, углом между перпендикуляром od к большой оси cd эллипса-следа и осью os скважины). Поэтому, если известна пространственная ориентировка оси скважины и геометрическое место полюса плоскости, его положение на стереографической проекции может быть определено по значению видимого угла падения пласта.

Рассмотрим конкретный пример. Пусть скважина имеет зенитный угол 38° и отклонена от отвеса в сторону восстания пласта по азимуту 88° . Сам же пласт имеет азимут падения 318° . Определить истинный угол пласта, если видимый его угол падения в керне равен 49° .

Наложив кальку на сетку, производим вначале подготовительные построения (рис. III.6, б). По внешней окружности сетки отсчитываем азимут падения пласта 318° и проводим радиус op_0 . Строим проекцию скважины: отсчитываем азимут ее наклона 88° , совмещаем найденную точку s_0 с горизонтальным диаметром сетки и отсчитываем по градусным делениям от центра по направлению к периферии значение зенитного угла скважины 38° . Полученная таким образом точка s представляет собой стереографическую проекцию скважины. Далее приступаем к решению задачи, т. е. к нахождению на радиусе op_0 положения полюса плоскости пласта. Для этого нужно поворотом кальки вокруг центра добиться такого положения, при котором количество градусов одного из меридианов сетки между точкой s и радиусом op_0 окажется равным значению видимого угла падения пласта 49° . Точка пересечения дуги такого меридиана Z с радиусом op_0 является искомым полюсом плоскости пласта. Для того чтобы определить истинный угол падения пласта, необходимо точку p совместить с горизонтальным диаметром и отсчитать от нее до центра сетки количество градусов. В условиях задачи он оказался равным 68° . Но на этом еще не заканчивается решение задачи. Необходимо проверить, сколько решений она имеет: одно или два. Для этого следует еще раз повторить процедуру подбора дуги, но уже в смежном нижнем квадранте сетки. Если попытка окажется успешной, будет подобрана еще одна дуга и найдено второе положение полюса, значит задача имеет два возможных ответа, из которых предстоит

выбрать правильный и ложный. Нужно еще раз подчеркнуть, что такого рода неопределенность возникает вследствие того, что нам остается неизвестным положение керна в забое скважины до момента его отрыва и подъема на поверхность. Причем такое положение возникает и при определении истинного угла падения пласта любым другим способом — аналитическим, графическим, построением эпюра, механическим на специальных номограммах.

При выборе правильного значения угла падения пласта из двух возможных критерием может служить общая структурная обстановка месторождения, исключая возможность обнаружения пластов с крутым или, наоборот, с пологим падением. На этом основании одно из найденных двух значений угла падения пласта может быть исключено как невозможное в данной структуре.

Такой же выбор можно произвести путем сопоставления найденных значений углов падения пласта с углом падения других пластов, вскрытых выше по разрезу отложений в интервале, где скважина ориентирована вертикально. В ответственных случаях следует прибегнуть к ориентированию керна керноскопом либо к бурению короткой вспомогательной скважины. Этот способ будет рассмотрен нами ниже (см. пункты III.7 и III.8). Кстати, в рассмотренном выше примере подобрать вторую дугу невозможно. Задача имеет только одно решение.

Способ определения азимута падения пласта по измерениям в керне вертикальной скважины. III.7

Определение азимутов и углов падения пластов, вскрытых одной скважиной, представляет значительный практический интерес при разведке сложнослоистых угольных месторождений. Проще всего эта задача решается при наличии ориентированного керна скважины, который может быть получен, например, при помощи керноскопа К-5 конструкции М. И. Казанцева или иных приборов. Однако выпуск промышленностью этих приборов ограничен.

Предлагается чисто геометрический способ решения задачи определения элементов залегания пластов угля без предварительного ориентирования керна. Основан он на использовании установленной К. Г. Войновским-Кригером [7] функциональной зависимости между элементами залегания пласта, видимым в керне углом его падения и так называемым углом встречи пласта скважиной (угол в плане между направлением наклона оси скважины и направлением линии падения пласта).

Азимут падения пласта можно определить с достаточной точностью в единичной вертикальной скважине, если из ее ствола дополнительно пробурить на глубине в произвольном направлении короткую (около 10 м) вспомогательную скважину так, чтобы в призабойной части она имела зенитный угол не менее 15°

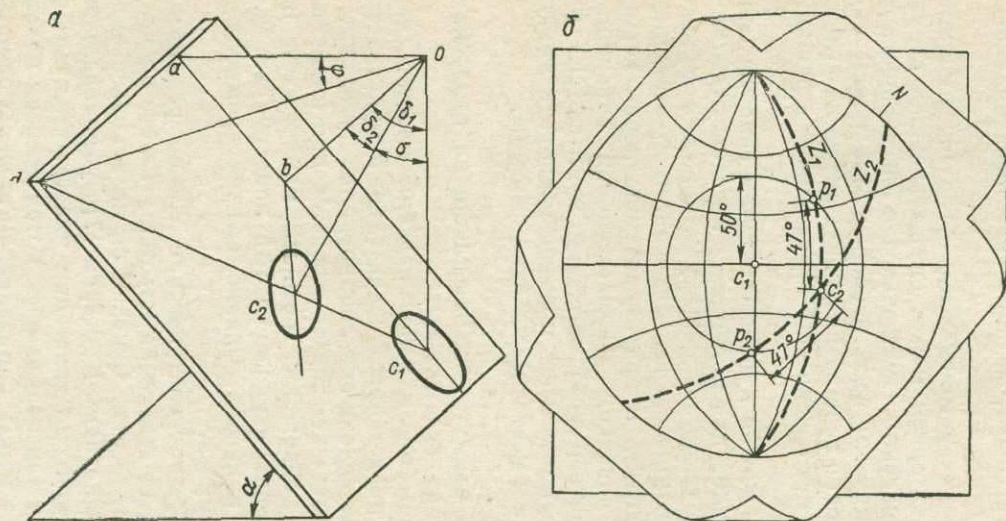


Рис. III.7. Определение азимута и угла падения пород в кернах двух скважин — вертикальной и наклонной.

a — схема положения скважин; b — определение элементов залегания пласта. ac_1 — линия падения пласта в залежи; oa — проекция линии падения пласта на горизонтальную плоскость; bc_1 — линия плоскости пласта, проходящая через концы скважин; bc_2 — плоскость, проходящая через ось скважины c_2 перпендикулярно к плоскости пласта.

(рис. III.7, а). Решение такой задачи сводится к геометрическим построениям на стереографической сетке, где исходными данными служат видимые в керне основной и вспомогательной скважин углы падения пласта δ_1 и δ_2 и углы ориентировки вспомогательной скважины σ и φ .

Рассмотрим этот способ подробно на примере решения конкретной задачи. Допустим, что измеренный в керне основной скважины угол падения пласта равен 50° , а во вспомогательной 47° . Азимут наклона вспомогательной скважины в месте отбора керна 253° , зенитный угол 35° . Необходимо определить азимут падения данного пласта.

Накладываем на стереографическую сетку лист кальки с обозначенным направлением магнитного меридиана и производим построение стереографической проекции скважин. Поскольку основная скважина вертикальна, ее проекция (точка c_1) располагается в центре сетки. Проекцию вспомогательной скважины строим следующим способом: проводим линию в направлении наклона скважины, совмещаем полученную засечку на внешнем круге с горизонтальным диаметром сетки и отсчитываем в противоположном направлении от центра сетки зенитный угол. Точка c_2 отмечает проекцию вспомогательной скважины.

Далее находим геометрическое место полюса плоскости пласта, т. е. окружность на верхней полусфере, которую образует перпендикуляр к плоскости пласта при его вращении вокруг вертикальной оси. Производим это следующим образом. Откладываем на горизонтальном диаметре сетки значение видимого угла падения пласта в керне вертикальной скважины (50°). Затем проводим из центра сетки окружность радиусом, равным отмеченному на горизонтальном диаметре сетки углу падения.

Теперь остается определить на этой окружности действительное положение полюса плоскости пласта посредством подбора на сетке меридиональной дуги, равной видимому углу падения пласта в керне вспомогательной скважины. Практически это достигается поворачиванием кальки вокруг центра сетки до тех пор, пока часть одной из меридиональных дуг сетки между окружностью возможных решений и проекцией вспомогательной скважины c_2 не окажется равной видимому в керне последней углу падения пласта 47° . Проведав такую операцию, мы получим две точки скрещения, одну (p_1) даст дуга Z_1 , другую (p_2) — дуга Z_2 .

Следовательно, азимут падения интересующего нас пласта может быть равен либо 3 , либо 143° . Какой же из них правильный? Решение этого вопроса требует вычисления абсолютных отметок пласта, определения элементов залегания линии, соединяющей обе скважины в плоскости пласта, и дополнительных геометрических построений.

Абсолютная отметка пласта в наклонной вспомогательной скважине определяется как алгебраическая сумма абсолютной

отметки устья основной вертикальной скважины, ее глубины до места заложения наклонной вспомогательной скважины и вертикальных проложений отрезков последней между пунктами измерения зенитных углов. По вертикальной скважине абсолютная отметка слоя вычисляется как сумма абсолютной отметки ее устья и глубины подсечения слоя.

Для определения элементов залегания соединительной линии строим инклинограмму вспомогательной скважины — проекции

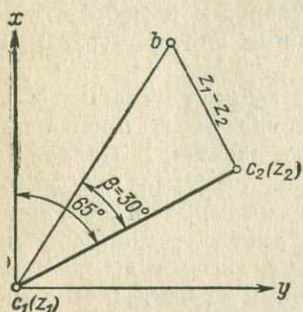


Рис. III.8. Определение азимута и угла наклона соединительной линии.

на горизонтальную плоскость отрезков ее ствола между пунктами измерения углов кривизны. Соединяем крайние точки инклинограммы (проекцию основной скважины и проекцию точки отбора керна во вспомогательной скважине) прямой линией, проставляем соответствующие им абсолютные отметки z_1 и z_2 и по направлению наклона линии определяем азимут ее падения (рис. III.8). Затем восстанавливаем в точке c_2 перпендикуляр и откладываем на нем в масштабе инклинограммы превышение абсолютных отметок слоя. Соединив точку b с началом инклинограммы, получаем угол наклона β линии, проходящей через обе скважины в плоскости пласта.

Предположим, что в результате такого рода вычислений и дополнительных геометрических построений азимут наклона соединительной линии оказался в нашем примере 65° , а угол наклона 30° . Из этого следует, что верным оказалось первое решение задачи (P_1), так как проекция соединительной линии попадает на дугу, построенную по элементам залегания: азимут падения 3° , угол падения 50° .

III.8 Способ определения азимута и угла падения пласта по измерениям в кернах близко расположенных наклонных скважин.

Геометрическим способом можно определить элементы залегания пласта также и по двум близко расположенным наклонным скважинам, т. е. когда основная скважина получила произвольное искривление ствола в процессе бурения, а вторая, вспомогательная — преднамеренное.

Так же как и в рассмотренном выше примере (пункт III.7), решение задачи включает в себя построение на стереографической сетке проекций скважин, окружностей, отображающих возможные положения полюса плоскости пласта при вращении кернов вокруг осей скважин, и нахождение возможного положения полюса плоскости пласта.

Графические построения производятся в такой последовательности.

1. По инклинометрическим углам скважин строим их стереографические проекции c_1 и c_2 .

2. Находим плоскость, в которой лежат проекции обеих скважин. Для этого кальку вращаем вокруг центра сетки до тех пор, пока точки c_1 и c_2 не попадут на один и тот же меридиан (рис. III.9, а). Прочерчиваем дугу этого меридиана Z и стягивающий ее диаметр. Последний избирается в качестве оси вращения сферы v . Не сдвигая кальку, перемещаем по соответствующим параллелям сетки проекции осей скважин на внешний круг диаграммы (точки c'_1 и c'_2), т. е. делаем поворот сферы вокруг оси v , в результате которого обе скважины занимают горизонтальное положение. При этом следует определить по одной из параллелей угол поворота ω .

3. Поворачиваем кальку вокруг центра сетки до совмещения проекции скважины c'_1 с вертикальным диаметром сетки, отсчитываем на обоих концах диаметра значение видимого в керне угла падения пласта и прочерчиваем соответствующие полученным засечкам параллели сетки (рис. III.9, б). Последние являются геометрическим местом полюса плоскости слоя, вскрытого скважиной c'_1 (перпендикуляр к плоскости слоя во время полного оборота керна вокруг горизонтальной оси оставит на стереографической сетке два диаметрально противоположных следа).

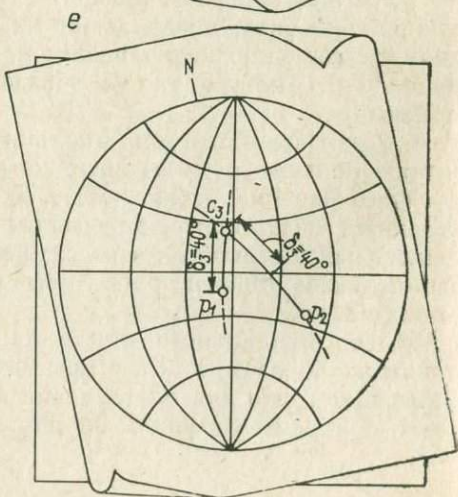
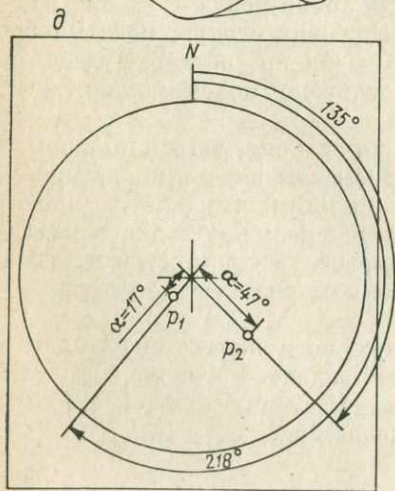
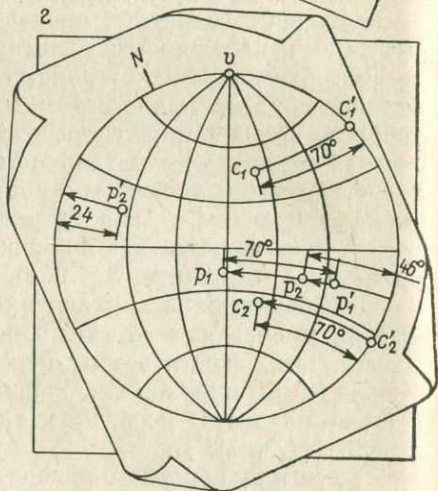
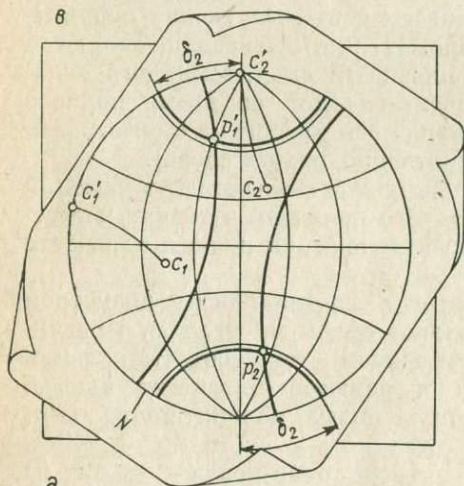
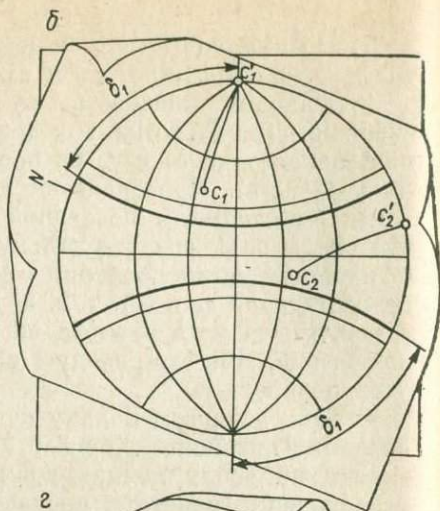
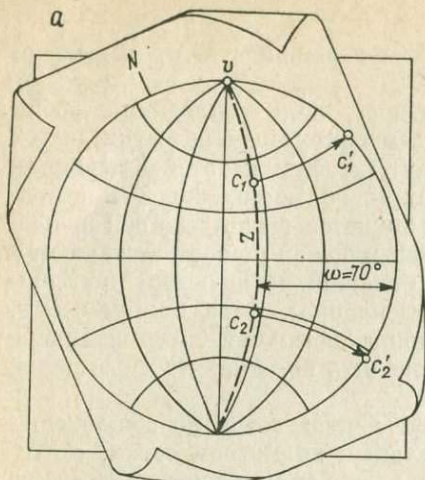
4. Таким же способом строим окружность возможных решений и для скважины c'_2 , в результате чего получаем в точках пересечения окружностей два возможных положения полюса плоскости пласта p_1 и p_2 (рис. III.9, в).

5. Совместив ось вращения v с вертикальным диаметром сетки, производим обратный поворот сферы на угол ω . Практически это достигается перемещением по соответствующим параллелям проекций скважин и полюсов плоскости пласта. После поворота последние займут новые положения p_1 и p_2 (рис. III.9, г).

Если при обратном повороте сферы точки-полюсы уходят за линию горизонта, продолжение их траектории следует искать на диаметрально противоположном краю сетки по соответствующей параллели. Именно таким образом найдено новое положение полюса p_2 .

6. Совмещаем отметки N кальки и сетки и определяем по положению полюсов p_1 и p_2 возможные элементы залегания интересующего нас пласта (рис. III.9, д). Напомним, что радиус, проведенный через полюс, определяет на внешнем круге диаграммы азимут падения пласта, а расстояние между центром сетки и точкой-полюсом плоскости на горизонтальном диаметре — угол падения пласта.

Выбор правильного ответа из двух возможных производим таким же образом, как и в предыдущей задаче. Различие состоит лишь в том, что для определения азимута соединительной линии здесь приходится строить две инклинограммы.



Если на моноклинали рядом находится еще одна скважина, выбор правильного решения задачи упрощается. Необходимо построить проекцию третьей скважины и поворотом кальки вокруг центра привести ее проекцию c_3 вначале на меридиональную дугу сетки, проходящую через полюс p_1 , а затем через полюс p_2 (рис. III.9, е).

Истинные элементы залегания пласта отмечает тот полюс, градусное расстояние которого от проекции третьей скважины окажется равным значению видимого в ее керне угла падения пласта. На рис. III.9, е положение полюса p_1 отмечает истинные элементы пласта, так как угловое расстояние между точкой p_1 и проекцией скважины c_3 равно углу δ_3 .

В практике геологоразведочных работ на уголь иногда представляется возможность определить элементы залегания пласта (слоя породы) по неориентированному керну в одной скважине даже без дополнительного бурения.

Если речь идет о заведомо моноκлиальном залегании угленосной толщи, в качестве дополнительной скважины можно принять наиболее искривленную часть ствола основной скважины, и тогда решение задачи сводится к построениям, которые были уже описаны в пункте III.3 (случай вертикальной и наклонной скважин). Для этого необходимо иметь лишь инклинометрические углы максимального искривления ствола скважины, значения видимого в керне угла падения пласта в данном интервале и угла падения любого слоя породы в керне вертикальной части скважины. Естественно, что положительные результаты можно получить лишь в том случае, если зенитный угол максимального искривления скважины превышает 15° .

Для освоения графического способа определения элементов залегания пласта рекомендуется повторить все его приемы при решении нижеследующей задачи.

Скважина c_1 наклонена по азимуту 223° под углом к вертикали 47° , видимый в ее керне угол падения пласта $\delta_1 = 64^\circ$. Скважина c_2 наклонена по азимуту 353° под углом 37° , а видимый в ее керне угол падения пласта $\delta_2 = 27^\circ$. Решение этой задачи изображено на рис. III.9. Ответ: p_1 — азимут падения пласта 218° , угол падения 17° ; p_2 — азимут падения пласта 135° , угол падения 47° . Правильное решение дает p_1 , так как видимый в керне соседней третьей скважины c_3 (азимут наклона 180° , угол наклона 25°) угол падения $\delta_3 = 40^\circ$.

Способ определения элементов залегания пласта по данным III.9 измерения вектора естественной остаточной намагниченности пород в керне скважины.

Он предусматривает выполнение следующих операций.

Рис. III.9. Определение азимута и угла падения пласта по данным измерения углов в керне двух близко расположенных скважин.

1. Отбор образца керна с хорошо выраженной первично-горизонтальной слоистостью породы и включением сидеритовой конкреции*.

2. Измерение в керне по известной методике А. Н. Храмова склонения a и наклонения j вектора первичной естественной остаточной намагниченности I_n^0 в условной системе координат, где осью X является линия видимого в керне простирания поверхности напластования, осью Y — линия падения, а осью Z — перпендикуляр к поверхности напластования.

3. Построение стереографической проекции плоскости пласта с использованием в качестве исходных данных значений измерений склонения a вектора I_n^0 в системе координат образца, видимого в керне угла падения пласта δ , углов наклона оси скважины (азимутального и зенитного) в месте отбора образца, а также известного из литературных источников для данного района значения склонения D_0 меридиана в эпоху накопления исследуемых отложений.

4. Определение по положению полюса плоскости пласта его азимута и угла падения в современной системе координат.

Порядок выполнения двух последних операций рассмотрим подробно на примере из практики исследований в Донбассе [36]. В одной из скважин на глубине 1528 м был отобран образец слоистого алевролита (видимый в керне угол падения плоскости напластования 20°) с включением крупной сидеритовой конкреции. Измерение в керне первичной естественной остаточной намагниченности показало, что вектор I_n^0 имеет склонение 68° и наклонение минус 38° . По данным инклинометрических измерений азимут наклона оси скважины в месте отбора образцов равен 125° , а зенитный угол 12° .

Наложив лист кальки на стереографическую сетку (рис. III. 10, а), отметим точкой i_0 угол склонения магнитного меридиана в верхнем карбоне Донбасса $D_0 = 213^\circ$ (заимствовано из карты А. Н. Третьяка [48]). Найдем положение оси X_0 образца, отсчитав от точки i_0 в направлении, обратном движению часовой стрелки, значение угла склонения вектора I_n^0 образца $a = 68^\circ$. Затем, воспользовавшись значением видимого угла падения пласта, построим проекцию оси скважины c' при горизонтальном залегании пласта. Для этого требуется повернуть кальку вокруг центра до совмещения точки x_0 с нижним концом центрального меридиана и по экватору сетки влево от центра отсчитать значение видимого угла падения пласта $\delta = 20^\circ$. Полюс p' плоскости пласта располагается в этом случае в центре сетки (пласт занимает горизонтальное положение).

Следующие построения требуют поворота плоскости напластования слоя таким образом, чтобы ось скважины заняла свое

* Среди пород угленосной толщи только сидеритизированные аргиллиты и алевролиты обладают стабильными магнитными свойствами.

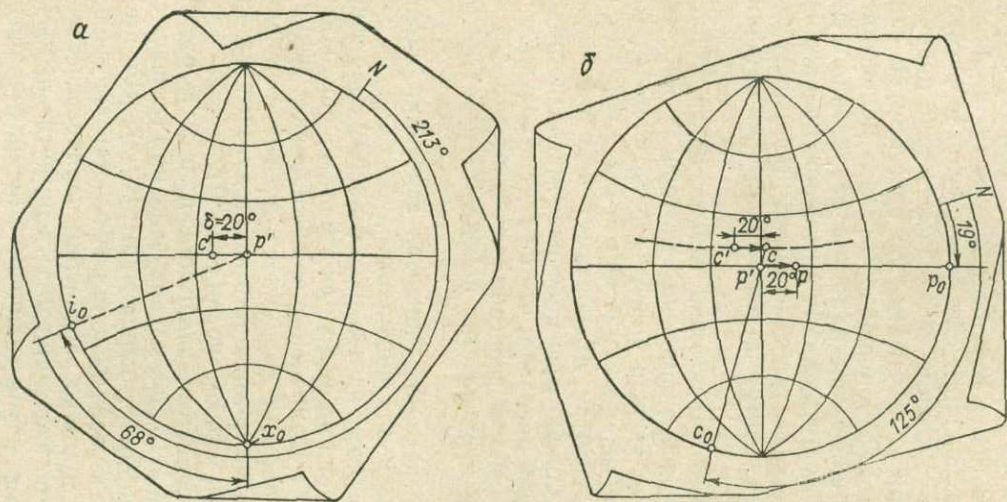


Рис. III.10. Определение элементов залегания пласта по данным измерения остаточной намагниченности пород в керне.

действительное положение. Поскольку нам известен механизм образования складки (отбор образца производился на крыле Первомайской антиклинали, имеющей характер складки поперечного изгиба), такой поворот осуществляется вокруг горизонтальной оси следующим образом.

Построим проекцию с оси скважины по ее азимуту и зенитному углу наклона (рис. III.10, б). Поворотом кальки вокруг центра приведем точки c' и c на одну и ту же параллель сетки и по градусным делениям определим угловое расстояние между этими точками — значение необходимого угла поворота $\omega = 20^\circ$. Не сдвигая кальку, переместим по экватору на значение этого же угла поворота (20°) полюс p' в новое положение p , отмечающее элементы залегания пласта в современной системе координат. Остается вернуть кальку в исходное положение (отметки N кальки и сетки должны быть совмещены) и по градусным делениям сетки определить азимут и угол падения слоя (азимут падения 19° , угол падения 20°).

Для вертикальных скважин азимут падения пласта определяется по результатам измерения вектора I_n^0 простым арифметическим действием. Нужно определить разность углов склонения палеомагнитного меридиана и вектора I_n^0 образца по формуле $A_n = D_0 - a - 90^\circ$ (где A_n — азимут падения пласта).

Экспериментальная проверка палеомагнитного способа ориентирования керна показала, что он дает небольшую погрешность определения элементов залегания пласта ($\pm 15 \div 20^\circ$), приемлемую в условиях производства поисковых работ на уголь.

III.10 Способ определения элементов залегания пласта в ориентированном керне скважины.

Придать поднятому на поверхность керну положение, какое он занимал в скважине до отрыва от забоя, можно только в том случае, если он имеет специальные ориентирующие метки. Последние получают при помощи различного рода керноскопов [19] или путем нанесения на поверхность керна дуговых меток вращением приподнятой над забоем коронкой [30].

Измерение элементов залегания пласта в ориентированном керне можно производить механически при помощи специальных гониометров (например, керномером КР-2). Но эта же задача легко может быть разрешена также на стереографической проекции. В качестве примера рассмотрим порядок графического определения элементов залегания пласта по дуговым меткам на боковой поверхности керна наклонной (искривленной) скважины. Нам известно, что середина меток-полуколец 1, 2 и 3 определяет положение образующей ab , лежащей в апсидальной плоскости A скважины (рис. III.11, а). В то же время пространственное положение последней определяется азимутом наклона оси скважины. Поэтому, если известен видимый в керне угол падения плоскости пласта δ и угол λ на торце керна между направлением линии

падения пласта и апсидальной плоскостью, этих данных оказывается достаточно для определения его элементов залегания.

Допустим, что скважина имеет в точке отбора керна зенитный угол $\sigma = 25^\circ$ и азимут наклона 50° . Угол λ , отсчитанный от середины дуговых ориентирующих меток по ходу часовой стрелки, составляет 95° , а видимый угол падения пласта $\delta = 29^\circ$.

Построим проекцию скважины c по ее инклинометрическим измерениям. Повернув кальку вокруг центра сетки, поместим

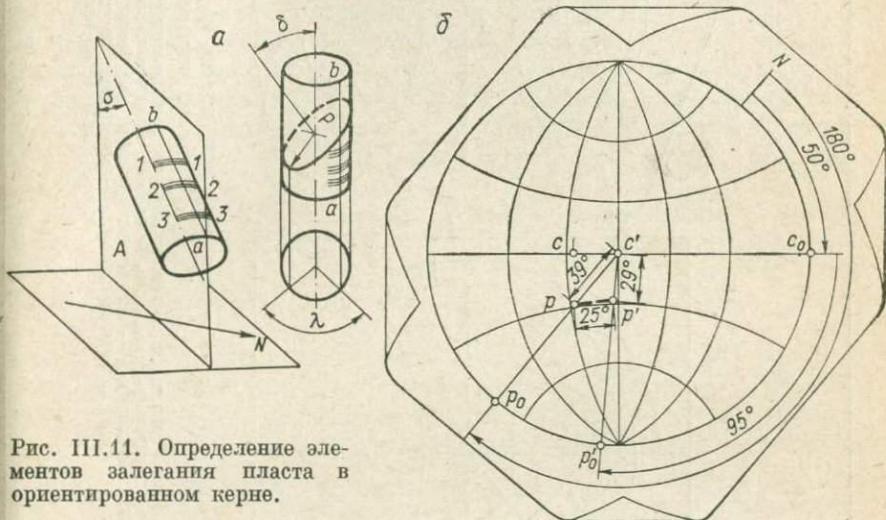


Рис. III.11. Определение элементов залегания пласта в ориентированном керне.

точку c на экватор сетки (рис. III.11, б). Не сдвигая кальку, переместим проекцию оси скважины в центр сетки, обозначив ее новую позицию буквой c' , т. е. приведем керн поворотом сферы в вертикальное положение.

Считая точку c_0 нулем отсчета угла λ , построим полюс пласта по углам $\lambda = 95^\circ$ и $\delta = 29^\circ$. Теперь остается осуществить обратный поворот сферы, при котором ось керна займет свое первоначальное положение. Для этого приведем точку c на экватор сетки и переместим полюс p' по соответствующей параллели на значение зенитного угла σ (в точку p). Элементы залегания пласта: азимут падения 180° , угол падения 39° .

Графический способ определения элементов залегания пласта III.11 по данным геофизических измерений в скважинах.

При помощи трех электродов M_1, M_2 и M_3 пластового накломера в скважине регистрируются кривые потенциалов поляризации k_1, k_2 и k_3 , аномалии которых позволяют определить превышения z_{12} и z_{13} поверхности кровли пласта относительно отметки, записанной воспринимающим электродом M_1 (рис. III.12, а). Одновременно определяется в магнитной системе

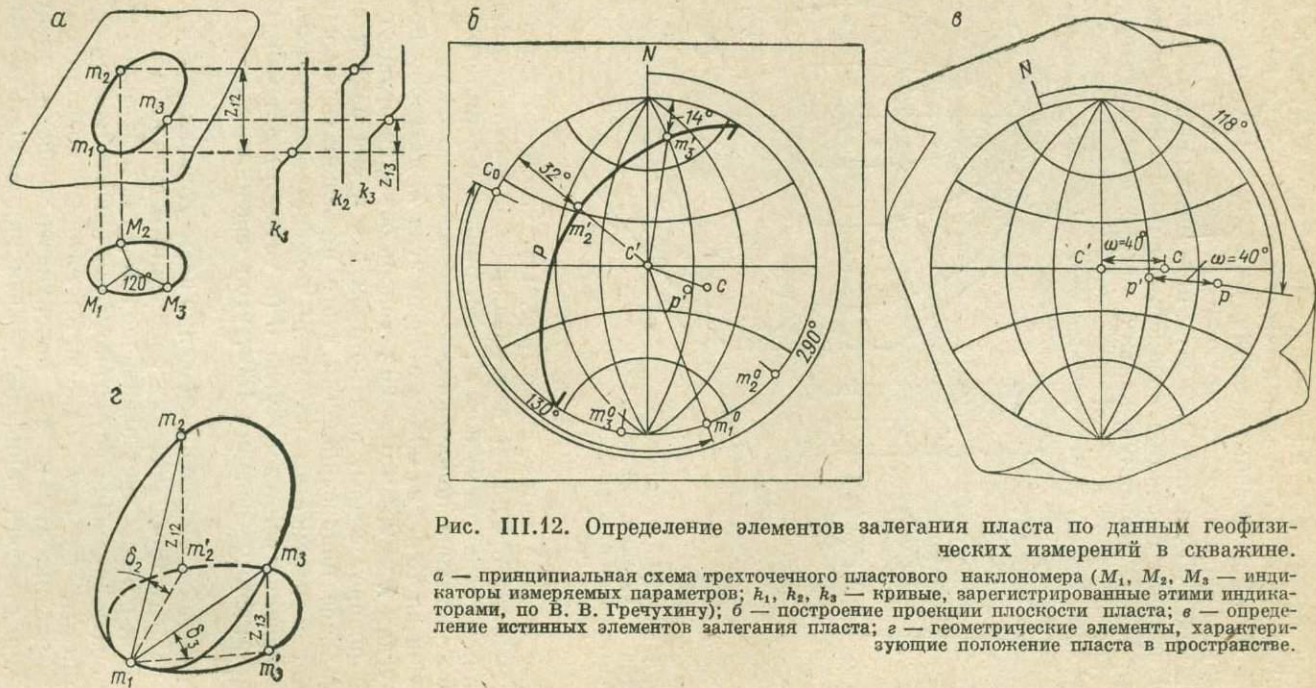


Рис. III.12. Определение элементов залегания пласта по данным геофизических измерений в скважине.

а — принципиальная схема трехточечного пластового наклономера (M_1, M_2, M_3 — индикаторы измеряемых параметров; k_1, k_2, k_3 — кривые, зарегистрированные этими индикаторами, по В. В. Гречухину); *б* — построение проекции плоскости пласта; *в* — определение истинных элементов залегания пласта; *з* — геометрические элементы, характеризующие положение пласта в пространстве.

координат положение электродов в пространстве (угол между плоскостью, в которой находится одно из воспринимающих устройств, и апсидальной плоскостью скважины) и положение оси скважины (азимут и зенитный угол наклона). Затем по трем сложным формулам вычисляются азимут и угол падения пласта [13 и др.].

Элементы залегания пласта можно определить по данным наклонометрии с достаточной степенью точности также простым графическим способом. Сущность его состоит в нахождении полярных координат (азимутов и углов наклона) двух прямых, лежащих в плоскости пласта, и в построении по координатам стереографической проекции этой плоскости. В качестве прямых в этом случае принимаются m_1m_2 и m_1m_3 , соединяющие нулевую отметку электрода M_1 с высотными отметками z_{12} и z_{13} электродов M_2 и M_3 (рис. III.12, з).

Пусть при каротаже скважины получены следующие данные: зенитный угол скважины $\sigma = 40^\circ$; азимут наклона скважины 290° ; угол $\lambda = 130^\circ$; превышение $z_{12} = 42,9$ мм; превышение $z_{13} = 17,3$ мм; радиус скважины $R = 40$ мм. Требуется определить элементы залегания пласта P . Известно, что электроды наклономера располагаются по окружности через 120° , образуя вписанный правильный треугольник (см. рис. III.12, з). Стороны этого треугольника m_1m_2' и m_1m_3' являются проекциями прямых m_1m_2 и m_1m_3 на плоскость, перпендикулярную к оси скважины, и могут быть определены: $a = 3R/\sqrt{3} = 1,732 \cdot 40 = 69,28$ мм. Тогда углы наклона δ_2 и δ_3 прямых m_1m_2 и m_1m_3 определяются из выражений $\text{tg } \delta_2 = z_{12}/a = 42,9/69,28 = 0,62$ ($\delta_2 = 32^\circ$) и $\text{tg } \delta_3 = z_{13}/a = 17,3/69,28 = 0,25$ ($\delta_3 = 14^\circ$).

Азимуты наклона прямых определяются следующим образом. Построим по имеющимся данным инклинометрии стереографическую проекцию скважины (точку c) и поворотом сферы вокруг горизонтальной оси (см. пункт I.30) приведем скважину в вертикальное положение (точка c'), так как все замеры наклономером производились относительно плоскости, перпендикулярной к оси скважины (рис. III.12, б). Отложим от точки c_0 по наружной шкале сетки в направлении, обратном движению часовой стрелки, известный угол $\lambda = 130^\circ$ (точка m_1^0). Таким образом определяется положение в пространстве воспринимающего электрода M_1 .

Отрезки $m_2'm_1$ и $m_3'm_1$ (рис. III.12, з) являются сторонами равностороннего треугольника и, следовательно, составляют между собой угол 60° . Направление $c'm_1^0$ (см. рис. III.12, б) делит этот угол пополам. Поэтому проекции вышеупомянутых отрезков m_2^0 и m_3^0 можно найти, отсчитав угол 30° в обе стороны от точки m_1^0 по внешней окружности сетки. Тогда проекции m_1' и m_2' прямых m_2m_1 и m_3m_1 найдем по их углам наклона $\delta_2 = 32^\circ$ и $\delta_3 = 14^\circ$, как описано в пункте I.10.

Остается по найденным проекциям прямых m_2' и m_3' (см. рис. III.12, б), лежащих в плоскости напластования, найти про-

екцию этой плоскости P' . Эта операция осуществляется поворотом кальки вокруг центра сетки до совпадения точек m'_2 и m'_3 с одной и той же дугой большого круга сетки. Она и представляет собой искомую дуговую проекцию плоскости пласта P' с полюсом в точке p' (построение полюса плоскости см. в пункте I.14).

Однако эта проекция еще не характеризует истинное положение пласта в недрах, так как построена относительно плоскости, перпендикулярной к оси скважины. Для окончательного решения задачи необходимо произвести обратный поворот сферы вокруг горизонтального диаметра, т. е. вернуть скважину в исходное наклонное положение (рис. III.12, *е*). В результате такого поворота полюс p' переместится по соответствующей параллели на значение зенитного угла скважины в новое положение p , характеризующее уже истинные элементы залегания данного пласта. Азимут падения пласта P оказался 118° , угол падения 71° .

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ
ХАРАКТЕРИСТИКА
СКЛАДЧАТЫХ
И РАЗРЫВНЫХ СТРУКТУР

Измерение
элементов складок

Для точного анализа и картирования складок определяется ориентировка их геометрических элементов — крыльев, шарнира, осевой плоскости, оси (рис. IV.1) IV.1

Крылья складок обычно имеют характер плоскостей. Шарниром называется линия, проходящая в пределах поверхности

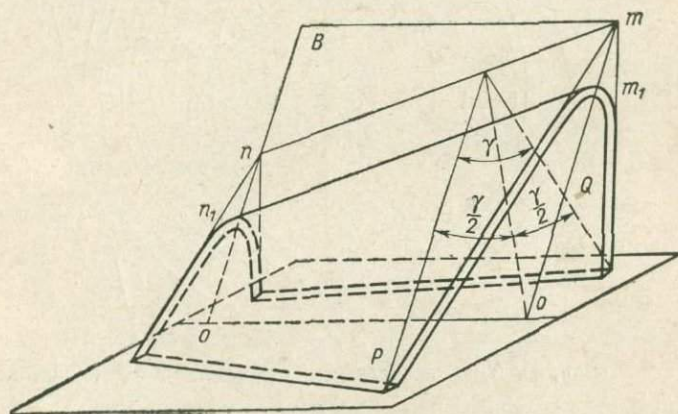


Рис. IV.1. Геометрические элементы складки.

какого-либо пласта вдоль замка складки и соединяющая все точки перегиба этого пласта. Осевой называется плоскость, делящая складку на две симметричные части (плоскость, проходящая через шарниры последовательно лежащих пластов в складке). Осью называется линия пересечения осевой плоскости с поверхностью земли (с горизонтальной плоскостью). Угол складки — двугранный угол, образующийся при пересечении плоскостей, соответствующих крыльям складки.

Элементы залегания крыльев складки измеряются непосредственно в поле горным компасом, а в камеральной обстановке — транспортиром на разрезах и структурных планах. Эти измерения

являются исходными данными для определения других геометрических элементов складки. Такая задача проще всего решается при помощи стереографической сетки. Рассмотрим эту процедуру на конкретном примере.

Пусть в обнажении на местности измерены элементы залегания крыльев синклинали складки P (330° , $\angle 60^\circ$) и Q (195° , $\angle 39^\circ$).

IV.2 Азимут и угол наклона шарнира синклинали определяется следующим образом.

На кальке нужно построить дуговые проекции плоскостей крыльев. Для изображения крыла P отметим точкой p_0 азимут

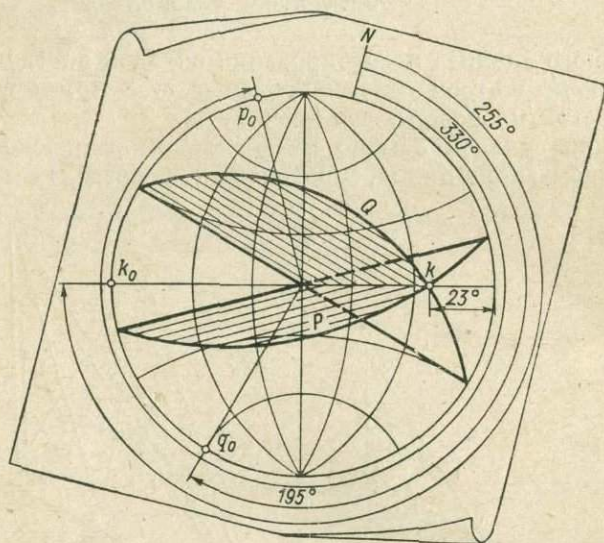


Рис. IV.2. Стереограмма синклинали складки.

его падения 330° и, повернув кальку вокруг центра, совместим эту точку с концом горизонтального диаметра (рис. IV.2). Проекция плоскости крыла P находится на противоположной половине диаметра путем подбора на сетке дуги большого круга, точка перегиба которой удалена от внешнего круга на значение угла падения крыла 60° . Таким же способом находится проекция плоскости другого крыла Q . Точка k пересечения дуг — проекция линии пересечения плоскостей P и Q — является искомой проекцией шарнира складки (на рис. IV.1 прямые mn и $m'n'$ параллельны и поэтому имеют одни и те же элементы залегания). Совместив отметки N кальки и сетки, останется определить по положению проекции шарнира его элементы залегания. Точка k_0 располагается против числа наружной шкалы сетки, указывающего азимут наклона шарнира (255°), а расстояние точки k

от окружности, измеряемое по градусным делениям горизонтального диаметра сетки, указывает значение угла наклона (23°).

Проекция крыльев и шарнира складки приобретает наглядный вид, если точку k соединить прямой с центром o (провести линию пересечения плоскостей) и штриховкой покрыть те части плоскостей крыльев, которые лежат выше линии скрещения. Так получается стереограмма синклинали (рис. IV.2).

Осевая плоскость B делит складку на две симметричные части, являясь биссектральной плоскостью двугранного угла, образуемого пересечением плоскостей крыльев P и Q (см. рис. IV.1). IV.3

Для определения ее элементов залегания требуется построить проекцию вспомогательной плоскости Z , перпендикулярной к шарниру OK (двугранный угол плоскостей измеряется плоским углом, образованным их следами в плоскости, перпендикулярной к линии пересечения), измерить по дуге этой плоскости угловое расстояние между проекциями плоскостей крыльев P и Q , поделить его на две равные части и через найденную биссектрису OB и шарнир OK провести биссектральную (осевую) плоскость B (рис. IV.3).

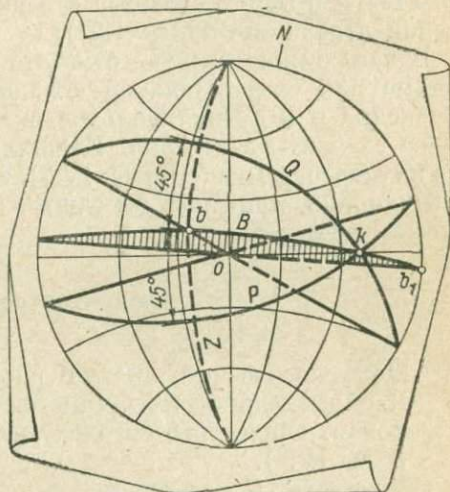


Рис. IV.3. Построение осевой плоскости складки.

Техника такого рода построений подробно изложена в пунктах I.26 и I.27. Поэтому можно ограничиться пояснением лишь процедуры построения и определения элементов залегания самой осевой плоскости B . Получив проекцию биссектрисы b , нужно подобрать на сетке дугу большого круга B , которая проходила бы через точки b и k . Она является проекцией осевой плоскости складки. Угол ее падения измеряется по градусным делениям горизонтального диаметра сетки расстоянием от перегиба дуги до внешнего круга. Азимут падения определяется в положении, когда отметки N кальки и сетки совмещены.

Осью синклинали является линия простирания осевой плоскости B (см. рис. IV.3). IV.4

Поскольку ось ориентирована перпендикулярно к линии падения осевой плоскости, ее азимут находится вычитанием 90° из

значения азимута падения осевой плоскости ($169 - 90 = 79^\circ$). На стереографической проекции линией простираения осевой плоскости B является радиус ob_1 (см. рис. IV.3). Если отметки N кальки и сетки совмещены, азимут простираения этой оси определяется значением дирекционного угла между северным направлением центрального меридиана и точкой b_1 .

IV.5 Угол γ синклинали определяется двугранным углом между плоскостями P и Q . На стереографической проекции он измеряется по градусным делениям дуги Z между проекциями плоскостей P и Q (см. рис. IV.3). В рассматриваемом примере угол синклинали равен 90° .

Геометрические элементы синклинали могут быть изображены и определены также путем построения полюсов плоскостей ее крыльев P и Q , что сводится к решению более простой геометрической задачи (см. пункт I.27).

В заключение следует отметить, что все построения, выполненные для синклинали складки, могут быть отнесены без изменения и к антиклинальной складке, крылья которой имеют те же элементы залегания. Единственное отличие состоит в том, что на стереограмме (см. рис. IV.2), если бы последняя изображала антиклиналь, пришлось бы заштриховать другие части проекций плоскостей.

Измерение элементов разрывных смещений

IV.6 Морфологический анализ разрывных смещений сводится к определению их геометрической формы и ориентировки. Определяются следующие геометрические элементы (рис. IV.4).

Сместитель R — трещина или серия трещин, по которой произошло смещение пород. Крылья — перемещенные части одного и того же пласта, прилегающие к сместителю. Лежащее крыло P_1 залегает под наклонным сместителем, висячее P_2 — над сместителем. При вертикальном положении сместителя различают поднятое и опущенное крылья.

Линии скрещения $1-1'$ и $2-2'$ — линии пересечения плоскостей крыльев и сместителя*.

Амплитуда — расстояние перемещения крыльев; для одного и того же разрывного смещения зависит от направления, в котором она измеряется. Полная амплитуда A_n — расстояние между ранее смежными точками крыльев n_1 и n_2 , измеренное в плоскости

* Поверхности сместителей и крыльев редко сохраняют постоянство ориентировки на протяжении протяжения, однако в пределах небольших площадок их элементы залегания обычно изменяются мало, что позволяет считать эти поверхности плоскостями.

сместителя. Полная амплитуда разлагается на две составляющие — взбросовую или сбросовую (в зависимости от направления относительного перемещения висячего крыла), ориентированную вдоль линии падения сместителя и измеряемую наклонной длиной отрезка A_B , и сдвиговую A_C , ориентированную вдоль линии простирания сместителя. Стратиграфическая или нормальная

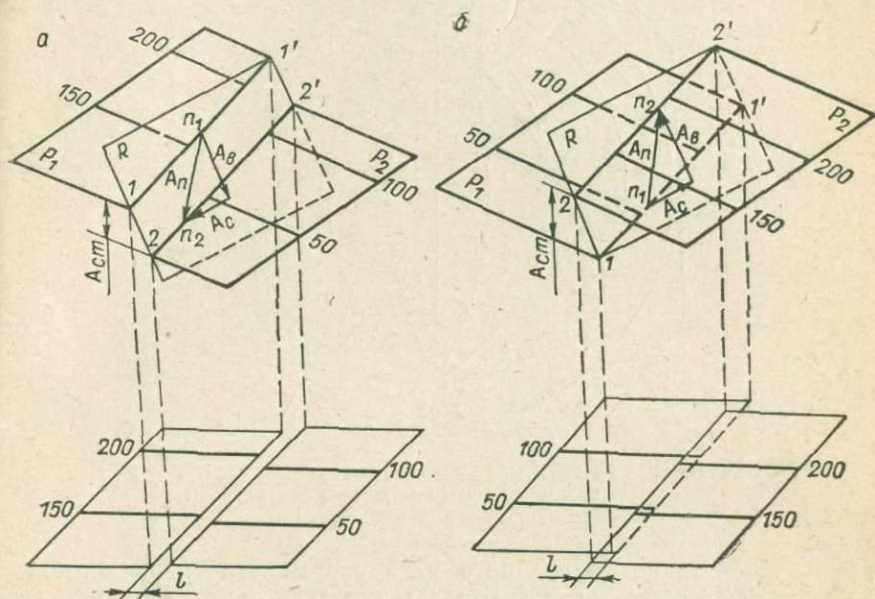


Рис. IV.4. Геометрические элементы сброса (а) и взброса (б). P_1 и P_2 — крылья разрывных нарушений; 50, 100, 150, 200 — горизонталы пластов на крыльях, м.

амплитуда $A_{ст}$ — расстояние между смещенными крыльями по нормали. Перекрытие или зияние l — горизонтальное расстояние между линиями скрещения.

Из угловых характеристик определяются угол встречи, образованный пересечением линий простирания крыльев и сместителя, и двугранный угол между плоскостями крыла и сместителя, угол скольжения, измеренный в плоскости сместителя между линией его падения и направлением борозд скольжения, и др.

Построение линии скрещения. Пусть плоскость пласта P (рис. IV.7) (20° , $\angle 30^\circ$) смещена по сместителю сброса R (60° , $\angle 50^\circ$).

Линия скрещения строится, как линия пересечения плоскостей P и R . Построив дуговые проекции плоскостей пласта и сместителя (рис. IV.5) по их элементам залегания, найдем точку k пересечения дуг P и R (проекцию линии скрещения) и определим эле-

менты залегания последней: азимут наклона 356° , угол наклона 28° . Эта же задача может быть решена и путем построения полюсов плоскостей P и R (техника построения линий пересечения описана в пункте I.24).

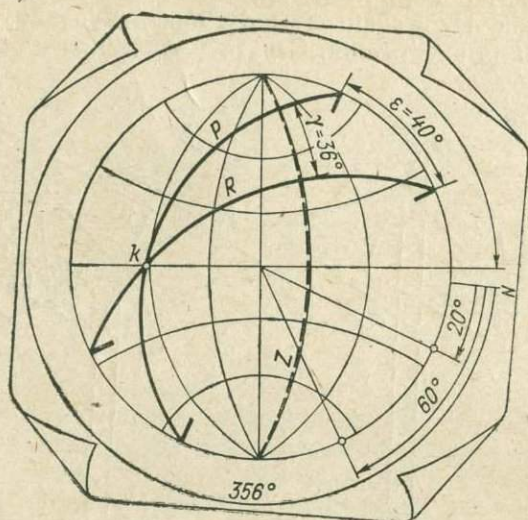


Рис. IV.5. Определение двугранного угла разрывного смещения и угла встречи.

IV.8 Определение двугранного угла разрывного смещения (элементы залегания сместителя и крыльев приняты те же, что и в пункте IV.7).

Двугранный угол измеряется в плоскости, перпендикулярной к линии скрещения (порядок решения задачи см. в пункте I.25). Пользуясь тем, что проекция линии скрещения k (см. рис. IV.5) является полюсом такой плоскости, найдем проекцию последней Z (см. пункт I.14) и, совместив дугу Z с соответствующим меридианом сетки, отсчитаем по его градусным делениям между дугами P и R значение двугранного угла $\gamma = 36^\circ$. Очевидно, что эту же операцию можно выполнить и при задании плоскостей их полюсами p и r (см. пункт I.25).

IV.9 Определение угла встречи (условия те же, что и в пункте IV.7).

Угол встречи ϵ определяется либо в стереографической проекции путем непосредственного отсчета по градусным делениям внешней окружности сетки между линиями простирания плоскостей P и R (см. рис. IV.5), либо арифметически, как разность азимутов падения этих плоскостей ($\epsilon = 60 - 20 = 40^\circ$).

IV.10 Определение азимута падения сместителя по его углу падения и известной линии скрещения.

Возможны случаи, когда азимут падения сместителя не удастся измерить непосредственно горным компасом (например, из-за близости магнитных масс в забое разведочной горной выработки), в то время как угол падения плоскости сместителя легко поддается измерению.

Рассмотрим конкретный пример. Предположим, геологической съемкой установлено, что выход угольного пласта срезается сместителем сброса в точке A (рис. IV.6, a). Рассечкой, пройденной

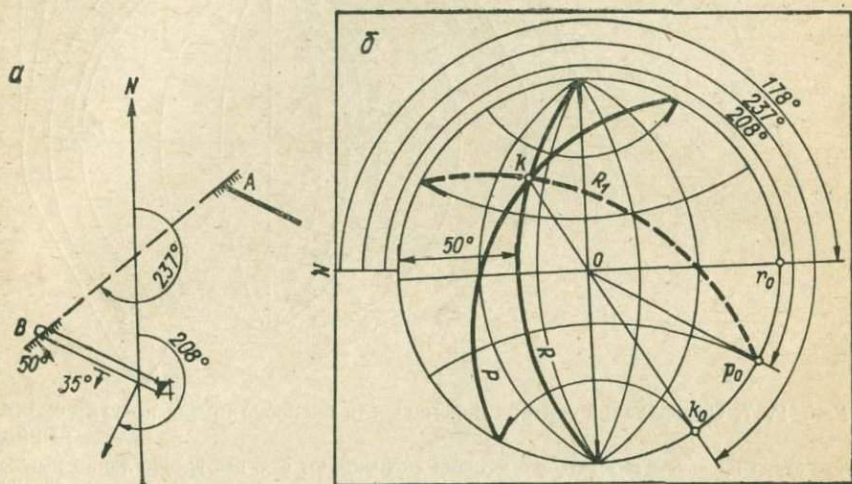


Рис. IV.6. Определение азимута падения плоскости сместителя по известной линии его пересечения с пластом.

из разведочного шурфа по простиранию пласта, тот же сместитель встречен в точке B , где измерен его угол падения, равный 50° (падение сместителя и пласта согласное). Азимут линии скрещения AB , измеренный транспортиром на плане, равен 237° . Угол падения пласта, измеренный в рассечке, оказался равным 35° , а азимут его падения, снятый с плана, составляет 208° .

Вначале построим дуговую проекцию плоскости пласта P (рис. IV.6, b) и, отметив на внешней окружности азимут линии скрещения 237° точкой k_0 , найдем проекцию этой линии k на пересечении продолжения радиуса ok_0 и дуги P , т. е. решим задачу построения линии заданного азимута в данной плоскости (см. пункт I.21). Затем, вращая кальку вокруг центра сетки, совместим найденную проекцию линии скрещения k с меридианом сетки R , отвечающим измеренному углу падения сместителя $\alpha = 50^\circ$. При этом необходимо следить, чтобы общее направление падения плоскости сместителя соответствовало задокументированному в выработке. В данном случае в забое рассечки установлено согласное падение плоскостей пласта и сместителя, а поэтому и на

стереограмме из двух возможных положений плоскости сместителя R и R_1 выбрано то (R), которое соответствует согласному падению сместителя. Скопировав меридиан R на кальку, получим проекцию плоскости сместителя (178° , $\angle 50^\circ$).

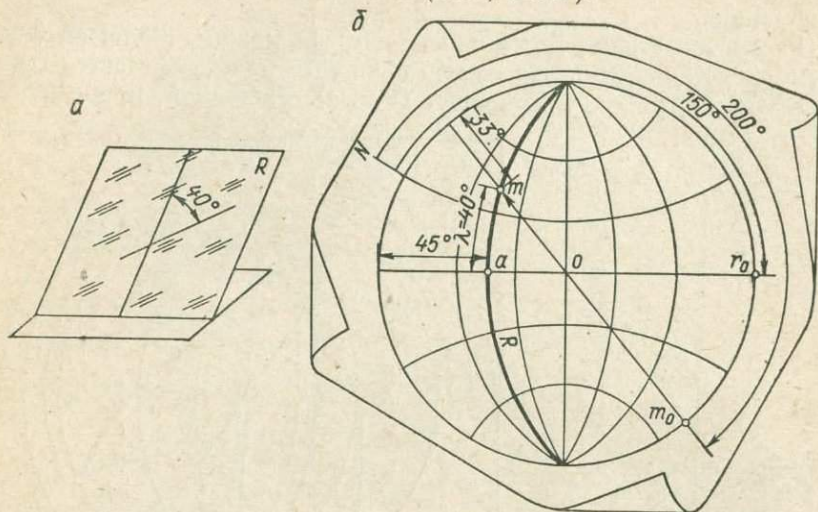


Рис. IV.7. Определение вектора перемещения висячего крыла по углу скольжения.
 а — схема плоскости сместителя с метками скольжения; б — построение линии перемещения.

IV.11. Определение направления вектора относительного перемещения висячего крыла разрывного смещения по ориентировке меток движения на поверхности сместителя.

При изучении меток движения на поверхности сместителя (штрихов, борозд, гребней) обычно измеряется так называемый угол скольжения λ — угол в плоскости сместителя между линией его падения (восстания) и направлением меток движения.

Пусть в плоскости сместителя (150° , $\angle 45^\circ$) измерен угол склонения борозд скольжения λ , равный 40° , по ходу часовой стрелки от линии восстания (рис. IV.7, а). Форма борозд указывает, что висячее крыло перемещалось вверх по отношению к лежащему, т. е. разрывное смещение является взбросо-сдвигом.

Построив дуговую проекцию плоскости сместителя R , совместим ее с соответствующим меридианом сетки (рис. IV.7, б). На пересечении меридиана R с экватором найдем точку a — проекцию линии восстания плоскости R . Затем по градусным делениям меридиана отсчитаем от точки a угол $\lambda = 40^\circ$ (по условию задачи этот угол отсчитывается в направлении хода часовой стрелки). Найденная точка t является проекцией линии перемещения. Ее элементы залегания, найденные обычным способом (см. пункт I.11): азимут наклона 200° , угол наклона 33° . Однако, поскольку

перед нами стояла задача определения направления относительного перемещения всячего крыла (напомним, что по условиям задачи последнее перемещалось вверх), вместо азимута и угла наклона вектора мы должны записать азимут линии восстания 20° и угол восстания 33° .

Определение вектора относительного перемещения всячего крыла разрывного смещения по оперяющей трещине. Предположим, что вблизи от сместителя (310° , $\angle 65^\circ$) измерены элементы залегания оперяющей трещины отрыва (338° , $\angle 47^\circ$).

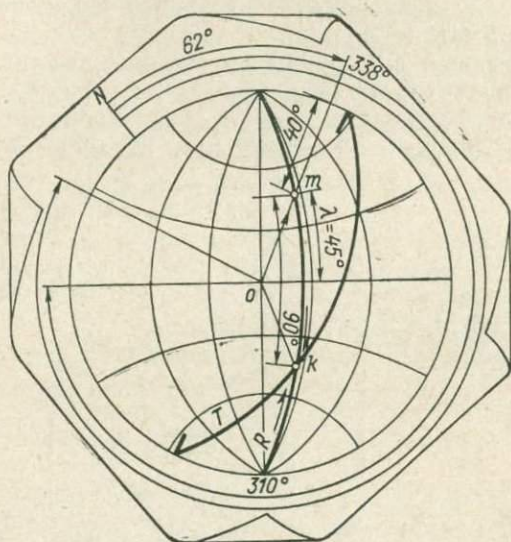


Рис. IV.8. Определение вектора перемещения крыла разрыва по ориентировке оперяющих трещин отрыва.

Известно [8, 22], что линия скрещения оперяющей трещины или сперяющего разрыва со сместителем перпендикулярна к линии перемещения крыльев. Построив дуговые проекции плоскостей сместителя R и трещины T , найдем проекцию их линии скрещения k (рис. IV.8). Совместив дугу R с соответствующими меридианом сетки и отсчитав по его градусным делениям 90° от точки k , получим точку m — проекцию линии перемещения.

Известно также, что вершина острого двугранного угла, образуемого оперяющей трещиной отрыва с плоскостью сместителя, обращена в сторону относительного смещения данного крыла разрывного смещения. Как видно из рис. IV.8, направление отрезка om совпадает с направлением, в котором обращена вершина острого двугранного угла между плоскостями T и R в всячем

крыле сместителя. Следовательно, висячее крыло перемещалось относительно лежащего вверх в диагональном направлении, т. е. разрывное смещение является взбросо-сдвигом.

Элементы залегания вектора относительного смещения висячего крыла: азимут восстания 62° , угол восстания 40° . Отсчитав по дуге меридиана R число градусов между экватором сетки и точкой m , получим угол склонения линии перемещения $\lambda = 45^\circ$. При таком значении угла λ размеры взбросовой и сдвиговой составляющих перемещения равны между собой (их отношение равно котангенсу угла λ).

IV.13 Определение вектора относительного перемещения по смещению крыльев складки.

Если разрывным смещением пересечены две непараллельные структурные поверхности (две минеральные жилы, имеющие различные элементы залегания, два крыла складки либо пласт и секущая жила), то вектор относительного перемещения может быть

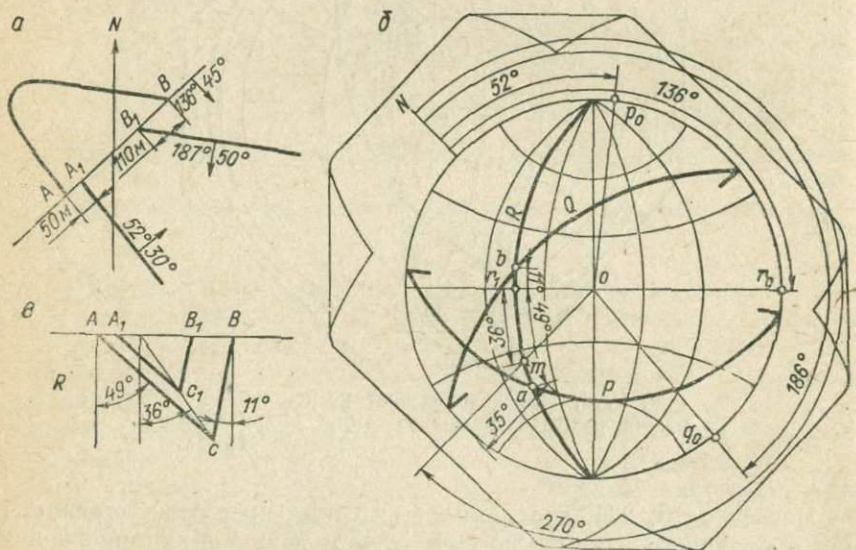


Рис. IV.9. Определение вектора перемещения крыла разрыва по геометрическому положению крыльев складки.

установлен по размеру смещения этих поверхностей [61, 22 и др.]. В этом случае часть построений выполняется на отдельном чертеже, составленном в плоскости сместителя.

На выкопировке из геологической карты (рис. IV.9, а) представлена асимметричная синклиналиальная складка, пересеченная разрывным смещением. Выход северного крыла складки (187° , $\angle 50^\circ$) смещен по простиранию сместителя (136° , $\angle 45^\circ$) на 110 м, в то время как выход южного крыла (52° , $\angle 30^\circ$) всего на 50 м.

Пользуясь стереографической сеткой, построим на кальке (рис. IV.9, б) проекции плоскостей сместителя R , южного крыла складки P и северного Q и найдем проекции a и b линий скрещений крыльев P и Q со сместителем R . Совместив дугу R с соответствующим меридианом сетки, отсчитаем от проекции r_1 линии падения сместителя углы склонения линий скрещения. Оказалось, что линия скрещения южного крыла OA отклоняется от линии падения против хода часовой стрелки на 49° , а линия скрещения северного крыла OB — по ходу часовой стрелки на 11° . Дальнейшие построения выполним на отдельном чертеже (рис. IV.9, в), который представляет собой разрез в плоскости сместителя R .

Перенеся на линии горизонта точки выходов пласта висячем A_1B_1 и лежащем AB крыльях, отложим углы склонения следов крыльев плоскости сместителя 49 и 11° . На пересечении следов получим точки C и C_1 , которые являются первоначально смежными. Соединив их прямой линией, получим направление вектора перемещения в плоскости сместителя. Его угол склонения λ составил 36° против хода часовой стрелки. Длина отрезка CC_1 равна перемещению по сместителю (150 м).

Возвращаясь к стереограмме (рис. IV.9, б), отложим от проекции линии падения сместителя r_1 угол 36° и получим проекцию m вектора перемещения висячего крыла. Его элементы залегания: азимут восстания 270° , угол восстания 35° (висячее крыло смещено вверх). Отношение взбросовой составляющей перемещения к сдвиговой оказалось равным $\text{ctg } 36^\circ = 1,376$.

Применение метода изолиний для определения вектора IV.14 перемещения.

Если крылья разрывного смещения по одному и тому же пласту детально изучены разведочными скважинами или горными выработками, то для определения вектора относительного перемещения крыльев может быть привлечен разработанный А. А. Трофимовым метод изолиний [49]. Этот метод основан на построении карт в изолиниях различных показателей пласта (общей мощности, мощности отдельных пачек и прослоек, содержания того или иного компонента и т. д.) и в отыскании точек с равными или экстремальными значениями этих показателей на обеих линиях скрещения. Такие точки считаются первоначально смежными, а линия, соединяющая их в плоскости сместителя, соответствует линии перемещения.

Важным условием применения метода изолиний является требование первичности того признака, по которому производится построение изолиний. Первичными, например, т. е. сформировавшимися еще в период торфонакопления, признаками считаются зольность угольного вещества, содержание органической серы, некоторых редких и рассеянных элементов, мощность пласта и отдельных его пачек в слабо дислоцированных месторождениях. Особенно ценными в этом отношении являются

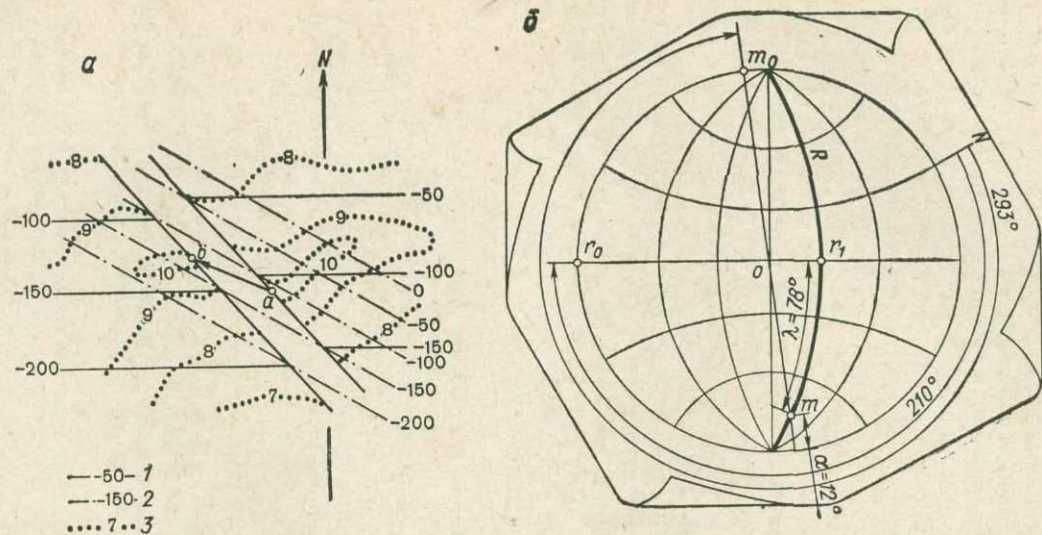


Рис. IV.10. Определение вектора перемещения крыла разрыва по методу А. А. Трофимова.

a — схематическая выкопировка из гипсометрического плана угольного пласта, разорванного смещением сбросового типа; *b* — стереограмма плоскости сместителя.
 1 — изогипсы пласта; 2 — изогипсы сместителя; 3 — изолинии зольности угля, %.
 Точки *a* и *b* — первоначально смежные точки крыльев.

изменения мощности, связанные с сингенетичными русловыми размывами угольного пласта.

В то же время такие признаки, как выход летучих, пластометрические показатели, изменения мощности, связанные с тектоническими пережимами и вздутиями, для восстановления вектора перемещения непригодны, так как процессы углефикации и тектонического воздействия на структуру и мощность пластов могли продолжаться и после формирования разрывного смещения.

При использовании метода изолиний стереографические проекции могут быть применены как вспомогательный инструмент для определения угловых характеристик смещения. На рис. IV.10, а приведена схематическая выкопировка из гипсометрического плана угольного пласта, разорванного смещением сбросового типа, на которую нанесены изолинии зольности, очерчивающие удлиненную аномалию, где зольность принимает максимальное значение, превышающее 10%. Очевидно, что точки *a* и *b* линий скрещения лежачего и висячего крыльев, в которых зольность принимает максимальное значение, являются первоначально смежными, а отрезок *ab* в плоскости сместителя соответствует линии перемещения. Допустим, что сместитель имеет элементы залегания 210° , $\angle 60^\circ$, а азимут линии перемещения *ab* составляет 293° . Тогда, построив стереограмму плоскости сместителя *R* по его элементам залегания (рис. IV.10, б) и отметив точкой m_0 азимут линии *ab*, найдем на пересечении дуги *R* с продолжением радиуса om_0 точку *m* — проекцию линии перемещения. Ее угол наклона, измеренный между точкой *m* и ближайшим концом проведенного через нее диаметра, равен 12° , а угол скольжения λ , определенный в плоскости *R* между линией падения последней и линией скрещения, составляет 78° . Таким образом, оказалось, что разрывное смещение является не сбросом, как можно было бы предположить на основании его геометрической формы, а сбросо-сдвигом со значительным преобладанием сдвиговой составляющей. Отношение сбросовой составляющей к сдвиговой в данном примере равно $\text{ctg } 78^\circ = 0,213$.

Определение составляющих амплитуды перемещения.

IV.15

Зная одну из составляющих амплитуды смещения пласта и угловые характеристики разрывного смещения, можно определить и другие ее составляющие. Так, если известно горизонтальное разобшение крыльев по простиранию сместителя *AB* (рис. IV.11, а), то нормальное горизонтальное разобшение (отход) *AD* можно определить из прямоугольного треугольника *ABD* либо как произведение стороны *AB* на синус угла встречи ϵ , либо графически, построив треугольник *ABD* на отдельном чертеже (рис. IV.11, в). Нормальную амплитуду *DE* определим из прямоугольного треугольника *ADE* как произведение отхода *AD* на синус угла падения пласта α , либо из прямоугольного треугольника *ABC*, умножив горизонтальное разобшение *AB* на косинус угла ψ между

линией простирания сместителя AB и нормалью к плоскости пласта BC . Этот угол определим на стереограмме (рис. IV.11, б), совместив линию простирания плоскости сместителя R с центральным меридианом сетки и отсчитав число градусов между полюсом плоскости напластования p и ближайшим концом центрального меридиана. Отсчет угла ψ производится по градусным делениям того меридиана сетки Z , на который ляжет в этом положении кальки полюс p .

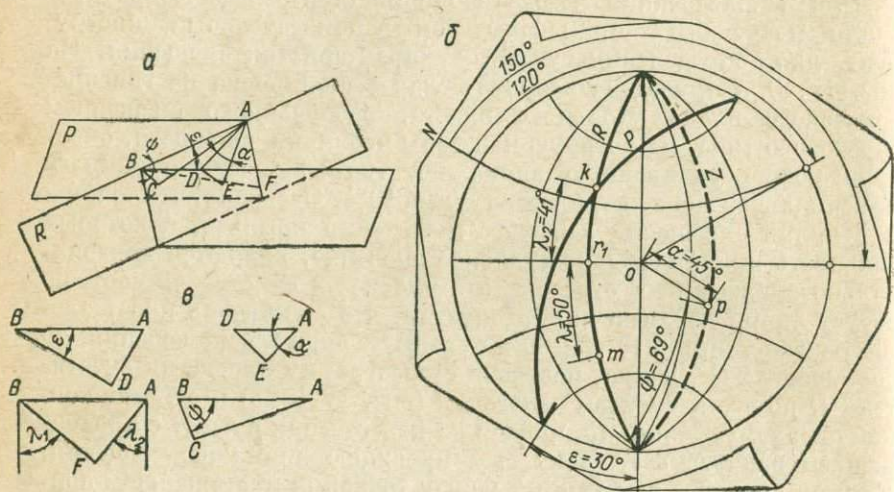


Рис. IV.11. Определение составляющих амплитуды разрывного нарушения.

Аналогичным образом, строя соответствующие треугольники, можно решать обратную задачу: определение отхода или разобщения по известной нормальной амплитуде.

Если известно положение линии перемещения в плоскости сместителя, может быть определена также полная амплитуда перемещения. Так, если известен угол склонения линии перемещения FB (угол скольжения λ_1), то перемещение (полная амплитуда) определится из косоугольного треугольника ABF (см. рис. IV.11, а, б), где сторона AB — известное разобщение, а BF — искомое перемещение. Направления сторон BF и AF определяются углами склонения λ_1 и λ_2 . Более точно перемещение можно определить аналитически, пользуясь теоремой синусов: $BF = AB \cos \lambda_2 / \sin (\lambda_1 + \lambda_2)$. Необходимое для решения задачи значение угла склонения линии скрещения λ_2 определим на стереограмме (рис. IV.11, б), пользуясь указаниями пункта IV.7.

На рис. IV.11 приведено решение задачи при следующих исходных данных: плоскость сместителя R (150° , $\angle 60^\circ$), плоскость пласта P (180° , $\angle 45^\circ$), разобщение по простиранию сместителя $AB = 34$ м, угол скольжения $\lambda_1 = 50^\circ$ против хода часовой

стрелки. В результате построений получены следующие значения: угол встречи $\varepsilon = 30^\circ$, угол склонения линии скрещения $\lambda_2 = 41^\circ$ по ходу часовой стрелки, отход AD составил 17 м, угол $\psi = 69^\circ$, нормальная амплитуда $BC = DE = 12$ м, полная амплитуда $FB = 26$ м.

Дешифрирование разрывных смещений на аэрофотоснимках. IV.16

Сместители разрывных смещений обнаруживаются на аэрофотоснимках по ряду дешифрирующих признаков, характер которых зависит от ландшафтной зоны (степь, тундра, тайга, пустыня), от степени расчлененности рельефа (равнинный, холмистый, горный), от степени обнаженности изучаемого комплекса пород, их литологического состава и ряда других факторов [37, 29, 54].

Часто сместители фиксируются по более или менее четким линейно вытянутым границам участков с различным рисунком или тоном фотоизображения. В открытых районах (Донбасс, Казахстан) важнейшим признаком разрывных смещений является наличие определенной линии, вдоль которой смещены контакты слоев пород. В закрытых районах на первое место выступают косвенные признаки, такие как линейное расположение ложбин, ручьев, приуроченность влаголюбивой растительности к определенным линейным зонам. Разрывные смещения, сформированные новейшими и современными тектоническими движениями, часто обнаруживаются по наличию уступов в современном рельефе, по смещению речных долин и хребтов.

В связи с тем что в зонах разрывных смещений породы имеют пониженную механическую прочность, выходы сместителей часто бывают более разрушены и задернованы, чем окружающие их ненарушенные породы. Поэтому сместители, как правило, не образуют четких фигур сечения с рельефом местности, подобных «пластовым треугольникам» (см. пункт III.5).

Дешифрирование аэрофотоснимков чаще всего дает возможность определить лишь простираание сместителей [20]. Определение угла падения представляет собой более трудную задачу и возможно лишь тогда, когда имеется выход сместителя на двух разных склонах. Такой выход представляет собой, по существу, тот же «пластовый треугольник», только образованный плоскостью сместителя. При наличии стереопары плановых аэрофотоснимков, запечатлевших выход сместителя, азимут и угол падения последнего могут быть определены тем же способом, что и элементы залегания любой другой структурной плоскости — пласта, поверхности несогласия, магматического контакта и т. п. Рис. IV.12,а демонстрирует пример дешифрирования разрывного смещения по аномальному рисунку гидросети. На фоне извилистых дендритообразных водотоков, развитых в бассейне реки, выделяются своей прямолинейностью и аномальной направленностью два водотока, приспособившиеся к ослабленной зоне выхода разрывного смещения. Выходы AB и CB на правом и левом бортах речной до-

лины имеют неодинаковое видимое простираение, что позволяет использовать треугольник ABC , лежащий в плоскости сместителя, для определения элементов залегания последнего.

Пользуясь стереоприборами, снабженными специальным приспособлением (рис. IV.12, б), можно определить азимут и угол падения плоскости треугольника ABC методом горизонтальной

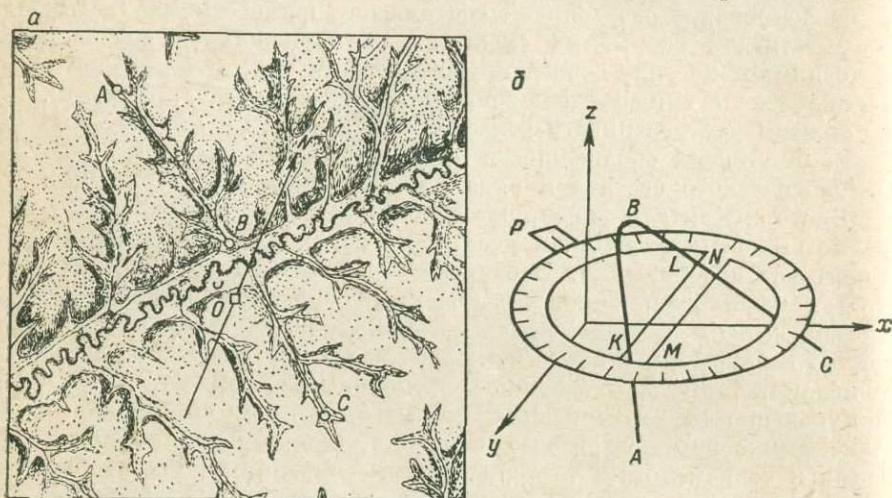


Рис. IV.12. Определение элементов залегания сместителя разрывного нарушения на аэрофотоснимке.

а — подготовленный аэрофотоснимок (AB и BC — отделифированные линии выхода сместителя; O — главная точка аэрофотоснимка); б — приспособление для определения элементов залегания плоскостей методом горизонтальной линии (по В. Е. Гендлеру [9]).

линии [9]. Для этого, поместив в поле зрения стереоприбора оба снимка стереопары и добившись стереоскопического эффекта, пространственную модель горизонтальной линии KL совмещаем путем поворота и изменения параллакса с двумя произвольными точками треугольника ABC . На круговой шкале приспособления против индекса P отсчитываем азимут простираения плоскости сместителя. Угол падения плоскости α определим, совместив с ней при помощи параллактического винта модель второй горизонтальной линии MN и определив разность Δp параллаксов между двумя положениями линии простираения. Зная расстояние l между линиями KL и MN , найдем угол α по формуле $\text{tg } \alpha = \frac{\Delta p}{bl}$, где f_k — фокусное расстояние фотокамеры; b — базис фотографирования.

В случае отсутствия специальной аппаратуры, например в полевых условиях, определение азимута и угла падения сместителя может быть выполнено при помощи стереографических проекций.

Напомним, что подготовка стереопары состоит в нахождении на каждом из двух снимков главных точек и трех точек выхода

пласта (на рис. IV.12, *a* главная точка снимка обозначена буквой *O*, а точки выхода — буквами *A*, *B* и *C*) и в определении на каждом из снимков азимутов линий видимых выходов *AB* и *CB*, а также азимута и угла наклона проектирующего луча для общей точки выходов *B*.

Построения в стереографической проекции включают в себя нахождение проекций выходов сместителя (они определяются пересечением соответствующих проектирующих плоскостей) и определение положения плоскости сместителя по двум лежащим в ней прямым *AB* и *CB*. Порядок действий по определению ориентировки сместителя аналогичен описанному в пункте III.5 случаю определения элементов залегания пласта.

Полученные по измерениям на аэрофотоснимках элементы залегания сместителей разрывных смещений в сочетании с результатами измерений ориентировки смещенных пластов и амплитуд смещения являются ценными данными для получения полной характеристики разрывных смещений.

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛЕВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТРЕЩИН

Определение пространственного соотношения трещин со складками и разрывными смещениями

V.1 Трещины широко распространены во всех горных породах и в углях. В пределах больших участков месторождений встречается множество однотипных трещин, подчиняющихся общим закономерностям ориентировки.

В практике горного дела и инженерной геологии иногда возникает необходимость сопоставления выявленных статистической обработкой средних элементов залегания трещин с элементами залегания пласта, всей угленосной толщи, осевой плоскости складки или сместителя разрывного смещения. Решение этой задачи в стереографической проекции сводится к построению стереограммы в истинной или условной системе стереографических координат, связанной с элементами залегания пласта.

Делимость горных пород на блоки также является одним из факторов, определяющих физико-механические свойства массива пород, в частности их поведение в кровле горных выработок. Если известны средние значения элементов залегания систем трещин и средние нормальные расстояния между трещинами каждой системы, геометрическая форма и размеры блоков определяются при построении макета на основе стереограммы.

При геологическом изучении трещин иногда возникает вопрос о последовательности образования систем трещин и складчатых структур. Частной задачей в этой области является определение с помощью стереографических проекций доскладчатой ориентировки трещин, развитых в крыльях складки, с целью установления их первичности по отношению к складкообразованию.

Данные об ориентировке трещин представляют особую ценность, если они получены по керну скважин во время проведения геологоразведочных работ.

Методика полевых наблюдений за трещиноватостью пород в кернах скважин изложена в специальной литературе [31 и др.]. Одной из интересных задач в интерпретации результатов измере-

ний трещин является определение истинной ориентировки трещин по измерениям в керне наклонных и искривленных скважин.

Кроме обычных тектонических трещин в осадочных горных породах угленосных толщ наблюдается скрытая делимость — кливаж (расщепление пород на тонкие плитки по взаимно параллельным плоскостям, секущим седиментационную слоистость). Но это явление в угольных бассейнах встречается довольно редко и проявляется лишь в тех районах, где вторичные изменения пород достигли наибольшей интенсивности, приблизившись к начальной стадии метаморфизма. На дневной поверхности по плоскостям кливажа развиваются частые трещины выветривания, ориентировка которых легко поддается измерению, на глубине же кливаж может макроскопически не выявляться, обнаруживаясь лишь при микроскопическом исследовании шлифов.

При изучении кливажа практический интерес представляет определение ориентировки его плоскостей по измерениям в плоских шлифах, вырезанных из керна.

Построение стереограммы систем трещин и пласта.

V.2

В пункте II.6 приводились статистические данные обработки результатов измерений 130 трещин отдельности пород долинской свиты на северо-западном крыле Тентекской синклинали (Карагандинский бассейн). Как показала статистическая обработка,

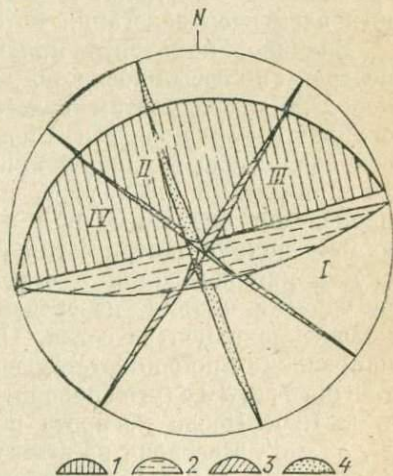


Рис. V.1. Стереогрaмма систем трещин отдельности, наблюдаемых в породах долинской свиты (северо-западное крыло Тентекской синклинали, Карагандинский бассейн).

1 — плоскость напластования пород; 2 — плоскость продольной трещины; 3 — плоскости диагональных трещин; 4 — плоскость поперечной трещины.

трещины отдельности группируются здесь в четыре системы: I (348° , $\angle 66^\circ$), II (72° , $\angle 83^\circ$), III (303° , $\angle 85^\circ$) и IV (37° , $\angle 88^\circ$). Чтобы выяснить угловые взаимоотношения между этими системами трещин и напластованием пород (165° , $\angle 18^\circ$), построим стереогрaмму по усредненным значениям элементов залегания плоскостей трещин и плоскости седиментационной слоистости. Техника построения стереогрaмм изложена в пункте I.33. Стереогрaмма (рис. V.1) позволяет не только измерить двугранные углы ме-

жду плоскостями всех четырех систем трещин и плоскостью напластования и определить положение линий скрещения этих плоскостей по отношению к линии падения или простирания пород, но и наглядно представить себе взаимное расположение этих плоскостей.

При рассмотрении стереограммы видно, что трещины отдельности всех четырех систем пересекают плоскость напластования под углами, близкими к прямому ($81-84^\circ$), т. е. являются нормально секущими. Система *I* по отношению к простиранию пород угленосной толщи является продольной, система *II* — поперечной, а системы *III* и *IV* — диагональными.

V.3 Определение элементов залегания трещин в системе координат пласта.

В этом случае следует произвести преобразование географической системы координат в систему, связанную с плоскостью напластования. В последней за плоскость проекции (условный горизонт) принимается плоскость напластования, а за нулевое направление отсчета азимутов трещин — направление падения слоя.

Построим стереограмму в такой приведенной системе стереографических координат для трещин отдельности, средние значения элементов залегания которых приведены в пункте V.2.

Вначале, пользуясь приемом, изложенным в пункте I.14, построим полюсы плоскостей всех систем трещин и напластования пород по их элементам залегания в географической системе координат. Затем произведем поворот сферы вокруг горизонтальной оси, совпадающей с линией простирания плоскости напластования до приведения последней в горизонтальное положение, т. е. произведем операцию, как в пункте I.30. Для этого, вращая кальку вокруг центра сетки (рис. V.2, а), совместим полюс плоскости напластования p с горизонтальным диаметром сетки и, не сдвигая кальки, переведем этот полюс по экватору в новое положение в центре сетки. Одновременно переместим в том же направлении по соответствующим параллелям полюсы плоскостей трещин *1*, *2*, *3* и *4* (угол поворота ω равен углу падения плоскости P , т. е. 18°). После поворота полюсы займут новое положение I' , $2'$, $3'$ и $4'$. Построив по этим полюсам дуговые проекции плоскостей I' , II' , III' и IV' , приемом, описанным в пункте I.29, осуществим второй поворот сферы, на этот раз вокруг вертикальной оси (рис. V.2, б). Угол второго поворота, осуществляемого против хода часовой стрелки, равен азимуту падения плоскости P , т. е. 165° . Практически этот поворот осуществляется перенесением нулевой отметки кальки из точки $N_{\text{ист}}$ в точку p_0 внешней окружности ($N_{\text{усл}}$).

Элементы залегания плоскостей трещин в новой системе координат отражают положение последних по отношению к плоскости пласта: «угол падения» отвечает двугранному углу между

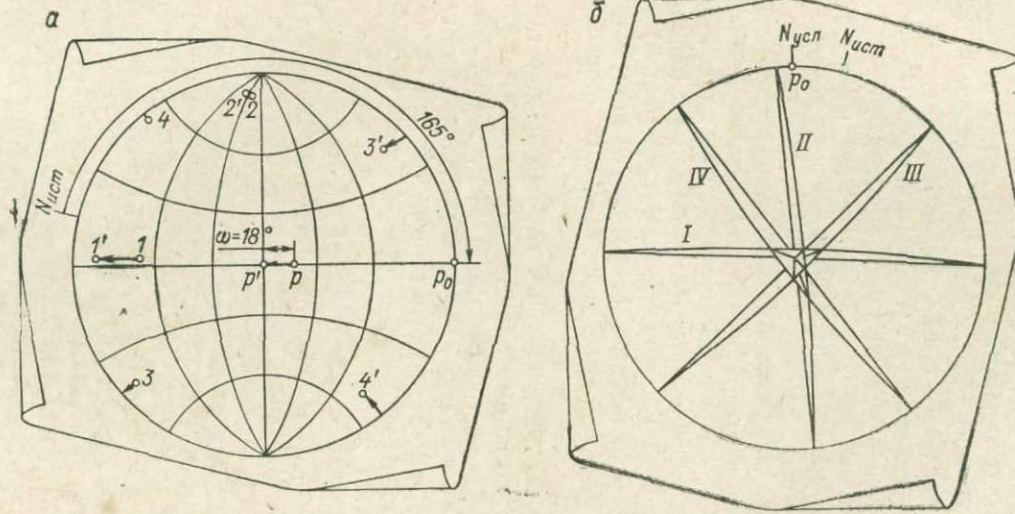


Рис. V.2. Построение стереограммы плоскостей трещин в системе координат, связанной с плоскостью напластования.

a — приведение плоскости напластования к горизонту; *b* — стереограмма трещин.

плоскостью данной трещины и плоскостью напластования, а «азимут падения», измеренный от новой нулевой отметки $N_{\text{усл}}$, определяется ориентировкой трещин по отношению к линии падения или простирания пласта: азимуты, близкие к 0 и 180°, имеют продольные трещины, азимуты, близкие к 90 и 270°, указывают на поперечную ориентировку трещин, а промежуточные значения азимутов характеризуют диагональное положение трещин. В данном случае новые элементы залегания систем трещин оказались следующими: I (продольная) 183°, \angle 83°; II (поперечная) 265°, \angle 84°; III (диагональная) 317°, \angle 82°; IV (диагональная) 53°, \angle 81°. Стереогаммы, составленные в такой приведенной системе координат, позволяют легко сопоставлять ориентировку трещин отдельности, развитых на участках крыльев складки, имеющих самые различные элементы залегания.

V.4 Построение элементарных блоков (отдельностей) пород.

Для обоснования тектонических построений, а также некоторых инженерно-геологических расчетов иногда возникает необходимость определения геометрической формы и размера выделяемых трещинами элементарных блоков (отдельностей) пород. Если известны элементы залегания и густота трещин, такую задачу легко решить построением при помощи стереографической сетки.

Допустим, пачка алевролитов с хорошо выраженной седиментационной слоистостью имеет азимут падения 130° и угол падения 10°. Породы рассечены трещинами T (340°, \angle 65°, густота 40 мм) и U (270°, \angle 70°, густота 70 мм). Определить форму и размер отдельности алевролитов с учетом того, что они свободно распадаются также по плоскостям седиментационной слоистости на плитки мощностью 20 мм.

Приемом, изложенным в пункте I.12, производим построение стереографических проекций плоскостей трещин и слоистости T , U и P (рис. V.3, а). Точки пересечения дуг T , U и P являются проекциями линий скрещения соответствующих плоскостей, т. е. ребрами параллелепипеда блока. Обозначим эти ребра буквенными индексами: p_x — линию скрещения плоскостей T и U , u_x — плоскостей T и P , t_x — плоскостей P и U . Построим также полюсы всех трех плоскостей t , u и p . Полюсы являются проекциями нормалей к граням блока отдельности, т. е. тех направлений, по которым определялось расстояние между плоскостями трещин и делимости по напластованию. Нам же для построения необходимо знать отрезки, отсекаемые гранями на ребрах блока. Для определения этих отрезков найдем углы между нормалью к каждой из систем плоскостей и ребром, образованным плоскостями двух других систем (способ определения угла между двумя прямыми приведен в пункте I.17). Угол между нормалью p и ребром p_x равен 17°, между нормалью t и ребром t_x 29°, а между нормалью u и ребром u_x 27°.

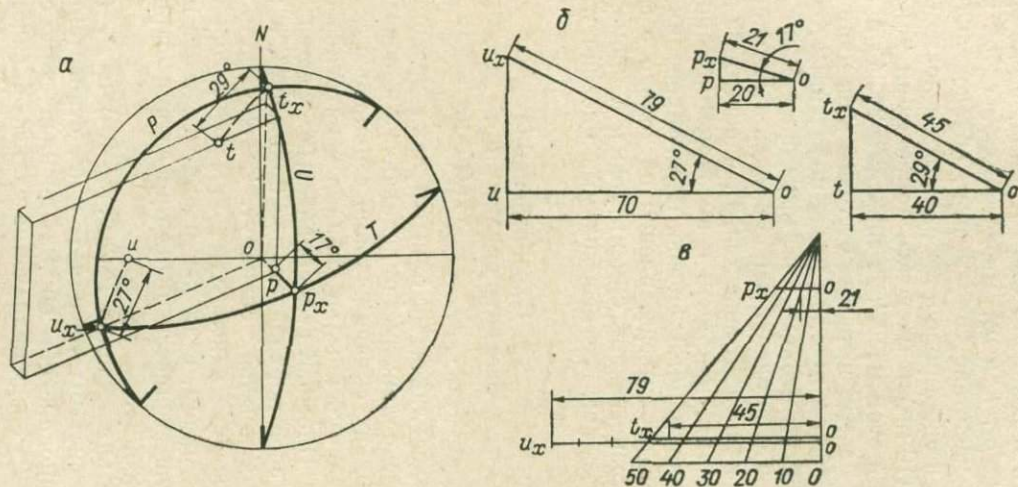


Рис. V.3. Построение элементарных блоков при помощи стереографической сетки.

Построим три прямоугольных треугольника с острыми углами 17 , 29 и 27° и прилежащими катетами, равными нормальным расстояниям между плоскостями систем P , T и U (рис. V.3, б). Гипотенузы этих треугольников дадут нам длины отрезков, отсекаемых плоскостями отдельности на ребрах p_x , t_x и u_x . Длины этих отрезков оказались равными соответственно 21 , 45 и 79 мм.

Учитывая, что отрезки на стереограмме, соединяющие центр сетки o с точками p_x , t_x и u_x , представляют собой радиус полусферы (50 мм) в масштабе сокращения, обусловленном способом проектирования, найдем пропорциональным делением (рис. V.3, в) единицу длины (10 мм) в масштабе сокращения для каждого из ребер и отмерим в этом масштабе значения 21 , 45 и 79 мм. Отложив эти отрезки на стереограмме от точки o по направлениям соответствующих ребер и проведя через полученные точки прямые, параллельные другим ребрам, получим форму блока отдельности (см. рис. V.3, а). Такое изображение блоков отдельности является условным и его нельзя отождествлять с общепринятыми способами проектирования, например с аксонометрическим или ортогональным; однако данный способ проектирования имеет свои преимущества: он дает представление не только о форме блока, но и о его пространственной ориентировке, а кроме того, позволяет легко определить все необходимые плоские и двугранные углы.

Преобразование элементов залегания трещин

V.5 Определение доскладчатой ориентировки трещин.

Проверить предположение о доскладчатом образовании трещин в обоих крыльях складки можно с помощью стереографической проекции, вернув крылья складки в исходное горизонтальное положение. Плоскости доскладчатых трещин возвратятся в этом случае в свое первоначальное положение, а их элементы залегания в обоих крыльях совпадут. Если шарнир складки горизонтален, приведение каждого из крыльев к горизонту осуществляется в один прием, если же шарнир залегает наклонно, то эта операция осуществляется после приведения шарнира в горизонтальное положение.

Пусть в крыльях складки P (20° , $\angle 40^\circ$) и P_1 (165° , $\angle 60^\circ$) обнаружены две системы трещин T и U , относительно которых существует предположение об их доскладчатом образовании. На крыльях P и P_1 , средние значения элементов залегания систем трещин соответственно таковы: T (310° , $\angle 84^\circ$), U (52° , $\angle 66^\circ$) и T_1 (276° , $\angle 28^\circ$), U_1 (119° , $\angle 63^\circ$). Порядок действий при решении данной задачи в основном аналогичен описанному в пункте I.31.

Прежде всего построим полюсы плоскостей крыльев p и p_1 и трещин t , t_1 , u и u_1 по их элементам залегания и, руководствуясь указаниями пунктов IV.2 и I.24, найдем проекцию шарнира

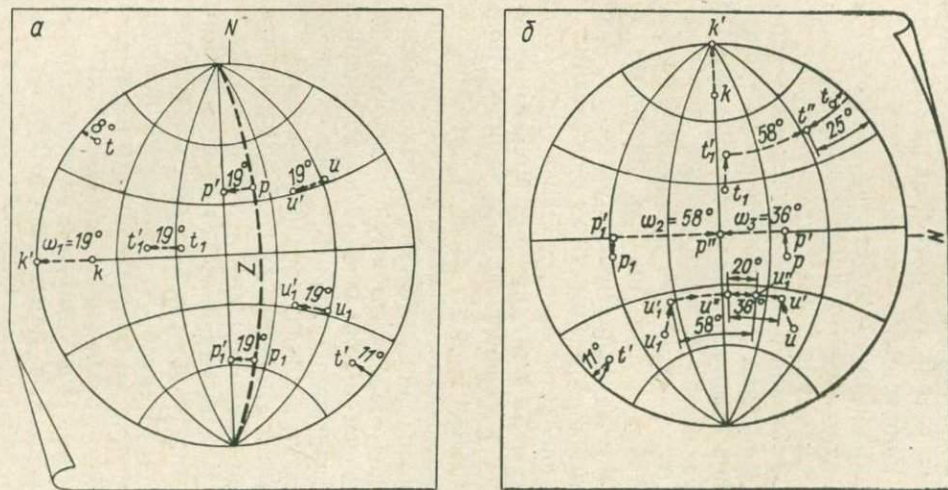


Рис. V.4. Определение доскладчатой ориентировки первичных трещин.

складки k . Напомним, что точка k является полюсом плоскости Z (рис. V.4, а), в которой лежат полюсы плоскостей крыльев p и p_1 . Совместив точку k с экватором сетки, переместим ее по линии экватора на внешнюю окружность сетки (в точку k') и отсчитаем по градусным делениям экватора угол поворота ω_1 , равный в данном случае 19° . Точки p , p_1 , t , t_1 , u и u_1 также переместим по соответствующим параллелям на тот же угол ω_1 , соблюдая указания пункта I.30. Таким образом, мы осуществили первый поворот сферы, в результате которого шарнир складки принял горизонтальное положение.

Поворотом кальки на 90° добьемся совмещения точки k' с одним из концов центрального меридиана (рис. V.4, б). Точки p' и p'_1 при этом окажутся на экваторе сетки. Теперь остается вторым поворотом вокруг горизонтальной оси, совпадающей с шарниром k' , привести крылья складки в горизонтальное положение. Такой поворот выполняется отдельно для каждого крыла. Полюс крыла p' переместим по экватору в центр сетки (точку p'') и, отсчитав угол поворота ω_2 , равный 58° , переместим по соответствующей параллели на тот же угол полюсы связанных с этим крылом систем трещин t' и u' . Аналогичную операцию выполним с полюсами другого крыла p'_1 и связанных с последним систем трещин t'_1 и u'_1 (угол поворота ω_2 равен 36°). В результате поворота полюсы систем трещин t' и t'_1 пришли в одну и ту же точку t'' , что подтверждает их доскладчатое образование. Полюсы же двух других систем трещин u' и u'_1 , хотя и перемещались по одной и той же параллели, однако попали в две точки u'' и u''_1 , отстоящие друг от друга по параллели сетки на некоторый угол (в данном случае 20°). Такое «перекрытие» углов поворота показывает, что трещины данной системы образовались на раннем этапе формирования складки, а размер «перекрытия» дает возможность определить форму складки в момент образования данной системы трещин (вычтя угол «перекрытия» 20° из 180° , мы получим угол складки в момент образования трещин).

Отметим, что в тех случаях, когда одно из крыльев складки опрокинuto, для получения правильного результата необходимо, осуществляя второй поворот, выводить полюс опрокинутого крыла к центру сетки не по кратчайшему пути, а через горизонт, т. е. вначале к ближайшему краю сетки, а затем от противоположного края к центру. При этом угол поворота крыла и связанных с ним систем трещин будет превышать 90° .

V.6 Определение ориентировки трещин по измерениям в керне наклонных и искривленных скважин.

В неориентированном керне вертикальных скважин азимуты и углы падения трещин можно определить геометрическим способом [31 и др.]. В этом случае видимый в керне угол падения трещины, измеренный по отношению к плоскости, перпендикулярной к оси керна, равен истинному углу падения трещины, а вместо

азимута ее падения в керне измеряется так называемый **условный азимут** — угол между направлением падения слоистости пород и направлением падения трещины. Если этот угол измерялся по ходу часовой стрелки, то азимут падения трещины будет равен сумме ее условного азимута падения и азимута падения толщи пород в месте заложения скважины, который измеряется либо транспортиром на гипсометрическом плане или геологической карте, либо непосредственно в поле горным компасом.

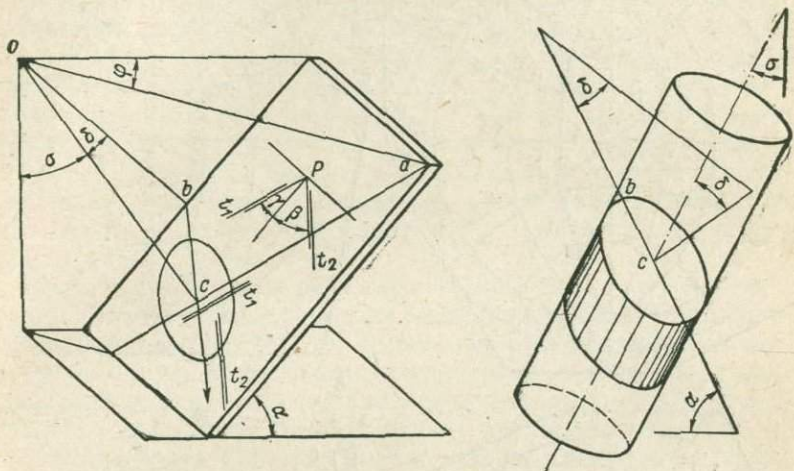


Рис. V.5. Геометрические элементы керна

Измерения условных азимутов и видимых углов падения трещин удобно производить специальными угломерными палетками или угломером ДонбассНИЛ [33].

Если скважина задана наклонно или получила в процессе бурения значительное (более $3-5^\circ$) искривление, то условные азимуты и видимые углы падения трещин уже не могут быть преобразованы в истинные столь простым способом. Измеренные в керне наклонных скважин видимые углы падения трещин и других структурных плоскостей не соответствуют их истинным углам падения, азимутальные угловые взаимоотношения между слоистостью и трещинами также изменяются. Пример такого изменения приведен на рис. V.5, где две системы трещин t_1 и t_2 , в действительности являющиеся диагональными по отношению к плоскости пласта P , в керне наклонной скважины os выглядят как поперечная и продольная системы.

Для преобразования видимых в керне элементов залегания трещин в истинные в таких случаях требуется производить геометрические построения в стереографической проекции.

Рассмотрим порядок этих построений на конкретном примере. Пусть в керне произвольно наклоненной скважины (азимут

наклона 100° , зенитный угол 24°) наблюдаются две тектонические трещины: трещина T имеет условный азимут падения 72° , видимый угол падения 51° , трещина U — условный азимут падения 285° ,

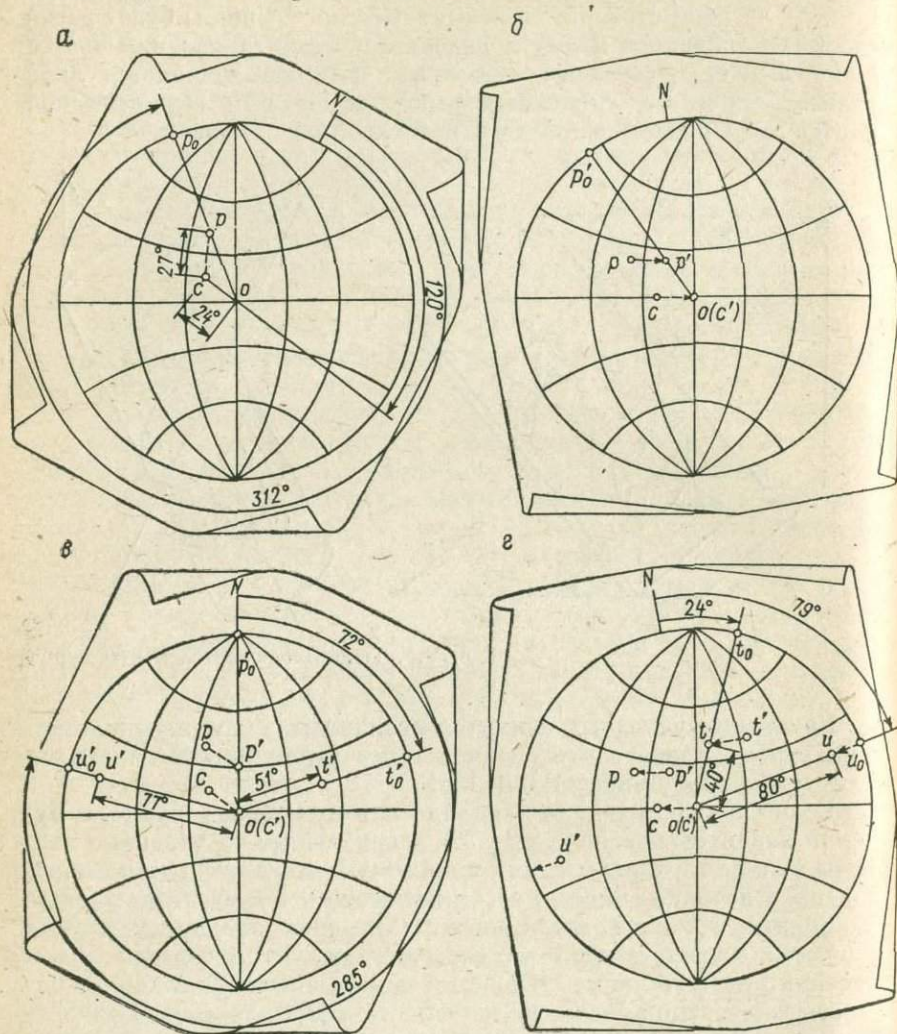


Рис. V.6. Преобразование видимых в кернах элементов залегания трещин в истинные.

угол падения 77° . Азимут падения пород в месте заложения скважины, измеренный на геологической карте, равен 312° . Видимый угол падения пород в кернах составил 27° .

Первой операцией является построение полюса плоскости напластования (более подробно эта операция описана в пункте III.6). Построив проекцию скважины s по инклинометрическим

измерениям и проведя радиус op_0 по известному азимуту падения пород 312° (рис. V.6, а), подберем вращением кальки меридиональную дугу, число градусных делений которой между точкой c и радиусом op_0 равно видимому углу падения пород 27° . Найденная точка p является полюсом плоскости напластования.

Теперь поворотом сферы приведем ось скважины в вертикальное положение, т. е. придадим керну такое положение, в котором измерялись условные азимуты и видимые углы падения трещин. Для этого, совместив поворотом кальки проекцию скважины c с экватором сетки (рис. V.6, б), переместим ее по экватору в центр сетки. Одновременно переместим по соответствующей параллели сетки полюс плоскости напластования p . Угол поворота сферы ω равен зенитному углу скважины, т. е. 24° , а новое положение полюса p' соответствует тому положению, которое занимает плоскость напластования при вертикальном положении керна. Прочертив через точку p' радиус op'_0 , мы получим то направление, относительно которого измерялись условные азимуты падения трещин.

Приняв точку p'_0 за условную северную отметку кальки, построим полюсы трещин t' и u' по их условным азимутам и видимым углам падения (рис. V.6, в). Теперь остается обратным поворотом сферы повернуть ось скважины (керна) в первоначальное, наклонное положение (в этом повороте должны участвовать и полюсы трещин). Осуществив этот поворот с соблюдением правил, изложенных в пункте I.30, мы получим полюсы плоскостей трещин t и u в том положении, какое эти плоскости занимали в массиве пород (рис. V.6, г). Их азимуты падения, измеренные относительно северной отметки кальки, составляют соответственно 24 и 79° , а углы падения — 40 и 80° .

Определение ориентировки плоскостей кливажа по измерениям в ориентированных шлифах. V.7

Предположим, что плоскости кливажа обнаружены в керновом образце алевролита, взятом из вертикальной скважины. Видимый угол падения слоистости составил 40° , азимут падения пород в месте заложения скважины 140° .

В соответствии с установившейся практикой микроструктурного анализа [15] вырежем из образца (рис. V.7, а) три плоских шлифа в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Эти плоскости определяются тремя условными координатными осями, одна из которых (а) совпадает с линией падения слоистости, вторая (б) — с линией простирания, а третья (с) перпендикулярна к двум первым и направлена вверх. Шлиф 1 вырезан в плоскости ac , шлиф 2 — в плоскости bc и шлиф 3 — в плоскости ab .

В шлифах под микроскопом измерены углы между одной из осей и следом плоскости кливажа (удобнее брать ту ось, которая совпадает со следом слоистости в шлифе). Эти углы отсчитываются по ходу часовой стрелки с помощью шкалы предметного столика

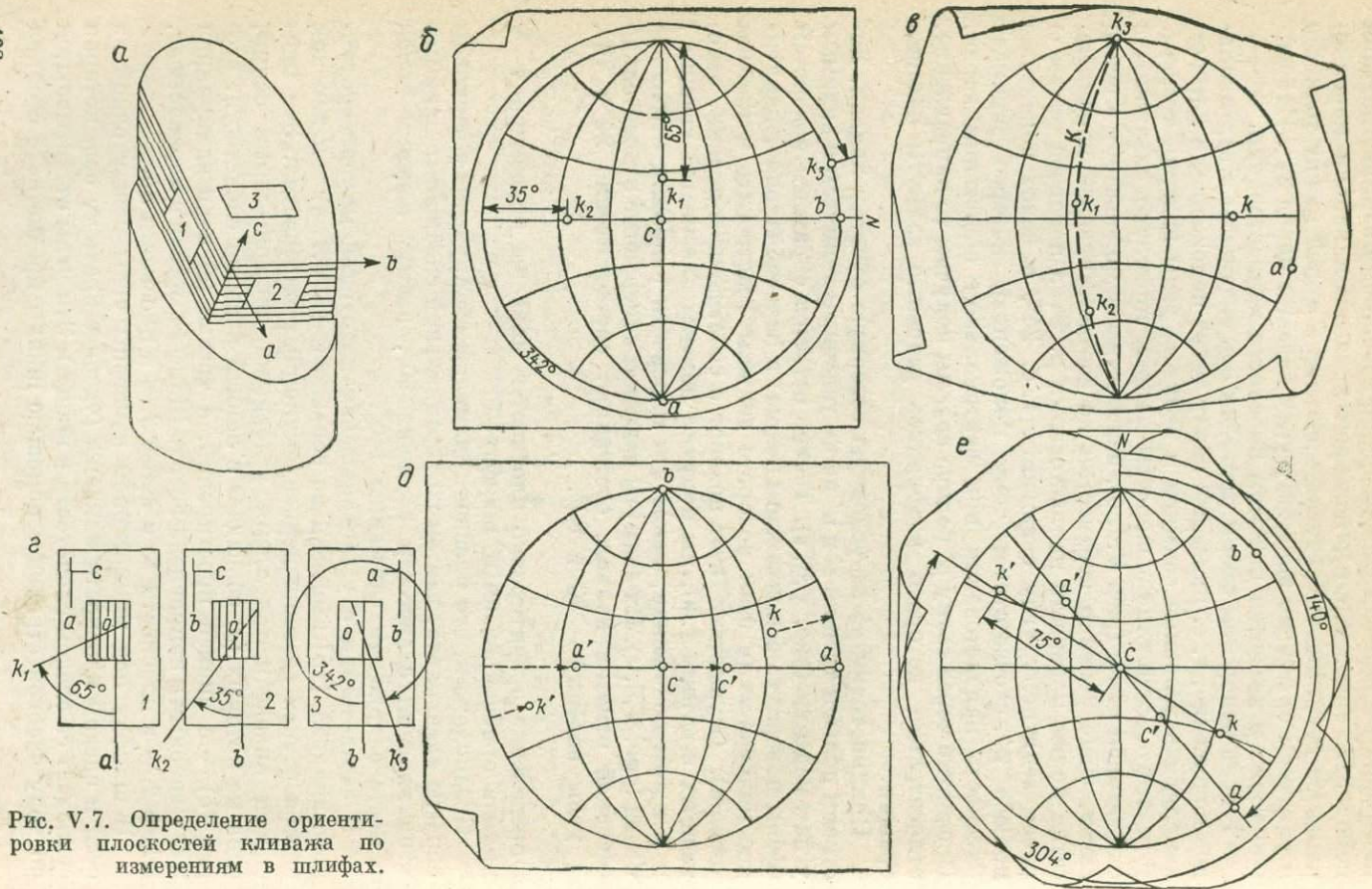


Рис. V.7. Определение ориентировки плоскостей кливажа по измерениям в шлифах.

а — схема изготовления ориентированного шлифа; б, в, г, е — построение полюса кливажной плоскости; д — схема угловой привязки плоскостей кливажа.

микроскопа. Допустим, что эти углы оказались следующими (рис. V.7, з): в шлифе 1 угол между осью a и следом кливажа ok_1 равен 65° , в шлифе 2 угол между осью b и следом кливажа ok_2 составил 35° , а в шлифе 3 угол между осью b и следом ok_3 — 342° .

Вначале построим на кальке условную систему координат. Наложив кальку на экваториальную сетку (рис. V.7, б), нанесем проекцию оси c в центре сетки. Проекция оси a совпадает с нижним концом центрального меридиана, а проекция оси b — с правым концом экватора сетки. При этом проекция плоскости шлифа 1 (ac) совпадает с центральным меридианом, проекция плоскости шлифа 2 (bc) — с экватором сетки, а проекция плоскости третьего шлифа (ab) — с внешней окружностью сетки. Отложив в этих плоскостях от соответствующих осей измеренные углы склонения следов кливажа, получим проекции этих следов k_1 , k_2 и k_3 .

Следует обратить внимание на правильное определение направления отсчета этих углов, так как при отсчете угла в вертикальной плоскости направление по ходу часовой стрелки или против хода часовой стрелки зависит от того, с какой стороны смотреть на данную плоскость. Поэтому следует ориентироваться по положительным и отрицательным направлениям осей. Так, в шлифе 1 угол 65° отсчитан от положительного направления оси a в сторону отрицательного направления оси c . На стереограмме следует отсчитать этот угол по центральному меридиану не от точки a , а от противоположного конца меридиана (напоминаем, что на плоскость проектируется только верхняя полусфера). Точно так же в плоскости bc угол склонения 35° следует отсчитать от конца экватора, противоположного точке b . В горизонтальной плоскости ab угол склонения 342° отсчитаем по ходу часовой стрелки от оси b .

Следующей операцией является построение плоскости кливажа K . Вращая кальку вокруг центра сетки, добьемся такого положения (рис. V.7, в), чтобы все три следа легли на один и тот же меридиан K , который и является проекцией искомой плоскости. Не сдвигая кальку, найдем полюс этой плоскости k .

Если бы все три точки (k_1 , k_2 и k_3) не легли на один меридиан, предпочтение следовало бы отдать тем следам плоскости кливажа (k_1 и k_2), ориентировка которых определена относительно следов слоистости. В таких случаях несоответствие третьего следа с меридианом K вероятнее всего объясняется погрешностью изготовления ориентированного шлифа 3, которую невозможно выявить из-за отсутствие в плоскости ab следов слоистости.

Таким образом, мы установили положение плоскости K в условной системе координат. Чтобы определить ее положение в географической системе координат, придадим слоистости то положение, которое она занимала в массиве пород.

Вначале (рис. V.7, д) повернем сферу вокруг оси b на значение угла падения пород (поскольку скважина вертикальна, этот угол равен видимому углу падения слоистости, т. е. 40°). Совместив

проекцию оси b с одним из концов центрального меридиана, переместим точки a , c и k на 40° по параллелям сетки так, чтобы точка c перемещалась по направлению к точке a , т. е. выполним прием пункта I.30. После поворота проекции осей a , c и полюс плоскости кливажа k займут новые позиции — a' , c' и k' . Теперь остается приемом пункта I.29 повернуть сферу вокруг вертикальной оси до совпадения направления падения слоистости в керне с известным из условий задачи азимутом падения пород в точке заложения скважины (140°). Для этого (рис. V.7, e) совместим точку a с отметкой 140° внешней окружности сетки и отметим на кальке положение северного конца меридиана отметкой N . Пользуясь этой отметкой как направлением географического севера, определим элементы залегания плоскости кливажа (304° , $\angle 75^\circ$) по ее полюсу k . Если бы скважина, из которой извлечен керн, была не вертикальной, то вначале следовало бы приемом, изложенным в пункте III.6, найти полюс плоскости напластования, привести поворотом сферы (см. пункт I.30) эту плоскость в горизонтальное положение и лишь затем выполнить описанные выше построения.

Методика восстановления ориентировки плоскостей кливажа по шлифам, вырезанным из ориентированного образца, взятого в горной выработке, не отличается от описанной выше для случая вертикальной скважины при условии соблюдения того же порядка маркировки образца.

ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКАЯ
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ
СТРУКТУРНЫХ ФОРМ

Реконструирование
осей напряжений
по ориентировке трещин
и разрывных смещений

Развитие физической теории образования трещин, разрывных смещений и складок [2, 3, 10—12, 14, 41, 55 и др.] привело к популяризации в геологоразведке динамического подхода к их изучению и прогнозированию. VI.1

Для этой цели разработаны специальные методы тектонофизической интерпретации элементарных структурных форм и графического отображения закономерностей взаимного расположения их плоскостных элементов и осей тектонических деформационных напряжений. В настоящей главе рассматривается графическое решение некоторых задач в этой области при помощи стереографической проекции.

Трещины скалывания образуются в результате накопления напряжений, вызываемых деформацией, до уровня, при котором они достигают временной прочности пород на скалывание. VI.2

В каждой точке эти трещины возникают вдоль площадок, отклоняющихся от площадок действия максимальных касательных напряжений в сторону оси наибольших нормальных напряжений σ_3 (рис. VI.1, а). Линия пересечения трещин скалывания параллельна оси средних нормальных напряжений σ_2 , а ось наименьших напряжений σ_1 перпендикулярна к двум первым.

Если известны элементы залегания сопряженной пары трещин скалывания*, можно определить ориентировку осей нормальных напряжений, вызвавших появление этих трещин. Пусть имеются трещины скалывания T_1 (135° , $\angle 45^\circ$) и T_2 (220° , $\angle 60^\circ$). Для определения положения осей нормальных напряжений вначале нужно построить стереографические проекции плоскостей трещин и найти линию их пересечения (рис. VI.1, б). Как это делается, подробно

* Сопряженными, по М. В. Гзовскому, называются трещины скалывания, возникающие одновременно при одном и том же напряженном состоянии.

рассматривается при решении геометрической задачи в пункте I.24.

Затем следует построить проекцию плоскости, перпендикулярной к линии пересечения, и определить на ней положение бис-

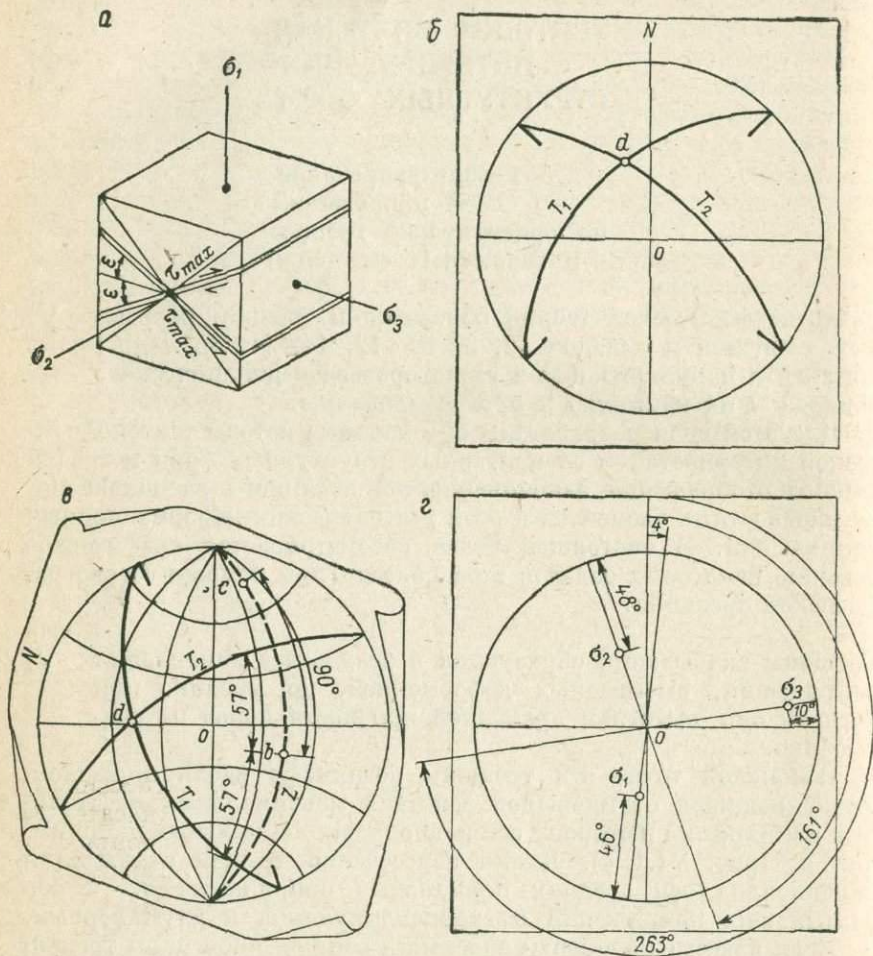


Рис. VI.1. Определение положения осей главных нормальных напряжений по элементам залегания сопряженной пары трещин скалывания.

а — схема образования трещин скалывания; б и в — построение осей σ_1 , σ_2 и σ_3 ; г — определение элементов залегания осей.
 τ_{\max} — максимальные скалывающие напряжения; ε — углы скалывания.

сектрис тупого и острого угла между плоскостями трещин. Для этого совместим с экватором сетки проекцию линии пересечения (точку d), отсчитаем по градусным делениям экватора от точки d через центр сетки 90° и штриховой линией проведем через полученную отметку соответствующую дугу Z (рис. VI.1, в). Оставляя

кальку в прежнем положении, определим по дуге Z значение двугранного угла между трещинами и разделим этот угол на две равные части ($114 : 2 = 57^\circ$). В результате получим проекцию биссектрисы тупого угла между плоскостями трещин (точку b). Проекцию биссектрисы острого угла между ними (точку c) можно построить, отсчитав по дуге Z от точки b угол 90° (см. пункт I.26).

Поскольку угол между поверхностью скалывания и осью σ_3 меньше 45° , положение данной оси напряжений в нашем примере совпадает с биссектрисой острого угла (точкой c). Тогда осью наименьших нормальных напряжений σ_1 является биссектриса тупого угла (проекция b), а осью средних нормальных напряжений σ_2 — линия пересечения трещин (проекция d). Вернув кальку в исходное положение (рис. VI.1, z), определим азимуты и углы наклона осей напряжений. В приведенном примере имеем следующие элементы залегания осей напряжений: σ_3 (263° , $\angle 10^\circ$), σ_2 (161° , $\angle 48^\circ$), σ_1 (4° , $\angle 46^\circ$).

Трещины отрыва возникают, когда максимальное растягивающее напряжение достигает временной прочности пород на отрыв. Они располагаются перпендикулярно к оси наибольшего нормального растягивающего напряжения σ_1 (рис. VI.2, a). Поэтому, если известны элементы залегания трещины отрыва, можно реконструировать положение этой оси. Но при этом невозможно установить направление действия двух других главных нормальных напряжений σ_3 и σ_2 .

VI.3

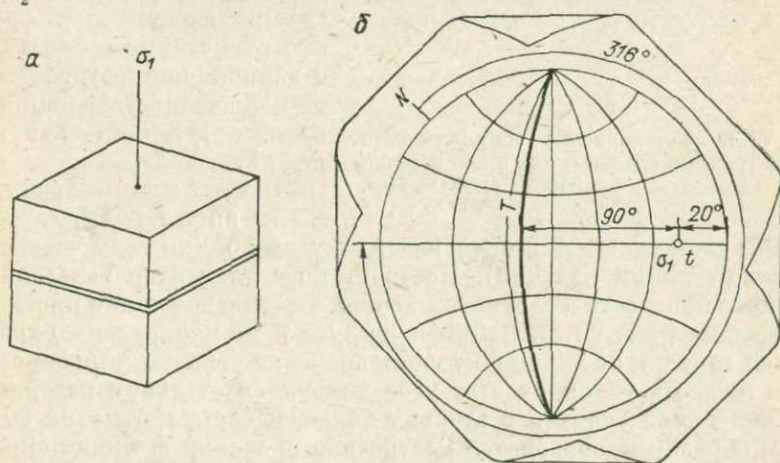


Рис. VI.2. Определение положения осей главных нормальных напряжений по элементам залегания трещины отрыва.

Пусть имеется трещина отрыва (136° , $\angle 70^\circ$). Построим проекцию T плоскости данной трещины и найдем ее полюс t (см. геометрическую задачу в пункте I.14). Поскольку полюс трещины

отрыва совпадает с проекцией оси наибольших нормальных растягивающих напряжений σ_1 , определим элементы залегания последней — азимут наклона 316° , угол наклона 20° (рис. VI.2, б).

VI.4 Для реконструирования положения осей нормальных напряжений можно использовать выделенные на круговой диаграмме средние элементы залегания систем трещин скальвания. Решение задачи производится таким же способом, как и по элементам единичной пары трещин.

Когда сопряженность систем трещин при полевых наблюдениях не установлена, выбор на диаграмме сопряженных пар возможен по ориентировке имеющих на поверхности трещин борозд скольжения.

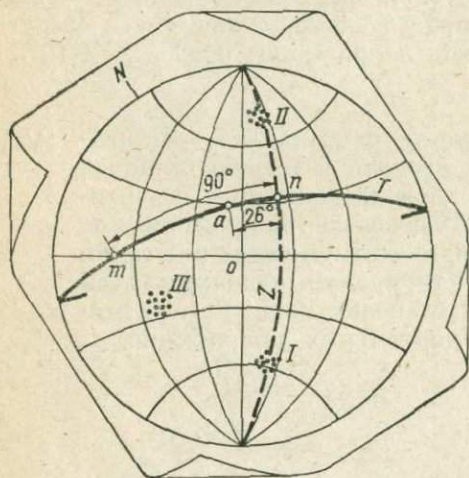


Рис. VI.3. Установление сопряженности систем трещин скальвания при помощи борозд скольжения.

борозды составляют с линией падения угол 26° (по ходу часовой стрелки от линии падения). Построим по ее элементам залегания проекцию плоскости T и отметим точкой a линию восстания плоскостей трещин (рис. VI.3). Отметим на дуге T по направлению хода часовой стрелки от линии восстания значение угла падения борозд 26° (в полевых условиях этот угол измерялся от линии падения) и от найденной точки n в сторону большей части дуги угол 90° . Таким образом производится построение проекции m линии скрепления данной системы трещин с сопряженными с ней трещинами другой системы.

Остается совместить точку m с горизонтальным диаметром сетки и провести через отметку борозды (точку n) дугу большого круга Z . Она будет представлять собой искомое геометрическое место полюсов плоскостей сопряженных трещин. Если в исследу-

Последние появляются в результате смещения пород в сторону оси средних нормальных напряжений и всегда ориентированы перпендикулярно к ней. Поэтому, если известно значение острого угла между направлением падения трещин данной системы и бороздами скольжения на поверхности, можно найти геометрическое место полюсов плоскостей тех трещин, которые связаны с данной конкретной системой общностью направления действия напряжений.

Пусть в системе трещин скальвания I (200° , $\angle 60^\circ$)

емой части района имеются также другие системы трещин, выбор сопряженных с данной системой I (200° , $\angle 60^\circ$) трещин производится следующим образом. Рабочую кальку с построенной дугой большого круга необходимо наложить на диаграмму трещин, совместив при этом их отметки N , и выделить систему трещин, полюсы которых попадают на дугу большого круга. В приведенном примере сопряженной оказалась система трещин II (40° , $\angle 73^\circ$). При необходимости она может быть использована совместно с системой I для реконструирования осей напряжений.

Особенности морфологии и ориентировки разрывных смещений, развивавшихся путем разрастания и слияния трещин скальвания в одну сплошную зону разрыва, предопределяются пространственным положением трех составляющих тектонического давления — осями главных нормальных напряжений σ_1 , σ_2 , σ_3 . VI.5

Это теоретическое положение тектонофизики может служить различным целям, в том числе и реконструированию осей нормальных напряжений в реальных структурных объектах по элементам наблюдаемых в них разрывных смещений (взбросов, взбросо-сдвигов, сбросов, сбросо-сдвигов, поддвигов, подбросов). В качестве исходных данных для этого могут быть использованы элементы залегания сместителей разрывов, направление борозд скольжения, ориентировка оперяющих трещин, средний угол скальвания * пород в районе исследований и др.

При изучении тектоники разведываемых угольных месторождений чаще всего возникает необходимость в решении нижеследующих частных задач.

Определить стереографические координаты осей нормальных напряжений по элементам залегания сместителя (320° , $\angle 40^\circ$), углу отклонения борозд скольжения от линии его падения (46° по ходу часовой стрелки) и среднему углу скальвания пород (в данном районе он равен 30°), если форма борозд указывает на перемещение висячего крыла вверх по отношению к лежащему.

Построив проекцию плоскости сместителя S , отложим на ее дуге угол склонения борозд 46° и от найденной точки n выхода их линии на поверхности полусферы 90° (рис. VI.4, б), что представляет возможность определить положение оси σ_2 (линии скрещения плоскости сместителя с возможной сопряженной поверхностью скальвания). Далее необходимо к оси σ_2 построить перпендикулярную плоскость Z , в которой лежат две другие оси напряжений σ_1 и σ_3 . Положение последних можно определить, используя значение угла скальвания.

Как известно из основных положений тектонофизики, ось σ_3 в плоскости Z располагается таким образом, что в каждом из

* Угол между поверхностью скальвания и осью наибольших нормальных напряжений. В Донецком бассейне его среднее значение равно 31° .

крыльев разрывного смещения острый угол между этой осью и плоскостью сместителя совпадает с направлением относительного перемещения данного крыла. Из условия задачи видно, что всяческое крыло перемещалось вверх по отношению к лежащему, т. е. смещение имеет взбросовый характер. В этом случае (рис. VI.4, а) ось σ_3 должна занимать более пологое положение по отношению

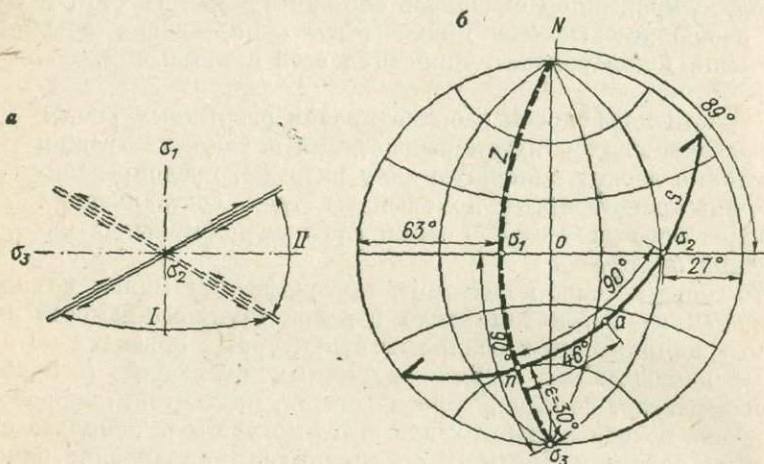


Рис. VI.4. Определение положения осей главных нормальных напряжений по ориентировке борозд скольжения на поверхности сместителя.

а — схема образования взброса; б — построение осей напряжений. Сектор: I — удлинения, II — сжатия.

к линии скрещения плоскостей S и Z . Отложив по градусным делениям дуги Z от точки n в направлении ближайшего конца меридиана угол скалывания 30° , найдем положение оси σ_3 . В нашем примере она оказалась горизонтальной, ориентированной по азимуту 359° .

Для нахождения положения оси σ_1 необходимо от проекции оси σ_3 отсчитать по дуге плоскости Z угол 90° . Ее азимут наклона составил 89° , угол наклона 63° , в то же время ось σ_2 имеет диаметрально противоположный наклон под углом к горизонту 27° . В данной задаче попутно может быть решен также вопрос о положении смещенного крыла разрывного нарушения.

Из решения задачи видно, что разрывное смещение является взбросо-сдвигом и потерянный пласт на его висячем крыле необходимо искать вверху, над лежащим крылом.

Другая частная задача состоит в определении положения осей нормальных напряжений по элементам залегания сместителя (220° , $\angle 60^\circ$) и системы (287° , $\angle 69^\circ$) оперяющих трещин скалывания (рис. VI.5, а).

Так же как и в случае, изложенном в пункте VI.1, произведем построение проекции поверхностей скалывания (в данном примере

плоскостей сместителя S и трещины T), линии их пересечения K и проекции перпендикулярной плоскости Z к линии пересечения (рис. VI.5, б). По дуге плоскости Z найдем значение двугранного угла между поверхностями скальвания (в примере он равен 120°) и его биссектрису (точку b). Найдем также проекцию лежащего

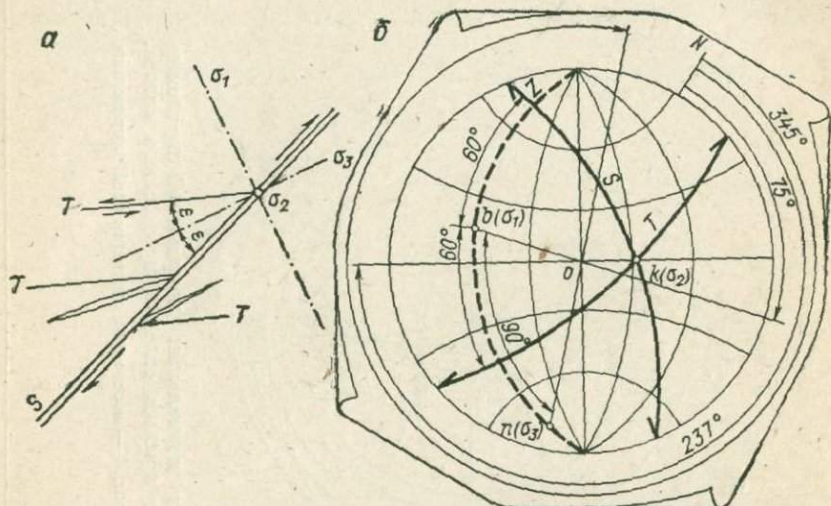


Рис. VI.5. Определение положения осей главных нормальных напряжений по ориентировке оперяющих трещин скальвания.

a — схема взаимоотношения сместителя и оперяющих трещин; b — построение проекции осей напряжений.

в плоскости Z перпендикуляра n к биссектрисе. В результате получим проекцию трех взаимно перпендикулярных линий, с которыми совпадают направления осей нормальных сжимающих напряжений. Поскольку в задаче рассматриваются две сопряженные поверхности скальвания (см. рис. VI.5, б), совершенно очевидно, что биссектриса острого угла между ними (точка n) является осью наибольших нормальных сжимающих напряжений σ_3 , а линия их пересечения (точка k) — осью средних нормальных напряжений σ_2 . Третья ось нормальных напряжений σ_1 совпадает с биссектрисой тупого угла, точкой b . Остается определить стереографические координаты этих осей напряжений, вернув кальку в исходное положение. Имеем σ_3 (345° , $\angle 11^\circ$), σ_2 (237° , $\angle 59^\circ$) и σ_1 (75° , $\angle 30^\circ$).

Реконструирование осей напряжений по элементам складок

При складкообразовании слои пород могут изгибаться под воздействием либо горизонтальных сжимающих сил, направленных в их плоскости продольно, либо вертикальных сил, приложенных к слоям в поперечном направлении. Вследствие

VI.6

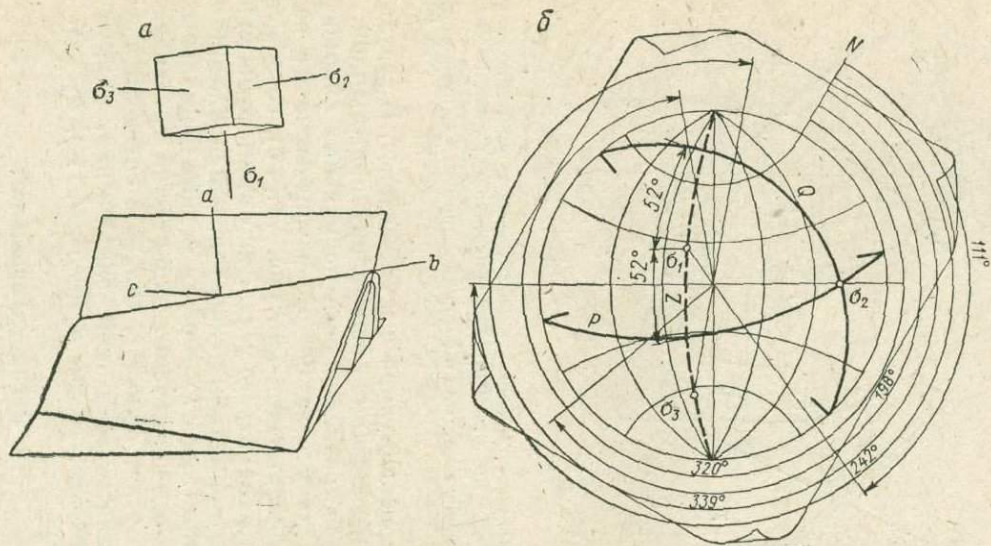


Рис. VI.6. Реконструирование осей главных нормальных напряжений по элементам залегания крыльев складки продольного изгиба.
 а — схема образования складки; б — построение проекции осей напряжения.

этого складки подразделяются на два типа: продольного изгиба и поперечного изгиба*.

В первых ось наибольшего укорочения деформации с соответствующим направлением действия наибольших сжимающих нормальных напряжений, ось наибольшего удлинения деформации a совпадает с направлением действия наименьших сжимающих напряжений, а средняя ось деформации b , отвечающая шарниру складки, с направлением действия средних сжимающих напряжений (рис. VI.6, а).

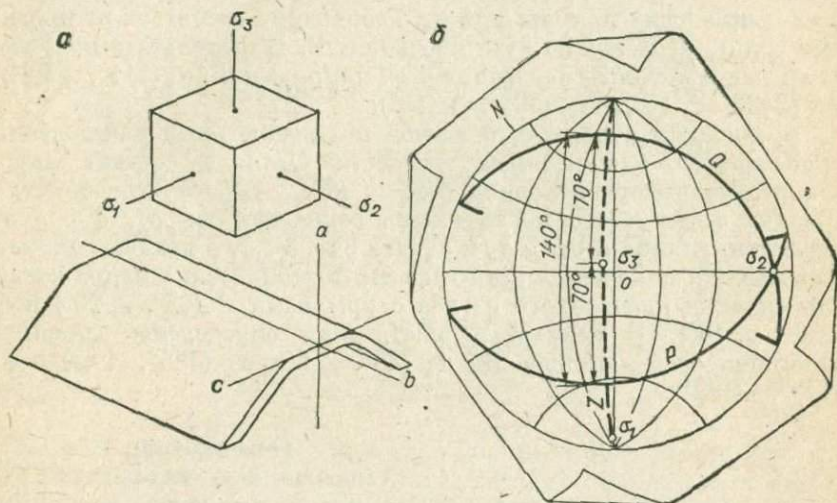


Рис. VI.7. Реконструирование осей главных нормальных напряжений по элементам залегания крыльев складки поперечного изгиба.

а — схема образования складки; б — построение проекций осей напряжения.

В складках второго типа оси деформации a , c и оси нормальных напряжений σ_3 , σ_1 также располагаются в вертикальной плоскости, перпендикулярной к шарниру складки. Однако с осью деформации a совпадают наибольшие, а с осью c — наименьшие сжимающие напряжения (рис. VI.7, а). Конечно, подобные тектонофизические реконструкции дают весьма приближенное представление о динамической обстановке образования складок, так как изменение формы и размеров складок рассматривается независимо от микроскопических механизмов деформации минеральной массы, литологического состава, текстуры, прочностных свойств пород и других важных физико-геологических факторов.

* Термины введены М. В. Гзовским. По В. В. Белоусову, складки общего смятия и глыбовые; по В. В. Бронгулееву, складки коробления и плитовые; по Г. Штилле, складки альпийские и германские.

Но этот общий анализ все же может оказаться полезным при изучении тектоники месторождений [12].

Для графического изображения осей нормальных напряжений на основании элементов залегания крыльев складок продольного изгиба необходимо выполнить следующие построения. Пусть нам даны крылья такой складки (320° , $\angle 60^\circ$) и (198° , $\angle 25^\circ$).

Приемом, изложенным в пункте VI.3, найдем проекцию шарнира складки (ось σ_2). Измерив угол складки, в данном случае равный 104° , разделим его пополам, найдя таким образом положение оси σ_1 (рис. VI.6, б). Чтобы найти положение оси наибольших сжимающих напряжений σ_3 , необходимо от проекции оси σ_1 угол 90° по дуге плоскости Z . В результате получим следующие элементы залегания осей напряжений: σ_1 (111° , $\angle 62^\circ$), σ_2 (242° , $\angle 19^\circ$), σ_3 (339° , $\angle 19^\circ$).

В складках поперечного изгиба построение осей напряжений производится аналогичным способом. Отличие состоит лишь в определении ориентировки осей σ_1 и σ_3 . С биссектрисой угла складки поперечного изгиба здесь совпадает ось σ_3 , а ось σ_1 перпендикулярна к осям σ_3 и σ_2 . На рис. VI.7, б показан пример определения положения осей главных тектонических напряжений для складки поперечного изгиба с крыльями P (23° , $\angle 26^\circ$) и Q (236° , $\angle 16^\circ$). В результате построений определены элементы залегания осей напряжений: σ_1 (36° , $\angle 6^\circ$), σ_2 (305° , $\angle 6^\circ$) и σ_3 (170° , $\angle 82^\circ$).

Определение генетического типа разрывных смещений на основе тектонофизического анализа

VI.7 Сочетание статистико-графической обработки массовых измерений элементов залегания сместителей разрывных смещений и тектонофизического анализа взаимоотношения этих структурных форм со складками в некоторых случаях дает возможность относить разрывные смещения к тому или иному генетическому типу, не имея о нем никаких сведений, кроме данных об ориентировке сместителя по отношению к осевой плоскости складки.

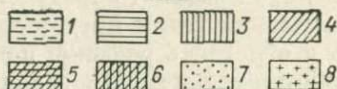
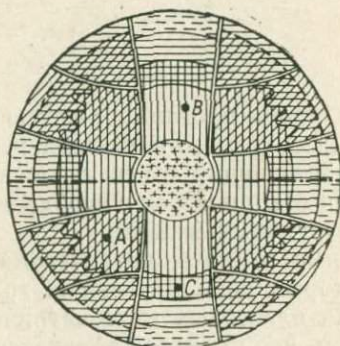
В качестве примера можно привести обобщенную диаграмму ориентировок разрывных смещений, составленную на основании статистико-графического и тектонофизического анализов нескольких тысяч разрывных смещений в различных складчатых структурах Донбасса (рис. VI.8). Эта диаграмма строилась путем оконтуривания полей, занимаемых полюсами сместителей разрывов каждого генетического типа на частных диаграммах, составленных для отдельных складок. Правильность отнесения разрывов каждого поля диаграммы к данному генетическому типу тщательно проверялась тектонофизическими построениями, после чего все

частные диаграммы были сведены в одну обобщенную, с приведением осей складок к единому простиранию [34].

Закономерности формирования складок и связанных с ними разрывных смещений, выявленные в Донецком бассейне, после надлежащей проверки могут быть распространены и на другие угольные бассейны, где также может быть применена данная или аналогичная диаграмма.

Рис. VI.8. Обобщенная диаграмма ориентировок разрывных смещений.

1 — сбросы растяжения; 2 — сбросы сжатия; 3 — взбросы; 4 — сдвиги; 5 — сбросо-сдвиги; 6 — взбросо-сдвиги; 7 — поддвиги; 8 — подбросы.



На обобщенной диаграмме VI.8 условными знаками показаны поля, занимаемые на частных диаграммах полюсами плоскостей сместителей разрывных нарушений различных генетических типов.

Для определения принадлежности разрывного смещения к тому или иному генетическому типу следует построить на кальке полюс плоскости сместителя и провести ось складки (линию простирания осевой плоскости). Кальку наложить на обобщенную диаграмму так, чтобы простирание оси на складке совпадало с простиранием ее на диаграмме, и определить, в каком поле диаграммы находится полюс разрывного смещения. Так, например, разрывное смещение, полюс плоскости сместителя которого находится в точке А, по всей вероятности, является взбросо-сдвигом, а в точке В — взбросом. Сместитель, полюс которого попал в точку С, может принадлежать как взбросу, так и сбросу сжатия, так как поля распространения полюсов взбросов и сбросов здесь частично перекрываются.

РЕШЕНИЕ
ГОРНО-ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ЗАДАЧ

VII.1 При проектировании разведочных выработок, а также при анализе геолого-маркшейдерской документации строящихся и действующих шахт геологам-разведчикам иногда приходится сталкиваться с необходимостью определения специальных угловых величин.

Подобные горно-геометрические задачи обычно решаются путем некоторых дополнительных графических построений, выполняемых на пластовых гипсометрических планах, или аналитическим путем, что вызывает определенные затруднения. Применение стереографической сетки представляет возможность существенно упростить и облегчить решение подобных задач. В качестве примеров горно-геометрических задач рассмотрим нижеследующие.

VII.2 Определить длину выработки (скважины) заданного направления до встречи с угольным пластом, если известно нормальное расстояние до пласта (обратная задача: определить нормальное расстояние до пласта по известной длине выработки).

Необходимость определения длины выработки заданного направления до плоскости пласта с известными элементами залегания возникает в различных ситуациях, например при разведке смещенной части угольного пласта, при бурении водоспускных скважин на старые затопленные выработки, при вскрытии наклонными квершлагами и гезенками выше- и нижележащих пластов и др.

Забоем штрека, проходимого по пласту угля (30° , $\angle 45^\circ$), пересечено разрывное смещение (рис. VII.1, а). По стратиграфическим признакам установлено, что смещенная часть пласта находится выше штрека на расстоянии 50 м по нормали. Требуется определить, на каком расстоянии встретит пласт восстающая скважина, пробуренная по азимуту 350° под углом 30° к горизонту.

Решение задачи прежде всего требует определения угла δ между осью скважины и нормалью к пласту (видимого в керне угла падения пласта). Построив по известным элементам залегания полюс пласта p и по данным инклинометрических измерений

проекцию скважины c , повернем кальку так (рис. VII.1, б), чтобы точки p и c оказались на одном меридиане сетки Z . Сосчитав число градусных делений меридиана Z между точками p и c , получим значение искомого угла δ , равное 35° . На отдельном листе бумаги построим в произвольном масштабе прямоугольный треугольник abc (рис. VII.1, в) с углом 35° и прилежащим катетом ac , равным нормальному расстоянию до пласта (50 м). Тогда гипотенуза ab окажется равной искомой длине скважины (61 м).

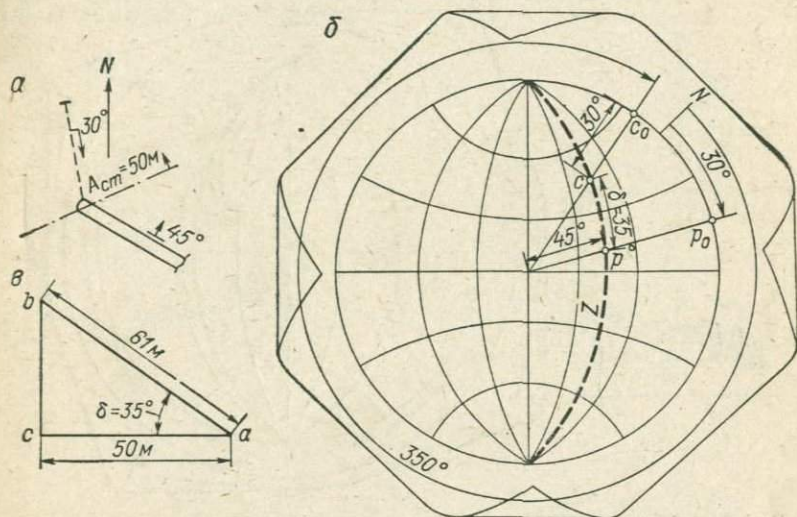


Рис. VII.1. Определение длины скважины заданного направления до встречи угольного пласта.

a — план горных работ; $б$ — построение проекции скважины и пласта; $в$ — вспомогательные построения; $A_{ст}$ — стратиigraphическая амплитуда; тонкой штриховой линией обозначена скважина.

При решении обратной задачи (определении нормального расстояния до пласта по известной наклонной длине разведочной скважины) поступаем аналогичным образом. Решение задачи отличается от описанного выше лишь порядком выполнения заключительной операции: строится прямоугольный треугольник с углом 35° и гипотенузой 61 м. Прилежащий катет окажется в нем равным искомому нормальному расстоянию. Напомним, что в случае бурения скважины с подъемом керна угол между нормалью к напластованию и осью скважины может быть определен непосредственным измерением в самом керне.

Определить азимут падения пласта по известным углам его VII.3 падения (истинному и видимому) в вертикальной плоскости произвольного направления.

Такая задача возникает, когда отсчеты по магнитной стрелке компаса могут быть искажены влиянием крупных магнитных

масс (забойные механизмы, вагонетки, рельсы, металлические крепления выработок). Допустим, забоем разведочной штольни, пройденной по азимуту 300° (рис. VII,2, а), встречен угольный пласт, истинный угол падения которого оказался равным 35° . Азимут падения пласта измерить не удалось из-за близости магнитных масс, однако установлено, что след подошвы пласта в вертикальной стенке штольни (рис. VII.2, в) погружается на северо-запад под углом 28° к горизонту, причем пласт падает вправо по

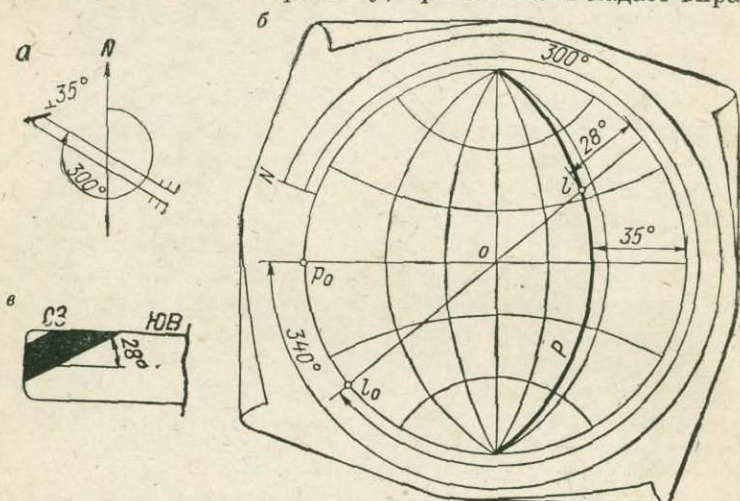


Рис. VII.2. Определение азимута падения пласта по известному углу падения.

а — план разведочной штольни; б — построение проекции пласта; в — зарисовка стенки штольни.

отношению к забою штольни. Требуется определить азимут падения пласта.

Воспользовавшись тем, что след плоскости напластования лежит в вертикальной плоскости известного простирания (300°), построим такую плоскость. Отложив на внешней шкале сетки от нулевой отметки кальки азимут стенки штольни 300° , проведем через полученную точку l_0 диаметр, который и является проекцией плоскости стенки. Совместив точку l_0 с одним из концов экватора сетки, отсчитаем от противоположного конца экватора по его градусным делениям угол падения следа подошвы пласта, равный 28° . Полученная точка l есть проекция линии, лежащей в плоскости пласта. Теперь, поворачивая кальку вокруг центра сетки, добьемся такого положения (рис. VII.2, б), чтобы точка l легла на меридиан сетки P , отвечающий углу падения плоскости напластования 35° . При этом необходимо проследить за тем, чтобы падение плоскости было направлено вправо от направления забоя штольни, обозначенного точкой l_0 на окружности диаграммы.

Обведем на кальке меридиан P и, отметив направление падения плоскости напластования точкой p_0 , определим искомый азимут падения пласта, равный 340° .

Определить нормальную мощность слоя по известной видимой мощности в вертикальном разрезе, проведенном не вкрест простирания (обратная задача — определить видимую мощность в случайном вертикальном разрезе по известной нормальной мощности).

VII.4

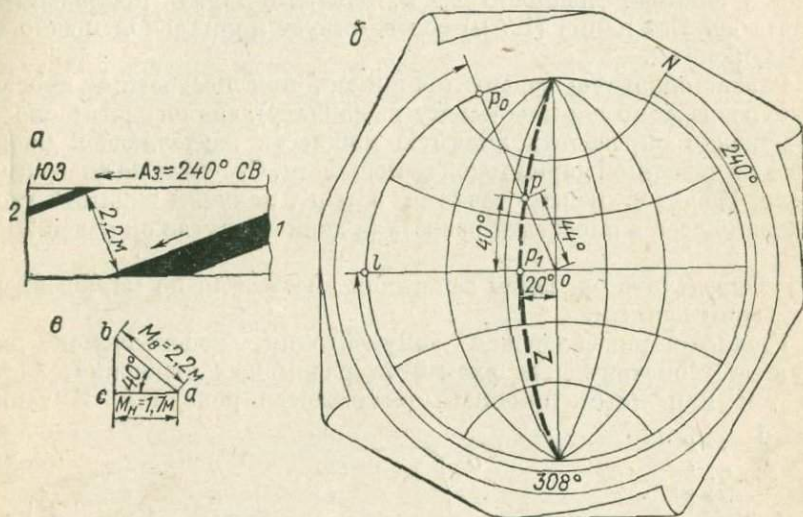


Рис. VII.3. Определение нормальной мощности слоя по видимой его мощности в стенке квершлага.

a — зарисовка стенки квершлага; b, c — последовательные этапы построения.

Необходимость решения таких задач появляется при составлении или чтении геологических зарисовок стенок квершлагов, разведочных канав, штолен и других выработок, пройденных не вкрест простирания пород.

Предположим, требуется определить нормальное расстояние между угольным пластом 1 и залегающим в его кровле угольным пропластком 2 . На зарисовке стенки горизонтальной околоствольной выработки, пройденной по азимуту 240° (рис. VII.3, a), видимое нормальное расстояние между пластом и пропластком составляет $2,2$ м. Элементы залегания пластов: 308° , $\angle 44^\circ$. (При решении задачи следует иметь в виду, что направление измерения мощности разделяющей пачки слоев в случайном вертикальном разрезе совпадает с проекцией нормали к напластованию на плоскость разреза.)

Построим полюс плоскости напластования p по известным элементам залегания (рис. VII.3, b) и отметим точкой l на

окружности диаграммы направление оси выработки (азимут 240°). Совместив точку l с одним из концов экватора сетки, спроектируем точку p по соответствующему меридиану Z на линию экватора ol . Полученная точка p_1 является проекцией того направления, в котором измерялась видимая мощность в вертикальном разрезе по стенке выработки, число градусов меридиана Z между точками p и p_1 соответствует углу δ между этим направлением и нормалью к плоскости напластования (40°). Построив прямоугольный треугольник abc (рис. VI.3, e) с острым углом 40° и гипотенузой ab , равной видимой мощности 2,2 м, измерим длину прилежащего катета ac . Его длина (1,7 м) соответствует нормальной мощности междупластья.

Решая обратную задачу (например, при построении проектного разреза по диагональному квершлагу), аналогичным способом можно определить видимую мощность разделяющей пачки слоев по известной нормальной ее мощности. Отсчитав на диаграмме число градусов между точками o и p_1 , получим видимый угол падения слоев в плоскости разреза (в данном случае он равен 20°).

VII.5 Определить элементы залегания сместителя по маркшейдерским данным.

Геолого-маркшейдерская документация, используемая для анализа геометрических элементов разрывных смещений, часто по тем или иным причинам оказывается неполной. В таких

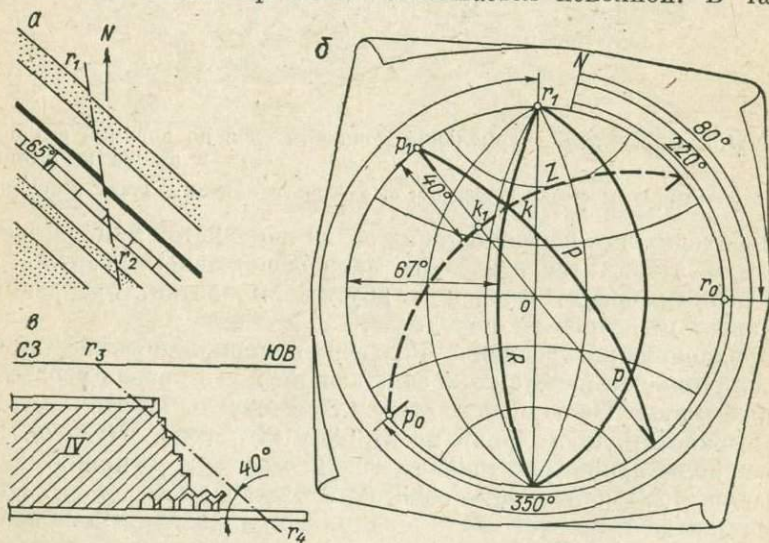


Рис. VII.4. Определение элементов залегания плоскости сместителя на плане горных работ.

a — геологическая карта ($r_1 r_2$ — линия разрывного нарушения); $б$ — построение проекции плоскости сместителя; $в$ — план горных работ в вертикальной проекции ($r_3 r_4$ — линия пересечения плоскости сместителя разрыва с пластом).

случаях приходится восстанавливать недостающие характеристики смещения косвенным путем, используя те данные, которые имеются на планах.

Так, на рис. VII.4, а показана выкопировка из геологической карты, где угольный пласт (220° , $\angle 65^\circ$) пересечен сместителем разрывного смещения, линия простирания которого $r_1 r_2$ ориентирована по азимуту 350° . На вертикальной проекции пласта (рис. VII.4, в) показана линия скрещения сместителя $r_3 r_4$, наклоненная к горизонту под углом 40° в юго-восточном направлении. Требуется определить направление и угол падения сместителя.

Прежде всего построим по известным элементам залегания дуговую проекцию плоскости пласта P и, совместив линию простирания последней с экватором сетки, отсчитаем от северо-западного конца линии простирания (точки p_1) по линии экватора угол склонения проекции линии скрещения 40° . Не сдвигая кальки, снесем полученную точку k_1 по меридиану сетки Z на дугу P , получив таким образом проекцию k линии скрещения в плоскости пласта. По известному азимуту (350°) построим проекцию линии простирания сместителя r_1 (рис. VII.4, б) и, совместив эту точку с концом центрального меридиана, обведем на диаграмме тот меридиан сетки, который в данном положении кальки проходит через точку k . Этот меридиан R и является проекцией плоскости сместителя, падающего по азимуту 80° под углом 67° к горизонту.

Построить в плоскости пласта на вертикальной проекции VII.6 линию заданного направления.

При очень крутом залегании угольных пластов принято планы горных работ составлять на вертикальной проекции, плоскость которой совпадает с простиранием пласта. В связи с этим возникают задачи по определению на такой проекции ряда угловых величин.

Пусть угольный пласт (190° , $\angle 60^\circ$) пересечен сместителем разрывного смещения (150° , $\angle 50^\circ$). Требуется изобразить в вертикальной проекции линию скрещения сместителя и пласта.

Первый этап решения задачи — построение линии скрещения сместителя и пласта — описан в пункте IV.7. Построив дуговые проекции плоскостей сместителя R и пласта P и найдя точку их пересечения k (проекцию линии скрещения), спроектируем последнюю на вертикальную плоскость, простирание которой совпадает с простиранием пласта.

Ортогональное проектирование прямых на вертикальную плоскость в стереографической проекции осуществляется путем переноса точек-проекций этих прямых по линиям меридианов сетки, когда проекция вертикальной плоскости совмещена с экватором (напомним, что плоскости всех меридианов перпендикулярны к плоскости экватора).

Совместив линию простирания плоскости P с экватором сетки (рис. VII.5, б), отметим точкой k_1 на экваторе сетки пересечение

последнего с меридианом Z , на котором лежит проекция линии скрещения k . Отсчитав число градусных делений экватора между точкой k_1 и ближайшим концом последнего, получим угол наклона линии скрещения в вертикальной проекции (58°). Отложив этот

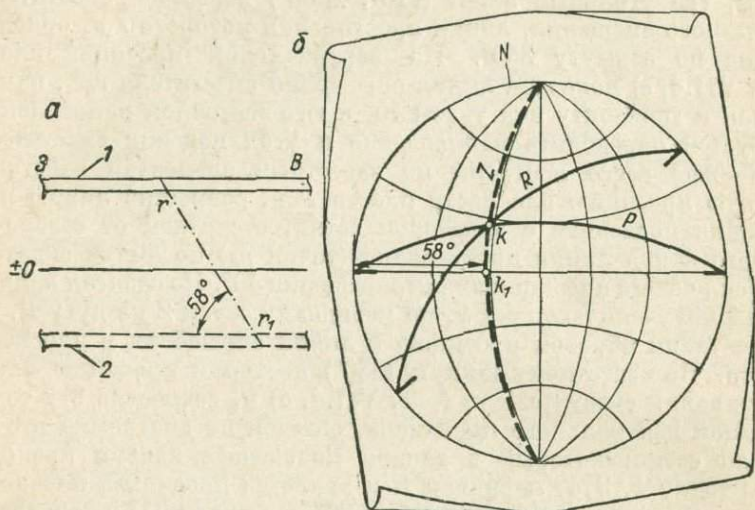


Рис. VII.5. Построение линии пересечения плоскости сместителя в вертикальной проекции.
1 — вентиляционный штрек, горизонт 50 м; 2 — откаточный штрек, горизонт минус 50 м.

угол от линии горизонта на вертикальной проекции пласта (рис. VII.5, а), получим искомое изображение линии скрещения kk_1 .

VII.7 Определить точку встречи сместителя разрывного нарушения штреком и задать выработку на смещенную часть пласта.

Пусть штреком, пройденным на горизонте 0 по пласту угля (200° , $\angle 40^\circ$), в точке A встречен сместитель взброса (172° , $\angle 60^\circ$) со стратиграфической амплитудой 20 м (рис. VII.6, а). Забой штрека горизонта -50 м находится в точке B . Требуется определить место встречи сместителя штреком горизонта -50 м, задать горизонтальный квершлаг на смещенное крыло пласта и определить длину квершлага.

Прежде всего построим проекцию линии скрещения (точку k) пласта и сместителя (точку пересечения дуговых проекций плоскостей сместителя R и пласта P). Как видно на рис. VII.6, б, азимут линии скрещения оказался равным 240° . Проведя из точки A (см. рис. VII.6, а) прямую по азимуту 240° , мы найдем точку C встречи сместителя разрыва штреком горизонта -50 м. При этом расстояние от точки B до точки C оказалось равным 70 м.

Чтобы определить кратчайшее горизонтальное расстояние между смещенными частями пласта, построим дополнительный разрез $I-I'$ вкрест простирания пласта. При угле падения пласта 40° и нормальном расстоянии между смещенными его частями, равном 20 м, горизонтальное расстояние составляет 31 м.

Проведем на плане из точки C линию простирания сместителя (ее азимут равен 82°), а также проведем параллельно штреку

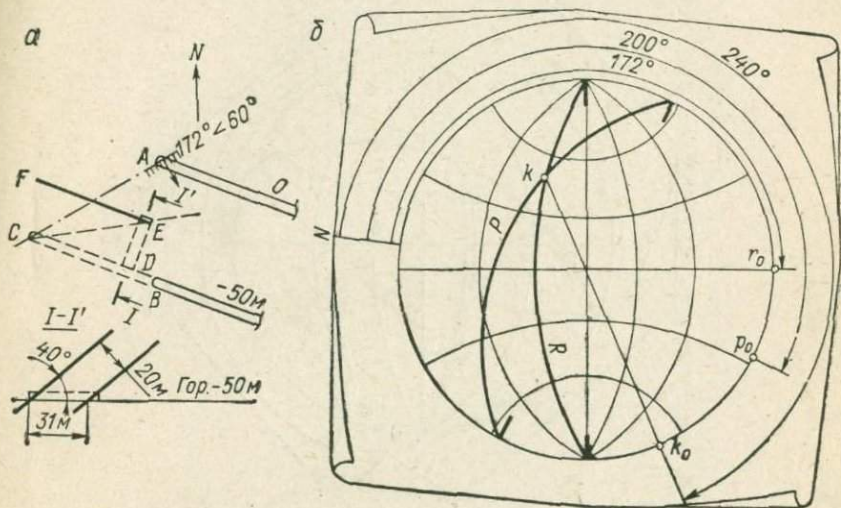


Рис. VII.6. Нахождение точки встречи сместителя разрыва кваршлагом.
 а — план горных работ; б — построение линии пересечения.

на расстоянии 31 м от последнего линию EF — след смещенной части пласта на горизонте — 50 м. Чтобы вскрыть лежащее крыло угольного пласта, необходимо продолжить проходку штрека до точки D и задать под прямым углом к нему кваршлаг. Его длина DE окажется равной 31 м.

Определить направление наибольшего ослабления механической связности пород кровли угольного пласта по измерениям ориентировки трещиноватости. VII.8

Влияние природной трещиноватости пород на поведение кровли угольных пластов в лавах общеизвестно. Наибольшие затруднения возникают, когда основная система трещин падает в сторону забоя лавы и образует в плане острый угол (менее $10-15^\circ$) с ее забоем. Поэтому измерения элементов залегания трещин по керну в породах кровли угольных пластов и выяснение геометрических взаимоотношений плоскостей наиболее развитой системы трещин с возможным направлением линии забоев лав составляют одну из наиболее интересных практических задач

прогнозирования горно-геологических условий разработки разведываемых и эксплуатируемых угольных пластов. Графическая часть решения такой задачи выполняется при помощи стереографической сетки следующим образом.

Из материалов геологической документации керна разведочных скважин известно, что наиболее развитая система трещин T

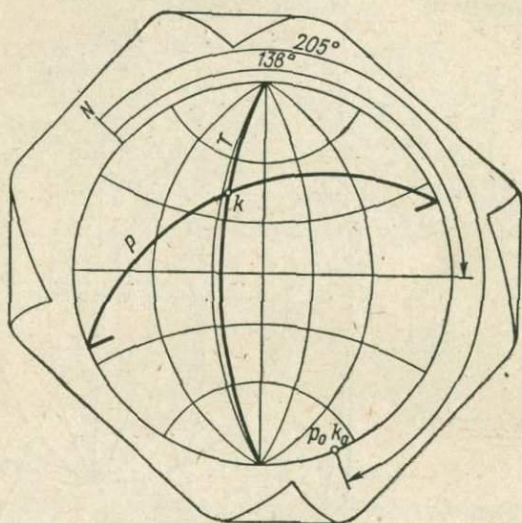


Рис. VII.7. Построение проекции линии пересечения плоскостей трещин T с поверхностью пласта P .

пород кровли имеет элементы залегания 138° , $\angle 65^\circ$. Требуется определить степень влияния ее на устойчивость пород кровли угольного пласта P на участке, где он имеет элементы залегания 205° , $\angle 40^\circ$. Забой лав намечается ориентировать вдоль линии падения пласта и продвигать с запада на восток.

Решение задачи состоит в построении линии пересечения двух плоскостей (см. пункт I.24). Построив дуговые проекции плоскостей P и T (рис. VII.7), найдем точку их пересечения k — проекцию линии скрещения. Азимут наклона этой линии, отсчитанный по внешней шкале сетки, составляет 205° . Из этого видно, что линия скрещения плоскостей трещин и плоскостей напластования пород совпадает по направлению с линией падения пласта. Следовательно, трещиноватость пород кровли имеет крайне неблагоприятную для эксплуатационных работ ориентировку. Учитывая это обстоятельство, следует рекомендовать горнякам располагать забой лав под углом 15° к линии падения пласта либо обрабатывать данный участок пласта в направлении на запад, т. е. обратным ходом.

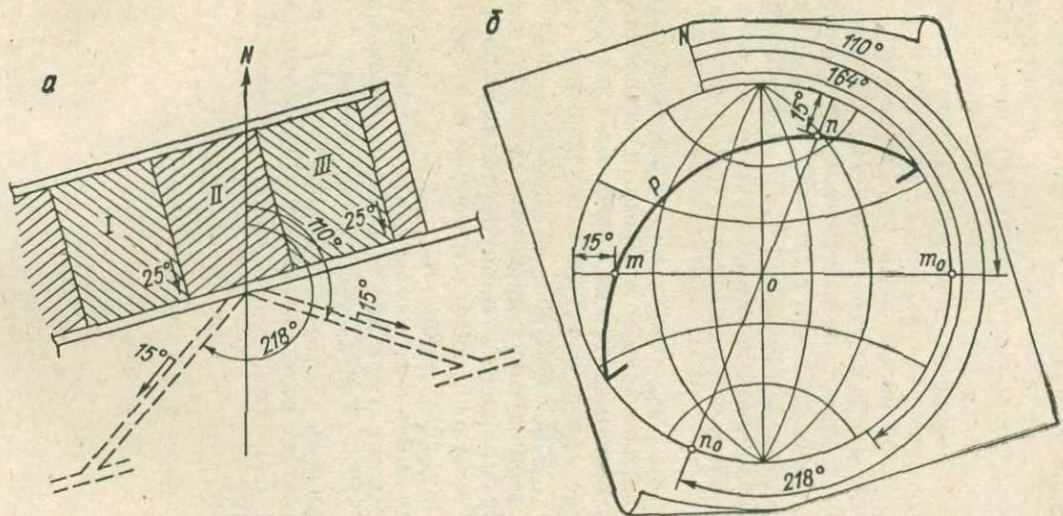


Рис. VII.8. Определение угла наклона выработки заданного направления.
 а — план горных работ; б — построение проекции.

VII.9 Определить угол наклона выработки заданного направления.

При проходке горных выработок в заданном направлении (сбойки, ходки, бремсберги, уклоны и т. п.) нередко появляется необходимость заранее найти их угол наклона, значение которого определяет возможность применения тех или иных забойных механизмов или видов крепления. Допустим, что из штрека, пройденного по угольному пласту (164° , $\angle 25^\circ$), проектируется проведение разведочного уклона по азимуту 110° (рис. VII.8, а).

Требуется определить угол наклона выработки к горизонту, т. е., по существу, выполнить построения, изложенные в пункте I.21. Построим дуговую проекцию плоскости пласта P (рис. VII.8, б). Отсчитав по наружной шкале сетки от северной отметки кальки азимут проектного направления уклона 110° и совместив полученную точку m_0 с экватором сетки, найдем на пересечении экватора с дугой P проекцию оси выработки m . Искомый угол наклона выработки оказался равным 15° . Из этого следует, что при проходке ее необходимо применить только те забойные механизмы, которые могут нормально работать в условиях пологого падения пластов.

Разновидностью рассматриваемой горно-геометрической задачи является определение возможных направлений проходки по пласту угля наклонных горных выработок под заданным углом наклона. Решение задачи сводится к определению азимута прямых заданного угла наклона в заданной плоскости (см. пункт I.22). Построив дуговую проекцию плоскости пласта P (см. рис. VII.8, б), будем вращать кальку до тех пор, пока число градусных делений экватора между его концом и дугой P окажется равным заданному углу наклона.

Найдя оба положения кальки, удовлетворяющие этому условию, отметим точками m и n два возможных положения оси горной выработки. Если критический угол наклона горной выработки 15° , то ее можно задать либо по азимуту 110° , либо по азимуту 218° . Подобные горно-геометрические задачи могут быть решены также посредством построения полюса плоскости P (см. пункт I.22).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликов Б. П.* О методе изучения трещинной тектоники месторождений строительного и облицовочного камня. М., Изд-во АН СССР, 1953. 85 с.
2. *Белоусов В. В.* Тектонические разрывы, их типы и механизм образования. М., Изд-во АН СССР, 1952. 147 с.
3. *Белоусов В. В.* О некоторых результатах и перспективах тектонофизических исследований. — «Изв. АН СССР. Серия геол.», 1958, № 11, с. 3—20.
4. *Букринский В. А.* Практический курс геометрии недр. М., «Недра», 1965. 244 с.
5. *Вистелиус А. Б.* Об обработке микроструктурных диаграмм. — «Зап. Всесоюз. минерал. о-ва», 1953, вып. 4, с. 271—280.
6. *Витковский В. В.* Картография (теория картографических проекций). Спб., 1907. 463 с.
7. *Войновский-Кригер К. Г.* Способ определения падения и простирания пород при помощи наклонного бурения скважин. — «Проблемы сов. геологии», 1936, № 8, с. 727—735; № 10, с. 908—916.
8. *Вольфсон Ф. И.* Структуры эндогенных месторождений. — В кн.: Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., 1953, с. 25—46.
9. *Гендлер В. Е.* Определение элементов залегания пород по аэрофотоснимкам методом горизонтальной линии. — «Бюл. науч.-техн. информации Всесоюз. аэрогеол. треста», 1966, № 1, с. 10—12.
10. *Гзовский М. В.* Тектонические поля напряжений. — «Изв. АН СССР. Серия геофиз.», 1954, № 3, с. 57—62.
11. *Гзовский М. В.* Соотношение между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре. — «Разведка и охрана недр», 1956, № 11, с. 7—22.
12. *Гзовский М. В.* Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. 1—4. М., Изд-во АН СССР. Ч. 1—2, 1959. 256 с. Ч. 3—4, 1963. 544 с.
13. *Гречухин В. В.* Геофизические методы исследования угольных скважин. М., «Недра», 1970. 549 с.
14. *Данилович В. Н.* Основы теории деформации геологических тел. Иркутск, Кн. изд-во, 1953. 103 с.
15. *Елисеев Н. А.* Структурная петрология. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1953. 309 с.
16. *Елисеев Н. А.* Составление диаграмм по структурному и микроструктурному анализу. Л., Изд-во Ленингр. ун-та, 1957. 27 с.
17. *Забродин А. С.* Указания по решению шахтно-геологических задач с помощью азимутальных сеток. Л., 1973. 152 с.
18. *Забродин А. С.* Опыт поисков смещенной части пласта в нарушенных месторождениях. Ч. 1 и 2. М., Углетехиздат, 1951—1952. 45 и 48 с.
19. *Казанцев М. И.* Кернометрия. Алма-Ата, 1971. 185 с.
20. *Кильдюшевский Е. И., Херасков Н. Н.* Зарубежный опыт изучения трещинно-разрывной тектоники по аэроснимкам (обзор). М., 1973. 31 с.

21. Кноринг Д. Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л., «Недра», 1969. 86 с.
22. Кушнарев И. П. Определение направлений и амплитуд перемещения по разрывам. — В кн.: Структуры рудных полей и месторождений. М., 1960, с. 171—239.
23. Леонтовский П. М. Элементы залегания пластов (горная геометрия). Екатеринбург, 1906. 69 с.
24. Лукин Л. И., Чернышев В. Ф., Кушнарев И. П. Микроструктурный анализ. М.—Л., «Наука», 1965. 59 с.
25. Митюнин Ю. К. Трафарет для статистической обработки измерений ориентировки плоскостей и направлений при построении структурных диаграмм. — «Сов. геология», 1970, № 3, с. 67—68.
26. Митюнин Ю. К., Кудлаева А. Л. Трафарет для статистической обработки структурных замеров на сетке Вульфа. — «Сов. геология», 1971, № 5, с. 149—152.
27. Михайлов А. Е. Полевые методы изучения трещин в горных породах. М., Госгеолтехиздат, 1956. 132 с.
28. Николаев В. В. Определение элементов залегания горных пород по неориентированным кернам. — Изв. вузов. Геология и разведка», 1967, № 8, с. 33—40.
29. Николаенко Б. А. О дешифрировании разрывных смещений открытого Донбасса по черно-белым аэрофотоснимкам. — «Геол. журн. АН УССР и М-ва геологии УССР», 1971, № 3, с. 123—124.
30. Новый способ получения ориентированного керна. — «Разведка и охрана недр», 1973, № 12, с. 48—50. Авт.: В. М. Сорокоумов, Г. Э. Сиднев, Г. Р. Илюхин и др.
31. Очеретенко И. А. Способ замера азимута и угла падения трещин с помощью угломерной палетки. — «Разведка и охрана недр», 1958, № 9, с. 15—19.
32. Очеретенко И. А. О прогнозе устойчивости кровли угольных пластов по наблюдениям разрывных нарушений в керне буровых скважин. — «Вестн. АН КазССР», 1959, № 8, с. 72—79.
33. Очеретенко И. А. Угломер ДонбассНИИ. — «Разведка и охрана недр», 1974, № 5, с. 48—50.
34. Очеретенко И. А., Троценко В. В., Заикин В. В. Повторяемость различных форм мелкоамплитудных разрывных смещений на северной окраине Донбасса. — «Геол. журн. АН УССР и М-ва геологии УССР», 1968, т. 28, вып. 1, с. 82—87.
35. Очеретенко И. А., Троценко В. В. Геометрический способ определения азимуты и углов падения пластов угля по керну скважин. — В кн.: Геология и разведка угольных месторождений. М., 1971, с. 176—180.
36. Очеретенко И. А., Шевлягин Е. В. Ориентировка керна скважин Донбасса по палеомагнитным данным. М., 1970. 10 с. (Экспресс-информация ВИЭМС, № 2).
37. Петрусевич М. Н. Аэрометоды при геологических исследованиях. М., Госгеолтехиздат, 1962. 407 с.
38. Пронин А. В. Статистическая обработка в стереографической проекции ориентированных величин. — «Сов. геология», 1949, № 37, с. 33—35.
39. Постников Д. В. О способе разбивки сетки Вульфа на разряды при обработке структурных диаграмм. — «Зап. Всесоюз. минерал. о-ва», 1954, вып. 3, с. 285—287.
40. Пэк А. В. Трещинная тектоника и структурный анализ. М., Изд-во АН СССР, 1939. 152 с.
41. Пэк А. В. К вопросу о так называемом «механическом анализе» в геологической литературе. — «Изв. АН СССР. Серия геофиз.», 1955, № 3, с. 71—72.
42. Разумовский П. К. Стереографические проекции. Л., 1932. 48 с.
43. Родыгин А. И. Применение азимутальных проекций в структурной геологии. Томск, 1973. 80 с.

44. Розенфельд Б. А., Сергеева Н. Д. Стереографическая проекция. М., «Наука», 1973. 46 с.

45. Рыжов П. А. Проекции, применяемые в геолого-маркшейдерском деле. М., Углетехиздат, 1951. 168 с.

46. Рыжов П. А. Геометрия недр. М. — Л., «Недра», 1952. 604 с.

47. Суворучкин В. В. Применение полярной сетки при изучении трещинной тектоники. — «Горн. журн.», 1945, № 10, с. 30—32.

48. Третяк А. Н. Палеомагнетизм среднего и верхнего палеозоя УССР. Киев, «Наукова Думка», 1965. 132 с.

49. Трофимов А. А. Метод определения вектора относительного перемещения крыла тектонического разрыва по геологическим данным при помощи изолиний. — «Сов. геология», 1956, № 54, с. 143—162.

50. Ушаков И. Н. Горная геометрия. М., Госгортехиздат, 1962. 455 с.

51. Федоров Е. С. Теодолитный метод в минералогии и петрографии. — «Тр. Геол. ком.», 1893, т. 10, № 2, с. 14—28.

52. Ферберн Х. В. Структурная петрология деформированных горных пород. М., Изд-во иностр. лит., 1949. 267 с.

53. Шатский Н. С. Происхождение Донбасса. — «Бюл. Моск. об-ва испытателей природы. Отд. геол.», 1937, т. 16, вып. 4, с. 17—25.

54. Шульц С. С. Аэрогеологические методы изучения тектонической структуры. — В кн.: Методы изучения тектонических структур. Вып. 2. М., 1961, с. 70—80.

55. Anderson E. M. The dynamics of faulting. Edinburgh, Oliver and Boyd, 1951. 206 p.

56. Bucher W. H. The stereographic projection, a handy tool for the practical geologist. — J. Geol., 1944, vol. 32, p. 191—210.

57. Denness B. A method of contouring polar diagrams using curvilinear counting cells. — Geol. Mag., 1970, vol. 107, № 1, p. 61—65.

58. Denness B. A revised method of contouring stereograms using variable curvilinear cells. — Geol. Mag., 1972, vol. 109, № 2, p. 49—58.

59. Donn W. L., Shimer L. A. Graphic methods in structural geology. N. Y., 1958. 107 p.

60. Pincus H. Statistical methods applied to the study of rock fractures. — Bul. Geol. Soc. Amer., 1951, vol. 62, № 2, p. 81—130.

61. Phillips F. C. The use of stereographic projection in structural geology. — Reader in Petrology, University of Bristol. First published 1954, reprinted 1955. 90 p.

62. Schmidt W. Gefügestatistik. — Minner. Pet. Mitt., 1925, Bd. 38, S. 14—16.

63. Seitz O. Das wulfische Netz als Hilfsmittel bei tektonischen Untersuchung. — Glückauf, 1924, № 9, S. 26—35.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Основные сведения о стереографической проекции	7
История стереографической проекции	8
Сущность стереографической проекции	10
Стереографическая сетка	12
Равноплощадная и равнопромежуточная сетки	14
Проекция прямых и плоскостей	19
Углы между прямыми и плоскостями	26
Пространственное соотношение плоскостей	31
Преобразования системы проекций	36
Стереограммы	39
Глава II. Построение статистических диаграмм	—
Общие положения	—
Построение статистических диаграмм при помощи равно- площадной сетки	41
Построение статистических диаграмм при помощи сте- реографической сетки	46
Примеры статистико-графической обработки полевых данных	47
Глава III. Определение элементов залегания пласта и его структур- ных компонентов	54
Интерпретация результатов измерений в обнажениях	—
Измерения в кернах буровых скважин	62
Глава IV. Геометрическая характеристика складчатых и разрывных структур	79
Измерение элементов складок	—
Измерение элементов разрывных смещений	82
Глава V. Геометрическая интерпретация полевых измерений трещин Определение пространственного соотношения трещин со складками и разрывными смещениями	96
Преобразование элементов залегания трещин	102
Глава VI. Тектонофизическая интерпретация структурных форм	111
Реконструирование осей напряжений по ориентировке трещин и разрывных смещений	—
Реконструирование осей напряжений по элементам складок	117
Определение генетического типа разрывных смещений на основе тектонофизического анализа	120
Глава VII. Решение горно-геометрических задач	122
Список литературы	133

ИБ № 1151

Игорь Александрович Очеретенко,
Виктор Владимирович Трощенко

**СТЕРЕОГРАФИЧЕСКИЕ
ПРОЕКЦИИ
В СТРУКТУРНОЙ
ГЕОЛОГИИ**

Редактор издательства В. С. Селиванов
Обложка художника Ю. Г. Колотвина
Технический редактор А. Б. Ящуржин-
ская
Корректор М. И. Витис

Сдано в набор 9/VIII 1977 г. Подписано
в печать 29/XII 1977 г. М-44197. Формат
60 × 90¹/₁₆. Бумага тип. № 2. Печ. л. 8¹/₂.
Уч.-изд. л. 8,21. Тираж 1450 экз.
Заказ № 422/433, Цена 40 коп.

Издательство «Недра». Ленинградское
отделение. 193171, Ленинград, С-171,
ул. Фарфоровская, 12.

Ленинградская типография № 6 Союзполи-
графпрома при Государственном комите-
те Совета Министров СССР по делам
издательств, полиграфии и книжной тор-
говли. 196006, Ленинград, Московский
проспект, 91.

40 КОП.

2489