

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС «ГЕОС»

Всесоюзный научно-исследовательский
проектно-конструкторский и технологический институт
геологических, геофизических и геохимических
информационных систем
(ВНИИгеоинформсистем)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ИЗУЧЕНИЮ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД
НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА**

МР 41—06—079—86

МОСКВА — 1987

МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС
"ГЕОС"

**Всесоюзный научно-исследовательский
проектно-конструкторский и технологический институт
геологических, геофизических и геохимических
информационных систем
(ВНИИгеоинформсистем)**

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ИЗУЧЕНИЮ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА РАЗЛИЧНЫХ
СТАДИЯХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА

МР 41-06-079-86

Москва 1987

Составители: от Кольского филиала АН СССР:
Белов Н.И., Горбунов Ю.И., Иванов В.И., Козырев А.А.,
Панин В.И., Рубинраут С.И., Тимофеев В.В., Ширяев А.А.;
от Всесоюзного научно-исследовательского проектно-кон-
структорского и технологического института геологических,
геофизических и геохимических информационных систем:
Варшавский А.И., Ищенко В.И., Кузнецов О.Л., Кузнецов Ю.И.,
Кузнецова Л.В., Чахмахчев В.Г., Чиркин И.А.; от Москов-
ского государственного университета: Николаев П.Н.,
Панасьян Л.Л.; от Всесоюзного заочного политехничес-
кого института: Марков Г.А.; от Института проблем ос-
воения Севера СО АН СССР: Иванников В.И., Царев В.П.

Научный редактор - академик Е.И.Шемякин

Дано системное изложение методики прогноза напряженного состояния пород на различных стадиях геологоразведочного процесса и инженерно-геологических изысканий. Изложены теоретические основы и наиболее характерные примеры изучения напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Методические рекомендации предназна-
чены для специалистов научно-исследователь-
ских и проектных институтов и ВУЗов.

© Всесоюзный научно-исследовательский
проектно-конструкторский и техноло-
гический институт геологических,
геофизических и геохимических
информационных систем
(ВНИИгеоинформсистем),
1987

В В Е Д Е Н И Е

Напряженно-деформированное состояние горных пород массива дает фундаментальное представление о важнейших геологических процессах, протекающих в земной коре как на глобальном (движение литосферных плит), так и на региональном и локальном уровнях (формирование складок, разрывов, возникновение землетрясений), а также об образовании и размещении месторождений полезных ископаемых.

Изучение параметров поля напряжений в земной коре и их изменений во времени имеет большое научное и практическое значение при поисках, разведке и разработке месторождений полезных ископаемых [21]. С напряжениями в земной коре связаны механоактивационные процессы, активизирующие большинство высокотемпературных химических реакций в условиях сравнительно низких температур и, следовательно, оказывающие влияние на генерацию жидких и газообразных углеводородов. К зонам разгрузки напряжений, в частности к глубинным разломам, приурочены структурные формы, наиболее благоприятные для скопления полезных ископаемых, в том числе нефти и газа.

Надежная информация о напряженном состоянии массивов горных пород необходима также и при проектировании, строительстве и эксплуатации горнодобывающих предприятий и подземных сооружений. В последние годы в связи с резким и повсеместным усложнением горно-технических условий добычи полезных ископаемых необходимость в такой информации постоянно увеличивается. Так, при сооружении шахтных стволов, рудоспусков, тоннелей, создании конструкций систем разработки месторождений полезных ископаемых своевременное получение достоверной информации о состоянии массивов горных пород позволяет в 2-3 раза повысить прочность и долговечность подземных выработок, получить значительный экономический эффект и улучшить условия техники безопасности.

К настоящему времени получила признание концепция о формировании поля напряжений в верхней части земной коры, в соответствии с которой суммарное поле определяется совместным действием двух силовых полей - гравитационного и тектонического, причем соотношение

между ними меняется в широких пределах [26]. Этим объясняется высокая изменчивость параметров поля напряжения в массиве горных пород как по площади, так и по глубине.

Однако состояние изученности рассматриваемой проблемы недостаточно для того, чтобы без специальных исследований надежно определять исходное напряженное состояние в конкретных массивах, особенно не вскрытых горными выработками, а также в районах, отнесенных к сейсмоопасным. Наиболее достоверная информация о напряженном состоянии массивов пород может быть получена лишь на основе системы методических приемов и исследований.

Цель настоящих рекомендаций - дополнить существующую инструкцию по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке [14].

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Основные понятия

1.1.1. Напряженно-деформированное состояние определяется интенсивностью внутренних сил, действующих на единицу поверхности массива горных пород. Внутренние силы взаимодействия возникают в результате приложения внешних усилий (тектонических и гравитационных).

1.1.2. Вектор напряжения, действующий на каждую из граней элементарного объема горной породы, раскладывается на нормальное напряжение, перпендикулярное этой грани, и два касательных, лежащих в ее плоскости (рис. 1).

1.1.3. Напряженное состояние в точке с заданными координатами выражается тензором второго ранга (тензором напряжений). Тензор записывается в виде матрицы компонентов (п. 1.1.2.):

$$T_{\sigma} = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

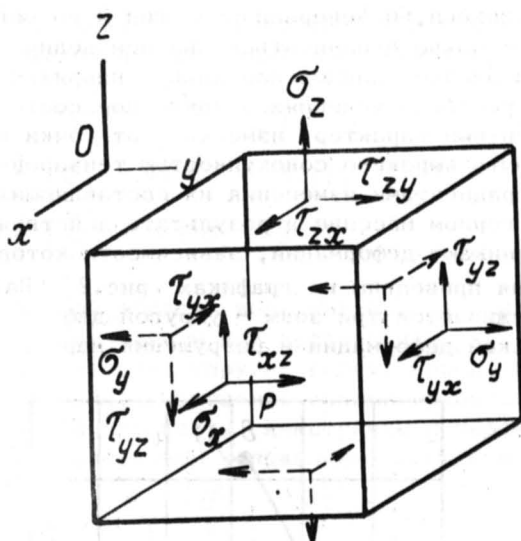


Рис. 1. Составляющие вектора напряжения на элементарных площадках в плоскостях xy , xz , yz

В силу принципа взаимности или парности касательных напряжений ($\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{xz} = \tau_{zx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$) тензоры напряжений симметричны, поэтому в общем случае тензор напряжений определяется шестью компонентами.

1.1.4. В любом поле напряжений можно найти такие направления осей координат, при которых все касательные компоненты тензора окажутся равными нулю. В этом случае запись тензора напряжений содержит лишь три нормальных напряжения:

$$T = \begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{vmatrix}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — главные нормальные напряжения, а направления их действия — главные оси напряжений.

Для аналитических решений задач механики горных пород, а также решения многих вопросов и задач текто-

ники, геофизики, инженерной геологии и горного дела чаще всего можно ограничиться знанием величин и направлений именно главных нормальных напряжений.

1.1.5. В реальных условиях напряженное состояние имеет градиентный характер, изменяясь от точки к точке, и может быть выражено совокупностью тензоров напряжений и градиентами изменения их составляющих.

1.1.6. В горном массиве в результате действия напряжений возникают деформации, зависимости которых от напряжения приведены на графиках рис.2. На рисунке прослеживаются три зоны - упругой деформации, пластической деформации и разрушения пород.

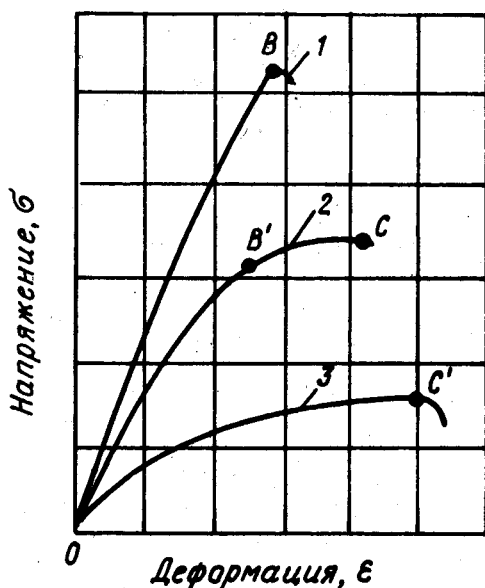


Рис. 2. Типичные графики деформации пород

1 - упругой (кварцит); 2 - упруго-пластической (роговик); 3 - пластической (мрамор); ОВ и ОВ' - зона упругих деформаций; В, С и ОС - зона пластических деформаций; точки В, С, С' - моменты разрушения пород

1.1.7. Линейная область соотношений между компонентами напряжений и деформаций описывается законом Гука:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]; \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)].\end{aligned}\quad (1.3)$$

Именно в этой области возможна оценка действующих напряжений по вызванным ими деформациям.

1.1.8. Для массива упругих горных пород принимают, что напряжения, вызываемые силами гравитации, в горизонтальной плоскости симметричны и перемещение частиц в горизонтальном направлении отсутствует, тогда из 1.3 следует:

$$\frac{\sigma_x}{E} - \frac{\sigma_y}{E} \nu - \frac{\sigma_z}{E} \nu = 0,$$

учитывая, что $\sigma_x = \sigma_y$, получаем:

$$\sigma_y = \sigma_x = \frac{\nu}{1-\nu} \sigma_z,$$

где $\frac{\nu}{1-\nu} = \xi$ - коэффициент бокового распора.

1.1.9. При аппроксимации массива горных пород идеально упругой средой коэффициент бокового распора получают в диапазоне $0,6 \geq \xi \geq 0,2$. Реологические процессы в массиве в течение геологического времени могут привести к условию $\xi = 1$.

1.2. Ранжирование полей напряжений

1.2.1. Распределение параметров полей напряжений в массиве горных пород является статистическим вследствие статистического распределения параметров физических свойств горных пород и их неоднородностей. Оно зависит от физических свойств пород (главным образом плотности, прочности и упругости), наличия крупных тектонических разрывов и рельефа местности.

1.2.2. Дифференциальный подход к изучению полей напряжений в массиве горных пород должен быть выработан на основе четырех принципов:

- 1) соответствия практическим задачам горного производства и подземного строительства;
- 2) учета генетической модели напряженного состояния горных пород в массиве;
- 3) соблюдения сомасштабности объектов исследования и неоднородностей горного массива;
- 4) оптимального комплексирования аналитических и экспериментальных методов изучения напряженного состояния горных пород в массиве.

1.2.3. Первый принцип предусматривает целевое назначение исследования. На разных стадиях освоения месторождения или подземного строительства детальность изучения напряженного состояния пород в массиве и достоверность получаемых при этом данных весьма различны. Например, при проектировании горнодобывающего предприятия для определения направления капитальных и вскрывающих выработок достаточно знать величину и направление наибольшего сжимающего напряжения. Для оптимизации параметров очистной выемки целесообразно составить карту напряжений в пределах очистного блока.

1.2.4. Принцип учета генетической модели напряженного состояния пород в массиве позволяет выработать методический подход к изучению его параметров. Если поле напряжений априорно диагностируется как гравитационное, то его параметры могут быть определены аналитически. Если на месторождении прогнозируется наличие тектонических напряжений, то напряженное состояние пород в массиве должно определяться на основе изучения модели формирования этих напряжений.

1.2.5. Принцип сомасштабности призван обеспечить сопоставимость масштабов изучаемых участков месторождения или района подземного строительства и тех элементов геологического строения, которые определяют закономерности пространственного распределения параметров поля напряжений в пределах исследуемого района. Одни и те же структурные элементы могут выступать как факторы статистической неоднородности массива или как феноменологические явления, обуславливающие характер напряженного состояния пород в массиве.

1.2.6. Принцип оптимального комплексирования аналитических и экспериментальных исследований вытекает из второго и третьего принципов, потому что на основе учета генетической модели и структуры исследуемого района априорно могут быть выделены по данным аналитических исследований детерминированные составляющие параметров полей напряжений в массиве пород. Экспериментальные определения напряжений следует проводить по сети, соответствующей закономерной составляющей изменчивости параметров напряженного состояния пород в массиве, которая представляет собой в общем виде функцию координат пространства, отражающую влияние гористого рельефа или какого-либо структурного элемента.

1.2.7. Формально-количественное описание массивов, в пределах которых действуют тектонические поля напряжений, целесообразно проводить в рамках кусочно-однородной модели, включающей объемы V , W , Ω . Результаты определения напряжений в микрообъеме типа V (объем типа V соизмерим с характерным размером монолитного образца породы) содержат два различных по природе вида информации: первый обусловлен значением напряжений в точке наблюдения, связан с геометрией размещения напряженных массивов и, следовательно, является функцией координат пространства, второй связан с возможными случайными колебаниями и носит вероятностный характер.

Характерные размеры объемов находятся в соотношении

$$\Omega \gg W \gg V. \quad (1.2.1)$$

Напряжения в объемах nV и W связаны следующими равенствами:

$$\bar{\sigma}_V = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Vi} \cdot K_i, \quad (1.2.2)$$

$$\bar{\sigma}_W = \bar{\sigma}_V \pm \frac{t_c \Delta\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (1.2.3)$$

$$\Delta\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_{Vi} - \bar{\sigma}_V)^2 \cdot K_i}{n-1}}, \quad (1.2.4)$$

где n - число измерений напряжений σ_{Vi} в однородно-напряженном объеме W , состоящем из подобъемов типа V ; K - частота измеренных значений напряжений; t_c - коэффициент Стьюдента, определяемый таб-

лично по числу измерений при заданной надежности;

$\Delta\sigma$ - среднеквадратическое отклонение единичного результата измерения напряжения.

1.2.8. Однородно-напряженный макрообъем W - это объем, в каждом подобъеме которого напряжение σ_v не отличается от напряжений σ_w больше чем на величину случайного отклонения.

Критерием квазиоднородности является условие:

$$\frac{t_s \cdot \Delta\sigma}{\sigma_w \cdot \sqrt{n}} \ll 1. \quad (1.2.5)$$

Напряженное состояние в объеме типа Ω может быть представлено совокупностью тензоров типа (1.1), значимое различие которых в функции координат пространства характеризуется градиентом

$$|\text{grad}| = \nabla\sigma = \frac{\sigma_{w_1} - \sigma_{w_2}}{\Delta l}. \quad (1.2.6)$$

1.2.9. В зависимости от размеров исследуемого объекта закономерную составляющую поля напряжений можно выявить лишь при определенной базе измерений, условно отвечающей квазиоднородности. Если по генетической модели и техническим возможностям методов выявить закономерную составляющую напряженного состояния пород в массиве не представляется возможным, изучение поля напряжений проводят на основе экспериментальных исследований по сети, определенной в соответствии с принципами статистического планирования эксперимента.

1.2.10. Районирование полей напряжений в соответствии с изложенными выше принципами позволяет построить карты напряжений, отвечающие практическим задачам и соответствующие напряженному состоянию горных пород изучаемого района.

1.3. Стадийность изучения напряженного состояния пород в массиве

1.3.1. Напряженное состояние горных пород в естественном залегании, по современным представлениям, объединяет совокупность напряженных состояний (тензоров напряжений), формирующихся в массивах горных пород под влиянием естественных факторов и техногенных воздействий.

1.3.2. Основной постоянно и повсеместно действующей

причиной формирования естественного напряженного состояния горных пород (ЕНСГП) является гравитация. Дополнительными причинами, или возбудителями ЕНСГП, являются различные процессы в земной коре и на ее поверхности: вертикальные поднятия и опускания, горизонтальные смещения и деформации участков земной коры, процессы метаморфизма, денудационного среза и переотложения горных пород. Дополнительные возбудители ЕНСГП характеризуются различными распространенностью, длительностью и силой действия и изменяются постоянно, непрерывно или скачкообразно. В ряде участков земной коры при активно действующих дополнительных возбудителях горизонтальные или наклонные составляющие тензоров напряжений могут значительно превышать вертикальные составляющие. Факторами, локально влияющими на ЕНСГП, являются геометрические и структурные характеристики массива, прочность горных пород и другие параметры.

1.3.3. Оценка ЕНСГП и проявлений горного давления под влиянием гравитации выполняется с использованием аналитических и численных методов, при этом учитываются свойства горных пород.

1.3.4. Практически значимые проявления тектонических полей напряжений в верхней части земной коры являются спецификой некоторых массивов горных пород как природных многокомпонентных систем, состав, строение и свойства которых определяются условиями их формирования. Для объяснения этого явления необходимо разработать специальную методику диагностирования пространственного размещения таких полей с применением приемов геометризации недр и инструментальных количественных определений составляющих тензоров напряжений и направлений векторов напряжений.

По результатам измерений, выполненных в горных выработках, установлены следующие закономерности в проявлении полей напряжений:

а) высокие горизонтальные напряжения в массиве (а также аномальные проявления горного давления в выработках) приурочены (по месту) в региональном плане к зонам восходящих движений земной коры, независимо от тектонотипа региона (древние щиты, платформы, зоны активизации орогенеза);

б) в массивах, расположенных в центре поднимающихся тектонических структур, наблюдаются наиболее высокие значения горизонтальных напряжений. Величина этих напряжений уменьшается в зонах тектонических нарушений;

в) высокие горизонтальные напряжения регистрируются на небольших глубинах в массивах, расположенных ниже дна долины. На участках, расположенных ближе к вершинам поднятий (выше местных базисов эрозии), горизонтальные напряжения существенно меньше. Наибольшие горизонтальные напряжения ориентированы параллельно простиранию поднятий, независимо от направления наибольшего сжатия в глубинных частях массива;

г) участки наиболее высоких горизонтальных напряжений коррелируют с распространением наиболее прочных, упругих и монолитных пород.

1.3.5. При поднятии земной коры массивы пород перемещаются на новый гравипотенциальный уровень и подвергаются процессу денудации. За счет этого происходит перераспределение напряжений, и в верхней части земной коры формируются высокие горизонтальные напряжения.

1.3.6. Поле напряжений в массивах, описанных в п. 1.3.5, может быть представлено как суммарное двух составляющих - гравитационной и тектонической:

$$T_{гН} + T_T = \begin{vmatrix} \gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{3}\gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}\gamma H \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \psi_1 T & 0 & 0 \\ 0 & \psi_2 T & 0 \\ 0 & 0 & T \end{vmatrix} \quad (2.1)$$

Поле тектонических напряжений характеризуется: модулем вектора T , азимутальным направлением (α_T) вектора, углом наклона вектора (β_T) и коэффициентом анизотропии поля по вертикали (ψ_1) и горизонтали (ψ_2). Принимая во внимание граничные условия на дневной поверхности, в качестве наиболее общих значений ψ_1 и β_T следует считать $\psi_1 = 0$, $\beta_T = 0$.

1.3.7. Диагностика массивов с высоким значением тектонических напряжений проводится в нижеприведенной последовательности:

а) выделение зон восходящих движений и активно поднимающихся тектонических блоков, определение их границ и расположения месторождений или участков возведения соответствующих объектов по отношению к границам блоков;

б) подразделение месторождений и участков по их расположению относительно элементов гористого рельефа;

в) дифференциация участков по распределению пород с различной прочностью, упругостью и трещиноватостью;

г) предварительное определение направлений главных напряжений по преимущественному развитию систем разрывных и сколовых нарушений;

д) определение величин и направлений напряжений в характерных точках с привлечением данных об особенностях разрушения выработок и скважин, а также данных инструментальных определений.

1.3.8. Оценка напряженного состояния пород в массиве выполняется с использованием широкого спектра методов: геологотектонических [8, 47], аналитических [7], геофизических [21, 54], горнотехнических [49]. Все эти методы могут применяться в определенных условиях, они различаются по значимости и качеству информации. Однако при оптимальном комплексировании они могут использоваться в любых условиях на любой стадии геологоразведочного процесса и инженерно-геологических изысканий, строительства, эксплуатации горнодобывающих предприятий и подземных сооружений. Структура методики прогноза напряженного состояния массивов пород на различных стадиях геологоразведочного процесса приведена в табл. 1.

1.3.9. На региональной стадии геологоразведочных работ по материалам анализа тектонического строения района выполняется предварительная оценка характера напряженного состояния пород в массиве, то есть определяется, можно ли его считать для решения практических задач гидростатическим (гравитационным) или результатом суммарного взаимодействия гравитационного и тектонического полей. Качественная оценка напряженного состояния пород может быть получена на основе анализа данных о направлении и интенсивности вертикальных и горизонтальных движений земной коры. В

Изучение напряженного состояния пород

Стадия изучения напряженного состояния пород	Стадия геологоразведочных работ	Метод исследования
1	2	3
Предварительная оценка поля напряжений	Региональная	Геологическое картирование, дешифрирование аэро- и космоснимков Сейсмологические наблюдения
Количественная оценка напряженного состояния горных пород	Поисковая Разведочная и эксплуатационная	Наземные геофизические методы (различные модификации методов сейсморазведки, гравиразведки, электроразведки, магниторазведки) Метод гидроразрыва в скважинах

Таблица 1
на различных стадиях геологоразведочных работ

Опорный информативный параметр	Ожидаемый результат
4	5
<p>Элементы залегания тектонических структур разного ранга</p> <p>Параметры сейсмических волн, генерируемых землетрясениями</p> <p>Величины скоростей упругих волн Скоростная анизотропия Аномалии силы тяжести Аномалии электромагнитных полей</p> <p>Ориентировка трещины, сформировавшейся в результате гидроразрыва пласта</p> <p>Давление разрыва</p>	<p>Оценка направлений главных напряжений</p> <p>Определение направлений главных напряжений и характера неоднородности поля напряжений</p> <p>Определение направлений главных напряжений и характера неоднородности поля напряжений</p> <p>Определение величин и направлений главных напряжений</p>

1	2	3
<p>Количественная оценка напряженного состояния горных пород</p>	<p>Разведочная и эксплуатационная</p>	<p>Анализ состояния стволов и кернов скважин</p> <p>Визуальное обследование горных выработок</p> <p>Сейсмоакустические измерения в горных выработках и скважинах</p> <p>Метод разгрузки</p> <p>Расчетные методы</p>

4	5
<p>Характер дискования керна Характер разрушения стенок скважины Характер естественного искривления скважин</p>	<p>Определение направлений главных напряжений и величины максимального сжимающего напряжения</p>
<p>Характер разрушения на контуре горных выработок</p>	<p>Определение величины и направления максимального сжимающего напряжения</p>
<p>Величины скоростей продольных и поперечных волн, параметры скоростной анизотропии</p>	<p>Определение направлений и величин главных напряжений</p>
<p>Деформации пород при разгрузке</p>	<p>То же</p>
<p>Данные о геологическом строении и петрофизических характеристиках пород</p>	<p>То же</p>

сейсмоактивных районах на этой стадии оценка направлений главных нормальных напряжений производится на основе данных о параметрах сейсмических волн, генерируемых землетрясениями [3,47]. Направления главных напряжений определяются также по результатам геологического картирования и дешифрирования аэро- и космоснимков.

1.3.10. На поисковой стадии геологоразведочных работ на основе материалов наземных геофизических методов определяются характер неоднородности поля напряжений и направления главных нормальных напряжений.

1.3.11. Количественная оценка напряженного состояния горных пород проводится на разведочной и эксплуатационной стадиях. Величины и ориентации главных напряжений определяют: на основе анализа состояния стволов и кернов скважин, методом гидроразрыва пласта, по результатам сейсмоакустических измерений в скважинах и горных выработках, на основе визуального обследования горных выработок, методом разгрузки и расчетными методами.

1.3.12. Представление о структуре поля напряжений создается в результате построения общей модели напряженного состояния изучаемого массива пород на основе геологотектонической и сейсмологической информации. Дальнейшая детализация наблюдений позволяет определить параметры поля напряжений в пределах каждого структурного элемента, на основе которых может быть построена уточненная модель регионального и локального полей напряжений с необходимой степенью дифференциации.

2. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КОМПЛЕКСОМ ДИСТАНЦИОННЫХ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

2.1. Оценка напряженного состояния по данным дистанционных наблюдений сети линеаментов

2.1.1. Для реконструкции регионального поля напряжений используются результаты дешифрирования аэро- и космоснимков. Если установлено соответствие линеаментов разрывным нарушениям и определен кинематический тип разрыва, что должно быть подтверждено наземными наблюдениями, реконструкция напряжений проводится способом, аналогичным описанному в п.2.1.3.

2.1.2. Схемы дешифрирования можно использовать для предположительной оценки напряжений в прилегающих участках, если установлены зависимости между напряженным состоянием, выявленным наземными методами в одной части исследуемого района, и ориентировкой крупных разрывов, дешифрируемых дистанционными методами. Распространение данных исследования по локальному участку на большую территорию возможно в случае однородности структурного рисунка, выявленного по результатам дешифрирования.

2.1.3. Оценка напряженного состояния по данным дистанционных наблюдений выполняется в три этапа.

Первый этап - проводится ранжирование разрывных нарушений. Для этого все разрывные нарушения в зависимости от их длины делятся на ряд классов. Для оценки величины интервала каждого класса по схеме дешифрирования замеряются минимальные и максимальные разрывные нарушения и определяется их общее количество. Величина классового интервала рассчитывается:

по формуле Стерджесса

$$\Delta l = \frac{(max - min) \ln 2}{\ln N}, \quad (2.1)$$

где Δl - величина классового интервала;
 max - максимальная длина разрыва;
 min - минимальная длина разрыва;
 N - количество разрывных нарушений;
по формуле Доерфеля

$$\Delta l = \frac{max - min}{\sqrt{N-1}} \quad (2.2)$$

(обозначения соответствуют предыдущей формуле).

Далее строятся схемы разрывов отдельно для каждого класса длин. Разрывы, имеющие простирания в разных румбах (субширотные, субмеридиональные, северо-западные, северо-восточные), наносятся на схемы разными цветами. Между разрывами каждого класса необхо-

димо рассчитывать среднее расстояние. Из расчета исключаются кулисно расположенные разрывы или те, расстояния между которыми превышают три длины наибольшего из сравниваемых разрывов. После проведения всех расчетов данные, полученные по разным румбам, объединяются с данными расчета общего среднего расстояния для разрывов данного класса и дисперсии этих расстояний.

Далее с помощью критерия Стьюдента, рассчитываемого по формуле (2.3), определяется достоверность различия средних значений расстояния между разрывами для соседних классовых интервалов:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2(n_1-1) + \sigma_2^2(n_2-1)}{(n_1+n_2-2)} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)}} \quad (2.3)$$

где \bar{X}_1 и \bar{X}_2 - средние значения расстояния между разрывами соседних классовых интервалов;

σ_1^2 и σ_2^2 - дисперсии длин разрывов соседних классовых интервалов;

n_1 и n_2 - объемы выборок, соответствующих меньшему и большему классовым интервалам.

Первый этап заканчивается построением сводного графика, где по оси X откладывается длина разрывных нарушений (величины классовых интервалов), а по оси Y - средние расстояния между разрывами. При этом средние значения соседних классовых интервалов, недостоверно различающиеся между собой, объединяются и рассматриваются общие средние. Ступенчатый график ранжированности разрывных нарушений, построенный по результатам дешифрирования, приведен на рис.3.

Второй этап - традиционным способом строятся розы простирааний разрывов для каждого ранга отдельно.

Третий этап - строятся схемы траекторий осей главных нормальных напряжений. Если разрывы данного ранга можно считать субвертикальными, то разброс в их простираании указывает на положение осей напряжений. Соответственно ось сжатия совпадает с биссектрисой между вершинами максимумов на розе-диаграмме со стороны наименьшего разброса, а ось относительного растяжения - со стороны максимального разброса. Простираания осей наносятся на схему вместе с разрывами соответствующих классовых интервалов.

Если разрывы нельзя считать субвертикальными, то выполнить оценку напряжений невозможно.

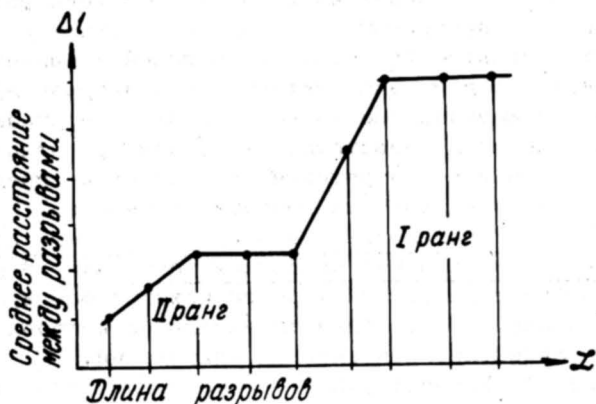


Рис. 3. Ранжированность разрывных нарушений

2.2. Оценка напряженного состояния пород по данным геологического картирования и тектоники района

2.2.1. Комплексы горных пород, слагающих геологический разрез изучаемого района, выделяют по результатам региональных геологических исследований. Породы чехла древних и молодых платформ, образующие комплекс недислоцированных или слабодислоцированных осадочных и вулканогенных пород и прорывающих их магматических тел, характеризуются действием тектонических напряжений (наряду с гравитационным полем напряжений). Породы складчатого фундамента платформ, как правило, находятся в условиях сложного гравитационно-тектонического поля напряжений.

2.2.2. Области активных новейших и современных поднятий и опусканий характеризуются по результатам анализа распределения тектонических напряжений в горных породах верхней части земной коры различным полем тектонических напряжений. Амплитуды новейших движений определяют по карте новейшей тектоники. Интенсивность современных движений определяется их скоростью: для

Европейской территории СССР скорость определяют по карте современных движений земной коры Восточной Европы. Если рассматриваемая область характеризуется новейшими и современными движениями положительного знака, то наряду с гравитационным полем напряжений прогнозируется действие тектонических напряжений.

Если вышеуказанные геологические и геодинамические признаки свидетельствуют о сложном гравитационно-тектоническом поле напряжений, переходят к определению ориентировок действия главных напряжений.

2.2.3. Определение ориентировок главных напряжений на основе анализа разрывной тектоники. В результате деформации земной коры происходит формирование разрывных нарушений, элементы залегания которых определяются ориентировкой главных напряжений.

2.2.3.1. Реконструкция главных напряжений должна проводиться по наиболее молодым разрывам, при этом их геометрические размеры должны быть соизмеримы с размером района, для которого осуществляется прогноз напряженного состояния горных пород.

2.2.3.2. Ориентировка главных напряжений определяется с использованием следующих признаков:

а) при сдвиге алгебраически максимальное напряжение σ_1 , соответствующее относительному растяжению, и алгебраически минимальное напряжение σ_3 , соответствующее относительному сжатию, ориентированы субгоризонтально, при этом угол, образованный направлением смещения по разрыву и направлением действия σ_3 (в виде сходящихся лучей), составляет около 45° ;

б) при взбросовом характере разрыва алгебраически максимальное напряжение σ_1 ориентируется субвертикально, напряжение σ_3 является субгоризонтальным и направлено параллельно горизонтальной проекции линии падения разрыва;

в) при сбросовом характере смещения напряжение σ_1 субгоризонтально и направлено перпендикулярно простиранию разрыва, напряжение σ_3 является субвертикальным.

Промежуточное напряжение σ_2 во всех случаях ориентировано перпендикулярно σ_1 и σ_3 .

2.2.3.3. При сложном типе смещения по разрыву, когда имеет место сочетание сдвиговой и сбросовой или сдвиговой и взбросовой составляющих, ориентировку главных напряжений определяют с помощью экваториальной равноугольной сетки Г.Ф.Вульфа. По окружности сетки показаны значения азимута падения; углы падения отмечены вдоль экваториальной линии. Сетку располагают так, чтобы деление 180° находилось сверху.

Проекцию плоскости разрыва строят следующим образом:

на сетку накладывают кальку, на которой чертят окружность, совпадающую с внешним контуром сетки; на кальке против деления 180° ставят указательную стрелку и, вращая кальку, совмещают стрелку со значением азимута падения разрыва;

вдоль экваториальной линии отсчитывают угол падения, через полученную точку проводят меридиан; линия меридиана и диаметр, соединяющий полюса, определяют проекцию плоскости разрыва.

2.2.3.4. Направление главных напряжений определяют следующим способом (рис.4):

в построенной на равноугольной сетке плоскости разрыва проводят проекцию линии смещения l при известном азимуте смещения; стрелкой указывают направление смещения всякого крыла разрыва;

в плоскости разрыва восстанавливают перпендикуляр к линии смещения l , ориентировка которого совпадает с осью промежуточного напряжения σ_2 . Строят плоскость, перпендикулярную σ_2 ; в этой плоскости располагаются оси напряжений σ_1 и σ_3 ;

к плоскости разрыва восстанавливают нормаль n ; если линия смещения имеет направление к центру сетки, то напряжение σ_3 совпадает с биссектрисой угла между нормалью n и линией смещения l ; при направлении смещения от центра сетки биссектриса угла между нормалью n и линией l совпадает с направлением напряжения σ_1 .

Описанный метод имеет крайне ограниченное применение из-за большой неточности определения времени образования разрывных нарушений и времени проявления

подвижки по разрыву, частого проявления разнонаправленных подвижек в разное время по имеющимся разрывам, слоистости и т.п. В связи с этим даже при благоприятных условиях полученные на основании предложенного метода результаты подлежат корректировке и проверке независимыми методами. Однако предложенный метод можно рекомендовать для предварительной оценки ориентировки главных напряжений регионального масштабного уровня.

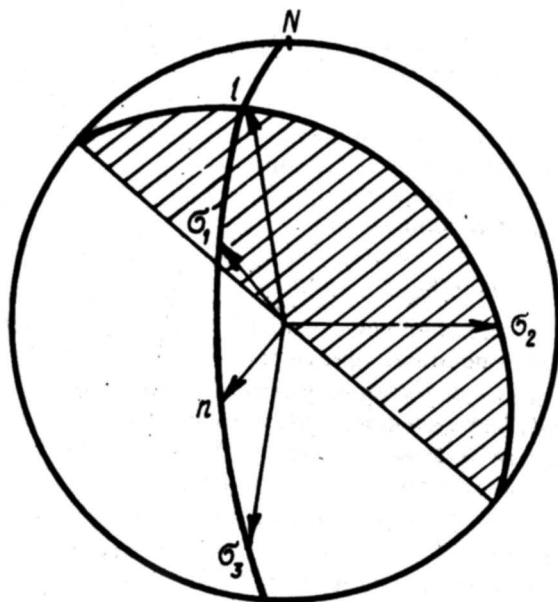


Рис. 4. Реконструкция ориентировок главных напряжений по известным элементам залегания разрыва и смещению его крыльев:

- D - плоскость разрыва;
- l - направление смещения крыльев разрыва;
- n - нормаль к плоскости разрыва;
- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные нормальные напряжения

2.2.3.5. ПРИМЕР. При геологических исследованиях массива горных пород в пределах изучаемого участка зафиксирован тектонический разрыв с параметрами:

азимут падения.....	145°
угол падения.....	54°
мощность зоны дробления.....	5 см
состав заполнителя.....	глина
наличие признаков смещения.....	борозды скольжения
вид нарушения.....	взбросо-сдвиг
азимут линии смещения висячего крыла разрыва.....	98°
угол падения линии смещения.....	45°

Реконструкцию палеонапряженного состояния, в условиях которого сформировался разрыв, проводят следующим образом:

на кальке, наложенной на стереографическую сетку, ставят указательную стрелку и, вращая кальку, совмещают стрелку со значением азимута падения 145°;

вдоль экваториальной линии от края сетки отсчитывают угол падения 54°, через полученную точку проводят линию меридиана и диаметр, соединяющий полюса; линия меридиана и диаметр определяют проекцию плоскости разрыва;

указательную стрелку совмещают со значением азимута линии смещения висячего крыла разрыва, равным 90°; вдоль экваториальной линии проводят проекцию линии смещения, соединяя центр стереографической проекции с меридианом большого круга проекции плоскости разрыва;

совмещают указательную стрелку со значением азимута падения разрыва, и по меридиану большого круга проекции плоскости разрыва от точки его пересечения с проекцией линии смещения l отсчитывают 90°; точку фиксируют и соединяют с центром стереографической сетки; полученный отрезок прямой совпадает с ориентировкой промежуточного напряжения σ_2 ;

точку σ_2 вращением кальки помещают на верхнюю половину экваториальной линии сетки и от нее вниз отсчитывают 90°; проводят проекцию большого круга, который является плоскостью, перпендикулярной к оси σ_2 ;

совмещают указательную стрелку со значением азимута падения разрыва и по экваториальной линии от

меридиана большого круга проекции плоскости разрыва отсчитывают вниз 90° ; полученную точку соединяют с центром сетки. Построенная таким образом прямая определяет ориентировку нормали n к плоскости разрыва; проводят биссектрису угла, образованного нормалью n и линией l ; биссектриса совпадает с направлением σ_1 ;

для определения оси напряжения σ_3 от точки σ_1 по меридиану большого круга проекции плоскости, перпендикулярной к σ_2 , отсчитывают 90° ; точку фиксируют и соединяют с центром сетки.

2.2.3.6. Параметры пространственной ориентировки напряжений определяют следующим образом:

каждую ось напряжений совмещают с верхней половиной экваториальной сетки, при этом указательная стрелка на линии окружности сетки показывает азимут направления соответствующего напряжения;

величину угла падения отсчитывают по экваториальной линии от края сетки до точки выхода соответствующей оси напряжений.

В рассматриваемом случае параметры пространственной ориентировки характеризуются следующими величинами, приведенными в табл.2.

Таблица 2

Параметры пространственной ориентировки главных напряжений (на основе анализа разрывной тектоники)

Главное напряжение	Азимут, град.	Угол падения, град.
Максимальное напряжение σ_1	24	66
Промежуточное напряжение σ_2	216	22
Минимальное напряжение σ_3	126	6

2.2.4. Реконструкция по методу М.В.Гзовского.

Проводят массовые замеры трещиноватости пород, выделяя основные системы, развитые в пределах изучаемой области, и определяют средние значения элемен-

тов залегания. При изучении трещиноватости необходимо установить генетический тип трещин. Для реконструкции ориентировки главных напряжений необходимо использовать наиболее молодые трещины, отражающие последний этап деформирования массива горных пород, поэтому при изучении трещинной тектоники определяют относительный возраст трещин.

Плоскости трещин отрыва ориентируются перпендикулярно направлению наибольших растягивающих или наименьших сжимающих напряжений. Сколовые трещины обычно развиваются по двум сопряженным направлениям. При изучении трещинной тектоники в полевых условиях выделяют сопряженные (возникшие одновременно под действием одного поля напряжений) пары систем трещин. Сопряженность трещин скола устанавливают по их слиянию, взаимному пересечению, одинаковой минерализации, разнонаправленности сдвигов по трещинам и сохранению угла между системами трещин при изменении их направления. После выявления сопряженных систем трещин определяют ориентировку главных напряжений. Для этого на равноугольную стереографическую сетку Г.В. Вульфа наносят элементы залегания сопряженных поверхностей скола и строят их проекции. Линии пересечения плоскостей определяют ориентировку промежуточного напряжения σ_2 . После этого строят проекцию плоскости, перпендикулярной к направлению σ_2 . В этой плоскости располагаются оси напряжений σ_1 и σ_3 . В условиях малой пластической деформации направление напряжений σ_3 совпадает с биссектрисой острого двугранного угла между плоскостями скалывания.

2.2.4.1. Правильность реконструированных ориентировок напряжений можно проверить, если известны сингенетичные направления смещений по поверхности трещин. Так, направление максимального алгебраического напряжения σ_1 совпадает с биссектрисой двугранного угла между системами трещин, смещение по которым имеет направление к линии их пересечения. Использование этой методики затруднено из-за того, что по перечисленным выше признакам нельзя, как показали данные многочисленных исследований, однозначно выделять сопряженные системы трещины. Этим объясняется неоднозначность реконструируемых полей напряжения. Следует отметить, что в

слабодислоцированных толщах значительную роль играют пластические деформации, приводящие к развороту плоскостей трещин, в результате которого ось относительно сжатия σ_3 часто совпадает с биссектрисой тупого угла между трещинами, а ось относительного растяжения σ_1 располагается в остром угле. Кроме того, при практических исследованиях часто наблюдается нечетное количество максимумов трещиноватости, что также приводит к произвольному выбору сопряженных пар трещин.

Метод Гзовского можно рекомендовать для реконструкции полей напряжений в относительно простых геологических обстановках, например в слабодислоцированных районах, когда удается четко выявить две сопряженные системы трещин.

2.2.4.2. ПРИМЕР. В результате массовых замеров тектонической трещиноватости в пределах Кукисвумчоррского участка Хибинского массива выделены основные системы трещин, определены средние значения элементов их залегания, генетический тип и относительный возраст (табл.3)

Таблица 3

Параметры основных систем тектонических трещин

№ системы трещин	Азимут падения, град.	Угол падения, град.	Генетический тип	Относительный возраст (от ранних к поздним)
1	215	60	скол	1
II	141	75	отрыв	2
III	268	70	скол	3,4
IV	181	65	скол	

По признакам, приведенным в п.2.2.4, установлено, что системы трещин III и IV являются сопряженными, поэтому они использованы для реконструкции. Плоскости указанных систем трещин строят на стереографической сетке, аналогично построению плоскости разрыва, приведенному в примере п. 2.2.3.5.

Линия пересечения плоскостей (рис.5) определяет ориентировку промежуточного напряжения σ_2 .

Точка выхода напряжения σ_2 помещается вращением кальки на верхнюю половину экваториальной линии сетки и от нее вниз отсчитывается 90° ; проводится проекция большого круга, который является плоскостью, перпендикулярной к оси σ_2 . Точки пересечения меридиана большого круга проекции данной плоскости с плоскостями систем трещин Ш и 1У соединяют с центром стереографической сетки. Биссектриса угла между этими прямыми, определяющими двугранный угол между плоскостями систем трещин, совпадает с направлением напряжения σ_3 , если этот угол является острым, в противном случае, биссектриса совпадает с направлением σ_1 . Параметры пространственной ориентировки определяют способом, аналогичным приведенному в п.2.2.3.6. Параметры ориентировок главных напряжений, установленные в результате реконструкции, приведены в табл.4.

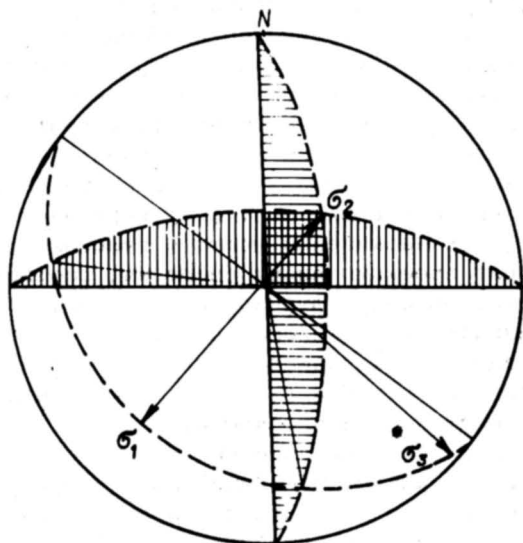


Рис.5. Реконструкция ориентировок главных напряжений по сопряженным системам сколовых трещин:



-  - ориентировка 1У системы трещин;
-  - ориентировка Ш системы трещин

Таблица 4

Параметры пространственной ориентировки главных напряжений (по методу М.В.Гзовского)

Главное напряжение	Азимут, град.	Угол падения, град.
Максимальное напряжение, σ_1	45	30
Промежуточное напряжение, σ_2	218	62
Минимальное напряжение, σ_3	314	3

2.2.5. Реконструкция ориентировок главных напряжений методом кинематического анализа плоскостей разрушения. Реконструкция выполняется путем измерения элементов залегания трещин со следами подвижек по ним, фиксации азимута и угла наклона борозд и штрихов скольжения, а также направления смещения висячего крыла. Результаты измерений наносят на стереографическую сетку Вульфа или Шмидта следующим образом:

по известным элементам залегания разрыва находят точку выхода на верхнюю полусферу нормали к плоскости нарушения, так называемый полюс нарушения;

наносят проекцию линии смещения, соответствующую ориентировке борозд и штрихов скольжения;

определяют след кинематической плоскости, совпадающей с одним из меридианов таким образом, чтобы вектор подвижки и нормаль к плоскости сдвига лежали в этой кинематической плоскости;

относительное смещение висячего крыла нарушения фиксируется стрелкой, исходящей из точки полюса и совпадающей со следом кинематической плоскости.

2.2.5.1. Проекции выходов осей σ_1 и σ_3 подбирают таким образом, чтобы ориентировки сдвиговых смещений располагались в створах острых углов, образованных совокупностями дуг больших кругов, пересекающихся в точках выхода осей σ_1 и σ_3 . При этом направление смещений имеет расходящийся характер от точки выхода оси σ_3 и сходящийся к точке пересечения дуг

второй совокупности, фиксирующей проекцию точки выхода оси σ_1 . Подбор соответствующего варианта ориентировки осей главных напряжений упрощается при помощи ряда ограничений на ориентацию осей σ_1 и σ_3 по отношению к направлению вектора касательного напряжения τ_n . Пример реконструкции главных напряжений описанным методом для условий Расвумчоррского месторождения Хибинского массива приведен на рис.6.

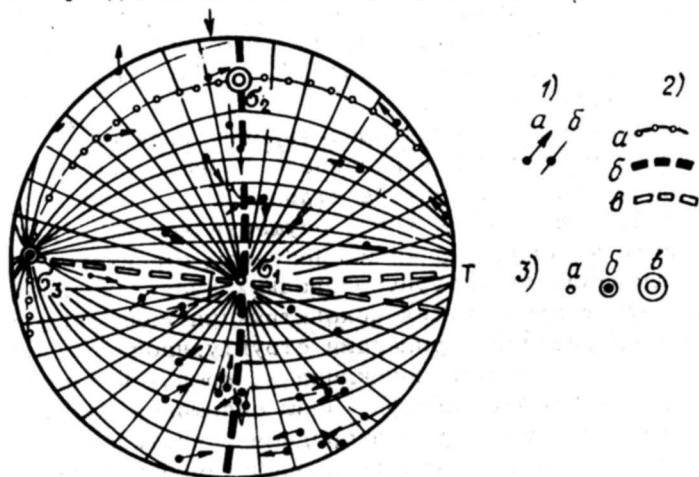


Рис.6. Реконструкция напряжения по структуре разрушения массива на Расвумчоррском месторождении [53]:

- 1 - направления сдвиговых смещений висячих крыльев нарушений, зафиксированных по бороздам скольжения (а - направления однозначные, б - неоднозначные);
- 2 - след проекции плоскостей действия главных нормальных напряжений σ_1 (а), σ_3 (б), σ_2 (в);
- 3 - точки выхода на верхнюю полусферу направлений главных осей напряжений σ_1 (а), σ_3 (б), σ_2 (в), определенные по методу кинематического анализа

2.2.5.2. Метод кинематического анализа плоскостей нарушений может применяться в случае равномерного распределения трещин по азимутам, то есть когда плотность трещин одинакова во всех направлениях. В противном случае, когда наблюдаются преимущественные ориенти-

ровки элементов залегания трещин, последние определяют анизотропию горных пород, что приводит к несовпадению осей напряжения и деформации. Поскольку зеркала скольжения, указывая на смещение в массиве, являются результатом деформации пород, применение указанной методики в этом случае не позволяет оценить ориентировку главных напряжений.

2.2.5.3. Важнейшим условием эффективности использования данной методики является также выбор одновозрастных борозд скольжения, который должен быть осуществлен перед началом работ.

2.2.6. Реконструкция ориентировок главных напряжений по методу П.И. Николаева. Процесс реконструкции выполняется в четыре этапа.

2.2.6.1. На первом этапе осуществляется структурно-тектонический анализ исследуемой территории с целью выделения структурнооднородных участков, для которых будет проводиться реконструкция поля тектонических напряжений. Примерами структурнооднородных участков могут служить моноклинали, крылья и замковые части отдельных складок, зоны разрывных нарушений, то есть структурнооднородными участками являются те, где можно ожидать проявления однородного поля напряжений. Если рассматриваемый структурный элемент (например крыло складки) сложен сильно различающимися литологическими разностями (толщи песчаников, сланцев, известняков и т.д.), область распространения каждой из них рассматривается как самостоятельный структурнооднородный участок. Соблюдение этого условия необходимо для выявления влияния состава пород на характер поля напряжений.

2.2.6.2. На втором этапе проводится сбор массовых замеров элементов залегания трещин. Фиксируются азимут и угол падения каждой конкретной трещины вне зависимости от того, образуют или нет данные трещины четко видимую систему. Для реконструкции поля напряжений структурнооднородного участка обычно достаточно провести по 60-100 замеров в десяти более или менее равномерно расположенных по площади точках. В тектонически сложнопостроенных районах рекомендуется отобрать примерно по десять локальнооднородных участков, каждый из которых характеризуется 3-4 точками сбора замеров тектонической трещиноватости.

Для каждой точки наблюдений составляется таблица-матрица, показывающая количество наблюдаемых трещин с близкой ориентировкой (рис.7). По горизонтали (строки матрицы) располагаются углы падения трещин с шагом 5° , по вертикали - азимуты падения с шагом 10° . Каждый замер наносится в виде точки в клетку с соответствующим азимутом и углом падения. На эту же диаграмму-матрицу наносятся изолинии плотности трещин разной ориентировки, для чего подсчитывается количество трещин, попадающих в "окно" палетки, площадь которой определяется по формуле

$$S_n = \frac{2S_M}{N}$$

- где S_n - площадь палетки осреднения (методом скользящего среднего, то есть со смещением палетки наполовину как по горизонтали, так и по вертикали);
- S_M - площадь матрицы (при шаге азимутов 10° и углов падения трещин 5° она равна 648 элементарным площадкам);
- N - количество замеренных элементов залегания трещин.

Практически, когда количество замеров в каждой точке составляет 60-100, размер палетки осреднения равен 4×4 элементарным площадкам, то есть 20° по углу и 40° по азимуту. Количество трещин, попавших в "окно" осреднения, записывается в центре соответствующего квадрата. Затем палетка смещается наполовину и процедура повторяется до тех пор, пока не будет обчислена вся площадь исходной матрицы. По полученным значениям проводятся изолинии, по которым наглядно выявляются максимумы трещиноватости - направления преимущественной ориентировки трещин в пределах точки наблюдения. При использовании вместо стереографической сетки прямоугольной диаграммы-матрицы на обычной миллиметровке скорость камеральной обработки данных по элементам залегания трещин увеличивается в 7-10 раз и не требуется специальных приспособлений (изображения сетки, специальных трафаретов, палетки Пронина).

2.2.6.3. На третьем этапе составляется сводная матрица по всему структурнооднородному участку. Но на сводную матрицу наносятся не элементы залегания отдельных трещин, а положения локальных максимумов трещиноватости, выявленных по изолиниям на втором этапе обра-

ботки. Сводная матрица обрабатывается способом, описанным при рассмотрении второго этапа работы. Однако площадь палетки осреднения подбирается таким образом, чтобы на диаграмме проявились два "главных" максимума трещиноватости, соответствующих генеральному полю напряжений данного структурнооднородного участка.

2.2.6.4. На четвертом этапе определяется ориентировка и проводится идентификация главных осей напряжений, для чего на стереографическую сетку Вульфа методом, описанным в п.2.2.3.3, наносится ориентировка трещин, соответствующих главным максимумам сводной диаграммы-матрицы. Точка их пересечения соответствует выходу оси σ_2 . На эту же стереографическую сетку наносятся (рис.8) направления разбросов максимумов (направления их главной асимметрии). Стрелки направлены в сторону полблого "склона" максимума. Проводятся след плоскости, перпендикулярной оси σ_2 , и биссектрисы телесных углов, образуемых трещинами, соответствующими главным максимумам сводной диаграммы-матрицы. Направление стрелок разброса показывает положение оси относительного растяжения σ_1 . Третья оставшаяся ось является соответственно осью относительного сжатия σ_3 .

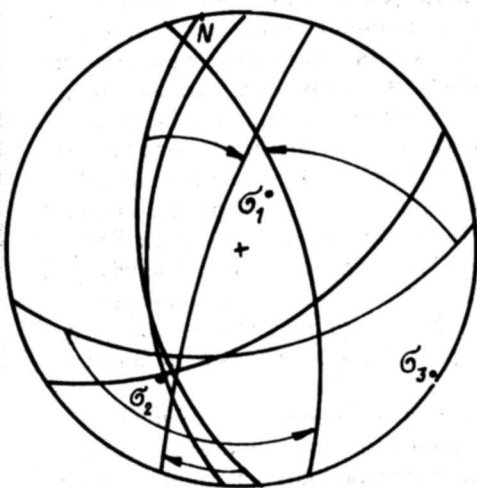


Рис.8.Определение ориентации главных осей напряжений

После определения элементов залегания осей главных нормальных напряжений (см.п. 2.2.3.6) проекции последних наносятся на структурно-тектоническую карту, что позволяет выделить структурные элементы соответствующего ранга. Выделение разномасштабных структурнооднородных участков позволяет построить иерархию полей напряжений разного ранга, ответственных за возникновение

различных структурных элементов. Важным преимуществом данной методики является возможность прогнозирования поля тектонических напряжений на глубину и, следовательно, возможность оценки кинематики глубоких и скрытых разрывных нарушений.

2.2.7. Реконструкция главных напряжений на основе анализа микроструктурных ориентировок в кристаллах.

Суть методики заключается в том, что под микроскопом на столике Федорова статистически исследуются особые динамические направления в кристаллах. Эти направления (S_0) определяются величиной отношения касательного напряжения в плоскости скольжения τ_{\perp} к общему напряжению сжатия σ_g , то есть

$$S_0 = \tau_{\perp} / \sigma_g,$$

$$S_0 = \sin \alpha \cdot \cos \beta,$$

где α - угол между направлением действующей силы и плоскостью скольжения в кристалле;
 β - угол между направлением действующей силы и линией скольжения.

Скольжение в кристалле чаще всего реализуется трансляцией, механическим двойникованием и образованием зон пластического излома. Величина критического касательного напряжения, вызывающего скольжение, зависит от угла приложения силы и линии плоскости скольжения, которая для каждого минерала соответствует определенному кристаллографическому направлению.

Для определения локальных (то есть относящихся к данному зерну в шлифе) направлений относительного сжатия S и относительного растяжения T используют свойство полярности смещений, то есть зависимость направления смещений от ориентировки оптической оси кристалла или от ориентировки главных осей индикатрисы.

2.2.7.1. Общий подход заключается в следующем. На сетку Вульфа наносят проекцию двойникового шва, плоскости трансляции или пластического излома. Определяется полюс этой плоскости (точка пересечения

перпендикуляра к плоскости с верхней полусферой) и выход оптической оси кристалла (для кальцита, доломита, магнетита и др.) или главных осей индикатрисы (для биотита, клиноэзстатита и др.). Через полюс и оптическую ось (соответственно в другом случае через главные оси индикатрисы) проводится плоскость, след которой на плоскости скольжения определяет линию скольжения. Перпендикулярно этой линии в плоскости скольжения расположена ось промежуточного локального напряжения. Напряжения относительного сжатия и растяжения располагаются в восстановленной перпендикулярной плоскости под углом в 45° к плоскости скольжения. Наименование этих осей определяется по положению оптической оси или оси индикатрисы N_g . Так, для карбонатов ось сжатия S располагается в том же квадранте, что и оптическая ось. У диопсида ось сжатия находится в квадранте оси N_g , а у биотита там, где ось N_p , у клиноэзстатита ось сжатия совпадает с квадрантом выхода оси N_m . Эти данные получают экспериментальным путем и могут быть найдены в соответствующих справочниках.

2.2.7.2. Массовое исследование зерен в шлифах позволяет построить диаграммы ориентировок локальных сетей сжатия и растяжения, с максимумами которых связывают направления главных напряжений σ_3 и σ_1 . Следует учесть, что первичная упорядоченность в ориентировке зерен может привести к ошибочному выводу.

2.3. Оценка напряженного состояния по материалам сейсмологических наблюдений

2.3.1. Зарегистрированные в результате сейсмологических наблюдений кинематические параметры сейсмических волн, возникающих при землетрясении, позволяют оценить механизм очага землетрясения, особенности которого определяются напряженным состоянием крупных блоков горных пород.

2.3.2. Определение направлений главных напряжений в очаге землетрясений по кинематическим параметрам сейсмических волн основано на ряде допущений [3,6]. Очаг землетрясений представляется в виде ограниченной площадки скольжения, которую можно принять за плоскость. Скачкообразное смещение крыльев плоскости разрыва создает упругие расходящиеся волны. При тектонических землетрясениях, как правило, наблюдается квадрантное рас-

пределение возмущений сжатия и растяжения, то есть области с положительными и отрицательными смещениями по характеру продольных волн разделяются в пространстве, окружающем очаг, двумя взаимноперпендикулярными плоскостями, проходящими через очаг и называемыми но-дальными [3]. Одна из плоскостей совпадает с плоско-стью разрыва, другая - перпендикулярна ей. Установить только с использованием продольных волн, какая из этих двух плоскостей совпадает с трещиной скалывания, трудно, поэтому привлекаются данные о распространении поперечных волн [3,20].

Найденные плоскости указывают два возможных по-ложения разрыва, которые соответствуют одному напря-женному состоянию, характеризующемуся двумя площадками действия максимальных касательных напряжений. Та-кими площадками являются нодальные плоскости. Ориен-тировка главных напряжений связана с положением пло-щадок главных касательных напряжений и направлением смещения крыльев разрыва.

2.3.2.1. Исходными материалами для определения механизма очага землетрясения являются записи смеще-ния почвы, по которым устанавливаются характеристики первичных волн. С сейсмограмм снимаются знаки и ам-плитуды смещений первых вступлений продольных и по-перечных волн по трем направлениям: север-юг, восток-запад, по вертикали.

2.3.2.2. На сетку Вульфа наносятся условные точ-ки по их сферическим координатам - азимуту станции относительно эпицентра и углу выхода луча из очага. Каждой такой условной точке приписываются знаки сме-щений в волнах, наблюдаемых на соответствующей стан-ции (сетка Вульфа рассматривается в данном случае как стереографическая проекция очаговой полусферы на проходящую через очаг горизонтальную плоскость).

2.3.2.3. Задача построения нодальных линий про-дольных волн сводится к нахождению на сетке Вульфа двух взаимноперпендикулярных дуг больших кругов, отделяющих условные точки, соответствующие станциям, зарегистрировавшим волны сжатия, от условных точек, соответствующих станциям, зарегистрировавшим волны растяжения. Если полного разделения знаков нодальны-

ми линиями добиться не удается, то последние проводят таким образом, чтобы им удовлетворяло максимально возможное число наблюдаемых знаков смещений.

2.3.2.4. Ориентировку главных напряжений после построения нодальных линий определяют следующим образом. Линия пересечения плоскостей σ_2 есть ось промежуточных главных нормальных напряжений σ_2 . В плоскости, перпендикулярной к ней, лежит ось алгебраически большего главного нормального напряжения σ_1 , которое в земной коре чаще всего бывает сжимающим (отрицательным), а не растягивающим (положительным). Оно разделяет пополам те углы между нодальными плоскостями, в которых первыми регистрируются волны сжатия. Ось алгебраически минимального главного напряжения σ_3 разделяет пополам те углы, в которые первыми приходят волны разрежения.

2.3.2.5. Точность определения направлений главных напряжений зависит от многих факторов (качества сейсмограмм, количества и расположения сеймостанций относительно очага землетрясения и др.), которые влияют на точность положения нодальных линий. Следует иметь в виду, что найденные рассматриваемым методом направления главных напряжений характеризуют напряженное состояние среды перед землетрясением лишь в том случае, когда оно вызвано смещением по трещине, возникшей вдоль площадки действия максимальных касательных напряжений. При повторных смещениях по древним трещинам, не совпадающим с направлением максимальных касательных напряжений, нодальные линии и плоскости не определяют фактического положения осей напряжений, действующих перед землетрясением. В силу перечисленных допущений ориентировка осей современных напряжений может быть установлена по сейсмограммам с погрешностью, достигающей 10-20°. Однако при массовых измерениях за счет статистического осреднения материала получают достаточно достоверные результаты о направлении осей главных напряжений в массиве горных пород.

2.3.3. Оценка негидростатичности напряженного состояния пород в крупных блоках базируется на анализе кинематических параметров сейсмических волн, регистрируемых от местных и близких землетрясений.

2.3.4. Негидростатичность напряженного состояния ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$) массива горных пород приводит к появлению скоростной анизотропии, поэтому наряду с продольной регистрируются две ортогонально поляризованные поперечные волны, каждая из которых распространяется в пространстве с различной скоростью и поляризована в плоскости действия соответствующего главного напряжения [31, 36, 49]. Влияние напряженного состояния массива пород на абсолютную величину скорости поперечной волны определяется величиной двух напряжений, действующих в направлениях распространения волны и ортогональном к направлению ее поляризации.

Если породы в ненагруженном состоянии однородны и изотропны, указанные напряжения оказывают одинаковое влияние на обе поперечные волны [54]. Характер изменения скоростей различных типов волн (за исключением SH)* в зависимости от направления их распространения значительно отличается от эллиптического закона.

2.3.5. Для выявления участков земной коры, напряженное состояние которых характеризуется превышением горизонтальных напряжений над вертикальными, сопоставляют времена прихода двух поперечных волн, обладающих вертикальной и горизонтальной поляризацией. Более высокая величина скоростей горизонтально поляризованных волн свидетельствует о превышении на данном участке горизонтальных напряжений сжатия над вертикальными. Наиболее обоснованные выводы ($T_{SH} - T_{SV} = \max$) могут быть сделаны по данным анализа волн, распространяющихся вдоль оси действия наименьшего по абсолютной величине горизонтального напряжения.

2.3.6. Определение направления действия наибольшего и наименьшего горизонтальных напряжений сжатия осуществляют на основе материалов регистрации сейсми-

* Учитывая, что основное внимание уделяется анизотропии, приняты не сейсмологические обозначения поперечных волн, а используемые в акустике анизотропных тел. Поэтому под SH и SV-волнами понимаются поперечные волны, поляризация которых ортогональна (SH) или совпадает (SV) с плоскостью, в которой рассматривается зависимость скоростей от направления распространения (см. рис. 9, б).

ческих волн для разных азимутов их распространения. Схема сейсмологических наблюдений может быть аналогична представленной на рис. 9, а или обратной, когда одной станцией регистрируются сейсмические колебания, приходящие из разных направлений. При этом анализируется зависимость разницы времен прихода различных волн ($T_{SV} - T_P$) или ($T_{SH} - T_{SV}$) в функции от направления их распространения.

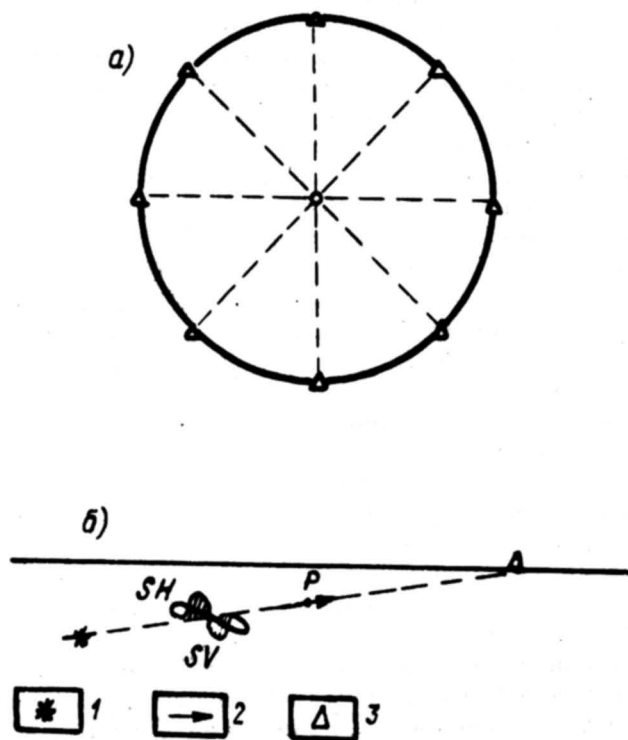


Рис. 9. Схема сейсмологических наблюдений:

а - горизонтальная плоскость; б - вертикальная плоскость; 1 - эпицентр землетрясения; 2 - направления распространения упругих волн; 3 - приемная станция; P - продольные волны; SV, SH - поперечные волны

На рис. 10 представлен теоретический вид этой зависимости ($L = 100$ км). Направление действия наименьшего горизонтального напряжения сжатия определяют по максимуму ($T_{SH} - T_{SV}$) и минимуму ($T_{SV} - T_P$).

2.3.7. Для дифференциации исследуемой области по различному соотношению напряжений проводят анализ изменения разности ($T_{SH} - T_{SV}$) при разных удалениях от эпицентра, но при одном и том же направлении распространения волн. Это направление следует выбирать вдоль оси действия наименьшего по абсолютной величине горизонтального напряжения. Неизменность величины ($T_{SH} - T_{SV}$) при увеличении расстояния от эпицентра по сравнению с базовым указывает на то, что исследуемый участок характеризуется превышением горизонтальных напряжений сжатия над вертикальными. Уменьшение величины ($T_{SH} - T_{SV}$) свидетельствует об ином соотношении горизонтальных и вертикальных напряжений: этот участок нагружен в меньшей степени или абсолютная величина вертикальных напряжений выше горизонтальных. Увеличение ($T_{SH} - T_{SV}$) свидетельствует об еще большей относительной величине горизонтальных напряжений в исследуемом участке по сравнению с базовым.

2.3.8. Анализ материалов сейсмологических наблюдений с целью оценки напряженного состояния пород в массиве ведут в тесной увязке с текстурно-структурными особенностями пород исследуемого участка, поскольку скоростная анизотропия может быть обусловлена не только негидростатическим напряженным состоянием массива, но и слоистостью или трахитоидностью пород. Поэтому, если последние имеют место в пределах изучаемого участка, необходимо оценить возможное их влияние на достоверность результатов анализа. В слоистой среде скорости продольных волн имеют наибольшие значения вдоль слоев. Наибольшие скорости поперечных волн должны отмечаться при распространении вдоль слоистости и поляризации волн в плоскости простираения слоев. Однако необходимо иметь в виду, что влияние негидростатического напряженного состояния в ряде случаев оказывается сильнее геологических факторов и приводит к переориентировке осей максимальных и минимальных скоростей в слоистой среде.

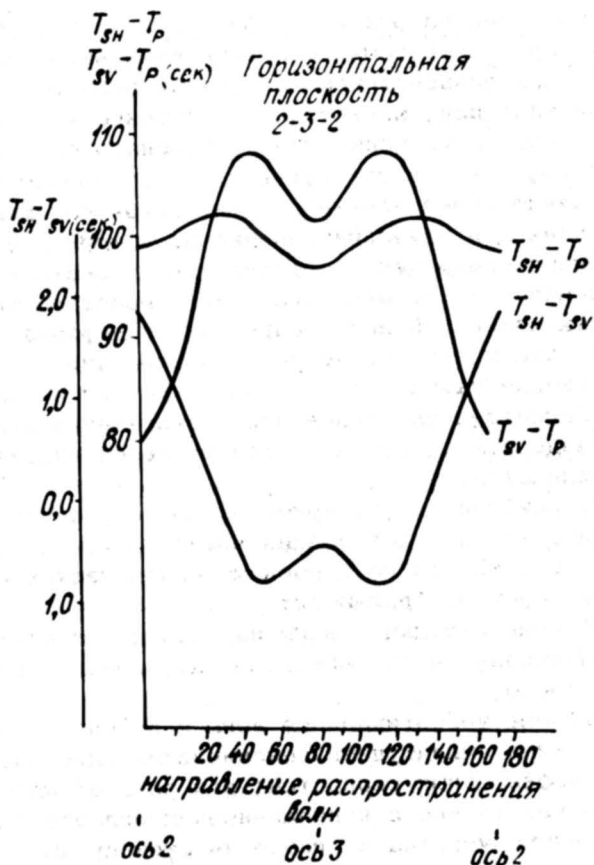


Рис. 10. Характер изменения величины разности времен прихода продольных (T_p) и различно поляризованных поперечных (T_{sh} , T_{sv}) волн от направления распространения волн в горизонтальной плоскости. Оси 2 и 3 - направления действия наименьшего и наибольшего главных напряжений

2.4. Изучение напряженно-деформированного состояния горных пород наземными геофизическими методами

2.4.1. Под воздействием напряжений меняются скоростная, плотностная, магнитная и электрическая характеристики среды. Деформация пород, находящихся как в докритическом, так и в закритическом состоянии, также вызывает значительные изменения этих характеристик. В связи с этим для изучения напряженно-деформированного состояния среды целесообразно использовать наземные сейсмические методы. Для оценки пространственно-временных изменений поля напряжений и деформаций на качественном и количественном уровнях наиболее широкое применение нашли методы сейсмоакустики и гравиразведки. Магнито- и электрометрия с этой целью используются гораздо реже, поэтому в данных рекомендациях не рассматриваются.

2.4.2. Наиболее достоверные данные о распределении поля напряжений и деформаций можно получить при выполнении этой оценки по временным сейсмическим разрезам, на которых отображаются:

погребенные складки и зоны нарушения, то есть участки пликативных и дизъюнктивных деформаций геологической среды;

чередующиеся субвертикальные зоны с аномально высокими и низкими амплитудами сейсмических сигналов и значениями эффективных скоростей; эти зоны отождествляются соответственно с напряженными и ослабленными субвертикальными участками геологической среды.

Такой анализ проводится на временных разрезах, полученных с динамическими поправками (за неидентичность условий возбуждения и приема) и с восстановлением истинных соотношений амплитуд сейсмических сигналов.

Дополнительно могут быть проанализированы гео-сейсмические модели эффективных скоростей и затухания энергии сейсмических [4] волн (α), значения энергий отраженных сигналов (E_c), шума (E_w) и дифрагированных волн (E_g) по целевым горизонтам, а также высокочастотные флуктуации (с частотой выше 2 км^{-1}) наблюдаемой кривой Δg . Графики энергий отраженных сигналов и шума определяются по программам ПГР (программа

ИАНА, разработанная ЦГЭ МНП СССР), графики энергий дифрагированных волн - по программам ДИФРЭН (разработка МИНГ им.И.М.Губкина). Эти графики можно использовать для качественной оценки напряжений и упруго-деформационных модулей и коэффициентов. Например, увеличение энергии отраженных сигналов указывает на увеличение напряжений горных пород в исследуемом интервале разреза, увеличение энергии шума и дифрагированных волн указывает на увеличение трещиноватости массива.

2.4.3. Для количественного определения значений эффективных упруго-деформационных модулей и эффективного горизонтального напряжения необходимо, чтобы сейсмические исследования проводились в многоволновой модификации - с обязательной регистрацией продольных и поперечных (либо обменных) волн. При обработке данных многоволновой сейсмики по схеме общей глубинной точки (ОГТ) могут быть получены четыре основных типа временных разрезов: для двух монотипных волн - продольной (P) и поперечной (S) и двух обменных (P/S и S/P). Исследования, проведенные в нашей стране и за рубежом, показали, что наиболее информативны окончательные временные разрезы по P- и P/S-волнам. Здесь следует отметить высокие перспективы использования комплекса результатов по P- и S/P-волнам, так как они могут быть получены по одним и тем же полевым данным МОГТ при различной схеме обработки. В последнем случае необходимость в проведении специальных полевых наблюдений сейсмических волн приемниками на X-компоненте отпадает. Обработка материалов обменных волн по методу общей глубинной точки (МОГТ) имеет специфические особенности (по сравнению с существующим стандартом) и требует более подробного рассмотрения.

2.4.4. Для обменных волн методика суммирования отличается от традиционной схемы ОГТ (рис.11), так как при формировании ОГТ лучевая схема будет несимметричной по сравнению со схемой монотипных волн. Для расчета схемы суммирования каналов (в случае обменных волн) следует использовать отношение

$$\frac{t_s^2 (t_p^2 + H^2)}{t_p^2 (t_s^2 + H^2)} = \frac{V_s^2}{V_p^2} \gamma^2,$$

где V_s и V_p - средние (для изучаемой толщи) значения скоростей S и P-волн;

l_s и l_p - горизонтальное расстояние от источника (или приемника) S и P-волн до общей глубинной точки;

H - глубина от дневной поверхности до ОГТ.

При $H > l_p$ более чем в 2-3 раза можно пользоваться отношением

$$l_s / l_p \approx \gamma.$$

Примеры расчета каналов суммирования обменных волн по схеме ОГТ приведены в табл.5. Из таблицы видно, что при обработке материалов, полученных по стандартной методике наблюдения МОГТ, схема суммирования каналов (или формирования годографа ОГТ) для обменных волн типа S/P должна быть изменена. При суммировании S/P-волн кратность уменьшается по сравнению с монотипными волнами, но при этом возрастает количество точек для одного наблюдения. В процессе обработки необходимо использовать значения статистических и кинематических поправок, соответствующих обменным волнам. Величины этих поправок могут быть получены по данным широкополосного акустического каротажа (АКШ) микросейсмокаротажа (МСК), а также при изучении зоны малых скоростей (ЗМС) методом преломленных волн (МПВ).

2.4.5. В результате обработки сейсмических материалов по монотипным и обменным волнам должны быть получены:

1) временные разрезы ОГТ на нескольких фильтрациях (низкой, средней и высокой) и с восстановлением истинных соотношений амплитуд;

2) вертикальные и горизонтальные спектры скоростей:

$$V_p, V_{s/p} (V_p/s);$$

3) параметры α , E_c , E_w , E_g для целевых горизонтов.

2.4.6. Количественная оценка физико-механических характеристик среды по материалам многоволновой сейсморазведки и высокоточной гравиразведки осуществляется в последовательности, приведенной ниже:

1) по временным разрезам ОГТ выполняется стратиграфическая идентификация исследуемых отражений P и S-волн или S/P(P/S)-волн. Для этой цели используются

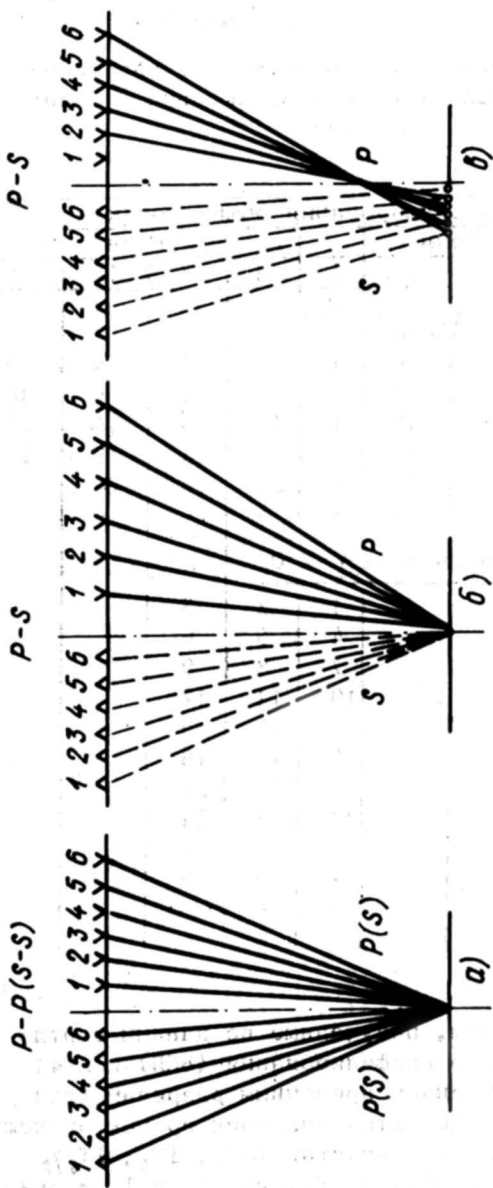


Рис. 11. Лучевые схемы формирования общих глубинных точек в случае монотипных (а) и обменных (б) волн, а также расформирования общей глубинной точки в случае суммирования обменных волн по схеме монотипных волн (в)

Условные обозначения: V – источник; Л – приемник

Таблица 5

Расчет каналов суммирования по схеме ОГТ для моно-типных и обменных волн (система наблюдений - фланговая, количество каналов - 24)

№ п/п	Каналы суммирования общих точек								
	для Р-Р и S-S-волн				для Р/S-волн				
	1	II	III	IV	1	II	III	IV	V
<u>кратность - 6, $\gamma=1,5$</u>									
1	1	2	3	4	1	2	3	4	5
2	5	6	7	8	6	7	8	9	10
3	9	10	11	12	11	12	13	14	15
4	13	14	15	16	16	17	18	19	20
5	17	18	19	20	21	22	23	24	-
6	21	22	23	24	-	-	-	-	-
<u>кратность - 12, $\gamma=2,0$</u>									
1	1	2			1	2	3		
2	3	4			4	5	6		
3	5	6			7	8	9		
4	7	8			10	11	12		
5	9	10			13	14	15		
6	11	12			16	17	18		
7	13	14			19	20	21		
8	15	16			22	23	24		
9	17	18			-	-	-		
10	19	20			-	-	-		
11	21	22			-	-	-		
12	23	24			-	-	-		

вертикальные годографы, полученные по данным вертикального сейсмического профилирования (ВСП) и АКш;

2) по всем полученным временным разрезам (для всех типов волн) определяются значения времен прохождения волны в исследуемых пластах (ΔT_p , ΔT_s , $\Delta T_{s/p}$ или $\Delta T_{p/s}$) по формуле $\Delta T = T_n - T_k$, где T_n и T_k - значения времен отражения от подошвы и кровли исследуемого пласта;

3) по данным бурения, СК или ВСП и значениям ΔT определяют мощность исследуемых пластов:

$$\Delta H = \frac{V_{\rho n} \cdot \Delta T}{2};$$

4) по данным комплексной интерпретации материалов грави- и сейсморазведки подбирается среднее значение плотности ρ_n в исследуемой толще (P_n) и определяется его относительное изменение ($\delta\rho_n$) по данным режимных наблюдений;

5) определяются значения эффективных упруго-деформационных модулей и эффективного горизонтального напряжения, а также их относительные изменения:

коэффициент Пуассона (ν)

$$\nu = \frac{0,5(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} = \frac{0,5(\Delta T_s/\Delta T_p)^2 - 1}{(\Delta T_s/\Delta T_p)^2 - 1},$$

$$\delta\nu = \frac{(0,5\Delta T_{s2}^2 - \Delta T_{p2}^2)(\Delta T_{s1}^2 - \Delta T_{p1}^2)}{(0,5\Delta T_{s1}^2 - \Delta T_{p1}^2)(\Delta T_{s2}^2 - \Delta T_{p2}^2)} - 1,$$

модуль сдвига (G)

$$G = \rho_n \cdot V_s^2 = 4\rho_n \left(\frac{\Delta H}{\Delta T_s}\right)^2,$$

$$\delta G = (1 + \delta\rho_n) \left(\frac{\Delta T_{s2}}{\Delta T_s}\right)^2 - 1,$$

модуль Юнга (E)

$$E = \rho_n \cdot V_p^2 (1 + \nu) = 4\rho_n \left(\frac{\Delta H}{\Delta T_p}\right)^2 (1 + \nu),$$

$$\delta E = (1 + \delta\rho_n) \left(\frac{\Delta T_{p2}}{\Delta T_{p1}}\right)^2 \frac{1 + \nu_2}{(1 + \nu_1)} - 1,$$

объемный модуль (K)

$$K = \rho_n \cdot V_p^2 - 3/4 \rho \cdot V_s^2 = \rho_n \cdot \Delta H^2 (4/\Delta T_p^2 - 3/\Delta T_s^2),$$

$$\delta K = (1 + \delta\rho_n) \frac{4/\Delta T_{p2}^2 - 3/\Delta T_{s2}^2}{4/\Delta T_{p1}^2 - 3/\Delta T_{s1}^2} - 1,$$

$$\sigma_r = \frac{1}{1-\nu} \rho_n \cdot H = \rho_n H \left(1 - 2 \frac{\Delta T_p^2}{\Delta T_s^2}\right),$$

$$\delta \sigma_r = (1 + \delta \rho_n) \frac{\Delta T_{s2}^2 (\Delta T_{s2}^2 - 2 \Delta T_{p2}^2)}{\Delta T_{s1}^2 (\Delta T_{s1}^2 - 2 \Delta T_{p1}^2)} - 1,$$

где ΔH - мощность исследуемой толщи (пласта);
 H - глубина до исследуемой толщи;

$\Delta T_{p1}, \Delta T_{p2}, \Delta T_{s1}, \Delta T_{s2}$ - время прохождения волн P и S в исследуемой толще при первоначальных (1) и повторных (2) наблюдениях;

ρ_n и $\delta \rho_n$ - средняя плотность породы в толще и ее относительное изменение при повторных наблюдениях.

При использовании временных параметров обменных волн в указанные формулы вместо ΔT_s подставляются значения $\Delta T_{s/p}$ (или $\Delta T_{s/p}$) и ΔT_p :

$$\Delta T_s = 2 \Delta T_{p/s} - \Delta T_p.$$

2.4.7. Пример определения отношения горизонтальной и вертикальной составляющих поля напряжений в массиве горных пород через коэффициент Пуассона приведен на рис.12. Временные разрезы по данным сейсморазведки продольных и обменных волн взяты из [58]. На разрезах достаточно четко идентифицируются отражения от одних и тех же стратиграфических толщ. В качестве верхнего маркирующего горизонта выбрано отражение P-волны на времени 0,64 с ($x=0$), а в качестве нижнего - на времени 0,98 с. В интервале между маркирующими горизонтами для каждого пикета (с шагом 0,1) определены значения ΔT_p и $\Delta T_{p/s}$, по которым рассчитаны значения ν и отношение горизонтальной и вертикальной составляющей поля напряжений σ_r / σ_v . Как видно из графика, это отношение меняется от 0,38 до 0,49. Если считать, что для рассматриваемой в примере горизонтально-слоистой среды вертикальная составляющая напряжений

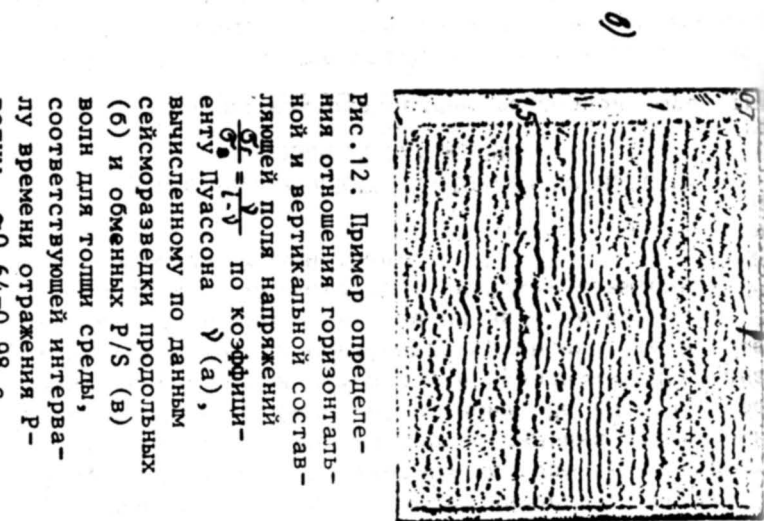
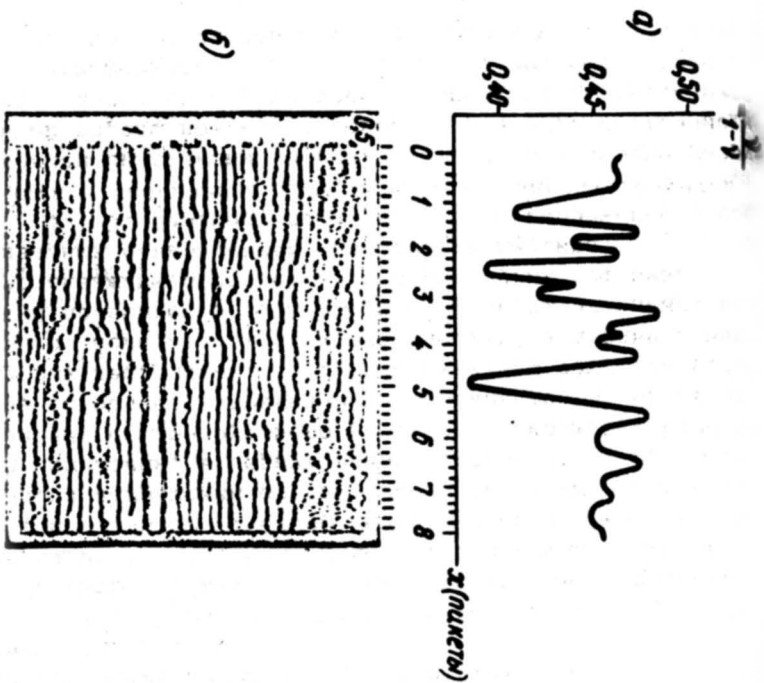


Рис. 12. Пример определения отношения горизонтальной и вертикальной составляющей поля напряжений $\frac{\sigma_r}{\sigma_\theta} = 1 - \nu$ по коэффициенту Пуассона ν (а), вычисленному по данным сейсмозаведки продольных (б) и обменных P/S (в) волн для толщи среды, соответствующей интервалу времени отражения P-волны $\approx 0,64-0,98$ с

$\sigma_v = \rho_n \cdot H$ для исследуемой толщи практически не меняется, то два основных минимума (в интервале пикетов 2,0-2,6 и 4,4-5,2), отмечаемых на графике, соответствуют областям разгрузки горизонтальных напряжений (в направлении профиля наблюдений). На временных разрезах, особенно для P/S-волн, в указанных интервалах отмечается заметное ослабление интенсивности отражений (так называемые "светлые пятна") на временах 1,2-1,3 с, что соответствует участкам повышенной трещиноватости горной среды.

3. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

3.1. Скважина как разновидность горной выработки

3.1.1. Скважины представляют собой наиболее распространенный класс горных выработок, предназначенных для изучения земных недр, поисков и разведки месторождений полезных ископаемых, эксплуатации глубокозалегающих продуктивных пластов, содержащих жидкие и газообразные флюиды.

3.1.2. Проходка скважины в горной породе, особенно на большую глубину, приводит к локальному возмущению напряженного состояния пластов, слагающих данный разрез, и вызывает ответную реакцию массива: компоненты тензора напряжений породы вокруг скважины изменяются. Эти изменения, в первую очередь, зависят от противодавления столба бурового раствора в скважине. Если порода сохраняет напряженность и находится в пределах упругих деформаций, то стенки скважины остаются устойчивыми. Если девиатор октаэдрических касательных напряжений превышает предел прочности породы на сдвиг, вокруг скважины образуется зона неупругих деформаций, связанных с нарушением сплошности массива.

3.1.3. Переход породы из упруго-напряженного состояния в напряженно-деформированное характеризуется появлением дилатансии, в результате чего в объеме разрушенной породы возникает новое напряженное состояние и восстанавливается равновесие напряжений на границе с упруго-деформированным массивом. Последующее изменение напряженно-деформированного состояния пластов в разре-

зе скважины обусловлено двумя причинами: увеличением или снижением противодействия на стенки скважины; взаимодействием фильтрата бурового раствора с породой.

3.1.4. Увеличение гидравлического давления на стенки скважины часто приводит к гидравлическому разрыву пластов и раскрытию трещин в зоне разгрузки горного давления (зона разуплотненной породы). Снижение давления на стенки скважины, например для вызова притока пластовых флюидов, приводит к нарушению устойчивости породы в зоне разгрузки горного давления; этим объясняется вынос в скважину при эксплуатации пластов большого количества обломочного материала.

3.1.5. Нарушение устойчивости породы в зоне разгрузки горного давления происходит также и в результате физико-химических процессов, связанных с введением фильтрата бурового раствора в породу. В качестве типичного примера нестабильного поведения пород можно привести глинистые и соляные пласты, где вследствие проникновения фильтрата в зону разрушения пласта на стадии его вскрытия скважиной за счет эффектов растворения соли, набухания и диспергирования глины наблюдаются: "расслабление" дилатированной сыпучей среды, подвижки фронта разрушения, расширение зоны деформации вокруг ствола скважины.

3.2. Оценка величин напряжений по выходу керна

3.2.1. Ствол геологоразведочной скважины и извлекаемые образцы керна являются технологическими датчиками, с помощью которых можно определять параметры поля напряжений нетронутого массива горных пород. Эти определения основываются на использовании экспериментально устанавливаемых зависимостей характера разрушения стенок скважин и выбуриваемого керна от величины напряжений. Известно [13,15], что характер разрушения стенок скважин и образцов керна в процессе бурения определяется величиной и ориентацией главных напряжений или прочностными характеристиками пород.

3.2.2. Оценку величины напряжений выполняют по параметрам разрушения керна в процессе бурения скважины. По данным измерений, выполненных методом разгрузки в высоконапряженных магматических породах Хибинского массива, установлено, что деление керна в процессе

бурения на отдельные части, длина которых превышает радиус керна, происходит при отношении

$$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{сж}} = 0,1 \div 0,3 ,$$

где σ_{\perp} - максимальное напряжение, ортогональное к оси скважины;

$\sigma_{сж}$ - прочность пород при одноосном сжатии.

Длина частей керна возрастает при уменьшении значения σ_{\perp} . Данная зависимость установлена по скважинам $\varnothing 76$ мм, диаметр керна $d = 58$ мм.

Несмотря на то что эта зависимость прослеживается слабо, по ней все же можно оценить уровень напряжений. Действующие напряжения при таких параметрах разрушения керна не превышают $0,3 \sigma_{сж}$.

3.2.3. Деление выбуриваемого керна на диски толщиной $t < 0,5 d$ по экспериментальным данным начинается в зависимости от типа пород при отношении

$$\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{сж}} \geq 0,3 \div 0,7 .$$

При отношении $\frac{\sigma_{\perp}}{\sigma_{сж}} = 1:2$ керн может полностью превратиться в буровую мелочь при небольших значениях двух других главных напряжений.

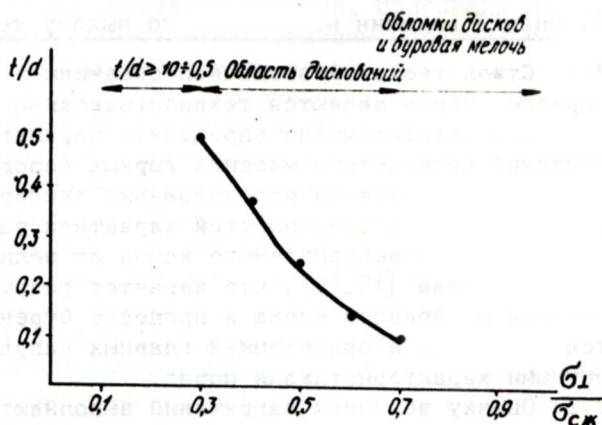


Рис. 13. Зависимость отношения t/d (t - толщина диска, d - диаметр керна) от $\sigma_{\perp} / \sigma_{сж}$

На рис. 13 приведена зависимость отношения t/d от величины $\sigma_{\perp}/\sigma_{сж}$, определенная для нефелиновых сиенитов Хибинских апатитовых месторождений при испытании образцов пород в специальных установках объемного сжатия. Напряжение σ_{\perp} ориентировано перпендикулярно к оси скважины. По параметрам дискования керна при бурении разведочных скважин можно вычислить величину действующих напряжений.

Следует отметить, что рассматриваемая зависимость несколько меняется для разных пород, поэтому для повышения надежности оценки напряжений по параметрам дискования керна ее следует устанавливать для каждой разности или класса пород разведываемого месторождения.

3.3. Оценка величины и направления главных напряжений по разрушению стенок и искривлению ствола скважин

3.3.1. Искривление ствола скважины вызывают различные геологические и технологические факторы: крутое залегание пластов, частая перемежаемость пластов различной твердости, природные нарушения в породах, тип долота и т.д. Однако искривление ствола наблюдается и в однородных массивных породах при минимальном влиянии технологических факторов. В этом случае искривление связано с особенностями напряженного состояния горных пород.

3.3.2. Использование результатов инклинометрических измерений в скважинах основано на зависимости расположения участков концентрации напряжений на контуре скважины от направления максимальных сжимающих напряжений в массиве горных пород. Если в зонах концентрации напряжений, ориентированных перпендикулярно направлению действия максимальных сжимающих напряжений, напряжения превышают половину предела прочности пород на одноосное сжатие, то породы в этих зонах разрушаются. Кроме того, при повышенной концентрации напряжений снижается энергоемкость процесса разрушения горной породы на контуре скважины буровым инструментом, который приобретает возможность преимущественного перемещения в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном вектору максимальных сжимающих напряжений. В этом случае имеет место азимутальное искривление ствола скважины.

3.3.3. Направление максимальных сжимающих напряжений определяют следующим образом*. В вертикальных скважинах, пробуренных на стадии геологоразведочных и инженерно-изыскательских работ, измеряют азимутальное искривление стволов. По результатам измерений строят гистограмму распределения направлений искривлений, по которой определяют азимут направления преимущественного искривления, к нему прибавляют или вычитают 90° . Полученное значение характеризует азимут действия в массиве горных пород максимального сжимающего горизонтального напряжения.

Для выявления преимущественной ориентировки сжимающих напряжений в пределах изучаемого массива целесообразно использовать скважины, равномерно распределенные по площади. Чтобы исключить влияние структурных особенностей горных пород, искривления стволов скважин измеряют в пределах участков однородных пород.

3.3.4. ПРИМЕР. В пределах разведываемого апатитового месторождения Каашва в Хибинском массиве проведены каверно- и инклинометрические измерения в скважинах. В процессе определения фактического диаметра скважин установлено, что он зачастую превышает расчетный из-за образования каверн, при этом кавернообразование зафиксировано в прочных монолитных породах. Этот факт можно объяснить действием высоких сжимающих напряжений, которые в Хибинском массиве имеют тектоническую природу. Для оценки направления действия тектонических напряжений определены значения азимутальных искривлений стволов скважин.

Чтобы исключить влияние структурных особенностей горных пород на оценку значений искривления ствола скважины, измерения проводились на участках однородных массивных пород - лявоchorритов и ювитов. Для измерений использовались инклинометры типов ИК-2 и ИТ-200, погрешность измерений угла отклонения от вертикали составляла ± 30 мин, азимута искривления - $\pm 4^{\circ}$.

* Козырев А.А., Горбунов Ю.Г., Ширяев А.А., Панин В.И. Способ определения направлений главных тектонических напряжений в массиве горных пород. - Авторское свидетельство СССР № 1208237. Бюллетень изобретений, 1986, № 4.

Среднее значение азимутального искривления скважин для месторождения в целом определялось по данным измерений, проведенных в 112 скважинах. По результатам инклинометрических измерений построена гистограмма (рис. 14), на которой зафиксирован максимум, характеризующий преобладающее искривление с азимутом $150-160^{\circ}$.

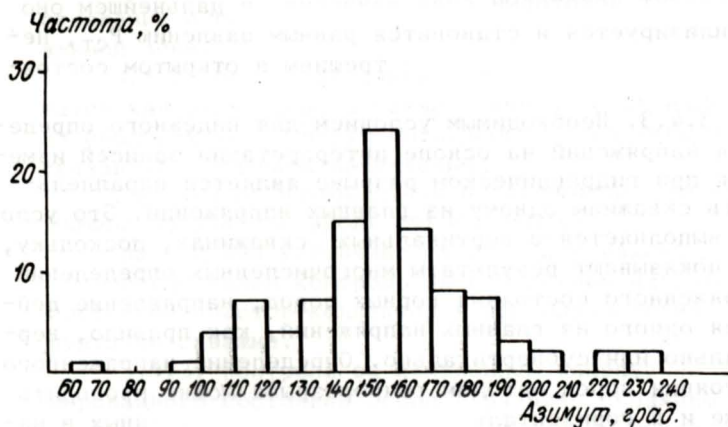


Рис. 14. Гистограмма распределения азимутальных искривлений стволов скважин

Из этих значений вычитается 90° . Следовательно, максимальные сжимающие тектонические напряжения в пределах месторождения имеют направление со средним значением азимута $60-70^{\circ}$.

3.4. Определение напряжений методом гидравлического разрыва в скважинах

3.4.1. При определении напряженного состояния горных пород методом гидравлического разрыва выбирается участок скважины, в пределах которого естественная трещиноватость пород отсутствует, а проницаемость не превышает ~ 1 мД. Этот участок изолируется пакерами и в него нагнетается жидкость, например вода, давление которой внутри скважины постоянно контролируется. При некотором критическом давлении P_p , называемом давлением разрушения, происходит разрыв отложений и в

стенке скважины формируется трещина. Момент образования трещины регистрируется по резкому сбросу давления.

3.4.2. После образования трещины нагнетание жидкости прекращается, гидравлическая система герметизируется и регистрируется изменение давления. Сначала происходит некоторый спад давления, в дальнейшем оно стабилизируется и становится равным давлению $P_{ст}$, необходимому для поддержания трещины в открытом состоянии.

3.4.3. Необходимым условием для надежного определения напряжений на основе интерпретации записей изменения при гидравлическом разрыве является параллельность скважины одному из главных напряжений. Это условие выполняется в вертикальных скважинах, поскольку, как показывают результаты многочисленных определений напряженного состояния горных пород, направление действия одного из главных напряжений, как правило, вертикально или субвертикально. Определение напряженного состояния пород методом гидроразрыва можно проводить также и в горизонтальных скважинах, пробуренных в направлении действия одного из главных горизонтальных напряжений.

3.4.4. Если в стенке скважины в результате гидроразрыва образовалась вертикальная трещина, то величины минимального горизонтального главного напряжения σ_{Hmin} и максимального горизонтального главного напряжения σ_{Hmax} определяются по следующим формулам [57]:

$$\begin{aligned}\sigma_{Hmin} &= P_{ст}; \\ \sigma_{Hmax} &= \sigma_p + 3\sigma_{Hmin} - P_p - P_o,\end{aligned}$$

где σ_p — прочность породы на разрыв,
 P_o — поровое давление.

3.4.5. Определение направления действия σ_{Hmin} производится на основании того, что σ_{Hmin} перпендикулярно вертикальной плоскости, в которой формируется трещина гидроразрыва. Ориентация трещины устанавливается с помощью скважинного акустического телевизора.

3.4.6. Если в стенке скважины в результате гидроразрыва образовалась горизонтальная трещина, то вертикальное главное напряжение $\sigma_z = P_{ст}$. Величины и направления σ_{Hmin} и σ_{Hmax} в этом случае не определяются.

3.5. Оценка напряженного состояния горных пород по данным акустического каротажа скважин

3.5.1. Акустический каротаж (АК) – один из наиболее распространенных видов геофизических работ. Он широко применяется на стадии разведки месторождений полезных ископаемых. По данным АК можно составить представление о геодинамическом состоянии пород в прискважинной зоне.

3.5.2. На основе данных АК с привлечением результатов кавернометрии, а также акустических измерений на образцах керна могут быть решены следующие задачи, связанные с оценкой напряжений:

определены вертикальная и горизонтальная составляющие напряжений вдоль ствола скважин;

рассчитана устойчивость ствола скважины;

осуществлен контроль за изменением напряженного состояния пластов-коллекторов при опробовании и эксплуатации скважин.

3.5.3. Контроль за изменением напряженно-деформированного состояния пород в разрезе скважины осуществляется методом АК с использованием многоэлементных зондов, позволяющих определять скорость распространения упругих волн на различных базах измерения. По зависимости скорости распространения упругих волн от дефектности породы можно оценить степень нарушенности массива (плотность трещин в удельном объеме) и размеры зоны нарушений сплошности пласта. По данным повторного акустического каротажа (через 48 и 96 ч) можно выявить динамику процесса неупругой деформации стенок скважины, а также определить интервалы, потенциально опасные с точки зрения обвалов породы.

3.5.4. Методика измерения скоростей и амплитуд упругих волн, а также регистрации фазокорреляционных диаграмм (ФКД) и волновых картин изложена в [29], методика акустических измерений на образцах керна – в [48, 55].

3.5.5. Оценка вертикальной составляющей напряжений вдоль ствола скважины проводится по однотипным петрофизическим интервалам, выделенным в пределах разреза [22]. Для каждого интервала измеряют скорости распространения продольных волн (V_p') в статистически значимом количестве образцов при нормальных ус-

ловиях. С целью построения тарировочных зависимостей для данного интервала выбирают наиболее представительный образец с V_p' , близкой к среднему значению. В процессе нагружения выбранного образца измеряют значения скоростей V_p'' при различных давлениях σ . По результатам измерений вычисляют:

$$\Delta V_p = \frac{V_p'' - V_p'}{V_{cp}}, \quad (3.5.1)$$

$$\text{где } V_{cp} = \frac{V_p'' + V_p'}{2}.$$

Затем строят тарировочные зависимости $\Delta V_p \div \sigma$ для вскрытых скважиной литологических разностей.

Для отдельных петрофизических интервалов по данным акустического каротажа определяют среднюю величину V_p , а затем рассчитывают ΔV_p :

$$\Delta V_p = \frac{V_p - V_p'}{V_{cp}}, \quad (3.5.2)$$

$$\text{где } V_{cp} = \frac{V_p + V_p'}{2}.$$

По величине ΔV_p (3.5.2) и соответствующей данному петрофизическому интервалу тарировочной зависимости $\Delta V_p - \sigma$ определяют величину вертикальной составляющей напряжений σ_z . Далее на основе аналогичных определений для других интервалов строят обобщенную зависимость σ_z от глубины H . Полученный градиент напряжений сравнивают с рассчитанным по весу вышележащих пород ($\sigma_z^0 = \sum_{i=0}^z \gamma_i H_i$, где γ_i - удельный вес отдельных разновидностей пород) и делают заключение о наличии отклонений от нормального закона изменения вертикальных составляющих напряжений.

3.5.6. Экспериментально оценить величину горизонтальных составляющих напряжений по данным акустического каротажа скважин принципиально возможно в том случае, когда наряду с V_p используется скорость поперечных волн (V_s). Физической основой для такой оценки является то, что в отличие от V_p , изменение которой определяется главным образом соотношением с распространением волн нагрузками, изменение V_s зависит от двух компонент напряжений, соответствующих направлению распространения волны и ее поляризации. Если породы однородны и изотропны в ненагруженном состоянии, влияние на величину V_s двух

указанных напряжений одинаково. Таким образом, при каротаже разведочных скважин, то есть при распространении волн в субвертикальном направлении, V_p будут характеризовать изменение прежде всего вертикальной составляющей напряжений (σ_z), а V_s - изменение суммы вертикальной и горизонтальной составляющих ($\sigma_z + \sigma_y$).

С целью оценки горизонтальной составляющей напряжений (σ_y) для V_s выполняют измерения, аналогичные описанным в п. 3.5.5, и определяют значения V_s , V_s' , V_s'' , V_{scp} , ΔV_s . По величине ΔV_s и установленной в процессе осевого нагружения керна тарировочной зависимости $\Delta V_s - \sigma$ рассчитывают сумму вертикальной и горизонтальной составляющих, а с учетом измеренной σ_z (п. 3.5.5) оценивают собственно горизонтальную составляющую.

3.5.7. Нарушение устойчивости ствола скважин наиболее вероятно в интервалах интенсивной разгрузки пород в виде осыпания стенок скважины и на участках высоконапряженных пород вследствие превышения напряжениями предела прочности пород.

3.5.8. Для выделения интервалов интенсивной разгрузки используют интервальные времена продольной волны Δt_p , значения амплитуд продольных и поперечных волн (A_p и A_s) и ФКД. По искажению фазовых линий на ФКД, более сильному уменьшению значений A_s по сравнению с A_p , а также возможному увеличению диаметра ствола скважины выделяют зоны трещиноватости и в выделенных трещинных интервалах определяют значения V_p . Затем в нормальных условиях по образцам керна, отобранным из этих интервалов, измеряют скорости продольных волн (V_p'). Средние значения V_p и V_p' сопоставляют, и в случае их совпадения в пределах погрешностей измерений делают заключение о разгруженном состоянии данного трещиноватого интервала и возможном осыпании в нем стенки скважины. В случае превышения V_p над V_p' , которое сопровождается уменьшением затухания поперечной волны, меньшим искажением фазовых линий на ФКД и незначительным изменением диаметра скважин, делают заключение о смыкании трещин под действием нагрузки в данном интервале.

3.5.9. Оценку устойчивости ствола скважины в нагруженных интервалах пород проводят по величине напряжений, действующих ортогонально к ее оси. Для скважин, пройденных в породах, напряженное состояние которых формируется под влиянием только веса пород (согласно результатам прямых натуральных измерений σ_y другими методами), величину горизонтальных напряжений можно оценить через скорости продольных и поперечных волн по формуле:

$$\sigma_y = \frac{1}{1-\nu} \gamma H ,$$

где ν - коэффициент Пуассона, определяемый по V_p и V_s .

3.5.10. При отсутствии априорных данных о величине σ_y , полученных другими методами, для оценки устойчивости ствола скважин и диагностики субгоризонтальных тектонических напряжений в массиве производят экспериментальную оценку σ_y в соответствии с п. 3.5.6. Заключение об устойчивости стенок скважины делают на основе сопоставления значений σ_y с величиной $\gamma_m H$, где γ_m - удельный вес бурового раствора, H - глубина. Если $\sigma_y < \gamma_m H$, то стенки скважины устойчивы, если $\sigma_y > \gamma_m H$, то стенки скважины неустойчивы. На основании сделанного вывода выбирают оптимальную величину γ_m .

3.5.11. По прискважинным аномалиям напряженного состояния горных пород в ряде случаев можно определить размер зоны проникновения фильтрата бурового раствора и объяснить различие профилей приемистости и отдачи пластов при их гидродинамических исследованиях в процессе испытаний. Расформированию зоны проникновения после крепления скважины обсадной колонной предшествует перераспределение порового давления, т.е. расформирование аномалий напряжений. В связи с этим оперативный контроль напряженного состояния пластов-коллекторов может быть эффективно использован для прогнозирования процессов изменения *состава* флюидов и фильтрационных свойств пластов-коллекторов в прискважинной зоне.

3.5.12. Оперативный контроль и учет напряженного состояния пластов-коллекторов необходимы при оценке пористости по скорости продольных волн и при определении трещиноватости коллекторов [29]. Для решения

этих задач используют результаты непосредственного измерения забойного давления против пластов и тарировочные зависимости скорости и пористости от дифференциального давления [29].

3.5.13. Оперативный контроль и учет напряженного состояния пластов-коллекторов необходимы при оценке эффективности технологических воздействий в процессе испытания. К числу технологических воздействий, при которых происходят обратимые и необратимые изменения напряженного состояния пластов-коллекторов, относятся:

опробование пластов в открытом стволе с применением пластоиспытателей;

крепление скважины обсадной колонной и цементирование;

перфорация пластов-коллекторов;

испытание пластов;

проведение солянокислотных ванн, гидроразрыва и других видов обработки пластов с целью улучшения проницаемости прискважинной зоны.

Основой контроля изменений напряженного состояния при технологических воздействиях является проведение повторных измерений АК.

3.5.14. Методика проведения повторных измерений акустического каротажа включает: выполнение фонового замера перед технологическим воздействием и проведение контрольного замера после воздействия, сопоставление результатов измерений и определение изменения напряжений по разности измеряемых параметров при использовании соответствующих тарировочных зависимостей (см. п. 3.5.5).

3.5.15. Методика прогнозирования результатов испытаний^{х)} заключается в прогнозировании забойных давлений, при которых имеют место изменения напряженного состояния и смыкание трещин на стенке скважины либо на кольце повышенных напряжений вокруг нее. Положение и размеры кольца можно определить по данным разноглу-

^{х)} Ищенко В.И., Романова М.В. и др. Изучение возможности прогнозирования результатов испытаний на основе применения широкополосного АК в комплексе ГИС. М., ВГФ, 1986.

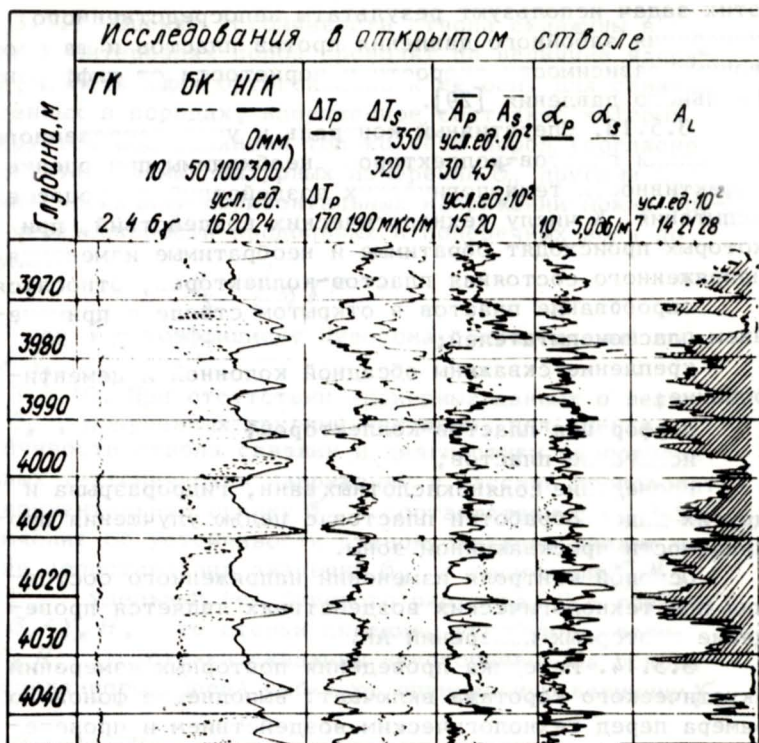


Рис. 15. Контроль за изменением проницаемости и трещинным параметрам

бинных акустических исследований (см. п. 3.5.3) или путем акустического частотного зондирования (АЧЗ). Оперативно оценить проницаемость пластов-коллекторов в прискважинной зоне при изменении забойных давлений можно путем измерения динамических параметров волн Лэмба-Стоунли при проведении широкополосного АК (рис. 15).

3.5.16. Результаты спектральной обработки можно представить в виде двумерных изображений акустической неоднородности прискважинной зоны, которая выражается изолиниями акустических параметров в функции глубины скважины h и расстояния от ее оси $r = f(\lambda)$, где λ - длина акустической волны. На таких изображениях, реализующих принцип интроскопии околоскважинного прост-

динамических параметров волн Лэмба-Стоунли против пласта-коллектора будет обусловлено в основном изменением его проницаемости и вертикальной трещиноватости. При увеличении проницаемости значения амплитуд волн Лэмба-Стоунли A_L уменьшаются, а коэффициент затухания волны α_L увеличивается (рис. 15). Указанные параметры наиболее чувствительны к изменению проницаемости при значениях, не превышающих 30 мД.

3.5.18. Пример 1. На месторождениях Самгори-Патардзеули и Телети по данным акустического каротажа скважин были определены: устойчивость пород, представленных пластами туфов, перспективных на нефть и газ, предельные значения возможных депрессий на пласты (не более 20 кгс/см²). В результате проведенных работ установлена возможность эксплуатации скважин с открытыми стволами [1,2]. На рис. 16 приведена акустическая характеристика продуктивной части разреза скв. 24 и расчетные данные по устойчивости ее стенок.

3.5.19. Пример 2. В скв. 6 пл. Ханкала (Чечено-Ингушская АССР) был выполнен акустический каротаж с регистрацией кривых интервальных времен на разных базах измерений. Исследуемый интервал (1100-1300 м) представлен чередованием глин и песчаников с нормальными значениями пластовых и поровых давлений. Плотность бурового раствора, закачиваемого в скважину, - 1300 кг/м³.

В песчаниках кривые Δt на всех базах измерений совпали, следовательно, радиальный градиент скорости распространения продольных волн отсутствует ($\frac{\Delta V_p}{\Delta R} = 0$). В глинистых породах, расположенных выше и ниже песчаника, зарегистрированы различные значения Δt , что свидетельствует об изменении скорости продольных волн в зависимости от расстояния (R) до оси скважины:

$R, \text{ м}$	0	0,12	0,2	0,4
$V_p, \text{ м/с}$	2035	2190	2235	2315

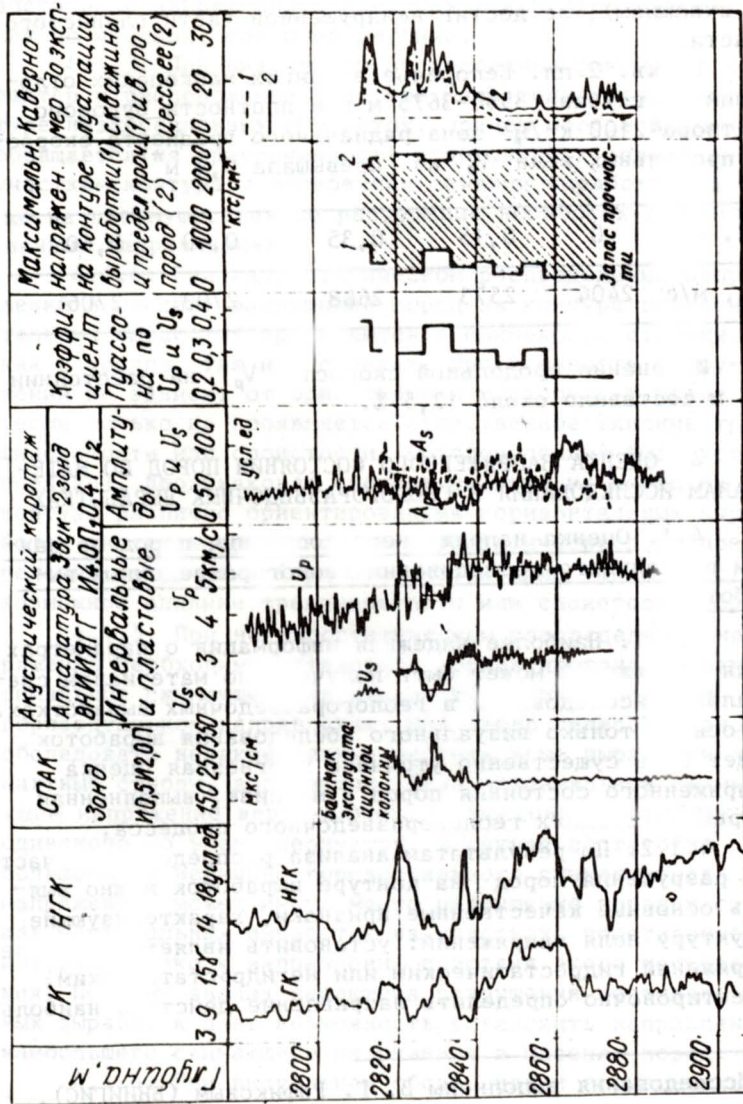


Рис. 16. Акустическая характеристика продуктивной части разреза скв. 24 и расчетные данные по устойчивости ее стенок [2]

В данном случае акустический сигнал, полученный на максимальном разnose источника и приемника (что соответствует слою на расстоянии более 0,4 м от стенки скважины), не достиг ненарушенной части глинистого пласта.

В скв. 2 пл. Белоречье в глинах майкопских отложений на глубине 3550–3675 м при плотности бурового раствора 2100 кг/м³ зона радиального градиента скорости продольных волн V_p не превышала 0,4 м*).

R, м	0	0,15	0,35	0,40	0,60
V_p , м/с	2404	2573	2688	2703	2706

Изменение продольной скорости V_p на расстоянии 0,4 м составило около 12,5 %.

4. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПО МАТЕРИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЯ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ВЫРАБОТКАХ

4.1. Оценка напряженного состояния пород по данным визуального исследования геологоразведочных выработок

4.1.1. Наиболее надежная информация о параметрах поля напряжений может быть получена по материалам специальных исследований в геологоразведочных выработках. На основе только визуального обследования выработок может быть существенно уточнена прогнозная оценка напряженного состояния пород в массиве, выполненная на ранних стадиях геологоразведочного процесса.

4.1.2. По результатам анализа распределения участков разрушения пород на контуре выработок можно выявить основные качественные признаки, характеризующие структуру поля напряжений: установить является ли поле напряжений гидростатическим или негидростатическим; ориентировочно определить направление действия наиболь-

* Исследования выполнены В. Г. Рафиковым (ВНИИГИС), Б. А. Александровым (СКТВ ПГ), М. П. Головки (трест "Грознефтегеофизика").

шего сжимающего напряжения, оценить характер изменчивости поля напряжений в пределах вскрытого участка как по площади, так и по глубине.

4.1.3. При визуальном обследовании фиксируют характер и расположение участков разрушения пород на контуре незакрепленных выработок, причем особое внимание обращается на приуроченность разрушений к определенным участкам контура в поперечном сечении выработок, а также на преимущественное разрушение выработок в определенных направлениях.

4.1.4. При гидростатическом распределении напряжений в массиве разрушения пород на контуре горизонтальных выработок проявляются в одинаковой степени, как в кровле, так и в стенках. Интенсивность разрушений не зависит от ориентировки выработок в плане (если только не проявляется существенное влияние трещиноватости или слоистости, которое должно быть установлено). Неодинаковая степень разрушения пород на контуре различно ориентированных горизонтальных выработок является признаком негидростатического распределения напряжений (при этом необходимо также учесть возможное влияние трещиноватости или слоистости пород).

4.1.5. При негидростатическом распределении напряжений необходимо установить, ориентировано ли максимальное сжимающее напряжение в вертикальном или горизонтальном направлении. Для этого целесообразно обследовать незакрепленные вертикальные выработки - шахтные стволы, восстающие. Если максимальное сжимающее напряжение вертикально, то состояние выработки одинаково по всему периметру. В случае достаточно большого по величине горизонтального сжимающегося напряжения может иметь место разрушение пород в стенках вертикальных выработок на участках, простирающиеся которых близко к направлению действия этого напряжения. Поэтому анализ характера разрушения вертикальных выработок дает возможность установить направление наибольшего сжимающего напряжения в массиве пород.

4.1.6. При визуальном обследовании горизонтальных выработок также можно установить направление действия максимального сжимающего напряжения (вертикальное или горизонтальное). В первом случае разрушения отмечаются лишь в стенках выработок, во втором -

преимущественно в кровле. Если наибольшие напряжения действуют в горизонтальном направлении, ориентировочную оценку азимута этого направления наиболее удобно

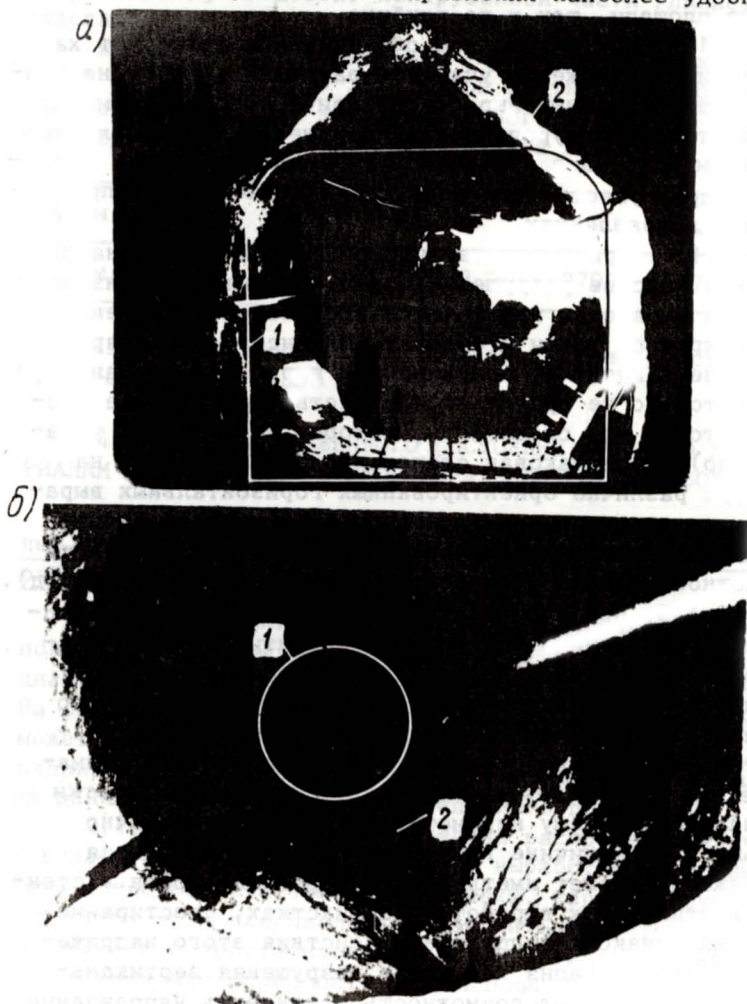


Рис. 17. Характерные разрушения выработок на Хибинских рудниках:

а- горизонтальные; б- вертикальные;
1- проектное сечение; 2- фактическое сечение

провести по данным обследования кольцевых выработок, например в системах выработок околоствольного двора. В выработках, параллельных наибольшему сжимающему напряжению, разрушения в кровле минимальны или отсутствуют совсем. В ортогональных выработках разрушения кровли наиболее интенсивны.

4.1.7. Величину максимального напряжения можно оценить по характеру и интенсивности разрушения пород вокруг горных выработок. При наличии хрупкого разрушения на контуре величина этого напряжения может быть приблизительно определена по формуле:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_c}{4},$$

где σ_c - прочность породы при одноосном сжатии.

4.1.8. Пример. При изучении причин "стреляния" горных пород на Хибинских апатитовых рудниках было обращено внимание на характер разрушения горизонтальных и вертикальных выработок (рис. 17). Разрушение горизонтальных выработок происходит преимущественно в кровле (рис. 17а), зоны шелушения и "стреляния" пород в вертикальных выработках получают наибольшее развитие по двум диаметрально противоположным стенкам, тогда как две другие остаются устойчивыми (рис. 17б). Такое разрушение горизонтальных и вертикальных выработок свидетельствует о наличии в Хибинском массиве высоких горизонтальных сжимающих напряжений.

Ориентировку этих напряжений в плане можно определить по особенностям проявления горного давления в горизонтальных выработках в зависимости от их направления. Так, на Расвумчоррском руднике ПО "Апатит" штореки, имеющие субширотное направление, относительно устойчивы, а в ортах, ориентированных субмеридионально, "стреляние" и разрушения проявляются весьма интенсивно. Поскольку известно, что наиболее устойчивыми являются выработки, ориентированные параллельно наибольшему напряжению (при условии квазиизотропного массива), то приведенный характер интенсивности разрушения различно ориентированных горизонтальных выработок свидетельствует о наличии на Расвумчоррском руднике аномально высоких горизонтальных сжимающих напряжений субширотного направления.

4.2. Определение параметров поля напряжений ультразвуковым методом

4.2.1. Ультразвуковой метод основан на зависимости скорости упругих волн в породе от напряжений. Наиболее распространенный вид этой зависимости показан на рис. 18.

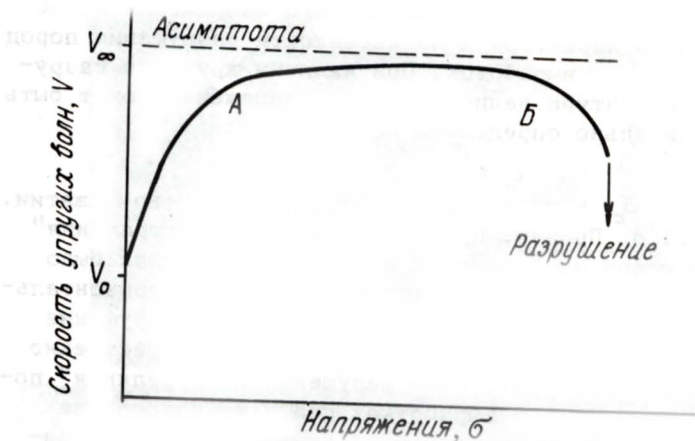


Рис. 18. Вид зависимости скорости упругих волн от напряжений

Для большинства пород восходящая ветвь А этой зависимости аппроксимируется функцией вида

$$V = \frac{AV_0 + \sigma V_\infty}{A + \sigma}, \quad (4.2.1)$$

- где V – скорость упругих волн (продольных или поперечных), км/с;
 σ – модуль нормальных сжимающих напряжений, МПа;
 V_0^* – параметр начальной скорости упругих волн в ненагруженной породе ($\sigma = 0$), км/с;
 V_∞ – параметр предельной скорости (при $\sigma \rightarrow \infty$), км/с;
 A – параметр, МПа.

ж) В случае наличия масштабных эффектов $V_0 = V_{обр}/R_0$ (см. п. 4.2.4.6).

Спадающая ветвь В характеризует запредельное состояние породы. Определить, какой ветви зависимости соответствует в данный момент состояние породы, можно по параметру $R = V_p / V_s$ - отношению скоростей продольных и поперечных упругих волн. Для большинства пород в допредельном состоянии $R = 1,6 - 2,1$, модальное значение $R = 1,75$, при переходе в запредельное состояние значение R выходит за указанный диапазон.

4.2.2. Ультразвуковым методом можно решить ряд задач, связанных с оценкой напряжений:

- 1) определить характер распределения напряжений в окрестности горных выработок;
- 2) установить направления действия главных напряжений;
- 3) оценить значение действующих в массиве напряжений;
- 4) изучить изменчивость величины и направлений главных напряжений в пределах исследуемого массива в зависимости от различных факторов.

4.2.3. Методика и аппаратура лабораторных и полевых измерений.

4.2.3.1. Исходной информацией для оценки напряжений являются параметры уравнения (4.2.1), определенные в процессе испытаний репрезентативной партии образцов, отобранных с участка измерений в массиве.

4.2.3.2. По результатам испытания образцов определяют зависимости $V_{p,s}(\sigma_3)$ скоростей продольных и поперечных волн от осевого прозвучиванию максимального по модулю напряжения σ_3 . Количество экспериментальных точек функции $V_{p,s}(\sigma_3)$ должно быть не менее 20-30, их плотность при меньших напряжениях (область сильного изменения) должна быть максимальной.

4.2.3.3. Порядок отбора, подготовки образцов и проведения измерений регламентирован ГОСТом 21153,0-7-75 "Породы горные. Методы физических испытаний".

4.2.3.4. Нагружение образцов должно быть трехосным с соотношением главных напряжений $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ или $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$. Для испытаний следует использовать камеры высокого давления, стабилометры, установки с боковым подпором и т. д., для измерений - датчики продольных и поперечных волн с приборами ДУК-66 (П, ПМ), УД - 10П, УД - 10УА, УС - 11ИМ, 1С - 12 ИМ или аналогичные.

4.2.3.5. Полевые измерения проводятся по измерительным станциям - серии из четырех и более скважин (шпуров) диаметром 38-76 мм. Скважины пробурены на глубину 3-5 м (рис 19) по схемам "веер", "квадрат" или другим. Схемы расположения скважин должны обеспечить получение объемного распределения скоростей упругих волн.

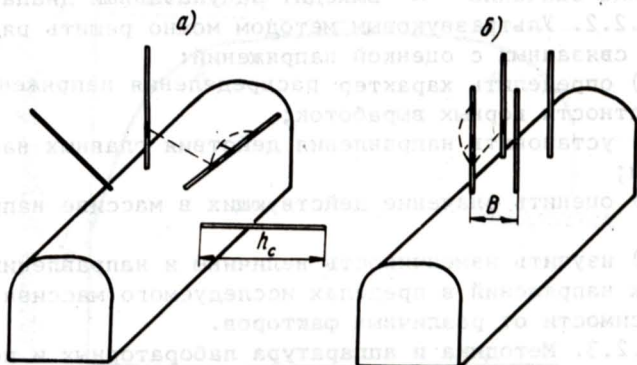


Рис. 19. Схемы расположения скважин (шпуров) измерительной ультразвуковой станции: глубина скважин $h_c = 3-5$ м, база измерений $B = 0,5 - 5$ м; а, б - схемы "веер" и "квадрат" соответственно

4.2.3.6. Измерения проводят по методикам прозвучивания и профилирования (акустического каротажа). Диапазоны частот при измерениях - 25-100 кГц, база измерений при прозвучивании - 0,5-5 м, при каротаже - 0,1-1 м, шаг измерения - 0,1-0,5 м. Методики измерений достаточно подробно описаны в [49].

4.2.3.7. Для оценки состояния массива с учетом его неоднородности полевые измерения проводятся по сети ультразвуковых станций. Станции должны быть однотипными, а при выборе их расположения в массиве следует предусмотреть возможность учета действий естественных и техногенных факторов.

4.2.4. Первичная обработка результатов измерений.

4.2.4.1. При первичной обработке рассчитываются скорости упругих волн и статистические параметры выборок скоростей. Для образцов скорости определяют пу-

тем деления акустической базы (высота образца) на истинное время прохождения упругой волны (с учетом акустической задержки):

$$V = \frac{L}{t_{\text{изм.}} - t_{\text{зад.}}}, \quad (4.2.2)$$

где L - акустическая база, км;
 $t_{\text{изм.}}$, $t_{\text{зад.}}$ - соответственно времена измеренное и акустической задержки.

4.2.4.2. Для полевых измерений скорости рассчитываются:

при профилировании - по годографам или по формуле:

$$V = \frac{\Delta L}{\Delta t}, \quad (4.2.3)$$

где ΔL - расстояние (база) между соседними приемниками (излучателями), км;
 Δt - разность времен прихода упругой волны до каждого из приемников, с;

при прозвучивании между скважинами (шпурами) - по формуле [28]:

$$V = \frac{\sqrt{B_0^2 + 2B_0 h \sin \alpha + 2h^2 (1 - \cos \alpha \cos \beta)}}{t_{\text{изм.}} - t_{\text{зад.}}}, \quad (4.2.4)$$

где B_0, h, α, β - геометрические параметры скважин, определяемые специальным координатным устройством;
 B_0 - расстояние между скважинами, км;
 h - глубина расположения датчиков, км;
 α, β - углы расхождения скважин в двух плоскостях, град;

при прозвучивании в случайно неоднородном массиве между скважинами, недоступными для измерений координатным устройством, по формуле [51]:

$$V = \frac{B_0 (t_0 + \theta h)}{t_0 (t_{\text{изм.}} - t_{\text{зад.}})}, \quad (4.2.5)$$

где t_0, θ - параметры уравнения линейной регрессии $t_{\text{изм}}$ на h (t_0, c ; $\theta, c/\text{км}$).

4.2.4.3. По полученным скоростям строят графики в координатах $V(h)$ - для полевых и $V(\sigma)$ - для лабораторных измерений.

4.2.4.4. Статистическая обработка*) данных частично ориентирована на решаемую задачу (п. 4.2.2) и в зависимости от нее включает следующие операции:

1) при изучении характера распределения упругих свойств пород около выработки - определяют значимость отличий средних скоростей в зонах пониженных (А), повышенных (Б) и характерных для массива (В) скоростей упругих волн \bar{V}_M (рис. 20). Для этого, исходя из графической информации (п. 4.2.4.3), формируют соответствующие выработки и проводят их сравнение (проверка нормальности, сравнение дисперсий и средних);

2) в случае значимого отличия средних скоростей в зонах около выработки дальнейшие операции с ними производят отдельно, в случае незначимого - объединяют;

3) сравнивают средние скорости \bar{V}_M по различным направлениям для одной станции. В случае их значимого отличия рассчитывают показатель анизотропии:

$$\alpha = \frac{\bar{V}_{max}}{\bar{V}_{min}}. \quad (4.2.6)$$

Для максимальной скорости фиксируют азимут и угол наклона. При наличии сети станций для этих параметров рассчитывают соответствующую статистику;

4) при наличии данных по сети станций из них формируется трехмерный массив $V_M(I, J, K)$, где индексы характеризуют:

J - направление измеренных скоростей;

I - единичные измерения скоростей;

K - положение в массиве (номер станции).

Для этого массива производится дисперсионный анализ и оценивается преобладающий по дисперсии фактор (I, J, K) .

*) Все операции по расчету и анализу данных следует выполнять на ЭВМ. Расчеты и форма представления результатов должны соответствовать требованиям ГОСТ 8.011-72, 8.207-76, 11-002-73, 11-004-74, 11-006-74.



Рис. 20. Виды распределений скоростей упругих волн вблизи выработки:

- 1 - с наличием зональности (А, Б, В);
- 2 - без зон

5) по данным испытаний образцов составляют четырехмерный массив $V_0(I, J, K, L)$, в котором индексы соответствуют: I - номеру образца по глубине скважины; J - номеру ступени нагружения образца; K - номеру скважины в пределах станции; L - положению скважины в массиве (номер станции). Для этого массива также производят дисперсионный анализ с оценкой частных дисперсий. Таким образом устанавливают структуру неоднородности данных по образцам.

4.2.4.5. Погрешность измерений определяют в соответствии с ГОСТ 8.011-72 и 8.207-76. Исходные погрешности средств измерений (прибора, комплекса) приведены в технической документации к ним. Погрешность методов определения скоростей упругих волн ΔV рассчитывают через суммарную погрешность измерения величин, входящих в формулы (4.2.2. - 4.2.5), по формуле [10]:

$$\Delta V(\chi_i) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial V}{\partial \chi_i}\right)^2 \Delta \chi_i^2}, \quad (4.2.7)$$

где $V(\chi_i)$ - скорости, рассчитываемые по формулам (4.2.2 - 4.2.5);

χ_i - измеряемые величины, входящие в (4.2.2 - 4.2.5);

$\Delta V(x_i)$ и Δx_i - погрешности определения скорости и измеряемых величин;

n - количество этих величин: (4.2.2) $n=3$,
(4.2.3) $n=2$, (4.2.4) $n=6$, (4.2.5) $n=6$.

4.2.4.6. При измерениях в неоднородном массиве необходимо провести оценку масштабных эффектов для средних значений скоростей. Для этого по данным измерений в массиве и на образцах строятся графики $\bar{V}(L)$, где \bar{V} - средние скорости в одном направлении и вне зоны влияния выработки на интервалах осреднения на базе измерений L , которая принимает ряд значений от минимальной базы (образца или единичного измерения скорости в массиве) до максимальной (полная глубина скважины, колонки керна). При наличии масштабного эффекта для перехода от средних скоростей по образцам к средним скоростям по массиву определяют соответствующий коэффициент ослабления $R_o = \bar{V}/\bar{V}_m$. При отсутствии масштабного эффекта в массиве при расчете напряжений он не учитывается.

4.2.5. Локальная оценка напряжений.

4.2.5.1. На образцах с помощью, например, метода наименьших квадратов проводят аппроксимацию зависимости (4.2.1), при этом определяют параметры (V_o, V_∞, A) и оценивают эффективность аппроксимации.

4.2.5.2. Выполняют оценку погрешности определения напряжений ультразвуковым методом. Для расчета напряжений пользуются формулой:

$$\sigma_i = A \frac{V_{mi} - V_o}{V_\infty - V_{mi}}, \quad (4.2.8)$$

где σ_i - модуль напряжений в i -ом направлении;

V_{mi} - скорости в массиве в i -ом направлении;

V_o, V_∞, A - параметры уравнения (4.2.1) (см. п. 4.2.5.1).

Погрешность $\Delta \sigma$ определяют по формуле (4.2.7), в которой в качестве функции берутся напряжения по формуле (4.2.8).

4.2.5.3. В качестве величин A, V_o, V_∞ и V_{mi} могут

быть взяты средние значения для соответствующих участков измерений в массиве и партии образцов. Степень такого осреднения определяется результатами дисперсионного анализа (по п. 4.2.4.4) данных по образцам, то есть осреднение можно проводить по фактору, дающему меньшее рассеяние, чем фактор напряжений. Тогда измерения осредняют на соответствующем уровне. Следует отметить, что осреднение по скважине (с учетом п.4.2.4.4) — наиболее распространенный случай, осреднение по скважинам станции производится при отсутствии анизотропии (см. п. 4.2.4.4), по станциям — в случае однородного массива. Рекомендуется применять минимальный уровень осреднения. Погрешность $\Delta\sigma$ при осреднении определяется также по формулам (4.2.7 и 4.2.8), погрешности исходных величин — по многократным измерениям по ГОСТ 8.207-76.

4.2.5.4 После оценок погрешности определения напряжений по формуле (4.2.8) рассчитывают напряжения.

4.2.5.5. Если напряжения рассчитывали по неосредненным параметрам, следует провести формирование соответствующих выборок и расчет их статистических параметров (аналогично п. 4.2.4.4).

4.2.5.6. Эффективность проведенной оценки определяют по относительным погрешностям (%):

$$\delta_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma} \cdot 100 \quad \text{или} \quad \delta_{\bar{\sigma}} = \frac{\Delta\bar{\sigma}}{\bar{\sigma}} \cdot 100.$$

В случае δ_{σ} или $\delta_{\bar{\sigma}} > 50\%$ полученные данные имеют качественный характер.

4.2.6. Оценка изменчивости и региональный прогноз напряжений по сети измерительных станций.

4.2.6.1. При наличии локальных оценок по сети станций может быть определено значение изменчивости напряжений под влиянием различных естественных и техногенных факторов (табл. 6). Для этого используют анализ множественной регрессии, где переменными являются параметры факторов (см. табл. 6) на станциях, а функцией — расчетные напряжения.

4.2.6.2. В случае слабой корреляции (низкая эффективность уравнения регрессии) факторы расставляются по критерию максимума дисперсии и для факторов, дающих максимальное рассеяние, строят графики $\sigma(F_i)$,

где F_i - параметры факторов. На графиках выделяются зоны повышенных и пониженных напряжений (аналогично п. 4.2.4.4).

4.2.6.3. Прогноз напряженного состояния дается в виде уравнения регрессии (п.4.2.6.1) или графиков зональности напряжений (п. 4.2.6.2) для участка массива, охваченного сетью ультразвуковых измерительных станций.

4.2.6.4. Пример. На рис. 21 приведены результаты измерений методом ультразвукового прозвучивания, проведенного около выработок с различным состоянием приконтурных пород. В первом случае (рис. 21а) отмечается значимый максимум скоростей продольных волн, во втором (рис. 21б) - только ослабленная зона, в третьем (рис. 21в) - значимой зональности не отмечается. Отличия средних зональных скоростей ($V_{pmax}, V_{pmin}, \bar{V}_M$) оценены с уровнем значимости $\alpha = 0,05$. На рис. 22 показаны экспериментальные и теоретические (аппроксимирующие) зависимости скоростей продольных упругих волн от напряжений: в двух случаях (рис. 22а и б) для трехосного нагружения, в третьем (рис. 22в) - для одноосного. Сходимость зависимостей установлена методом наименьших квадратов. Определенные таким образом параметры функции 4.2.1 имеют значения:

- а) $A = 118$ МПа, $V_0 = 5,44$ км/с, $V_\infty = 6,85$ км/с;
б) $A = 11$ МПа, $V_0 = 5,83$ км/с, $V_\infty = 6,97$ км/с;
в) $A = 1,5$ МПа, $V_0 = 3,74$ км/с, $V_\infty = 6,17$ км/с

Следует отметить, что наименьшие значения параметров A, V_0, V_∞ зафиксированы (см. рис. 22в) в более слабых породах при одноосном нагружении. Одноосное нагружение не всегда адекватно отражает свойства пород, особенно слабых, поэтому его рекомендуется применять только в случае проведения достаточного количества сравнительных с трехосным нагружением испытаний.

На рис. 23 приведен пример исследований по сети измерительных станций. После выделения экстремальных значений скоростей упругих волн, измеренных в массиве (по п. 4.2.4.4 - 1,2) для каждой станции, определена значимость анизотропии (по п. 4.2.4.4 - 3), а для выделенных направлений максимальных и минимальных ско-

Таблица 6

№ п/п	Фактор	Параметр фактора
	А. Естественный	
1	Глубина	Глубина
2	Рельеф	Расстояние до склона, дна долины
3	Тектонические нарушения, положение в микроблоке	Расстояние до нарушения, угол между линией акустической базы и нарушением
4	Минеральный состав	Процентное соотношение основных породообразующих минералов
5	Трещиноватость, пористость	Показатель трещиноватости
6	Влажность	Содержание влаги
7	Складчатость	Расстояние до ядра складки
8	Слоистость	Угол между слоями и линией акустической базы
9	Ориентация в региональном поле напряжений	Азимут и угол падения линии акустической базы
	Б. Техногенный	
1	Конфигурация выработок	Характерный размер выработки, радиус кривизны, размер целика
2	Очистная выемка	Расстояние до фронта работ
3	Обрушение налегающих пород	Расстояние до кромки обрушения

ростей построены суммарные индикатрисы (рис. 236, в), которые в горизонтальной плоскости ориентированы несогласно слоистости массива и характеризуют ориентацию максимальных горизонтальных напряжений. В результате дисперсионного анализа по этой сети выявлено: преобладание фактора макронеоднородности (положение станции в массиве);

из действующих в массиве факторов (после учета

анизотропии рассмотрены факторы 1-4, А, 1-2, Б табл. 6 для средних по станциям скоростей \bar{V}_{PM} , напряжений $\bar{\sigma}_M$ и отношения средних напряжений к среднему пределу прочности пород на одноосное сжатие $\bar{\sigma}_M / \bar{\sigma}_{сж}$ получено преобладающее влияние группы техногенных факторов (Б, табл. 6), следующими по порядку идут факторы состава и глубины (рельефа). Так как эти факторы для исследованного массива являются определяющими, то именно им должно быть уделено основное внимание при проектировании подземного рудника.

4.3. Определение напряженного состояния горных пород методом шахтной сейсморазведки

4.3.1. Сейсмический метод так же, как и ультразвуковой, основан на зависимости скоростей продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн от напряжений. Особенностями метода являются более низкие частоты и большие базы измерений (десятки и сотни метров), что позволяет получать интегральную характеристику состояния крупных блоков и осуществлять региональную оценку действующих полей напряжений при ограниченной сети геологоразведочных выработок [35-37, 39, 43].

4.3.2. Сейсмическим методом можно решить ряд задач, связанных с прогнозом напряжений:

- 1) оценить характер распределения напряжений вдоль горных выработок;
- 2) определить направления действия главных напряжений;
- 3) осуществить прогноз напряженного состояния участков пород, недоступных для непосредственных измерений другими методами.

4.3.3. Методика и аппаратура натуральных сейсмических измерений

4.3.3.1. Для натуральных измерений на базах

$B = 10^2 - 2 \cdot 10^3$ м следует применять стандартные среднечастотные сейсмические станции типа СМП-24 ($f = 20 - 120$ Гц) [35, 36, 43], для измерений при $b \leq 100$ м - высокочастотные станции типов СЦН-1, ШСА-1, ШЦС-1,2 ($f = 10^2 - 5 \cdot 10^4$ Гц) [39]. В качестве сейсмических приемников (СП) могут использоваться СВ-1-30 и др.

4.3.3.2. В зависимости от решаемой задачи полевые измерения производят по методике сейсмического профилирования, когда профиль приемников и пункты воз-

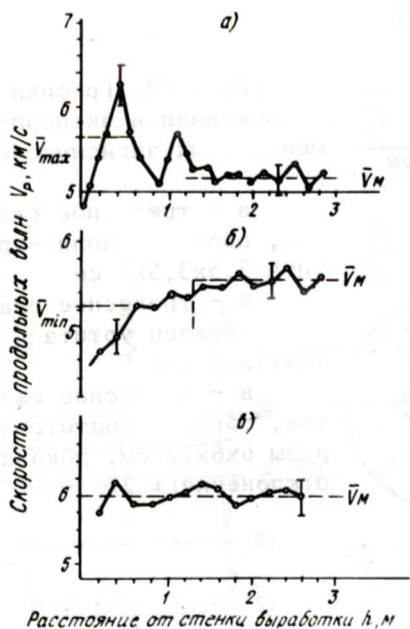


Рис. 21. Графики зависимости скорости упругих волн от расстояния (измерения производились вблизи от стенки выработки);

а - с наличием максимума; б - с наличием ослабленной зоны; в - без зональности; показано отклонение $\pm 3\%$

буждения (ПВ) находятся на одной линии, или сейсмического просвечивания, когда ПВ находятся в стороне от линии приемников, в другой выработке или скважине. Возбуждение колебаний осуществляют путем взрыва ВВ в специально пробуренных шпурах (при $B > 100$ м) или ударом ($B < 100$ м). Сейсмические приемники устанавливают в почву или стенку выработки.

4.3.3.3. Исходной информацией для оценки напряжений сейсмическим методом являются значения V_p и V_s , вычисленные по результатам измерения интервальных времен их распространения (t_p , t_s). Методика интерпретации сейсмограмм, определения t_p , t_s и V_p , V_s изложена в [3.5, 3.9].

4.3.3.4. Погрешность измерения V_p и V_s определяется суммарной погрешностью измерений t_p , t_s (паспортная погрешность применяемой аппаратуры) и погрешностью измерения базы B (расчет $\Delta V/V$ производится по формуле 4.2.7 при $n = 2$). Для оценки величин напряжений параметры V_p и V_s должны быть определены с погрешностью не выше 5%. При увеличении базы точность измерений повышается.

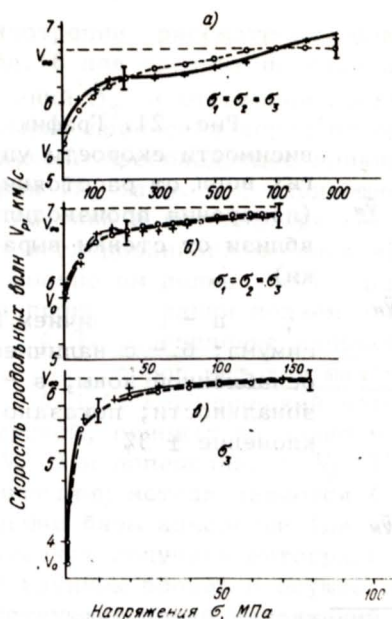


Рис. 22. Графики аппроксимации экспериментальных зависимостей:

- а - трехосное сжатие, образец ийолит-уртита 2,5x3,5x7 см;
- б - трехосное сжатие, образец уртита 11x11x28 см;
- в - одноосное сжатие, образец апатитовой руды 6x6x12 см; показано отклонение $\pm 2\%$

4.3.4. Характер распределения напряжений вдоль горных выработок оценивают по результатам их сейсмического профилирования [35, 36, 39]. Участок повышенных напряжений определяют по аномально высоким значениям V_p и V_s . Для практических расчетов достаточно, чтобы относительное изменение V_p , V_s превышало погрешность измерений; а их уровень сохранялся стабильным не менее чем в 2-3 точках. Для оценки надежности дифференциации могут использоваться известные статистические критерии, например показатель t -распределения. Учет петрографической неоднородности вдоль профиля производят путем сопоставления V_p , V_s в массиве с аналогичными значениями для разгруженных пород. Наиболее высокая надежность оценки месторождений достигается на участках профиля, сложенных однотипными породами.

4.3.5. Направления действия главных напряжений ($A_{\sigma_{1,2}}$) сейсмическим методом определяют по ориентировке в массиве осей анизотропии скоростей сейсмических волн.

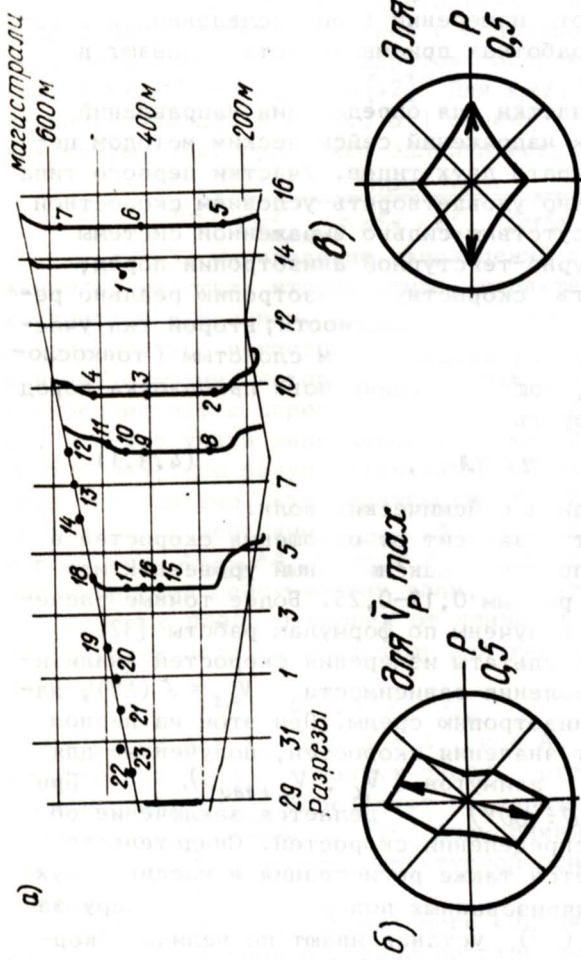


Рис. 23. Пример исследований по сети ультразвуковых станций на подземном руднике.

а - план расположения измерительных станций;
 б, в - оценка анизотропии состояния пород по результирующим вероятностным индикатрисам для максимальных и минимальных горизонтальных скоростей продольных волн;
 P - относительная частота

4.3.5.1. Измерение скоростей сейсмических волн в массиве проводят по методике сейсмического просвечивания. Взаимное расположение пунктов возбуждения и приема в подземных выработках выбирают таким образом, чтобы обеспечить относительно равномерную плотность измерений во всем диапазоне азимутов сейсмических лучей ($A = 0-360^\circ$). С целью последующего использования параметра V_s сейсмические приемники ориентируют нормально к плоскости измерений (при исследованиях в горизонтальных выработках приемники устанавливают в почву).

4.3.5.2. Участки для определения направлений действия главных напряжений сейсмическим методом целесообразно выбирать двух типов. Участки первого типа должны максимально удовлетворять условиям скоростной однородности, отсутствия сильно выраженной системы трещин и структурно-текстурной анизотропии пород, способных вызвать скоростную анизотропию реально регистрируемой в массиве контрастности; второй тип участков характеризуется неоднородным слоистым (тонкослоистым) строением, мощность единичного пропластка пород должна удовлетворять неравенству

$$m \leq K\lambda, \quad (4.3.1)$$

где λ — длина сейсмических волн.

Коэффициент K зависит от отношения скоростей в пропластках. В практике максимальный уровень K может быть принят равным 0,12–0,25. Более точные расчеты K могут быть получены по формулам работы [32].

4.3.5.3. Результаты измерения скоростей анализируют с целью выявления зависимости $V_{p,s} = f(A^\circ)$, характеризующей анизотропию среды. При этом на первом этапе сравнивают значения скоростей, полученные для противоположных азимутов ($V_\alpha, V_{\alpha+180^\circ}$). При $V_\alpha \approx V_{\alpha+180^\circ} (\alpha = 0 \div 180^\circ)$ делается заключение об анизотропном распределении скоростей. Свидетельством последнего является также регистрация в массиве двух ортогонально поляризованных поперечных волн. Мету зависимости $V = f(A^\circ)$ устанавливают по величине корреляционного отношения.

4.3.5.4. Направления действия наибольших и наименьших напряжений ($A_{\sigma_{1,2}}$) в пределах однородных

участков (1 типа), определяют непосредственно по азимутам, отличающимся наибольшими и наименьшими значениями V_p и V_s ($A_{\sigma_{max}} = A_{V_{max}}$, $A_{\sigma_{min}} = A_{V_{min}}$ при $\sigma(V)_{max} \perp \sigma(V)_{min}$). При этом необходимо иметь в виду, что относительно более резкие изменения $V = f(A^\circ)$ должны иметь место в секторе азимутов, прилегающих к $A_{\sigma_{min}}$, в связи с чем последний обычно выражен более явно. Для более точных определений $A_{\sigma_{1,2}}$ экспериментальную зависимость $V = f(A^\circ)$ аппроксимируют теоретической с использованием, например, метода наименьших квадратов. Аппроксимирующая функция $V_p = f(A^\circ)$ приведена в [42]. Для $V_s = f(A^\circ)$ (при соблюдении указанной в п. 4.3.5.1 ориентировки сейсмических приемников) применяют эллиптическую зависимость:

$$V_s(\alpha) = \frac{V_{max} \cdot V_{min}}{\sqrt{V_{max}^2 \cdot \sin^2 \alpha + V_{min}^2 \cdot \cos^2 \alpha}} \quad (4.3.2)$$

4.3.5.5. Определение направлений главных напряжений на участках второго типа, характеризующихся тонкослоистым строением, проводят путем сравнения параметров реально регистрируемой анизотропии и скоростной анизотропии, которая может быть вызвана только тонкослоистостью пород. При этом необходимо иметь в виду, что без учета напряжений в тонкослоистой среде $V_{||} > V_{\perp}$ [43]. По результатам натурных измерений в массиве установлено, что неравенство $V_{\perp} > V_{||}$ явно свидетельствует о действии σ_{max} субортогонально слоистости пород. Если $A_{V_{max}} \neq A_{||}$, $A_{V_{max}} \neq A_{\perp}$, сравнивают значения скоростей сейсмических волн, азимут распространения которых равно отклонен от наиболее близких к $A_{V_{max}}$ структурных осей, и вычисляют для текущих углов α величины ΔV :

$$\Delta V(\alpha) = V_{\alpha} - V_{-\alpha}$$

($\alpha = 0$ при $A = A_{||}$ или $A = A_{\perp}$, где $A_{||}$ - азимут слоистости пород; A_{\perp} - азимут линии, ортогональной к слоистости); $A_{\sigma_{max}}$ определяют по азимуту с наибольшей положительной величиной ΔV . Аналогичным образом, но уже относительно второй структурной оси, определяют $A_{\sigma_{min}}$.

4.3.6. Прогноз напряженного состояния участков пород, не доступных для непосредственных измерений другими методами, осуществляют путем сейсмического просвечивания по веерной схеме, а при наличии анизот-

ропии - по схеме параллельных лучей. Местоположение участков повышенных скоростей определяют графическим способом путем наложения секторов с повышенными значениями скоростей из разных ПВ или путем математического восстановления истинного скоростного разреза участка наблюдений методом решения обратной кинематической задачи [9]. Параметры выявленных аномалий сопоставляют с геолого-геофизической информацией об объекте исследований. Далее оценивают вероятность высокоскоростного геологического включения установленных размеров и вероятность появления аномальных значений скоростей вследствие флуктуаций от средней скорости пород участка. На основании полученных данных делают вывод о надежности прогноза скоростных аномалий в качестве зон повышенных напряжений.

4.3.7. Пример 1.

С целью качественной оценки характера распределения напряжений выполнено сейсмическое профилирование одного из ортов гор. +252 м рудника им. С.М. Кирова [36]. Участок профиля (рис. 24) представлен однотипными по составу уртитам. Анализ изменения V_p и V_s позволил выявить на участке зону пониженных и повышенных напряжений. Первая характеризовалась средними значениями скоростей $V_p = 5,2 \cdot 10^3$ м/с, $V_s = 3,1 \cdot 10^3$ м/с, вторая - $V_p = 6,3 \cdot 10^3$ м/с, $V_s = 3,7 \cdot 10^3$ м/с.

Надежность дифференциации участка на зоны оценивалась с использованием t - критерия. Для V_p надежность P составила 0,98, для V_s надежность $P \approx 0,95$.

4.3.8. Пример 2.

Определение $A_{\sigma_{1,2}}$ осуществлялось на участке второго типа (п. 4.3.5.2), расположенном в северной части гор. +252 м рудника им. С. М. Кирова (магистраль 200-500 м, р. 1-9) [36, 43]. Общая вытянутость слоев различных разновидностей апатито-нефелиновых руд и пород соответствовала субмеридиональному направлению (рис. 25). Мощности единичных пропластков в основном были существенно меньше $0,2\lambda$. По результатам анализа измерения $V_{p,s} = f(A^\circ)$ выявлено, что наибольшие скорости P и S - волн имеют место не вдоль слоистости пород, а поперек нее ($AV_{max} = A_1$). На основании этого был сделан вывод, что наибольшие сжимающие напряжения действуют по азимуту A_1 ($A_{\sigma_{max}} \approx A_1 \approx 60^\circ$).

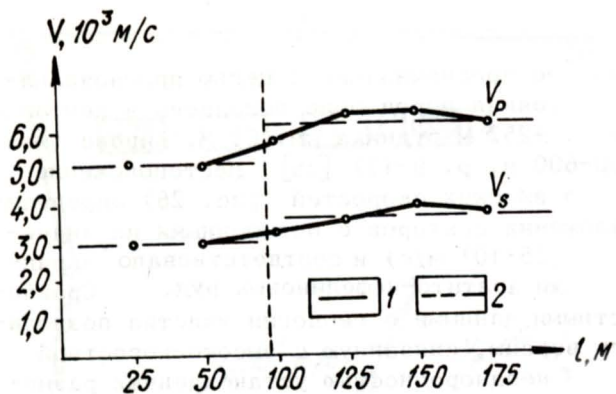


Рис. 24 Пример оценки характера распределения напряжений по V_p и V_s :
 1 - средние значения скоростей;
 2 - условная граница блоков

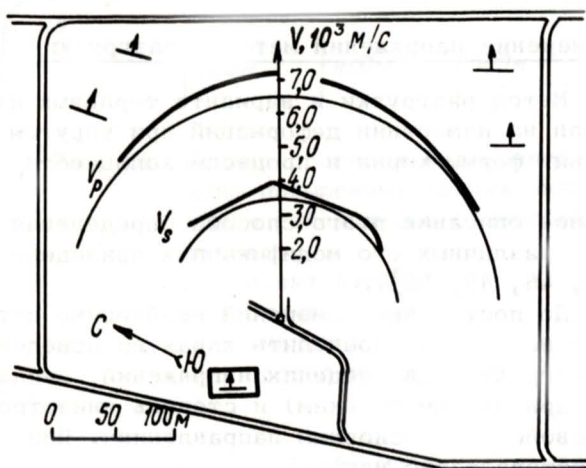


Рис. 25 Пример определения $A\sigma_{1,2}$ по V_p и V_s на участке второго типа

4.3.9. Пример 3.

Сейсмическое просвечивание с целью прогноза напряженного состояния пород было выполнено в центральной части гор. +252 м рудника им. С. М. Кирова (магистраль 200-600 м, р. 9-15) [36]. Местоположение зоны аномально высоких скоростей (рис. 26) определено путем наложения секторов с повышенными их значениями ($V_p \geq 6,25 \cdot 10^3$ м/с) и соответствовало западной части залежи апатито-нефелиновых руд. Сравнение с известными данными о геологии участка позволило исключить версию, связанную с высокоскоростной геологической неоднородностью установленных размеров. Оценка вероятности появления высокоскоростной аномалии вследствие флуктуаций от средней скорости апатито-нефелиновых руд дала $P \approx 15\%$. В соответствии с этим надежность прогноза повышенных напряжений в выделенной зоне аномально высоких V_p была оценена $P \approx 85\%$. Последующие измерения, выполненные другими методами, подтвердили данный прогноз.

4.4. Измерение напряжений методом разгрузки

4.4.1. Метод разгрузки в варианте торцовых измерений основан на измерении деформаций при упругом восстановлении формы керна в процессе кольцевого его обуривания.

Детальное описание этого способа определения напряжений в различных его модификациях приведено в [23, 24, 34, 46, 49, 52].

4.4.2. До постановки измерений необходимо путем лабораторных испытаний определить характер поведения породы под нагрузкой (в пределах напряжений, ожидаемых по предварительным оценкам) и степень анизотропии их упругих свойств по основным направлениям. При слоистой текстуре — это направления простириания слоистости, падения и нормали к слоистости, в неслоистых трещиноватых массивах — направления простириания, падения и нормали к простирианию наиболее развитой трещиноватости.

В случае упругого поведения и механической изотропности пород рекомендуется применять метод разгрузки в

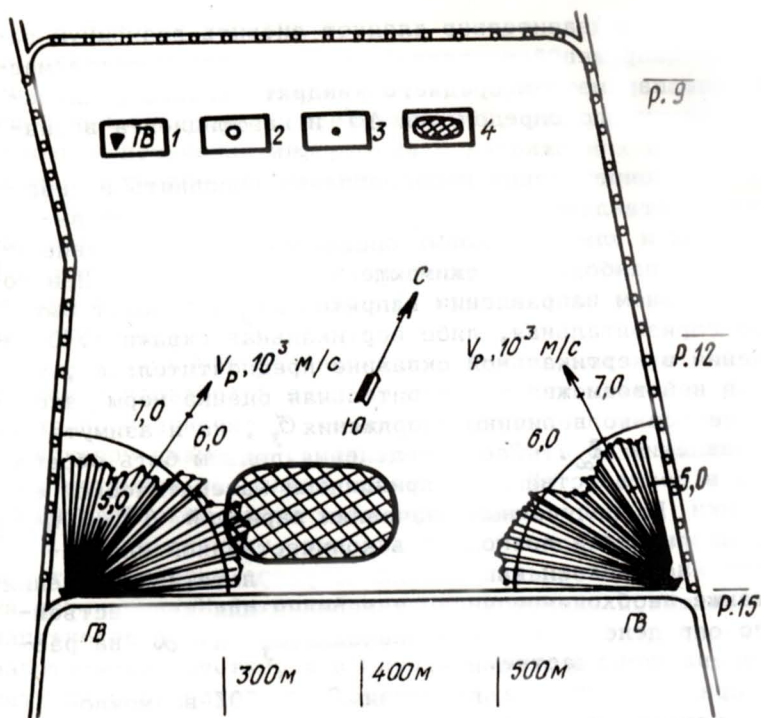


Рис. 26. Пример прогноза местоположения зоны повышенных напряжений методом сейсмического просвечивания:

- 1 - пункт взрыва;
- 2 - пункты приема;
- 3 - значения скоростей;
- 4 - прогнозируемая зона

варианте торцовых измерений. Определение деформаций забоя скважины при разгрузке может быть выполнено с относительной погрешностью 10^{-5} - 10^{-6} .

4.4.3. Значения напряжений от одной точки измерений к другой могут варьировать в некотором интервале за счет естественных вариаций условий напряженного состояния и упругих свойств пород в смежных точках

массива. Предварительно следует оценить возможную вариацию напряжений в условиях конкретного участка массива по параметрам среднего квадратического отклонения единичного определения $\Delta\sigma$ и коэффициента вариации R_σ .

Эти определения целесообразно выполнять в скважине, составляющей прямой угол с ожидаемым (из визуальных и ультразвуковых определений) направлением действия наибольшего сжимающего напряжения σ_3 . При горизонтальном направлении напряжения σ_3 это может быть либо горизонтальная, либо вертикальная скважина. Определения в вертикальной скважине предпочтительнее, так как в ней возможна предварительная оценка меры рассеяния не только величины напряжения σ_3 , но и азимута его направления R_α . Все определения должны быть обработаны в соответствии с принципами математической статистики. По полученным значениям вариации $\Delta\sigma, \Delta\alpha, R_\sigma, R_\alpha$ устанавливается возможность количественной или качественной оценки напряжений по результатам измерений, а также необходимое число измерений для количественного определения средних значений σ_3 и α на рассматриваемом участке.

При коэффициенте вариации $R_\sigma > 50\%$ возможно лишь качественное определение среднего значения напряжений для рассматриваемого участка, при $R_\sigma < 50\%$ можно ставить вопрос о количественном определении интегральных характеристик поля напряжений для рассматриваемого участка массива.

4.4.4. Для определения интегральных характеристик поля напряжений участка нетронутого массива следует проводить измерения за пределами зоны влияния выработок, камер, очистных пространств, в удалении от геологических нарушений (разломов, зон с нарушениями и окисленными породами, крупных трещин и т. д.).

Измерения выполняют не меньше чем в двух скважинах, ориентированных по направлениям главных напряжений в массиве пород. Для контроля целесообразно проводить измерения и в третьей скважине, задаваемой по направлению третьего главного напряжения. Ориентировка скважин осуществляется на основе информации о направлении главных напряжений, полученной по геологическим и тектонофизическим реконструкциям, визуальным, ультразвуковым и сейсмическим данным.

В прочных упругих породах измерения необходимо выполнять на расстоянии от контура выработки, превышающем ее наибольший поперечный размер, при этом искажающее влияние выработки не превышает 10%, что удовлетворяет условиям получения информации о напряжениях в массиве пород (с учетом погрешности самих определений).

Измерения целесообразно проводить в одиночной выработке, располагая скважины в тупиковой ее части. При этом одну из скважин бурят вертикально в кровле, другую - в направлении забоя, третью - в стенку выработки.

4.4.5. В крупнокристаллических породах рекомендуется использовать плоскую форму забоя скважины, которая по сравнению с усеченноконической позволяет (при одинаковом диаметре скважины) увеличить базу датчиков. База датчиков не должна превышать $0,3d$, где d - диаметр плоской части забоя скважины.

При измерениях, выполняемых с помощью проволочных тензометров, следует использовать розетки с четырьмя датчиками. Избыточный датчик в розетке повышает надежность измерений, так как позволяет контролировать работу всей розетки, а в случае необходимости - выявлять датчик, показания которого не согласуются с показаниями остальных.

Собственно измерения и подготовку измерительного оборудования следует проводить в соответствии с известными руководствами для рудников и шахт [23, 34, 46, 52].

4.4.6. При расчете напряжений по деформациям, измеренным на торце скважины, необходимо вводить поправочные коэффициенты. Коэффициенты концентрации, установленные экспериментально на объемных моделях [12, 53] и соответствующие породам с коэффициентом поперечных деформаций $\nu=0,2-0,4$ при усеченноконической и плоской формах забоя скважины для случая, когда измерительные скважины ориентированы по направлению главных напряжений, приведены на рис. 27.

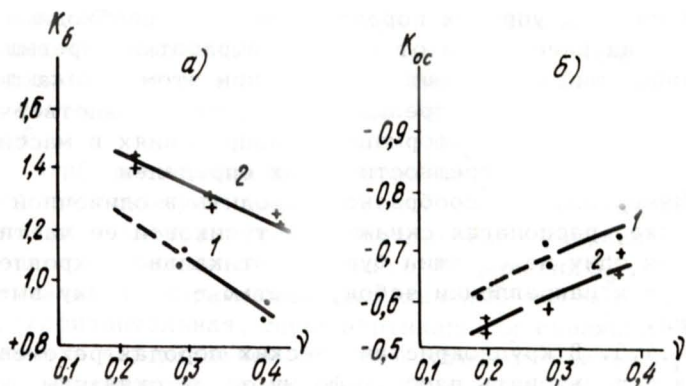


Рис. 27. Зависимость коэффициента концентрации напряжений при действии боковой K_{δ} и осевой $K_{ос}$ нагрузок от коэффициента поперечных деформаций:
 а - при двухосном напряженном состоянии ($\sigma_x = \sigma_y < 0$; $\sigma_z = 0$);
 б - при одноосном напряженном состоянии ($\sigma_x = \sigma_y = 0$; $\sigma_z > 0$);
 1 - плоский забой; 2 - усеченноконический забой

Параметры поля напряжений вычисляют по формулам (условие плоской деформации):

$$\sigma_{max} = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_4}{1 - \nu} + \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{4}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right];$$

$$\sigma_{min} = \frac{E}{2} \left[\frac{\epsilon_1 + \epsilon_4}{1 - \nu} - \frac{1}{1 + \nu} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_4)^2 + \frac{4}{3}(\epsilon_2 - \epsilon_3)^2} \right];$$

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2(\epsilon_2 - \epsilon_3)}{\sqrt{3}(\epsilon_1 - \epsilon_4)};$$

где θ - угол между σ_{max} (или σ_{min}) и осью первого датчика;

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$ - наибольшее и наименьшее напряжения на торце, соответствующие измеренным деформациям;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \epsilon_4$ - относительные деформации по четырем нап-

равлениям (датчикам) на забое, измеренные четырехдатчиковой розеткой, в которой углы между осями 1 и 2, 2 и 3, 3 и 4 датчиков равны $\pi/3$; между осями 1 и 4 датчиков - $\pi/2$;

E, ν - модуль упругости и коэффициент поперечных деформаций породы.

По величинам напряжений, полученным в разных точках вдоль каждой скважины, вычисляют средние значения. Средним значениям нормальных напряжений присваивают индекс той скважины, с направлением которой совпадает ориентировка напряжения.

Например, пусть измерения выполнены в трех взаимно ортогональных (по направлению трех главных напряжений) скважинах А, Б и В. В скважине А получены напряжения $\bar{\sigma}_{max}$ и $\bar{\sigma}_{min}$, которые совпадают по направлению соответственно с ориентировкой скважин Б и В, тогда $\bar{\sigma}_{max} = \sigma_B^A$, $\bar{\sigma}_{min} = \sigma_V^A$.

По средним значениям углов θ определяют уточненную ориентировку главных напряжений в массиве.

5. АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В МАССИВЕ

5.1. В настоящее время для расчета напряженно-деформированного состояния неоднородных объектов применяются приближенные методы. Использование ЭВМ позволяет оценивать напряженное состояние, в частности на основе разработанных в рамках теории упругости представлений о деформировании физических тел. Расчетные методы используются для выяснения наиболее общих закономерностей распределения напряжений в горных породах в различных геологических условиях. В общем случае напряженное состояние любого тела (и массива горных пород в том числе) определяется распределением сил и их величинами, формой и размерами самого тела, внутренним строением и свойствами материала (пород), из которого оно состоит. Величины напряжений представляют собой результат взаимодействия множества факторов, действующих постоянно и повсеместно или временно и локально [11, 41]. Значимость каждого фактора может быть оценена с помощью расчетных методов.

5.2. Расчетные методы предполагают использование аналитических и численных методов, с помощью которых можно получить соответственно точное и приближенное решения для принятой модели среды. Оба метода основаны на решениях теории упругости и термоупругости, пластичности, теории сыпучих тел и т.д. При использовании аналитических методов, как правило, учитываются отдельные факторы (неровность границ массивов, условия на контактах слоев, их мощность и искривление, соотношение упругих параметров и плотности контактируемых пород) и рассматриваются изотропные или трансверсально изотропные среды с горизонтально и наклонно залегающими слоями. Для того чтобы определить напряженно-деформированное состояние неоднородного весомого массива, рассматривается равновесие упругой среды, находящейся под действием внешних сил. Точное решение такой задачи с учетом большего числа факторов невозможно, поэтому используются приближенные методы.

5.2.1. Среди численных методов механики сплошных тел применительно к геологическим объектам наибольшее распространение получили методы, использующие вариационные принципы, в частности метод конечных элементов и метод конечных разностей. Последний является универсальным методом приближенного решения дифференциальных уравнений с заданной точностью. Расчет напряженного состояния по этому методу выполняется в последовательности, приведенной ниже [44]:

1) область непрерывного изменения аргументов заменяется конечным (дискретным) множеством точек (узлов), называемым сеткой. Вместо функции непрерывного аргумента рассматриваются функции дискретного аргумента, определенные в узлах сетки, такие функции называются сеточными. Каждая производная, входящая в дифференциальное уравнение, заменяется (аппроксимируется) разностным соотношением, которое содержит значения сеточной функции в нескольких узлах сетки.

В процессе аппроксимации дифференциальные уравнения заменяются системой алгебраических уравнений, которые решаются с помощью ЭВМ;

2) обычно требуется решать дифференциальные уравнения с некоторыми дополнительными (начальными и

граничными) условиями, поэтому, кроме построения разностного оператора, необходимо аппроксимировать на сетке дополнительные условия;

3) для каждого узла определяются параметры, которые характеризуют свойства материала в пределах ячейки, окружающей данный узел.

5.2.2. Применение вариационно-разностного метода составления сеточных уравнений, основанного на вариационном принципе Лагранжа, связано с минимизацией функционала, представляющего собой потенциальную энергию деформируемого тела:

$$Z = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij}(\bar{u}) \epsilon_{ij}(\bar{u}) dV - \int_V \chi_i u_i dV, \quad (5.1)$$

где σ_{ij} , ϵ_{ij} - компоненты тензора напряжений и деформаций;

χ_i - проекция массовой силы;

u_i - узловые значения функций перемещений;

\bar{u} - вектор перемещения.

Для построения разностной схемы в весовой области V вводится прямоугольная сетка ω_h разбиением сторон прямоугольника соответственно на N_1 и N_2 частей с шагами h_1 и h_2 . Каждому узлу сетки с координатами (m, n) соответствуют узловые значения функций перемещений (u), характеристики среды (λ, μ) и массовых сил (X): $u_i^{(m,n)}, \lambda^{(m,n)}, \mu^{(m,n)}, \chi^{(m,n)}$. Сеточный аналог Z^h исходного функционала Z получается путем дифференцирования Z^h по всем узловым значениям неизвестных функций:

$$\frac{\partial Z^h}{\partial u_i^{(m,n)}} = 0 \quad \begin{matrix} i = 1, 2 \\ m = 1, 2 \dots 1 \\ n = 1, 2 \dots 2 \end{matrix} \quad (5.2)$$

Для каждой внутренней точки области имеем два уравнения, в одном из которых присутствует массовая сила $\chi_2^{(i,j)}$. Чтобы записать уравнения в граничных точках, пользуются приемом учета значений функций в точках, лежащих за пределами расчетной области. В итоге получаем систему, состоящую из $2(N_1 + 1)(N_2 + 1)$ уравнений.

Для решения этой системы алгебраических уравне-

× - 42 32.

ний применяется метод последовательных приближений [25], при этом используется чебышевский набор итерационных параметров с соответствующей перестановкой, которая позволяет минимизировать влияние погрешности округлений на сходимость. Нулевое приближение выбирается произвольно. Число итераций в цикле составляет $2P$, где P — целое число. По вычисленным из итерационного процесса значениям узловых перемещений $U_i^{(m,n)}$ определяют деформации узла, а затем напряжения.

5.3. Для расчета напряженно-деформированного состояния массивов горных пород в пределах изучаемого месторождения выделяются участки, отличающиеся строением, степенью трещиноватости, наличием тектонических нарушений и др. Для каждого участка проводится расчет в сечении, ориентированном вкрест простирания основных тектонических структур района, так как в этом случае геологическое строение мало меняется от сечения к сечению.

5.3.1. Достоверность результатов, полученных при расчетах, решающим образом зависит от правильности исходных геологических предпосылок, схематизации геологического строения и выбора расчетных показателей. Обычно общие закономерности геологического строения, соотношения и мощности различных комплексов пород, наличие и очертание тектонических нарушений в расчетных моделях сохраняются. В то же время при схематизации разреза часть слоев в расчетной модели может быть объединена в единый слой или выделена особо. Так, когда в толще преобладает некоторая разновидность пород, в расчетах целесообразно ее рассматривать как единый слой, если свойства других пород толщи мало отличаются от свойств преобладающей породы. Единым слоем могут быть также представлены прослой взаимно обогащенных форм пород (доломитизированный известняк, ангидритизированный доломит и т.п.). Одинаковая степень метаморфизма позволяет объединить, например, ороговикованные карбонатные и терригенные породы. Если в разрезе присутствует серия линз, расположенных на одной и той же глубине или вытянутых в некотором направлении, они заменяются непрерывным горизонтальным или наклонным слоем. Однако даже маломощные слои подчиненного значения с резко отличными от вмещающих по-

род свойствами необходимо выделять в качестве самостоятельных единиц. Если тектонические разломы сопровождаются сильной трещиноватостью, то мощность такого разлома в расчетах может быть увеличена и т.д.

5.3.2. При расчете напряжений в массивах горных пород для корректного применения теории упругости достаточно знать такие свойства, как модуль Юнга, коэффициент Пуассона, плотность пород, в некоторых случаях коэффициент теплового линейного расширения. В связи с этим, помимо схематизации разрезов, необходимо проводить анализ физико-механических свойств изученных пород и причин изменения их параметров. При этом используются показатели физико-механических свойств горных пород, статистически обобщенные по данным лабораторных испытаний [19] образцов с учетом особенностей их состава и строения. Здесь же широко используются результаты специальных геофизических исследований свойств и состояния пород в массиве. В результате составляются модели распределения значений показателей физико-механических свойств в расчетных массивах (упругих характеристик, плотности, прочности, распределения температур и др.). Эти значения используются при подготовке банка данных для расчета напряжений на ЭВМ и при интерпретации результатов расчета.

5.3.3. В пределах изученных разрезов выбираются области нужных размеров, по каждой из них строят расчетную схему и получают математическую модель в виде системы уравнений для количественного анализа моделируемого объекта. На расчетную область накладывается прямоугольная сетка с определенным шагом (расстояние между узлами), который по горизонтали и вертикали может быть разным, но желательно, чтобы между ними была кратность. Величина шага характеризует детальность разбиения и определяет точность решения. Обычно она выбирается из расчета наименьшей величины неоднородности (например мощности пласта). Сетку можно наложить двумя способами: так, чтобы ячейки сетки "вписывались" в слои, или произвольным образом нанести на разрез. В первом случае величина расчетного показателя назначается в соответствии с принадлежностью ячейки к данному слою. Если граница

раздела слоев проходит внутри ячейки, то любой осредненный в ее пределах показатель (λ) можно вычислить по формуле:

$$\frac{\lambda_1 S_1 + \lambda_2 S_2}{S}, \quad (5.3)$$

где $S = S_1 + S_2$ - общая площадь ячейки.

Такой прием наложения сетки особенно удобен в тех случаях, когда в массиве имеются переслаивающиеся породы (аргиллиты, алевролиты, мергели) или однотипные породы разного минералогического состава (базальтовые, карбонатные или эруптивные брекчии), или зоны разной степени трещиноватости с нечеткими границами раздела и т.п. Таким образом, для каждого узла выписываются значения показателей физико-механических свойств в соответствии со стратиграфической принадлежностью породы и ее состоянием. Весь разрез представляется составленным из пород с различными свойствами, то есть заменяется кусочно-однородной моделью. Если размах рельефа расчетной области не превышает величину, равную утроенному вертикальному шагу сетки разбиения, то верхнюю границу модели при расчете можно считать горизонтальной.

В рассмотренной постановке задачи на всех границах раздела породы считаются жестко скрепленными. Коэффициенты, определяющие положение узла в массиве, являются функцией шага разбиения.

Расчет напряжений проводится для весомой упругой среды в условиях плоской деформации. Если поведение пород подчиняется закону Гука в широком диапазоне нагрузок (вплоть до разрушения), то для решения задачи о распределении напряжений в допредельном состоянии возможно применение модели линейно-деформируемой среды.

5.3.4. Выбор граничных условий зависит от постановки задачи, в частности от моделирования воздействия различных силовых факторов (гравитационных, тектонических, гидродинамических, геотермических, техногенных и др.). Так, граничные условия при действии гравитационных сил задаются следующим образом: на нижней границе перемещения отсутствуют; по боковым - допускаются вертикальные перемещения, горизонтальные перемещения принимаются равными нулю, перемещения свободной поверхности не ограничиваются.

5.4. Для исследованных массивов по результатам расчетов получают значения вертикальных (σ_y), горизонтальных (σ_x), касательных ($\tau_{x,y}$), главных ($\sigma_{max}, \sigma_{min}$), а также максимальных касательных (τ_{max}) напряжений, устанавливают направление действия главных напряжений, определяют коэффициенты напряжений и др.

5.4.1. При анализе результатов расчета используют приемы построения изолиний напряжений по каждому изученному участку. Изолинии строят в соответствии с правилами интерполяции, исключая из рассмотрения узлы, прилегающие к границам расчетной области, где возможно искажение результатов.

Характер напряженного состояния анализируется также по графикам, эпюрам и т.п., построенным в различных сечениях, по отдельным горизонтам, вблизи разломов, по разным частям массивов и т.д.

5.4.2. Неравномерность напряжений в массиве может быть охарактеризована распределением максимального главного и максимального касательного напряжений. Многочисленные факторы, формирующие напряженное состояние, служат источниками образования внутренних зон повышения максимальных напряжений — концентрации напряжений, которая количественно оценивается по величине коэффициента концентрации напряжений [17, 56]. Он представляет собой отношение $K = \sigma_{max} / \sigma_n$, где σ_{max} — наибольшее местное напряжение, σ_n — номинальное или среднее по сечению напряжение. Применительно к геологическим объектам за номинальное обычно берут значение γH , где γ — плотность пород, H — глубина. Разделив величину σ_{max} , найденную в результате расчетов, на значение γH , получают характеристику концентрации напряжений в любой точке массива.

5.4.3. Величины и направление главных напряжений, а также прочность горных пород являются исходными параметрами для оценки условий равновесия в разных точках массива. Напряженное состояние в каждой точке изучаемого массива задается рассчитанными главными напряжениями, а значения прочности пород (сжатие, растяжение, сдвиг и др.) определяются экспериментально. В работах многих авторов [30, 40] приводятся формулы

для уточнения критериев прочности, которые могут быть применены при конкретных расчетах устойчивости реальных объектов. Условия, исходя из которых решаются задачи о напряжениях и предельном равновесии, являются противоположными, так как одно из них основано на допущении, что ни в одной точке среды нет предельного напряженного состояния, а другое, наоборот, - на предположении, что оно имеет место. Очевидно, в действительности, в одной части расчетных массивов удовлетворяются уравнения теории упругости, в другой - теории предельного равновесия. Задача прогнозных расчетов в таком случае заключается в отыскании участков с возможно близкими значениями обоих решений. Путем сравнения результатов расчета напряжений и величин прочностных характеристик проводится анализ относительной устойчивости участков массива и строятся разрезы. На них показываются участки с относительно устойчивым и неустойчивым состоянием массива.

Расчеты напряженного состояния массивов горных пород выполняются по программам, составленным во ВНИИГ ВНИМИ, ЛГУ, МГУ, МИСИ, КФ АН СССР, ИФЗ АН СССР, ИФМГП АН КиргССР, Институте сейсмологии КазССР.

5.4.4. Пример. Имеется геологический разрез, ориентированный вкрест простирания основных геологических структур (рис. 28). В пределах разреза выделено три участка, отличающихся между собой условиями залегания пород, их составом и строением, характером и степенью трещиноватости, наличием разломов, их ориентацией и мощностью, глубиной залегания пород различных комплексов. Многообразие пород и структурных условий привело к необходимости схематизации геологического строения для проведения расчетов. В результате схематизации составлены три инженерно-геологические модели массивов. Каждый из них имеет специфические особенности. Инженерно-геологическая модель одного из массивов приведена на рис. 29. Все изученные породы были объединены в 13 литолого-стратиграфических горизонтов, имеющих различную мощность и углы падения от 0 до 20°. Породы этих горизонтов наиболее существенно отличаются по свойствам в ненарушенном состоянии. Из анализа физико-механических свойств изученных пород и причин их изменения следует, что



Туфодит
 Долерит
 Габбро
 Разлом

Рис. 28. Схематический геологический разрез:

- T₁ - нижний отдел триасовой системы, включает свиты:
 T₁mr - моронтовская свита;
 T₁nd - надеждинская свита;
 T₁gd - гудчихинская свита;
 T₁sw - сыверминская свита;
 P₂iv - ивакинская свита, верхний отдел пермской системы (P₂);
 C₃-P₂ - тунгусская серия;
 D₂mt - мантуровская свита;
 D₂₋₃ - нерасчлененный средний и верхний отдел девонской системы;
 D₁₋₂ - нерасчлененный нижний и средний отдел девонской системы

наибольшее влияние на эти параметры, помимо минералогического состава, оказывает характер трещиноватости пород. В связи с этим при расчетах использованы раздельные значения упругих параметров и плотности для ненарушенных пород и пород разной степени трещиноватости.

Основной отличительной особенностью массива III является наличие глубинного разлома и западных дизъюнктивов, а также связанных с ними значительных зон из-

мененных и раздробленных пород. В связи с этим модель расчетного массива можно условно разделить на три части - западную, центральную и восточную. Западная и восточная части отличаются одна от другой главным образом положением и мощностью рудоносной интрузии: в западной части она залегает на глубине более 1800 м, мощность ее не превышает 80-90 м, в восточной части - на глубине около 1000 м, мощность достигает 250 м. Вблизи главного разлома и западного нарушения интрузивное тело выклинивается. В центральной части массива интрузивные образования отсутствуют, мощность доломитов сокращается в три раза.

Построение расчетной схемы осуществлялось следующим образом. В пределах выбранных массивов выделялись области размером 2000x2000 м таким образом, чтобы решение в одной могло служить проверкой решения для другой части разреза. Поверхность массивов принималась горизонтальной, так как максимальное изменение величин отметок изученных участков не превышало 50-100 м. Затем на расчетную область накладывалась сетка с определенным шагом (расстояние между узлами), который по горизонтали составлял 100 м, по вертикали - 50 м (в соответствии с минимальной мощностью туффитов, распространенных в изученном разрезе). Пример разбиения виден на рис. 30. Здесь выбран способ произвольного наложения сетки. При определении расчетных показателей для каждого элемента, сложенного различными породами, величина искомого параметра, например модуля упругости, рассчитывается по формуле (5.3), исходя из рис.31.

Результатом этапа осреднения расчетных параметров является составление моделей распределения величин показателей свойств в массиве. Пример по массиву III приведен на рис. 30.

Рассчитываются вертикальные (σ_y), горизонтальные (σ_x) и касательные (τ_{xy}) напряжения. Затем находят главные напряжения (σ_y, σ_x' или σ_{max} и σ_{min}),

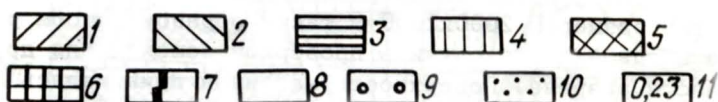
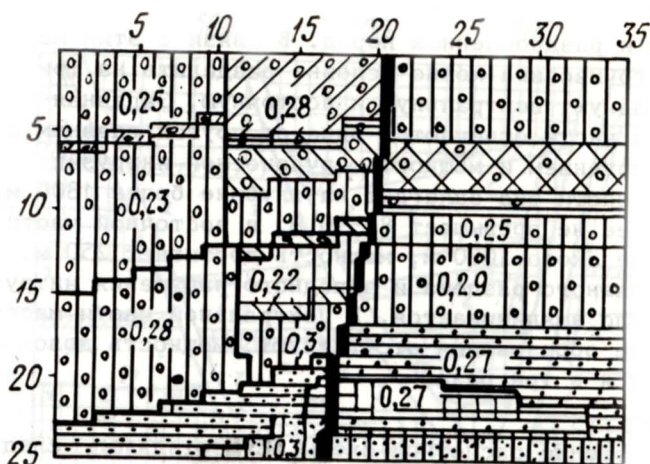


Рис. 30. Модель распределения величин показателей свойств пород в массиве III:
 Пределы изменения модуля упругости ($E \cdot 10^4$ МПа): 1 - 3,5-3,6; 2 - 4,2-4,5; 3 - 5-5,3; 4 - 6,1-6,5; 5 - 7,6-7,9; 6 - 9,4; 7 - 0,1. Коэффициенты линейного расширения ($\alpha \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$): 8 - до 0,5; 9 - 0,54; 10 - 1,0. 11 - значения коэффициента Пуассона. По вертикали и горизонтали указаны номера узлов сетки разбиения

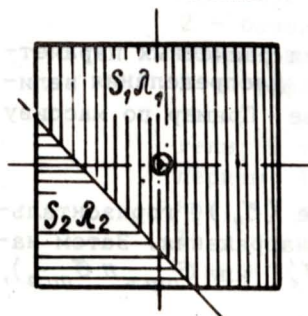


Рис. 31. Схема осреднения величины показателя свойств в узловой точке:
 \ - граница раздела слоев;
 ⊙ - узловая точка

а также максимальные касательные напряжения (τ_{max}) и угол (α) отклонения главных напряжений по формулам:

$$\sigma_y' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha;$$

$$\sigma_x' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy} \sin 2\alpha;$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad \left| \tau_{max} \right| = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right|$$

Затем строят картину распределения напряжений в изолиниях. На рис. 32 представлено распределение вертикальных напряжений в массиве Ш. На завершающем этапе расчетов определяется общая характеристика неравно-

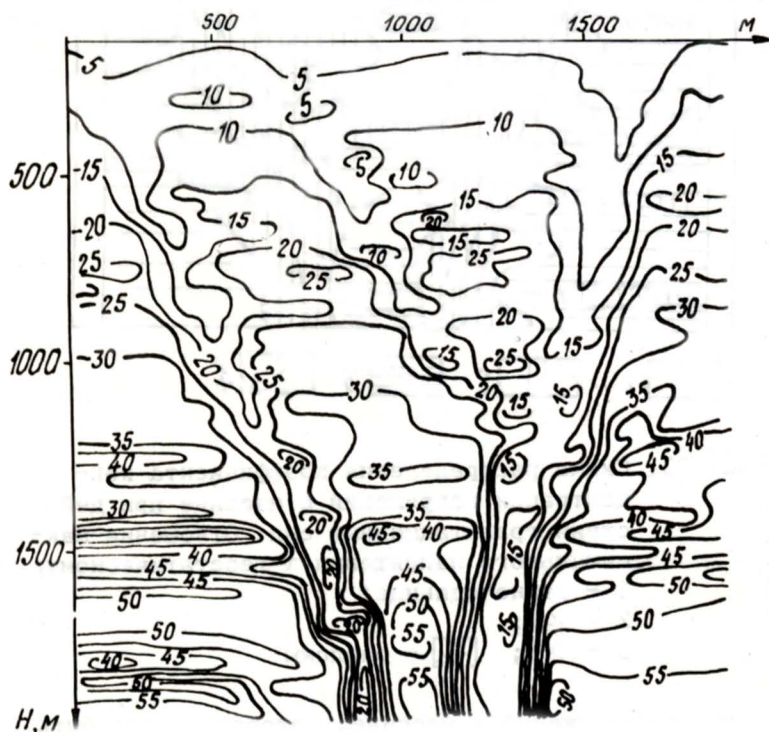


Рис. 32. Распределение вертикальных (σ_y) напряжений в массиве

5 - изолинии и величины напряжений, МПа

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров В. Б., Жетлухин Ю. Л., Нанадзе А.О., Гринберг М. Э., Кузнецов О. Л. Особенности разработки вулканогенно-осадочных коллекторов среднего эоцена. — Нефтяное хозяйство, 1978, №10, с.33-37.
2. Александров В. Б., Жетлухин Ю. Л., Гринберг М. Э., Грузман Э. Э., Кузнецов О. Л. Использование акустического каротажа при разработке залежей открытыми стволами скважин. — Нефтяное хозяйство, 1979, №6, с. 47-51.
3. Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева В.В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. Пояс упругих напряжений земли и механизм очагов землетрясений. — М., Наука, 1972, 190 с.
4. Белоликов Н. И., Карус Е. В., Кузнецов О. Л., Рогоцкий Г. В., Чахмахчев В. Г., Чиркин И.А. О возможности изучения напряженного состояния земной коры по геосейсмическим моделям поглощения. — Дан СССР, 1977, т. 237, №6, с. 1319-1321.
5. Временное методическое руководство для определения основных геологических показателей выбросоопасности горных пород в Донецком бассейне по результатам геофизических исследований углеразведочных скважин. (Редактор В. Ю. Зайченко). Днепропетровск.
6. Гзовский М. В. Основы тектонофизики. — М., Наука, 1975, 536 с.
7. Голодковская Г. А., Панасьян Л. В. Исследование структуры поля напряжений с помощью расчетных методов (Сборник научных трудов Гидропроекта). — М., 1979, с. 45-56.
8. Гущенко О. М. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений. — В кн.: Поля напряжений и деформаций в литосфере. — М., Наука, 1977, с. 7-25.
9. Ефимова Е. А., Рудерман Е. Н. Возможности применения цифровой томографии для интерпретации геофизических данных. — М., 1982, 55 с. — (Регион.-развед. и промысл. геофизика: Обзор/ВНИИ Экон. Минер. Сырья. Геол. развед. работ. ВИЭМС).
10. Зажигаев Л. С., Кишьян А. А., Ромашков Ю. И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. — М., Атомиздат, 1978, 232 с.

11. Золотарев Г. С. Геологические факторы, определяющие напряженное состояние массивов пород. ФТПРПИ СО АН СССР, №2, 1978.
12. Иванов В. И., Турчанинов И. А. Концентрация напряжений на забое скважины в условиях объемного сжатия. — Сб. Измерение напряжений в массиве горных пород. Новосибирск, изд-во ИГД СО АН СССР, 1979, с. 26-35.
13. Инструкция по безопасному ведению горных работ на рудных и нерудных месторождениях, склонных к горным ударам.—Л., ВНИМИ, 1980, 148 с.
14. Инструкция по изучению инженерно-геологических условий месторождений твердых полезных ископаемых при их разведке. — М., Недра, 1975, 50 с.
15. Исаев А. В. Разработка методов оценки напряженного состояния пород по дискованию керна и выходу буровой мелочи.—Автореферат на соискание уч. ст. кандидата технических наук. — Л., 1983, 18 с.
16. Казаков А. Н. Методическое руководство по динамическому анализу микроструктурных ориентировок карбонатов.—Л., Наука, 1967, 109 с.
17. Кишкин Б. П. Конструкционная прочность материалов. Изд-во МГУ, 1976.
18. Кольская сверхглубокая.—М., Недра, 1984.
19. Комаров И. С. Накопление и обработка информации по инженерно-геологическим исследованиям. — М., Недра, 1972.
20. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. — М., Наука, 1975.
21. Кузнецов О.Л. Изучение напряженного состояния земной коры на различных стадиях геологоразведочного процесса на нефть и газ. Сб. Изучение напряженного состояния массива горных пород акустическим способом.— М., ВНИИЯГГ, 1980, с.3-9.
22. Кузнецов Ю. И. Методика комплексного изучения физических свойств горных пород по керну скважин. В кн.: Методика и техника петрофизических исследований.— Апатиты, изд. КФ АН СССР, 1977.
23. Курленя М. В., Леонтьев А. В. Руководство по применению метода разгрузки керна с центральной скважиной для определения напряжений в осадочных горных породах.—Новосибирск, изд. ИГД АН СССР, 1969, 62 с.

24. Курленя М. В., Попов С. Н. Теоретические основы определения напряжений в горных породах.—Новосибирск, Наука, 1983, 97 с.

25. Марк-Крекен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на фортране.—Мир, 1977.

26. Марков Г. А. Тектонические напряжения и горное давление в рудниках Хибинского массива. — Л., Наука, 1977, 213 с.

27. Марков Г. А. О распространении горизонтальных тектонических напряжений вблизи поверхности в зонах поднятий земной коры.—Инженерная геология, 1980, № 1, с. 20-30.

28. Меденков Ф. Г. К методике определения расстояний между излучателем и приемником при оценке состояния горных пород в условиях их естественного залегания ультразвуковым методом. В кн.: Вопросы повышения эффективности разработки и комплексного обогащения полезных ископаемых.—Апатиты, изд. КФ АН СССР, 1976, с. 70-74.

29. Методические рекомендации по интерпретации материалов широкополосного акустического каротажа АКН-1.—М., ВНИИЯГ, 1980.

30. Москвитин Б. В. Соппротивление вязкоупругих материалов, — М., Наука, 1972.

31. Напряженное состояние земной коры. — М., Наука, 1973.

32. Невский М. В. Квазианизотропия скоростей сейсмических волн.—Наука, 1974, 180 с.

33. Нестеренко Г. Т., Барковский В. М., Скозобцов Б. С., Твердовский Р. К. Методические указания по применению метода разгрузки для измерения напряжений в массивах горных пород. — Л., ВНИМИ, 1972, 37 с.

34. Николаев П. Н. Методика статистического анализа трещин и реконструкций полей тектонических напряжений.—Известия ВУЗов, Геология и разведка, № 12, 1977, с. 103-115.

35. Павловский В. И., Иванов Г. А. Характер напряженного состояния пород на руднике Юкспор по сейсмическим данным. В кн.: Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры.—Апатиты, изд. Кольского филиала АН СССР, 1981, с. 120-126.

36. Павловский В. И., Иванов Г. А., Берман Б. И., Рубинраут С. И. Опыт анализа упругих свойств массива горных пород для оценки напряженно-деформированного состояния. — Сб. Изменение напряженно-деформированного состояния и свойств пород в массиве при обработке месторождений полезных ископаемых.—Апатиты, 1985, с. 91-94.
37. Панин В. И., Марков Г. А., Павловский В. И., Шаров Н. В. О связи скоростной анизотропии Хибинского массива с напряженным состоянием горных пород. — Сб. Измерение напряжений в массиве пород Новосибирск, ч.П, 1972, с 52-56.
38. Панин В. И., Павловский В. И. Методический подход и опыт оценки напряженного состояния пород на больших базах. В кн.: Природа и методология тектонических напряжений в верхней части земной коры.—Апатиты, КФ АН СССР, 1981, с. 90-94.
39. Проскуряков В. М., Бляхман А. С. Сейсмические методы исследования напряженного состояния горного массива. (Под общ. ред. И.М.Петухова). — М., Недра, 1983, 192 с.
40. Разрушение. — М., Мир, 1975, т.2,7.
41. Распределение напряжений в породных массивах/ Г.А.Крупенникова, Н.А.Филатов, В.М.Барковский и др.— М., Наука, 1972.
42. Рубинраут С.И. К теории распространения упругих волн в напряженно-деформированных горных породах. Рук. деп. в ВИНТИ 11.04.85. Деп. № 2458-85, с.108-137.
43. Рубинраут С.И., Павловский В.И., Иванов Г.А., Берман Б.И. Определение направления действия тектонических сил в неоднородных и анизотропных массивах горных пород методом сейсмического просвечивания. В кн.: Тезисы докл. научного семинара по горной геофизике. — Тбилиси; ИГМ АН ГССР, 1983, с.28.
44. Самарский Л.А. Введение в теорию разностных схем. — М., Наука, 1971.
45. Сейсморазведка. Справочник геофизика. — М., Недра, 1981, 464 с.

46. Слободов М.А. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов. - Л., изд-во ВНИИ, 1960, 15 с.

47. Соболева О.В., Шкляр Г.П., Благовещенская Е.Э. Изучение структуры поля напряжений в очагах землетрясений в связи с предсказанием места и времени возникновения сильного толчка.-В кн.: Поиск предвестников землетрясений на прогностических полигонах. - М., Наука, 1974, с.65-70.

48. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах.

49. Техника контроля напряжений и деформаций в горных породах. - Л., Наука, 1978, 232 с.

50. Тимофеев В.В. Об одном способе оценки напряженного состояния пород в массиве по скоростям продольных упругих волн.-В кн.: Повышение эффективности разработки и обогащения руд месторождений Кольского полуострова.-Апатиты, изд-во КФ АН СССР, 1979, с.47-50.

51. Тимофеев В.В. Совершенствование методики и техники ультразвуковых измерений в неоднородных скальных массивах пород.-В кн.: Добыча и обогащение руд месторождений Кольского полуострова. - Апатиты, изд-во КФ АН СССР, 1983, с.16-25.

52. Турчанинов А.И., Иванов В.И., Марков Г.А. Руководство по измерению напряжений в массиве скальных пород методом разгрузки. - Апатиты, изд-во КФ АН СССР, 1970, 48 с.

53. Турчанинов И.А., Марков Г.А., Иванов В.И., Козырев А.А. Тектонические напряжения в земной коре и устойчивость горных выработок. - Л., Наука, 1978, 256 с.

54. Турчанинов И.А., Панин В.И. Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве.-Л., Наука, 1976, 164 с.

55. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых(петрофизика). Справочник геофизика. - М., Недра, 1976, 527 с.

56. Черепанов Г.П., Ершов Л.В. Механика разрушения. - М., Машиностроение, 1977.

57. Haimson B.C. The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. - Int. journal, Rock Mech. and Mining Sciences and Geomech Abstr., 1978, v.15, N 4, 167-178.

58. Garotta R. Comparisons between P, SH, SV and converted waves. - Technical series N 521.82.08, 12 p.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
1.1. Основные понятия	4
1.2. Ранжирование полей напряжений	7
1.3. Стадийность изучения напряженного состо- яния пород в массиве.....	10
2. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД КОМПЛЕКСОМ ДИСТАНЦИОННЫХ И НАЗЕМНЫХ НАБЛЮ- ДЕНИЙ	18
2.1. Оценка напряженного состояния по данным дистанционных наблюдений сети линеаментов..	18
2.2. Оценка напряженного состояния пород по данным геологического картирования и тектоники района	21
2.3. Оценка напряженного состояния по материалам сейсмологических наблюдений	37
2.4. Изучение напряженно-деформированного состо- яния горных пород наземными геофизическими методами	44
3. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПО МАТЕРИАЛАМ СКВАЖИННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	52
3.1. Скважина как разновидность горной выработки	52
3.2. Оценка величин напряжений по выходу керна	53
3.3. Оценка величины и направления главных на- пряжений по разрушению стенок и искривле- нию ствола скважин	55
3.4. Определение напряжений методом гидравли- ческого разрыва в скважинах.....	57
3.5. Оценка напряженного состояния горных пород по данным акустического каротажа скважин...	59
4. ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД ПО МАТЕ- РИАЛАМ ИССЛЕДОВАНИЯ В ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ ВЫРАБОТКАХ.....	68
4.1. Оценка напряженного состояния пород по данным визуального исследования геолого- разведочных выработок.....	68

4.2. Определение параметров поля напряжений ультразвуковым методом	72
4.3. Определение напряженного состояния горных пород методом шахной сейморазведки	82
4.4. Измерение напряжений методом разгрузки	90
5 АНАЛИТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОД В МАССИВЕ	95
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	110

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИЗУЧЕНИЮ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ГОРНЫХ ПОРОД НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ
ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНОГО ПРОЦЕССА**

Ответственный за выпуск **И. Е. Колико**

Редактор **Л. П. Левчик**

Технический редактор **А. И. Сафонова**

Л-70746	Заказ 4232	Подписано в печать 30.12.86 г.
Уч.-изд. л. 6,0	Печ. л. 6,2	Тираж 300 экз. Цена 90 коп.

ВНИИгеоинформсистем, 113105, Москва, Варшавское шоссе, 8

Малоярославецкая городская типография управления издательств,
полиграфии и книжной торговли Калужского облисполкома