

Динамика отраженных  
сейсмических волн

Dynamics of seismic  
reflections

# Напряжение – деформация Stress - deformation

или модулем сдвига.

Хотя закон Гука находит широкое применение, он не выполняется для больших напряжений. При напряжениях, превышающих предел упругости (рис. 2.3, а), закон Гука уже более

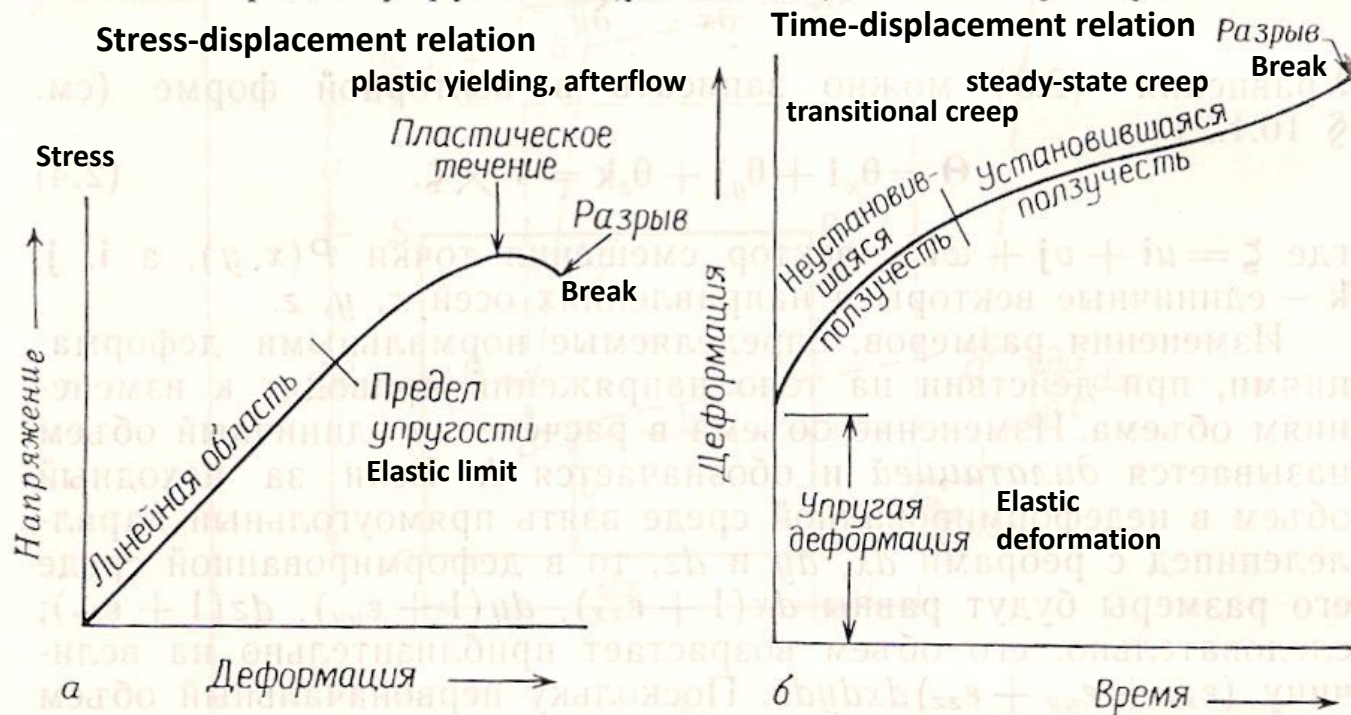


Рис. 2.3. Зависимости между напряжением, деформацией и временем: а — напряжение как функция деформации; б — деформация как функция времени.

не справедлив и деформации нарастают быстрее. Деформации, которые возникли при напряжениях, превышавших этот предел, не исчезают полностью при снятии напряжений. При дальнейшем росте напряжений может быть достигнут предел пластичности, когда начинается пластическое течение, и переход к пла-

# Напряжение – деформация Stress - deformation

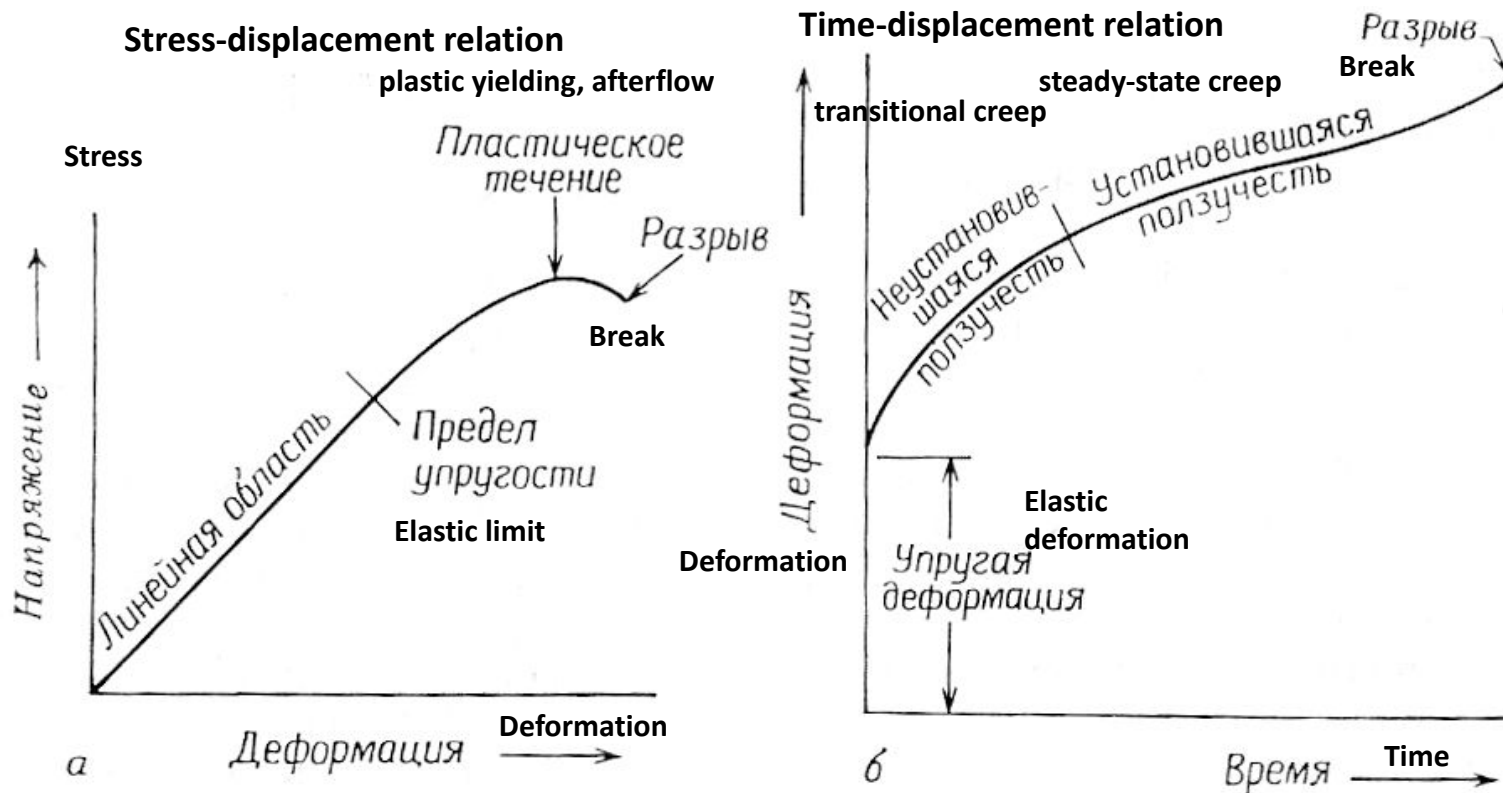


Рис. 2.3. Зависимости между напряжением, деформацией и временем: а — напряжение как функция деформации; б — деформация как функция времени.

Dependencies between stress, deformation and time.

# Взрыв в скважине Explosion in borehole

(объемных волн) в функции расстояния заряда (высоты или глубины) от поверхности земли.

Заряды обычно закладываются в специальные взрывные скважины диаметром 10—15 см, пробуренные глубже зоны выветривания; вес заряда колеблется от 0,05 до 100 кг. Глубина скважин изменяется от 10 до 100 м. После заложения заряда скважина по крайней мере на 3 м заполняется глинистым раствором или снегом, а иногда ее просто заливают водой. Заряд подрывается с по-

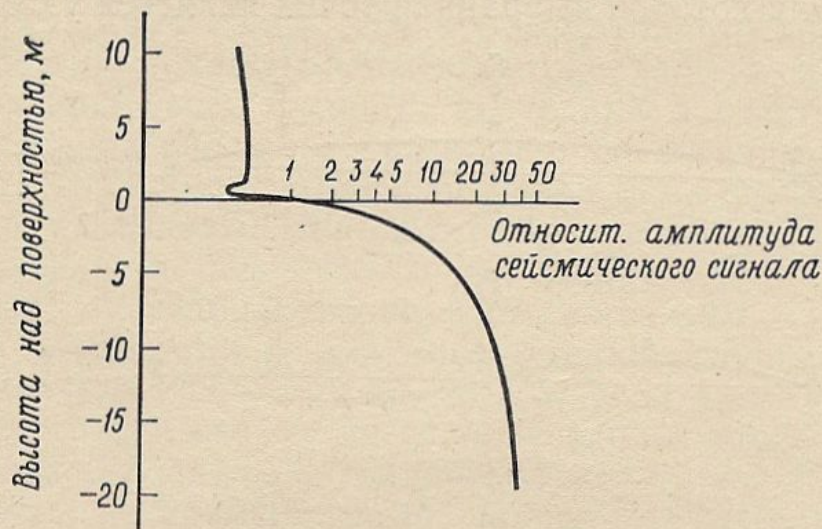
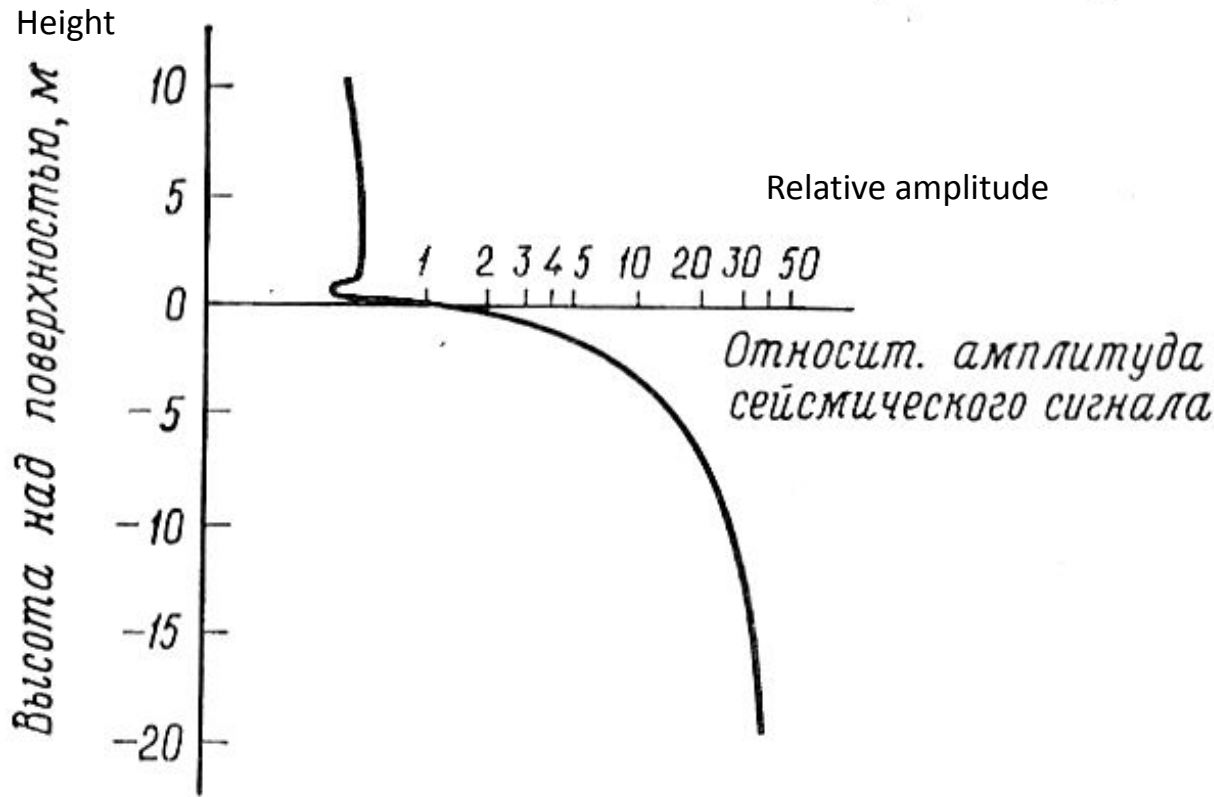


Рис. 3.1. Зависимость амплитуды сейсмического сигнала от глубины или высоты точки взрыва относительно земной поверхности. (По Рокарду — Кислингеру, 1963.)

мощью электрического детонатора. Момент взрыва отмечается импульсом в момент срабатывания детонатора. Для взрывания применяются взрывные машинки высокого напряжения. Момент включения высокого напряжения совпадает с моментом разрыва жостовой проволоочки в капсуле.

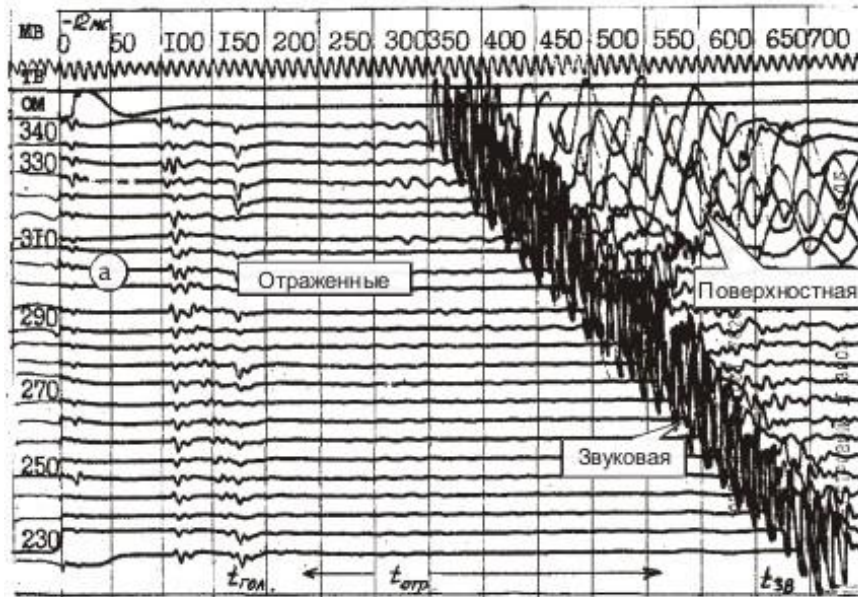
# Взрыв в скважине Explosion in borehole



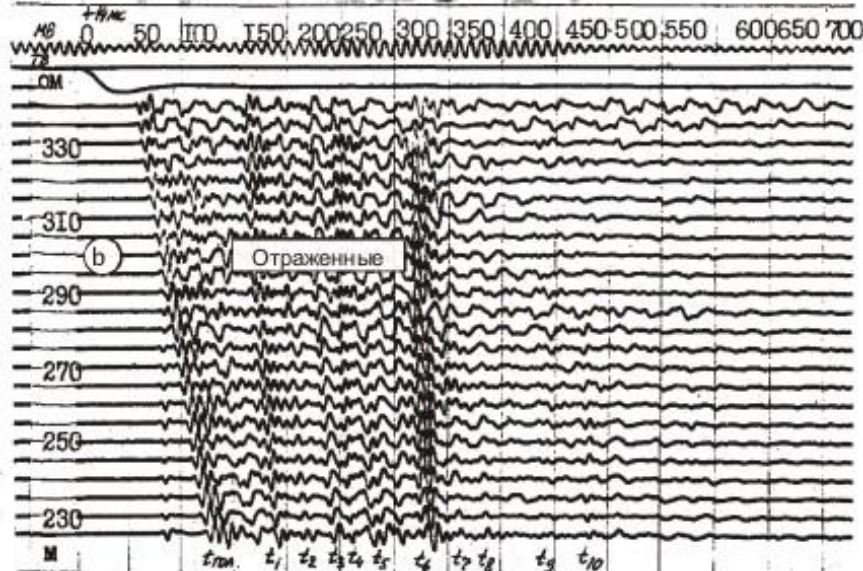
Seismic reflections **amplitude** depending on explosions **depth** in borehole (height in air).

Explosive charges (0.05-100 kg in weight) are placed usually inside the special boreholes (shot hole) 10-15 cm in diameter and 10-100 m in depth. The shot hole must be deeper, than the depth of weathering zone.

# Взрыв в скважине Explosion in borehole



Surface explosion



Borehole explosion

Seismograms, demonstrating seismic reflections **amplitude** dependence on explosion **depth** in borehole.

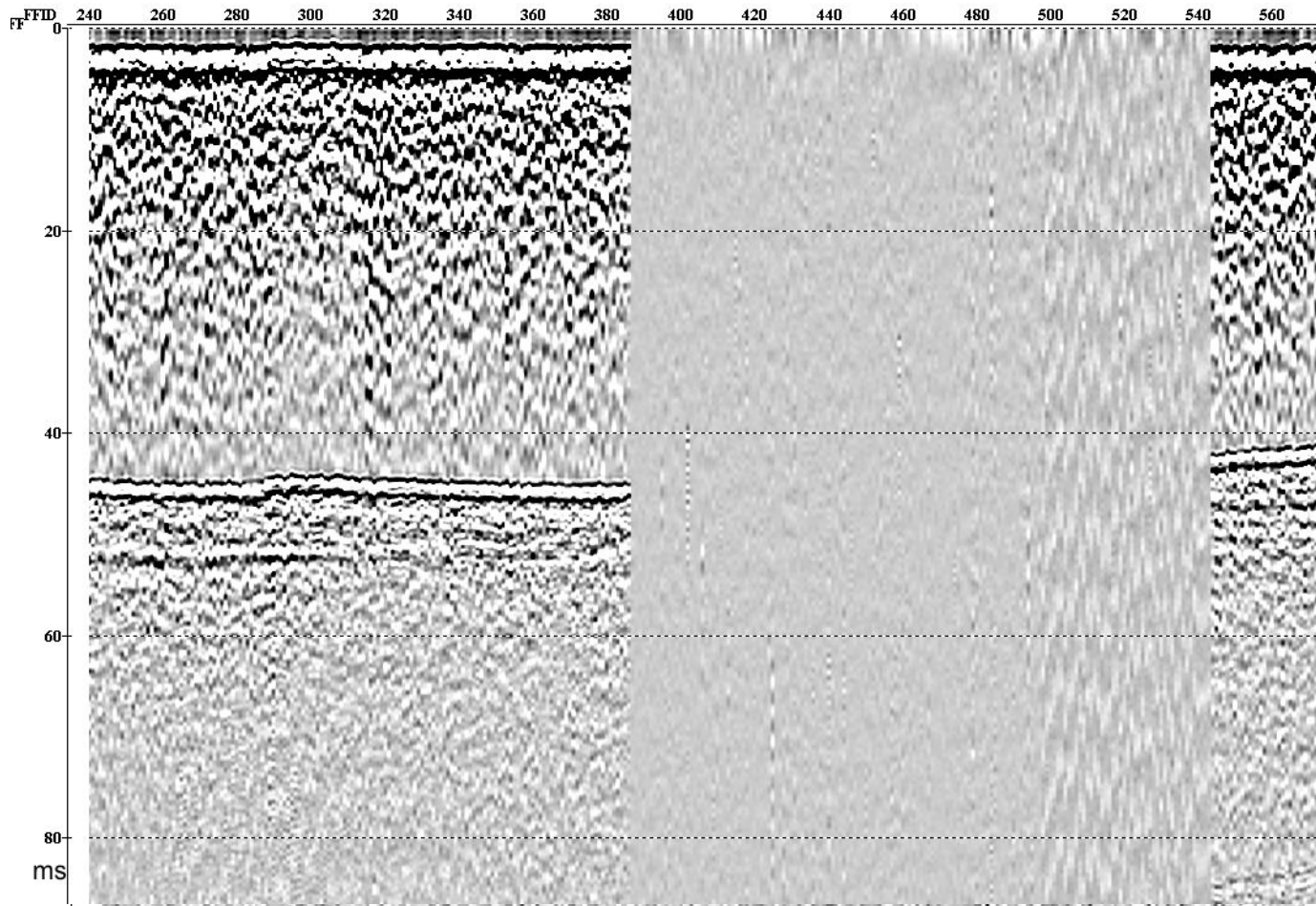
Explosive charge is 0.05 kg in weight in both cases.

Рис. 8. Сейсмограммы, полученные с одного и того же пункта взрыва при одинаковых условиях приема и регистрации:

- а) взрыв на поверхности заряда весом 50 г;
- б) взрыв такого же заряда в скважине на глубине 8 м.

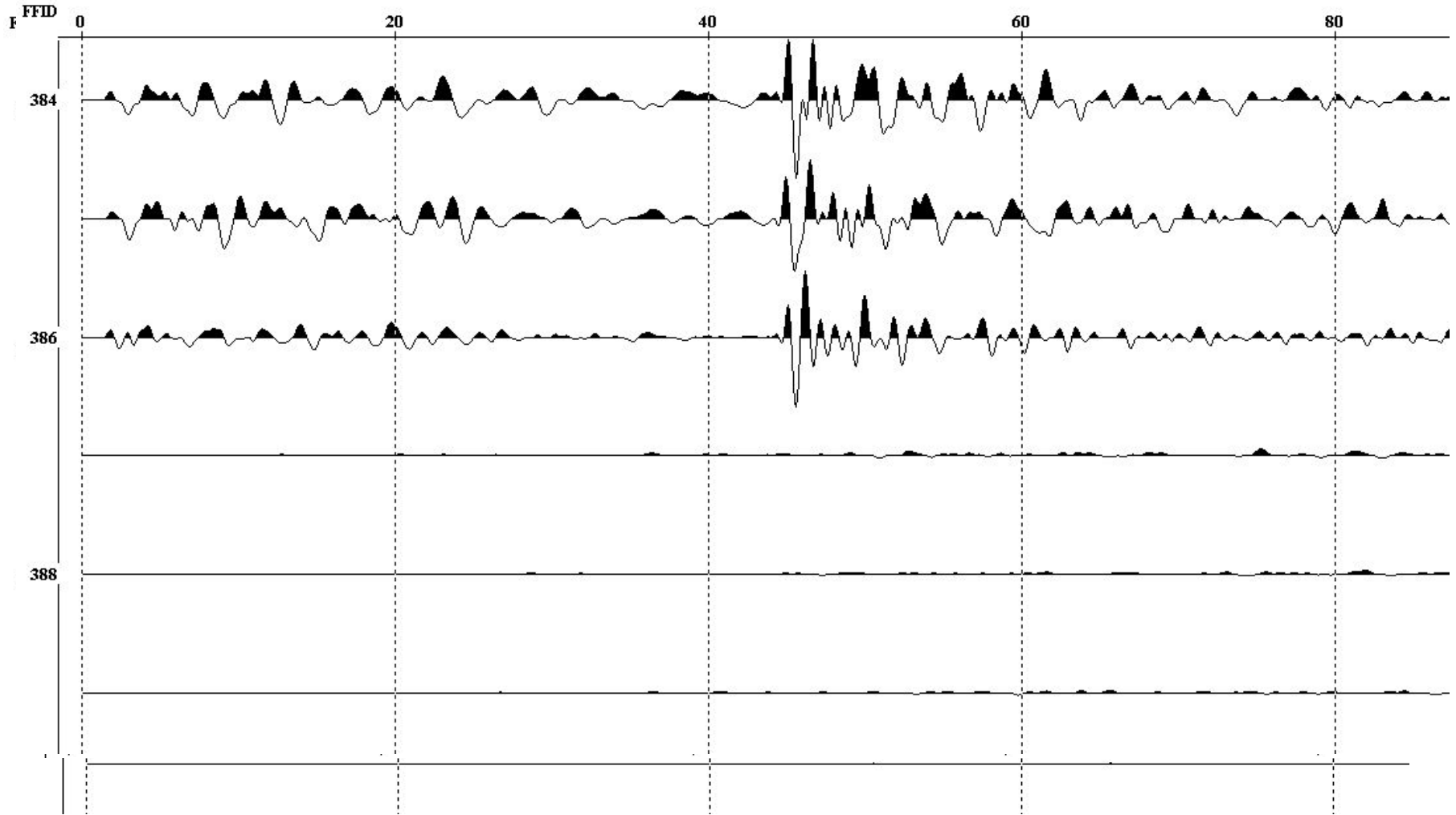
# Spherical divergence

Seismic time sections: a) raw; b) after band-pass filtering



# Spherical divergence

Seismic trace: a) amplifying coeff.=1; b) coeff.=5; c) after amplitude correction  $B(t) = A(t) * t$





# Коэффициенты отражения и прохождения. Обменные волны.

## Reflection and transmission. Converted waves.

летворять граничным условиям. Когда обе среды твердые, из граничных условий следуют четыре уравнения; следовательно, мы должны иметь четыре неизвестных.  $P$ - (или  $S$ -) волна при

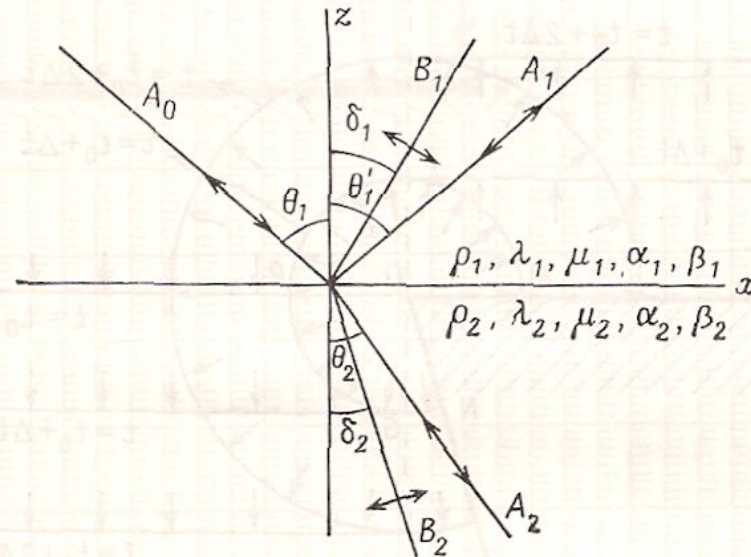
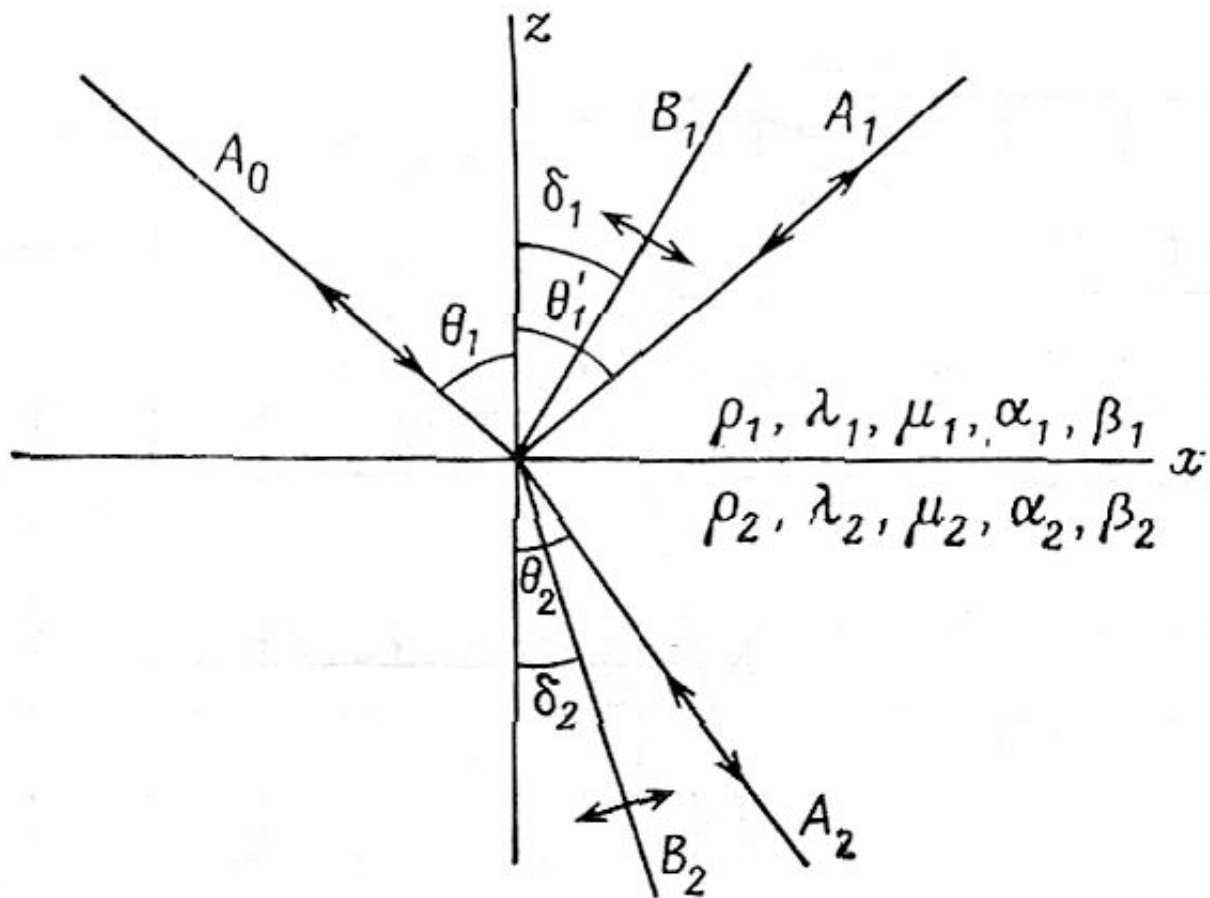


Рис. 2.25. Волны, возбуждаемые на границе раздела падающей  $P$ -волной.

падении на границу раздела двух твердых сред в общем порождает отраженные и преломленные как  $P$ -, так и  $S$ -волны. Таким образом, для падающей  $P$ -волны, как показано на рис. 2.25, мы имеем отраженную и преломленную  $P$ -волны с углами отражения и преломления соответственно  $\theta_1$  и  $\theta_2$  и отраженную и преломленную  $S$ -волны с углами  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Волны, тип которых изменяется на границе раздела (в рассмотренном примере образуются отраженные и преломленные  $S$ -волны), называются *обменными волнами*.

Коэффициенты отражения и прохождения. Обменные волны.

Reflection and transmission. Converted waves.



Волны, возбуждаемые на границе раздела падающей  $P$ -волной.

## Уравнения Цеппритца. Serprits equations.

### 2.4.4. Уравнения Цёппритца

Если взять (2.124) в более общей форме, т. е.  $A_0 = (\alpha_1/\omega) \mathcal{A}_0$ ,  $A_i = (\alpha_i/\omega) \mathcal{A}_i$ ,  $B_i = (\beta_i/\omega) \mathcal{B}_i$ ,  $i = 1, 2$ , то амплитуды потенциала смещения в уравнениях Кнотта можно заменить амплитудами смещения  $\mathcal{A}_0$ ,  $\mathcal{A}_i$ ,  $\mathcal{B}_i$ . (Точно так же, как в случае с  $A_0$ ,  $A_1$  и т. д., амплитуды смещения не дают непосредственно амплитуды величин  $u$  и  $w$ ; вместо этого  $\mathcal{A}$  является амплитудой смещения в направлении распространения волны, а  $\mathcal{B}$  — амплитудой смещения по нормали к направлению распространения.) Заменяя  $A_0$ ,  $A_1$  и т. д. в уравнениях Кнотта на  $\mathcal{A}_0$ ,  $\mathcal{A}_1$  и т. д., мы приходим к следующим уравнениям, называемым *уравнениями Цёппритца* [226] (см. также задачу 2.22):

$$\mathcal{A}_1 \cos \theta_1 - \mathcal{B}_1 \sin \delta_1 + \mathcal{A}_2 \cos \theta_2 + \mathcal{B}_2 \sin \delta_2 = \mathcal{A}_0 \cos \theta_1, \quad (2.125)$$

$$\mathcal{A}_1 \sin \theta_1 + \mathcal{B}_1 \cos \delta_1 - \mathcal{A}_2 \sin \theta_2 + \mathcal{B}_2 \cos \delta_2 = -\mathcal{A}_0 \sin \theta_1, \quad (2.126)$$

$$\mathcal{A}_1 Z_1 \cos 2\delta_1 - \mathcal{B}_1 W_1 \sin 2\delta_1 - \mathcal{A}_2 Z_2 \cos 2\delta_2 - \mathcal{B}_2 W_2 \sin 2\delta_2 = -\mathcal{A}_0 Z_1 \cos 2\delta_1, \quad (2.127)$$

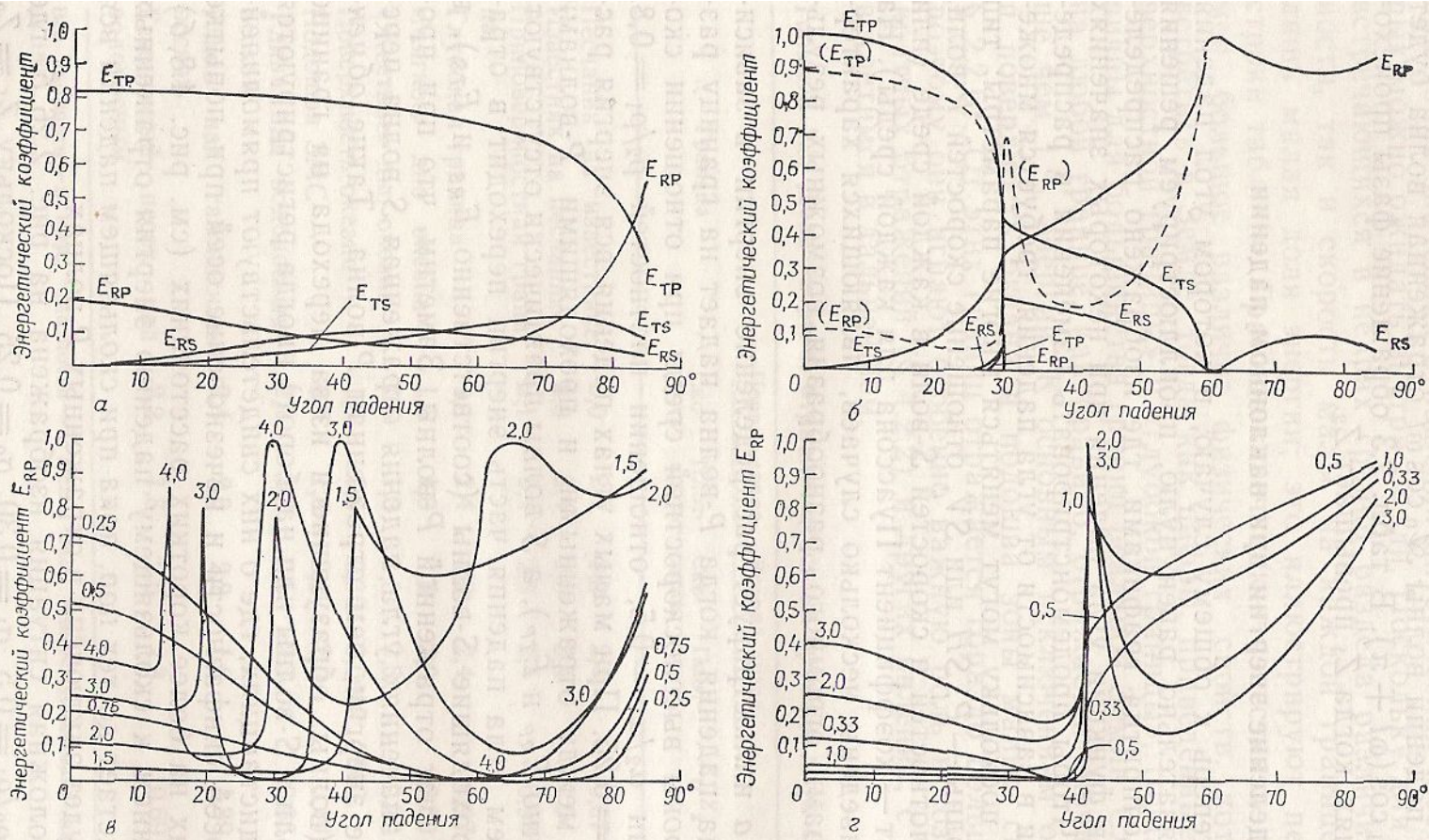
$$\begin{aligned} \mathcal{A}_1 (\beta_1/\alpha_1) W_1 \sin 2\theta_1 + \mathcal{B}_1 W_1 \cos 2\delta_1 + \\ + \mathcal{A}_2 (\beta_2/\alpha_2) W_2 \sin 2\theta_2 - \mathcal{B}_2 W_2 \cos 2\delta_2 = \\ = \mathcal{A}_0 (\beta_1/\alpha_1) W_1 \sin 2\theta_1, \end{aligned} \quad (2.128)$$

где

$$Z_i = \rho_i \alpha_i, \quad W_i = \rho_i \beta_i, \quad i = 1, 2.$$

Произведения плотности на скорость ( $Z_i$  и  $W_i$ ) известны под названием *акустических жесткостей*. Чтобы можно было применить эти уравнения на границе раздела, мы должны знать плотности и скорости в каждой из сред; следовательно,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $W_1$  и  $W_2$  известны. Для заданных  $\mathcal{A}_0$  и  $\theta_1$  мы можем из (2.117) вычислить  $\theta_2$ ,  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , а из (2.125)–(2.128) — четыре амплитуды  $\mathcal{A}_1$ ,  $\mathcal{A}_2$ ,  $\mathcal{B}_1$  и  $\mathcal{B}_2$ .

# Коэффициенты отражения и прохождения как функции от угла падения. Reflection coefficient and transmission coefficient versus incidence angle.



**Рис. 2.26.** Распределение энергии между проходящими и отраженными волнами как функция угла падения волны для случая падающей P-волны.  $E_{TP}$  — доля энергии, заключенной в проходящей P-волне,  $E_{RP}$  — доля энергии в отраженной P-волне,  $E_{TS}$  — в проходящей S-волне,  $E_{RS}$  — в отраженной S-волне. [205]. *a* — случай, когда в среде, где лежит падающая волна, скорость больше:  $\alpha_2/\alpha_1 = 0,5$ ,  $\rho_2/\rho_1 = 0,8$ ,  $\sigma_1 = 0,3$ ,  $\sigma_2 = 0,25$ ; *б* — случай, когда в среде, где лежит падающая волна, скорость меньше:  $\alpha_2/\alpha_1 = 2,0$ ,  $\rho_2/\rho_1 = 0,5$ ,  $\sigma_1 = 0,3$ ,  $\sigma_2 = 0,25$ , для пунктирных кривых  $\rho_2/\rho_1 = 1,0$ ; *в* — доля энергии, отраженной в виде P-волны, при различных значениях отношения скоростей P-волн и  $\rho_2/\rho_1 = 1,0$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,25$ ; *г* — доля энергии, отраженной в виде P-волны, при различных значениях отношений плотностей и  $\alpha_2/\alpha_1 = 1,5$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,25$ .

## Normal incidence case.

### 2.4.5. Распределение энергии при нормальном падении

При нормальном падении волн уравнения Цёппритца приобретают очень простой вид. Поскольку соответствующие кривые зависимости коэффициентов от угла при малых углах падения (примерно до  $20^\circ$ ) меняются медленно, результаты, полученные для нормального падения, имеют широкую область применимости. Для  $P$ -волны при нормальном падении отсутствуют тангенциальные напряжения и смещения; следовательно,  $\mathcal{B}_1 = \mathcal{B}_2 = 0$  и (2.125)–(2.128) сводятся к соотношениям

$$\mathcal{A}_1 + \mathcal{A}_2 = \mathcal{A}_0,$$

$$Z_1 \mathcal{A}_1 - Z_2 \mathcal{A}_2 = -Z_1 \mathcal{A}_0.$$

Решением этих уравнений является

$$R = \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0} = \frac{\alpha_2 \rho_2 - \alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2 + \alpha_1 \rho_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx \frac{\Delta Z}{2Z} \approx \frac{1}{2} \Delta(\ln Z), \quad (2.129)$$

$$T = \frac{\mathcal{A}_2}{\mathcal{A}_0} = \frac{2\alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2 + \alpha_1 \rho_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (2.130)$$

Формулы (2.129) и (2.130) определяют коэффициент отражения  $R$  (называемый также отражательной способностью) и коэффициент прохождения  $T$ . Соотношение (2.129) показывает, что последовательность амплитуд отраженных волн определяет приращение логарифма акустических жесткостей. Этот вывод ис-

Normal incidence case.

$$R = \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0} = \frac{\alpha_2 \rho_2 - \alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2 + \alpha_1 \rho_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \approx \frac{\Delta Z}{2Z} \approx \frac{1}{2} \Delta (\ln Z),$$

$$T = \frac{\mathcal{A}_2}{\mathcal{A}_0} = \frac{2\alpha_1 \rho_1}{\alpha_2 \rho_2 + \alpha_1 \rho_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1},$$

## Some examples of normal incidence coefficients

В табл. 2.3 показано, как изменяется отраженная энергия при таких значениях отношения акустических жесткостей, которых можно ожидать внутри Земли. Поскольку для большинства встречающихся в недрах границ раздела различия как плотности, так и скорости малы, на каждой границе отражается лишь малая доля энергии; это иллюстрируют первые четыре строки таблицы. Границе «песчаник — известняк» приписано самое большое различие физических свойств, которое можно встретить в Земле, тогда как цифры, приведенные для «приповерхностной границы» и «глубокой границы», гораздо более типичны для большинства границ реальной Земли. Следовательно, на любой границе, как правило, отражается значительно меньше чем 1 % энергии. К основным исключениям относятся дно и поверхность океана и подошва зоны малых скоростей (см. § 2.2.6). От этих границ отражается гораздо больше энергии, и поэтому они играют особенно важную роль в создании многократных отражений (§ 4.2.2) и других явлений, с которыми мы встретимся в дальнейшем.

Таблица 2.3. Доля энергии, отражающейся на границе двух сред

Граница	Первая среда		Вторая среда		$Z_1/Z_2$	$R$	$E_R$
	Скорость	Плотность	Скорость	Плотность			
Песчаник на известняке	2,0	2,4	3,0	2,4	0,67	0,2	0,040
Известняк на песчанике	3,0	2,4	2,0	2,4	1,5	-0,2	0,000
Приповерхностная граница	2,1	2,4	2,3	2,4	0,93	0,045	0,0021
Глубокая граница	4,3	2,4	4,5	2,4	0,97	0,022	0,0005
«Мягкое» дно океана	1,5	1,0	1,5	2,0	0,50	0,33	0,11
«Жесткое» дно океана	1,5	1,0	3,0	2,5	0,20	0,67	0,44
Поверхность океана	1,5	1,0	0,36	0,0012	3800	-0,9994	0,9988
Подошва ЗМС	0,5	1,5	2,0	2,0	0,19	0,68	0,47
Глина над водоносным песком	2,4	2,3	2,5	2,3	0,96	0,02	0,0004
Глина над газоносным песком	2,4	2,3	2,2	1,8	1,39	-0,16	0,027
Газоносный песок над водоносным	2,2	1,8	2,5	2,3	0,69	0,18	0,034

Все скорости—в км/с, плотности—в г/см<sup>3</sup>, знак минус указывает на обращение фазы на 180°.

Следует сказать о том, что, хотя доли энергии  $E_R$  и  $E_T$  не зависят от того, с какой стороны от границы падает волна, этого нельзя сказать об амплитуде отраженных волн  $\mathcal{A}_1$ , так как перестановка  $Z_1$  и  $Z_2$  в (2.129) изменяет знак отношения

## Some examples of normal incidence coefficients

Таблица 2.3. Доля энергии, отражающейся на границе двух сред

Граница	Первая среда		Вторая среда		$Z_1/Z_2$	R	$E_R$
	Скорость	Плотность	Скорость	Плотность			
Песчаник на известняке	2,0	2,4	3,0	2,4	0,67	0,2	0,040
Известняк на песчанике	3,0	2,4	2,0	2,4	1,5	-0,2	0,000
Приповерхностная граница	2,1	2,4	2,3	2,4	0,93	0,045	0,0021
Глубокая граница	4,3	2,4	4,5	2,4	0,97	0,022	0,0005
«Мягкое» дно океана	1,5	1,0	1,5	2,0	0,50	0,33	0,11
«Жесткое» дно океана	1,5	1,0	3,0	2,5	0,20	0,67	0,44
Поверхность океана	1,5	1,0	0,36	0,0012	3800	-0,9994	0,9988
Подошва ЗМС	0,5	1,5	2,0	2,0	0,19	0,68	0,47
Глина над водоносным песком	2,4	2,3	2,5	2,3	0,96	0,02	0,0004
Глина над газоносным песком	2,4	2,3	2,2	1,8	1,39	-0,16	0,027
Газоносный песок над водоносным	2,2	1,8	2,5	2,3	0,69	0,18	0,034

Все скорости—в км/с, плотности—в г/см<sup>3</sup>, знак минус указывает на обращение фазы на 180°.



Поглощение сейсмических волн.  
Absorption of seismic waves.

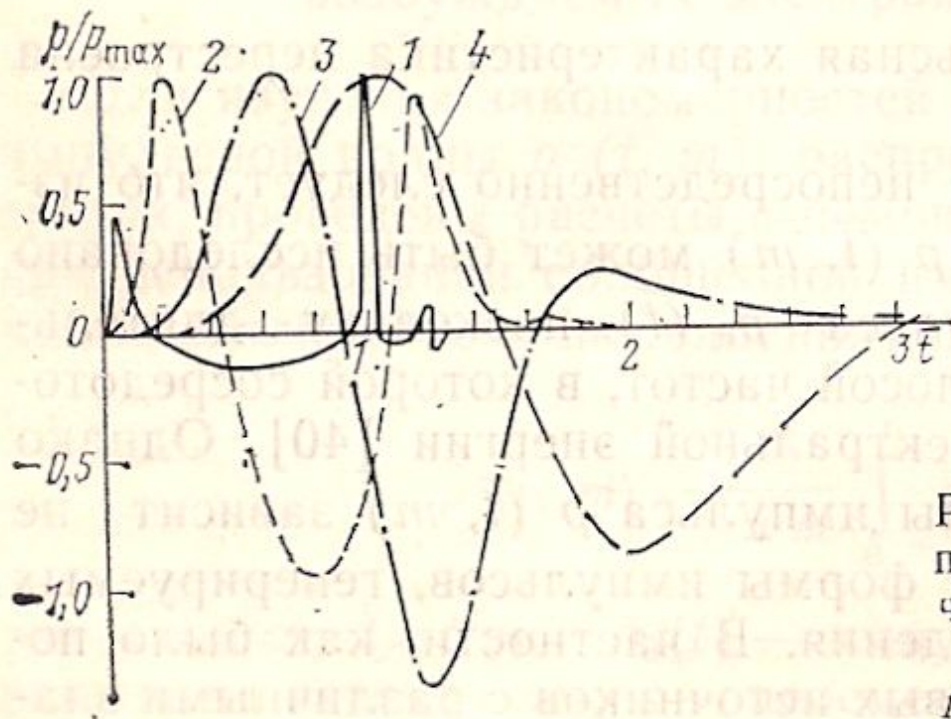


Рис. 32. Импульсы, прошедшие через поглощающую среду с различным значением обобщенного параметра поглощения  $\bar{m}$ .

1 —  $\bar{m}=0$ ; 2 —  $\bar{m}=0,1$ ; 3 —  $\bar{m}=0,4$ ; 4 —  $\bar{m}=1$

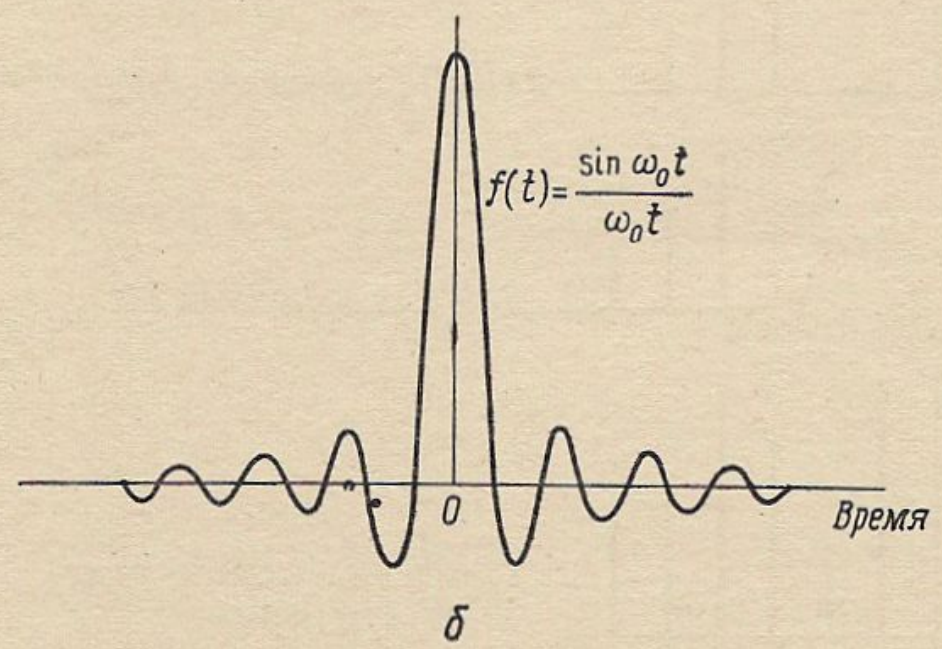
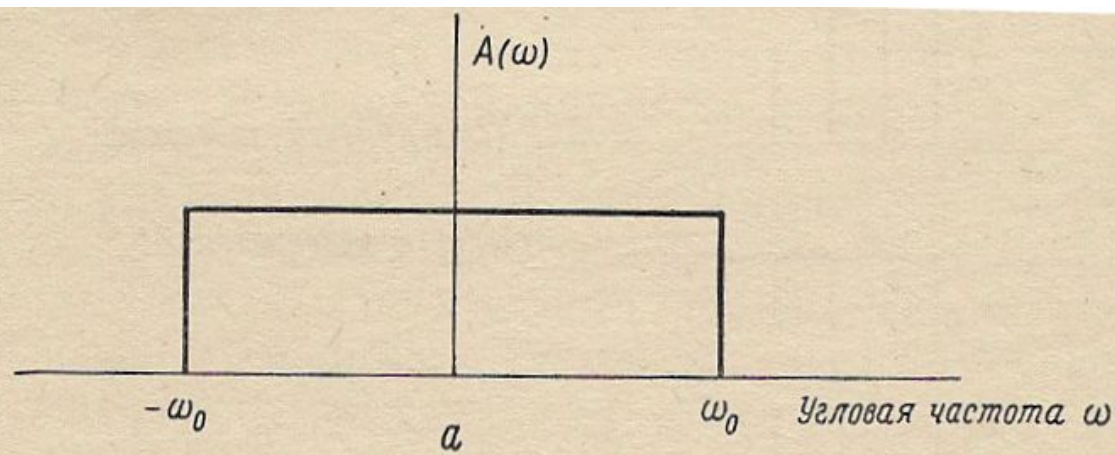


Рис. 4.6. Аппроксимация дельта-функции импульсом, имеющим равномерный амплитудный спектр в пределах полосы частот от  $-\omega_0$  до  $+\omega_0$ .

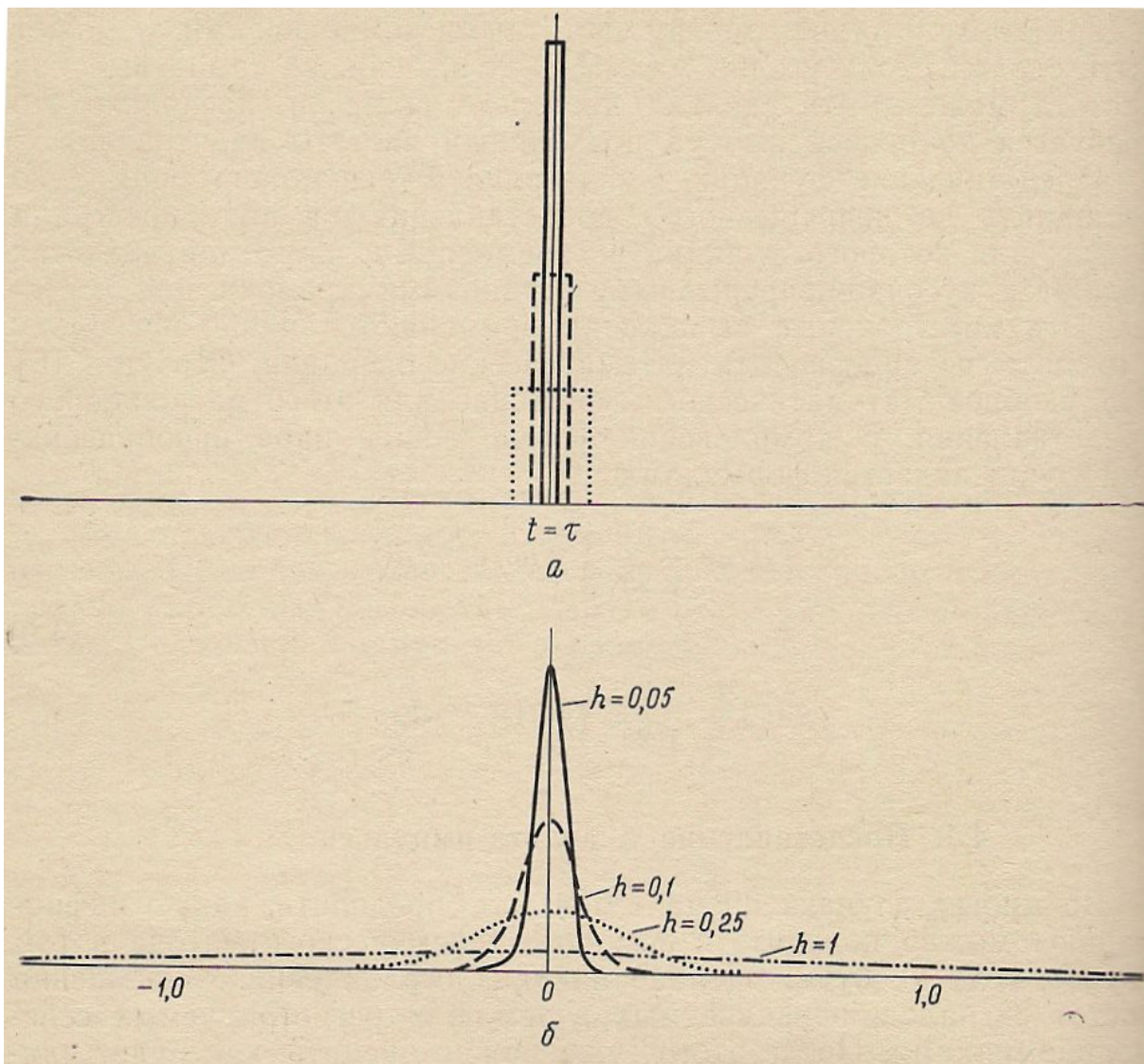


Рис. 4.5. Аппроксимации дельта-функции:  $a$  — приближение с помощью прямоугольных импульсов, имеющих постоянную площадь, но постепенно уменьшающуюся длительность;  $b$  — приближение, основанное на представлении о функции ошибки при стремлении к нулю параметра  $h$ .

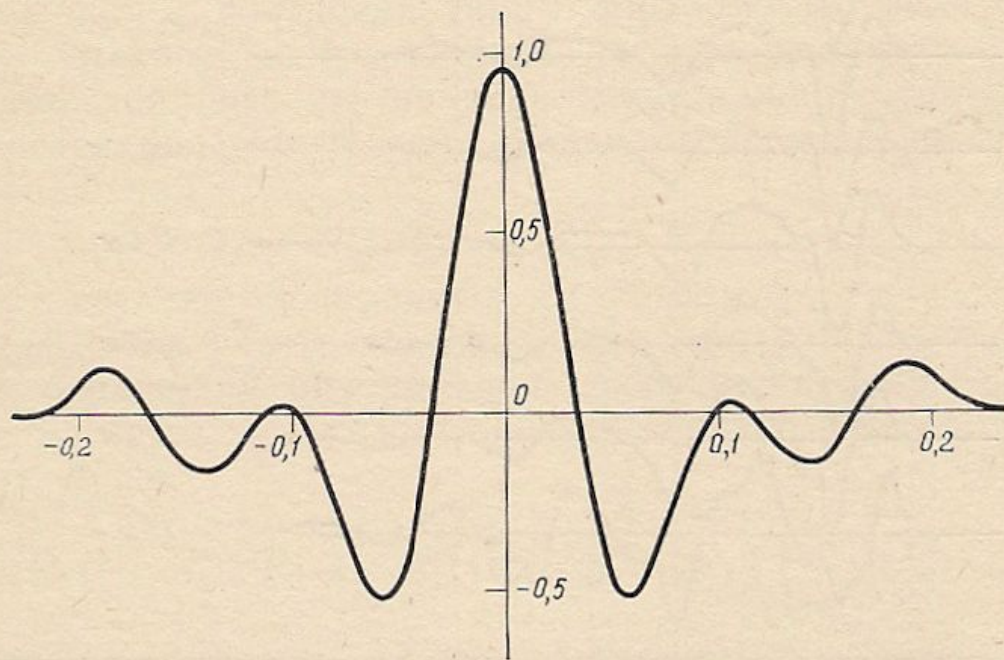


Рис. 4.12. Функция автокорреляции для прямоугольного амплитудного спектра в диапазоне 5—20 Гц.

# Расчет синтетических сейсмограмм – модель.

## Synthetic seismograms – model.

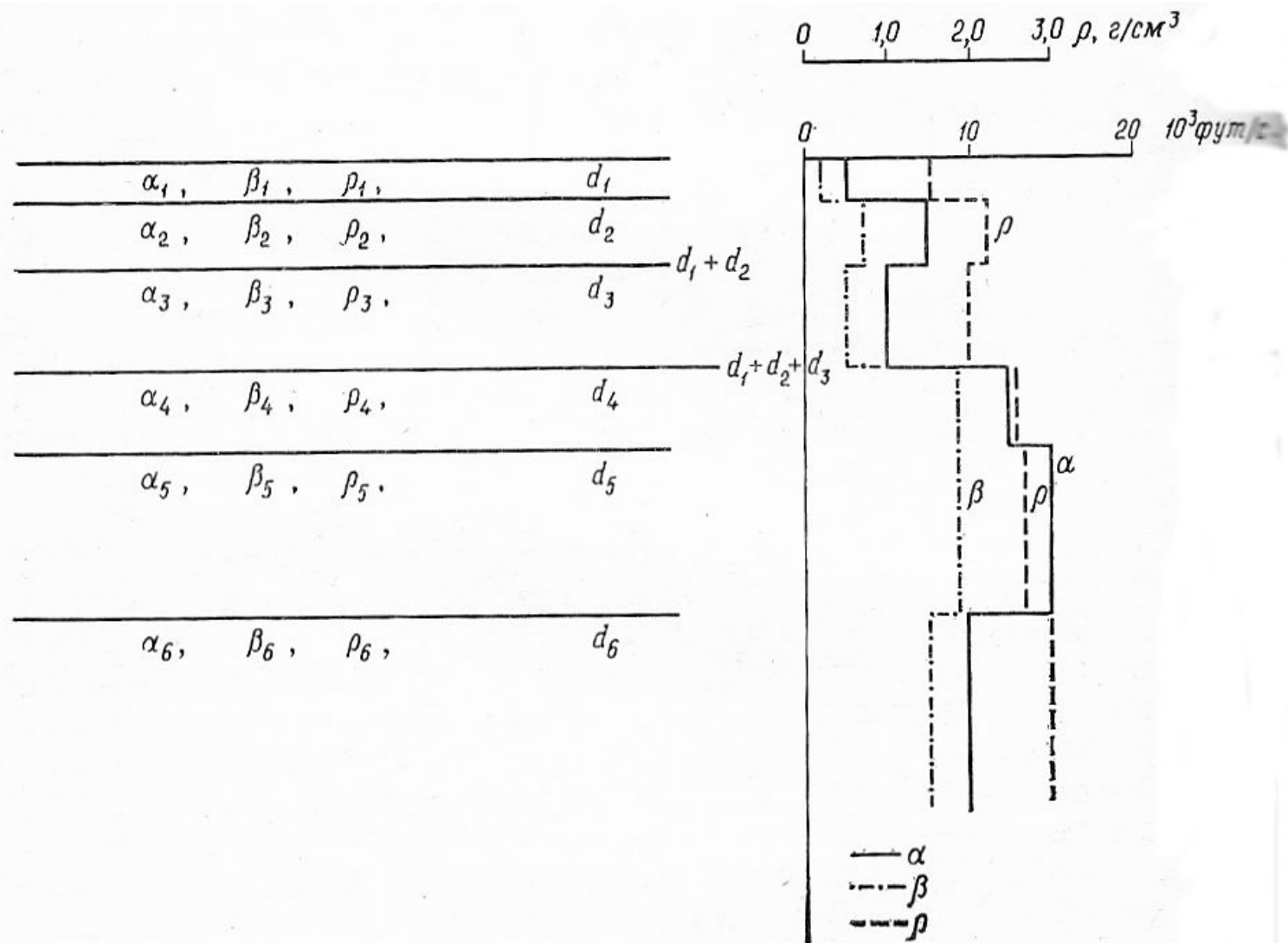


Рис. 4.9. Слоистая модель, принятая для изучения отражающих свойств разреза.  $\alpha$  и  $\beta$  — скорости распространения P- и S-волн соответственно,  $\rho$  — плотность.

# Расчет синтетических сейсмограмм – траектории лучей.

## Synthetic seismograms – ray tracing.

Чтобы завершить описание постановки задачи, скажем, что мы рассматриваем волны, распространяющиеся только по вертикали перпендикулярно напластованию, хотя для наглядности изображаются различные наклонные траектории лучей, как это сделано, например, на рис. 4.10. Поскольку предполагается, что лучи падают на границы по нормали, на диаграммах не показано никакого различия в углах отражения и преломления лучей.

Первая попытка построить синтетические сейсмограммы на основе данных о скоростях, найденных по каротажным диаграммам, была сделана Петерсоном [3]. Если такая диаграмма непрерывна, мы можем рассмотреть две точки, отстоящие по времени на бесконечно малую величину  $\delta t$ , скорости в которых равны  $V$  и  $\delta V$ . Пре-

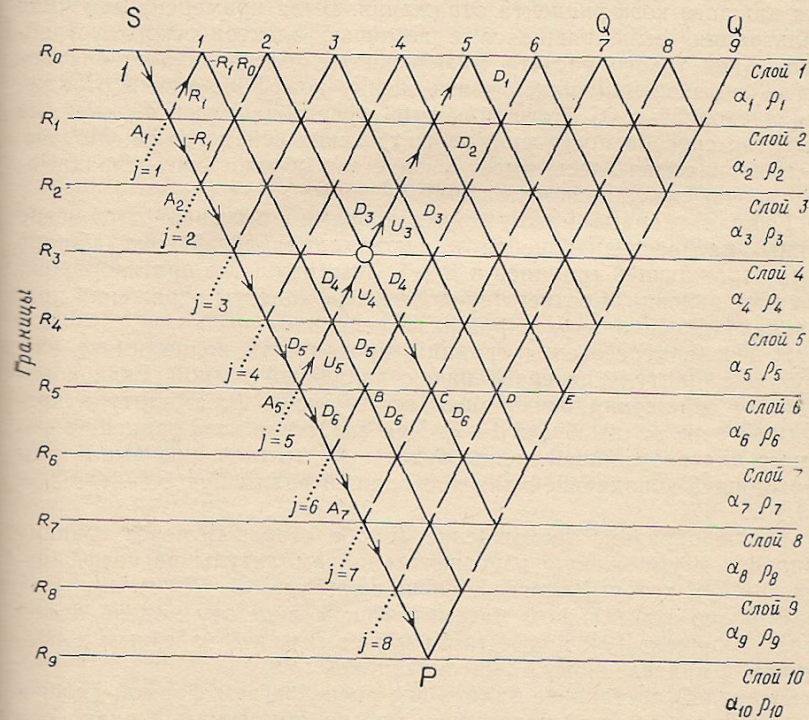


Рис. 4.10. Изображение всех возможных траекторий лучей для слоистой модели, характеризующейся постоянным временем пробега. Любой луч, начинающийся в точке S, непрерывно прослеживаемый с соответствующей компонентой смещения и затем возвращающийся к поверхности, считается возможной траекторией. Выходной сигнал в точках 1, 2, ..., n на поверхности представляет собой суммарный сигнал по всем траекториям с постоянным временем  $(2j\Delta t)$ .

Расчет синтетических сейсмограмм – траектории лучей.  
 Synthetic seismograms – ray tracing.

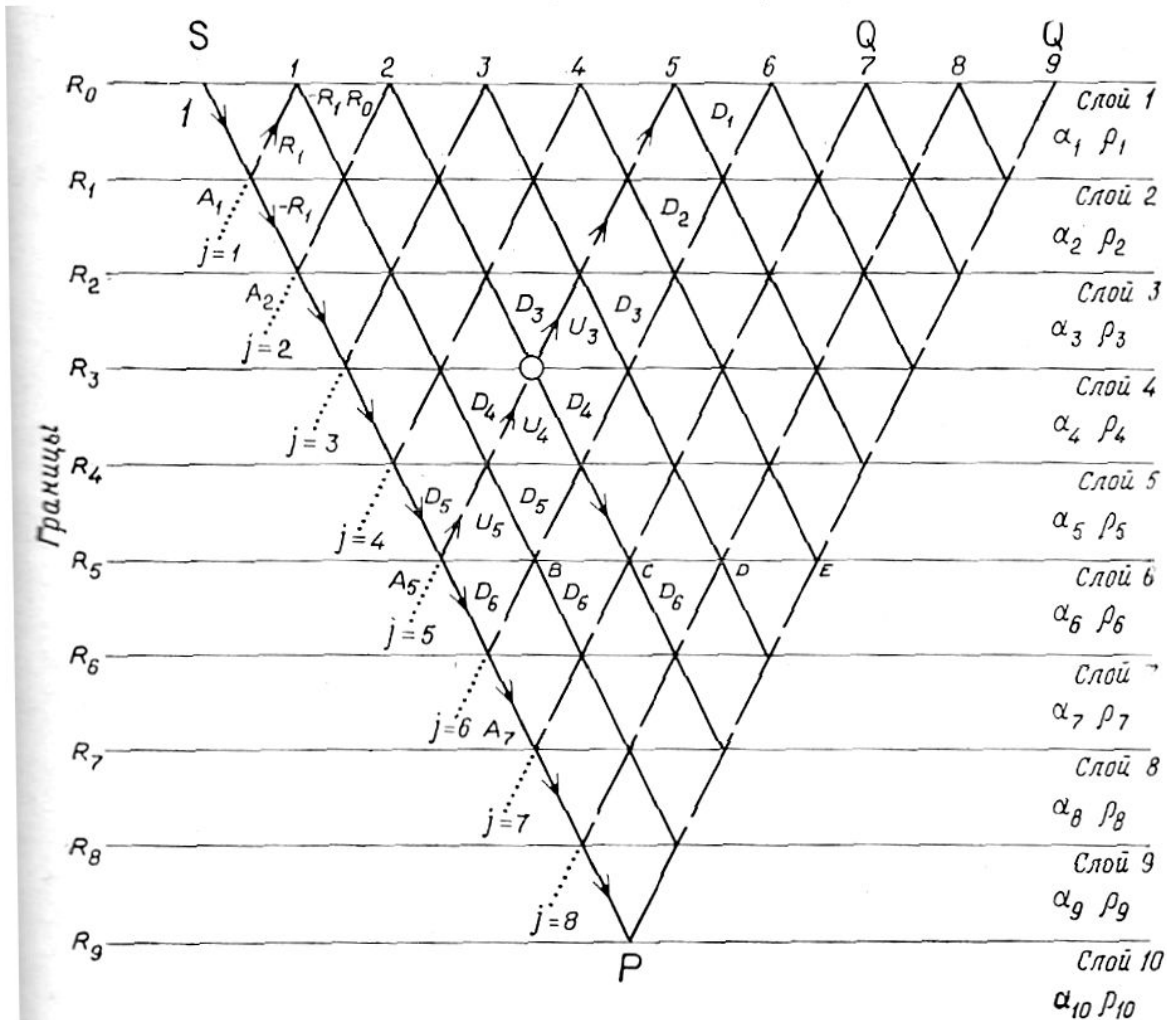


Рис. 4.10. Изображение всех возможных траекторий лучей для слоистой модели, характеризующейся постоянным временем пробега. Любой луч, начинающийся в точке  $S$ , непрерывно прослеживаемый с соответствующей компонентой смещения и затем возвращающийся к поверхности, считается возможной траекторией. Выходной сигнал в точках 1, 2, ...,  $n$  на поверхности представляет собой суммарный сигнал по всем траекториям с постоянным временем  $(2j\Delta t)$ .