

Vlastislav Červený

The influence of the structure of the overburden on the amplitudes of reflected and head waves Vliv struktury nadloží na amplitudy odražených a čelných vln

Acta Universitatis Carolinae. Mathematica et Physica, Vol. 8 (1967), No. 1, 55--[88]

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/142204>

Terms of use:

© Univerzita Karlova v Praze, 1967

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Влияние слоистости покрывающей толщи на амплитуды отраженных и головных волн

VLASTISLAV ČERVENÝ

Геофизический институт, Математическо-физический факультет
Карлова Университета, Прага

А. М. ЕПИНАТЬЕВА

Институт физики Земли АН СССР, Москва

(Поступило 16 января 1967 г.)

При интерпретации сейсмических данных, при теоретических расчетах кинематики и динамики сейсмических волн практически никогда не удается знать и учесть всю сложность строения геологических разрезов. Обычно производят замену сложной геологической среды более простой моделью; нередко вводят предположение об однородности среды, покрывающей отражающую или преломляющую границу, и в этом приближении решают прямые и обратные задачи.

Решение динамической задачи теории распространения сейсмических волн для простейшей модели среды — однородная среда, покрывающая границу полупространства — показало [1; 2 и др.], что в идеально-упругих средах амплитуды закритических отраженных волн гораздо больше амплитуд головных волн (на один-два порядка) и с расстоянием происходит усиление относительной интенсивности отраженных волн.

В случае отражающих и преломляющих слоев, согласно данным моделирования [3], относительная интенсивность головных волн при больших удалениях от источника становится еще меньше. Наличие поглощения в среде может привести к уменьшению относительной интенсивности отраженных волн [4].

В настоящей работе проведено изучение зависимости амплитудных характеристик отраженных и головных волн от строения покрывающей толщи. Цель работы — выяснить, как влияет сложность покрывающей толщи (наличие промежуточных границ раздела скоростей) на величину и характер изменения с расстоянием амплитуд отраженных и головных волн от границы полупространства и на соотношение амплитуд этих волн. Решение этой задачи должно тоже позволить понять, при каких параметрах слоистой однородных сред допустима, а при каких недопустима аппроксимация слоистой покрывающей среды средой однородной.

Все расчеты проведены для толстых идеально-упругих слоев в лучевом приближении [5; 12 и др.]. Настоящая работа является продолжением работ [6; 11]. В этих работах расчеты произведены для параметров, характерных для земной коры; в настоящей работе — для параметров, характерных для разведочного диапазона глубин.

В работе приняты следующие обозначения и терминология.

Границы в покрывающей толще называются промежуточными, граница полупространства, подстилающая покрывающую толщу, называется основной границей.

- k — номер слоев в покрывающей толще;
- V_i — скорости продольных волн в слоях покрывающей толщи ($i = 1, 2, \dots, k$);
- V_T — скорость продольных волн ниже основной границы;
- \bar{V} — средняя скорость в покрывающей толще;
- V^* — кажущаяся скорость отраженной волны;
- h_i — мощности слоев покрывающей толщи ($i = 1, 2, \dots, k$);
- H — мощность покрывающей среды;
- n — показатель преломления на основной границе;
- ϑ — угол падения на основную границу;
- ϑ_i — угол падения на i -тую промежуточную границу ($i = 1, 2, \dots, k-1$);
- s — синус угла падения на основную границу;
- s_i — синус угла падения на i -тую промежуточную границу ($i = 1, 2, \dots, k-1$);
- ρ_i — плотность в слоях покрывающей среды и полупространстве ($i = 1, 2, \dots, k + 1$);
- n_i — соотношение скорости продольных и поперечных волн в слоях покрывающей среды и полупространстве ($i = 1, 2, \dots, k + 1$);
- x — горизонтальное расстояние от источника;
- x_H — горизонтальное расстояние начальной точки головной волны от источника;
- t_0 — время прихода отраженной волны при $x = 0$;
- K — модуль коэффициента отражения плоских продольных волн;
- σ — произведение всех коэффициентов преломления плоских продольных волн на промежуточных границах (функция прохождения);
- σ^* — значение функции прохождения в начальной точке;
- D^* — коэффициент образования головных продольных волн;
- R — функция расхождения;
- f — частота;
- A_w — амплитуда вертикальной составляющей отраженной продольной волны;
- A_w^* — то же для головной волны (для частоты $f = 50$ гц);
- ε_w — отношение амплитуд вертикальной составляющей отраженных и головных волн (для частоты $f = 50$ гц).

§ 1. Модели для расчетов

При расчетах выбраны наиболее простые модели сред, которые позволили бы выяснить некоторые общие закономерности в изменении амплитуд отраженных и головных волн и их соотношении. Выполнено две системы расчетов (системы E и F) с широким изменением параметров покрывающей толщи (рис. 1, 2). В первой системе расчетов (включающей 16 моделей, разбитых на 5 серий) рассмотрена двухслойная и однослойная покрывающая среда. Во второй системе расчетов (включающей 32 модели, сгруппированных в 10 серий) рассмотрена трехслойная среда, в которой параметры первого и третьего слоев одинаковы. При всех расчетах сохранялись постоянными эти величины: скорость V_T в полупространстве ниже основной границы ($V_T = 5500$ м/сек),

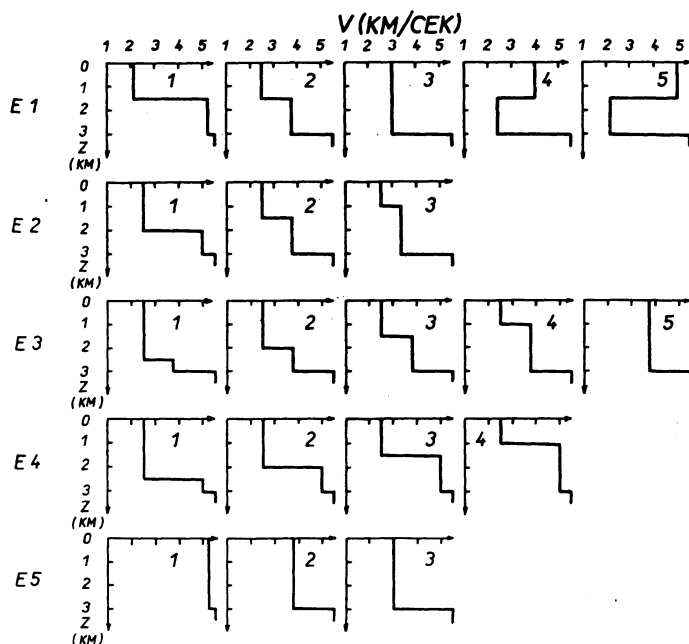


Рис. 1 Модели с двухслойной покрывающей толщей.

глубина основной границы раздела H ($H = 3$ км), соотношение скоростей продольных и поперечных волн V_P/V_S ($V_P/V_S = 2$). Тоже плотности во всех слоях остались неизменными. Скорости в слоях покрывающей толщи изменялись, но всегда были меньше чем V_T .

Расчеты проведены при горизонтальных расстояниях от источника от 0 до 20 км. Минимальные мощности h слоев в покрывающей толще равнялись 0,27 км для трехслойной покрывающей толщи и 0,5 км для двухслойной. При частоте $f = 50$ гц и скорости $V = 3$ км/сек минимальное отношение мощности слоя к длине волны равнялось соотношению 4,5 и 8,3. Многократные волны

в слоях при расчетах не учитывались. Возможное влияние этих ограничений на результаты расчета обсуждаются в конце работы.

В результате расчетов построены серии графиков зависимости разных величин (времени прихода, функции расхождения и прохождения, амплитуд отраженных и головных волн и их отношений) от расстояния. Эти же графики можно использовать для других сред удовлетворяющих условию подобия [7].

Двуслойная покрывающая среда. Расчеты проведены для моделей, изображенных на рис. 1; параметры моделей и некоторые результаты расчета указаны на таблице 1.

Для характеристики положения и наклона годографов отраженных волн в таблице 1 приведены величины t_0 и V^* ; V^* определялось на интервале расстояний 10—20 км от источника (аппроксимируя годограф прямой линией).

Таблица 1

Серия	Модель	V_1	V_2	h_1	h_2	\bar{V}	n	t_0	V^*
E1	1	2,1	5,23	1,5	1,5	3,00	0,951	2,00	5460
	2	2,5	3,74	1,5	1,5	3,00	0,680	2,00	4100
	3	3,00		3,00		3,00	0,546	2,00	3250
	4	4,0	2,40	1,5	1,5	3,00	0,436	2,00	4100
	5	5,0	2,14	1,5	1,5	3,00	0,389	2,00	5130
E2	1	2,5	5,00	2,0	1,0	3,00	0,909	2,00	5130
	2	2,5	3,74	1,5	1,5	3,00	0,680	2,00	3970
	3	2,5	3,34	1,0	2,0	3,00	0,607	2,00	3530
E3	1	2,5	3,74	2,5	0,5	2,65	0,680	2,27	
	2	2,5	3,74	2,0	1,0	2,81	0,680	2,12	
	3	2,5	3,74	1,5	1,5	3,00	0,680	2,00	3920
	4	2,5	3,74	1,0	2,0	3,21	0,680	1,87	3940
	5	3,74		3,00		3,74	0,680	1,60	4070
E4	1	2,5	5,0	2,5	0,5	2,73	0,909	2,20	5080
	2	2,5	5,0	2,0	1,0	3,00	0,909	2,00	5130
	3	2,5	5,0	1,5	1,5	3,33	0,909	1,80	5180
	4	2,5	5,0	1,0	2,0	3,75	0,909	1,60	5240
E5	1	5,2		3,0		5,2	0,947		
	2	3,7		3,0		3,7	0,672		
	3	3,0		3,0		3,0	0,546		

В сериях E1 и E2 сохраняется постоянной средняя скорость в покрывающей толще; изучается зависимость от распределения скоростей в слоях (серия E1) и от мощности слоев (серия E2). При переходе от модели к модели в обеих сериях меняется скачек в скоростях на основной границе. Модели этих серий имеют практическое значение. В сейсмическом эксперименте очень часто известна средняя скорость до границы, а строение покрывающей среды неизвестно. Различные модели серий E1 и E2 должны показать как могут меняться амплитудные характеристики волн в среде, в которой средняя скорость в покрывающей толще и граничная скорость сохраняются постоянными, а меняются параметры покрывающей толщи и скачек в скоростях на основной границе.

В сериях E3 и E4 сохраняются постоянными параметры на основной границе ($n = V_2/V_1$); изменяется мощность слоя, непосредственно покрывающего основную границу (серия E3 и E4) и скорость в нем (модели E3 и E4 при равной мощности h_2). Рассмотрение серий E3 и E4 преследует цель выяснения физических закономерностей в динамике волн при сохранении соотношения скоростей на основной границе и изменении скоростей и мощностей промежуточных слоев. Параметры моделей в сериях E3 и E4 подобраны так, что наклоны годографов отраженных волн на больших расстояниях близки для разных моделей. Модели E3 и E4 также имеют практическое значение. В эксперименте могут быть известны параметры на основной границе, а строение всей покрывающей среды неизвестно.

Трехслойная покрывающая среда. Рассмотрена однородная покрывающая толща ($V_1 = V_3$) с включением слоя со скоростью V_2 . В разных сериях изменяется мощность слоя h_2 и скорость в нем V_2 . Параметры моделей видны из рис. 2 и приведены в таблице 2. В одних сериях сохраняется неизменной величина t_0 отраженных волн и \bar{V} и при больших x годографы отраженных волн имеют разный наклон. В других сериях при переходе от модели к модели изменяются t_0 и \bar{V} , а наклон годографов отраженных волн при больших x примерно одинаковый. В сериях F1—F3 изучается зависимость характеристик волн от скорости в слое V_2 . Разные серии отличаются мощностью слоя h_2 . В сериях F7—F10 изучается зависимость от мощности h_2 слоя. Во всех этих моделях средняя скорость не сохраняется постоянной.

В сериях F4—F6 средняя скорость сохраняется постоянной. При этом условии изучается зависимость от скорости V_2 (серия F4), мощности h_2 слоя с повышенной скоростью (серия F5) и с пониженной скоростью (серия F6).

Мы считаем, что выбранные типы моделей с двухслойной и трехслойной покрывающей толщи достаточно представительны для того, чтобы понять как влияет слоистость покрывающей толщи на динамику волн и в более сложных случаях многослойной покрывающей толщи с постоянными скоростями в слоях.

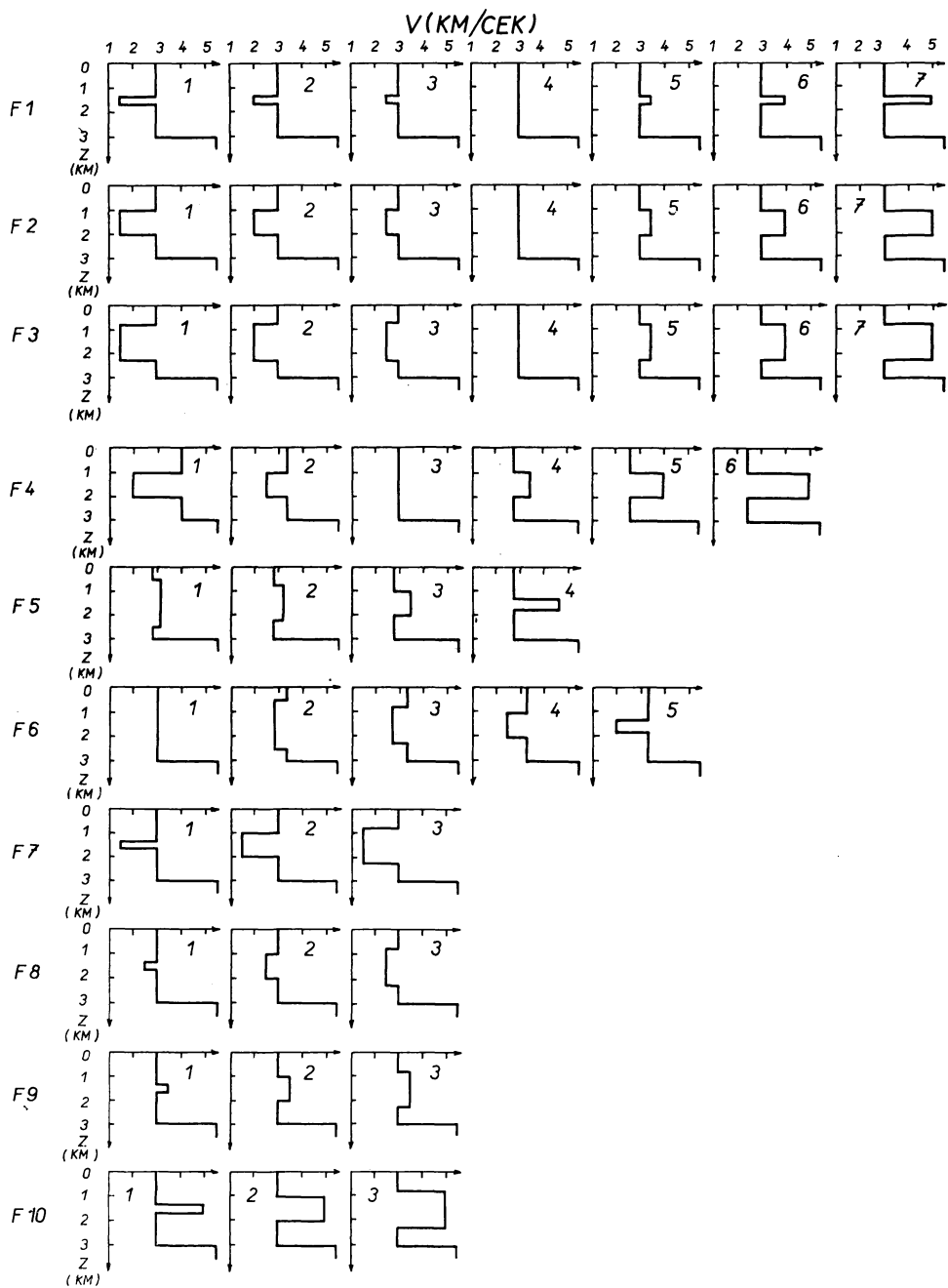


Рис. 2 Модели с трехслойной покрывающей толщей.

Таблица 2

Серия	Модель	$V_1 = V_3$	V_2	$h_1 = h_3$	h_2	n	\bar{V}	t_0	V^*
F1	1		1,5				2,75	2,17	3,250
	2		2,0				2,87	2,09	3,250
	3		2,5				2,94	2,04	3,240
	4	3	3,0	1,363 637	0,272 727	0,545	3,00	2,00	3,260
	5		3,5				3,04	1,98	3,510
	6		4,0				3,07	1,96	4,030
	7		5,0				3,11	1,93	4,830
F2	1		1,5				2,25	2,67	3,140
	2		2,0				2,57	2,33	3,150
	3		2,5				2,81	2,13	3,170
	4	3	3,0	1	1	0,545	3,00	1,98	3,250
	5		3,5				3,15	1,90	3,620
	6		4,0				3,27	1,83	4,120
	7		5,0				3,46	1,78	5,000
F3	1		1,5				2,00	3,00	3,100
	2		2,0				2,40	2,50	3,100
	3		2,5				2,73	2,19	3,120
	4	3	3,0	0,75	1,5	0,545	3,00	2,00	3,260
	5		3,5				3,23	1,85	3,650
	6		4,0				3,43	1,75	4,070
	7		5,0				3,75	1,60	5,150
F4	1	4,00	2,0	.1	1	0,725	3,0	2,00	4,180
	2	3,33	2,5	1	1	0,605	3,0	2,00	3,510
	3	3,00	3,0	1	1	0,545	3,0	2,00	3,280
	4	2,80	3,5	1	1	0,509	3,0	2,00	3,580
	5	2,67	4,0	1	1	0,485	3,0	2,00	4,070
	6	2,50	5,0	1	1	0,455	3,0	2,00	5,050
F5	1		3,11	0,50	2,0		3,0	2,00	3,310
	2	2,8	3,23	0,75	1,5	0,509	3,0	2,00	3,367
	3		3,50	1,00	1,0		3,0	2,00	3,600
	4		4,67	1,25	0,5		3,0	2,00	4,650

Таблица 2

Серия	Модель	$V_1 = V_3$	V_2	$h_1 = h_3$	h_2	n	\bar{V}	t_0	V^*
F6	1	3,00	3,00	3,0			3,00	2,00	3,310
	2	3,33	2,86	0,50	2,0		3,00	2,00	3,440
	3	3,33	2,73	0,75	1,5	0,605	3,00	2,00	3,480
	4	3,33	2,50	1,00	1,0		3,00	2,00	3,480
	5	3,33	2,01	1,25	0,5		3,00	2,00	3,440
F7	1			1,363 637	0,272 727		2,75	2,17	3,270
	2	3,0	1,5	1	1	0,545	2,25	2,67	3,130
	3			0,75	1,5		2,00	3,00	3,140
F8	1			1,363 637	0,272 727		2,94	2,04	3,270
	2	3,0	2,5	1	1	0,545	2,81	2,13	3,140
	3			0,75	1,5		2,73	2,18	3,180
F9	1			1,363 637	0,272 727		3,04	1,98	3,560
	2	3,0	3,5	1,00	1,00	0,545	3,15	1,91	3,600
	3			0,75	1,50		3,23	1,85	3,680
F10	1			1,363 637	0,272 727		3,11	1,93	4,850
	2	3,0	5,0	1,00	1,00	0,545	3,46	1,72	4,950
	3			0,75	1,50		3,75	1,61	3,420

§ 2. Методика теоретических расчетов

Расчетные формулы для амплитуд отраженных и головных волн приведены напр. в работе [12]. На основании лучевой теории для амплитуд вертикальной составляющей отраженных и головных волн A_w и A_w^* получены следующие формулы:

$$(1) \quad A_w = \frac{\sigma K}{R} \sin \vartheta_1; \quad A_w^* = \frac{V_1 n D^* \sigma^*}{2\pi f x^{1/2} (x-x_H)^{1/2}}.$$

Принятие обозначения объяснены в начале работы. Ниже приводятся формулы для величин K , σ , D^* , σ^* , R и x_H .

1. Модуль коэффициента отражения K продольной плоской волны.

Для K получаются разные формулы перед первой начальной точкой ($s < n$), между первой и второй начальной точкой ($n < s < n \cdot n_{k+1}$) и за второй начальной точкой ($s > n \cdot n_{k+1}$).

а) $s \leq n$

$$(2) \quad K = \frac{-a_1 + a_2 + a_3 + a_4 - a_5 - a_6}{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6}.$$

б) $n \leq s \leq n \cdot n_{k+1}$

$$(2') \quad K = \left[\frac{(-a_1 + a_2 + a_3)^2 + (a_4 - a_5 - a_6)^2}{(a_1 + a_2 + a_3)^2 + (a_4 + a_5 + a_6)^2} \right]^{1/2}.$$

в) $m_{k+1} \leq s < 1$

$$(2'') \quad K = \left[\frac{(-a_1 + a_2 - a_4 + a_6)^2 + (a_3 - a_5)^2}{(a_1 + a_2 - a_4 - a_6)^2 + (a_3 + a_5)^2} \right]^{1/2}.$$

Для a_i ($i = 1, 2, \dots, 6$) получается

$$(3) \quad \begin{cases} a_1 = s^2 [t - 1 - ms^2]^2; & a_4 = m^2 s^2 PQRS; \\ a_2 = PQ [t - ms^2]^2; & a_5 = tQS; \\ a_3 = PRt; & a_6 = RS [1 + ms^2]^2; \end{cases}$$

где

$$(4) \quad \begin{cases} P = (1 - s^2)^{1/2}; & R = |n^2 n_{k+1}^2 - s^2|^{1/2}; \\ Q = (n_k^2 - s^2)^{1/2}; & S = |n^2 - s^2|^{1/2}; \end{cases}$$

$$(4') \quad t = \varrho_k / \varrho_{k+1}; \quad m = 2 \left[\frac{t}{n^2 n_{k+1}^2} - \frac{1}{n_k^2} \right].$$

2. Функция продолжения σ . Функция прохождения выражается произведением всех коэффициентов преломления плоских продольных волн на промежуточных границах:

$$(5) \quad \begin{cases} \sigma = 1 & \text{для } k = 1, \\ \sigma = F_1 \cdot F_2 \dots F_{k-1} & \text{для } k \geq 2. \end{cases}$$

F_i — произведение двух коэффициентов преломления на i -той промежуточной границе раздела (в направлении вверх и вниз) — дается формулой

$$(6) \quad F_i = \frac{N_i S_i}{(K_i + L_i S_i)^2} \quad (i = 1, 2, \dots, k-1),$$

где

$$(7) \quad \begin{cases} K_i = s_i^2 [t_i - 1 - m_i s_i^2]^2 + P_i Q_i [t_i - m_i s_i^2]^2 + P_i R_i t_i; \\ L_i = m_i^2 s_i^2 P_i Q_i R_i + t_i Q_i + R_i [1 + m_i s_i^2]^2; \\ N_i = 4 t_i P_i [R_i (1 + m_i s_i^2) + Q_i (t_i - m_i s_i^2)]^2; \end{cases}$$

$$(8) \quad \begin{cases} P_i = (1 - s_i)^{1/2}; & R_i = [(V_i n_{i+1} / V_{i+1})^2 - s_i^2]^{1/2}; \\ Q_i = (n_i^2 - s_i^2)^{1/2}; & S_i = [(V_i / V_{i+1})^2 - s_i^2]^{1/2}; \end{cases}$$

$$(8') \quad t_i = \varrho_{i+1} / \varrho_i; \quad m_i = 2 \left[\frac{t_i V_{i+1}^2}{V_i^2 n_{i+1}^2} - \frac{1}{n_i^2} \right].$$

3. Коэффициент образования головных продольных волн D^* . Формула для коэффициента образования головных продольных волн имеет следующий вид:

$$(9) \quad D^* = \frac{K_2 L_1 - K_1 L_2}{K_1^2},$$

где

$$(10) \quad \begin{cases} K_1 = n^2 [t - 1 - mn^2]^2 + P^* Q^* [t - mn^2]^2 + P^* R^* t; \\ K_2 = -n^2 [t - 1 - mn^2]^2 + P^* Q^* [t - mn^2]^2 + P^* R^* t; \\ L_1 = m^2 n^2 P^* Q^* R^* + t Q^* + R^* (1 + mn^2)^2; \\ L_2 = m^2 n^2 P^* Q^* R^* - t Q^* - R^* (1 + mn^2)^2; \end{cases}$$

$$(11) \quad P^* = (1 - n^2)^{1/2}; \quad Q^* = (n_k^2 - n^2)^{1/2}; \quad R^* = n (n_{k+1}^2 - 1)^{1/2}.$$

и m даются формулой (4').

4. Величина σ^* . Значение σ^* получается из формулы (5) для σ , если положить $s = n$ и учесть что $s_i = a_i s / a_k$.

5. Функция расхождения R . R выражается формулой

$$(12) \quad R = \left[\frac{2x V_1 \cos^2 \vartheta_1}{\sin \vartheta_1} \sum_{i=1}^k \frac{h_i V_i}{\cos^3 \vartheta_i} \right]^{1/2}.$$

6. Горизонтальное расстояние начальной точки головной волны от источника x_H . Формула для x_H просто получается из формулы, связывающей горизонтальное расстояние x и синус угла падения на основную границу:

$$(13) \quad x = \sum_{i=1}^k \frac{2h_i s_i}{(1 - s_i^2)^{1/2}},$$

или

$$(14) \quad x = \sum_{i=1}^k 2h_i \operatorname{tg} \vartheta_i.$$

Если в этих формулах положить $s_i = V_i / V_{k+1}$, получим x_H :

$$(15) \quad x_H = \sum_{i=1}^k \frac{2h_i V_i}{(V_{k+1}^2 - V_i^2)^{1/2}}.$$

Методика численных расчетов. Расчеты для A_w и A_w^* на основании формул (1) очень громоздки. По этой причине были составлены программы для вычисления A_w и A_w^* (и некоторых других величин) на ЭВМ. Расчеты проводились на английской вычислительной машине *SIRIUS*. Максимальный номер слоев покрывающий толщи- 700. Время расчета для одного расстояния при $k = 3 - 10-15$ сек. В результате вычислений печатаются следующие величины: x , время прихода отраженной и головной волны, амплитуды горизонтальной и вертикальной составляющей отраженной и головной волны, сдвиг фазы отраженной волны и вспомогательные величины R, σ, K, s .

В расчетах не учитывалось: влияние функции направленности источника, поверхности Земли (коэффициенты конверсии), поглощение и интерференционные явления в отдельных слоях.

Краткое пояснение к рисункам §3 и §4. Номер у кривой обозначает номер модели. На графиках для A_w и A_w^* кривые для A_w обозначены обычными номерами, кривые для A_w^* номерами со звездочками. Так как формулы для A_w^* вблизи начальной точки неточны, на рисунках приводятся значения A_w^* только начиная с некоторого (условно избранного) расстояния за начальной точкой. Вместо величины σ на графиках приводится величина $1/\sigma$.

§ 3. Амплитудные характеристики волн при двухслойной покрывающей среде

Ниже рассмотрено как влияет слоистость покрывающей толщи на амплитуды вертикальной компоненты продольных отраженных (A_w) и головных (A_w^*) волн.

1. Влияние скоростей в слоях промежуточной толщи при сохранении постоянной средней скорости и мощности слоев (серия E1). Рассмотрение рис.

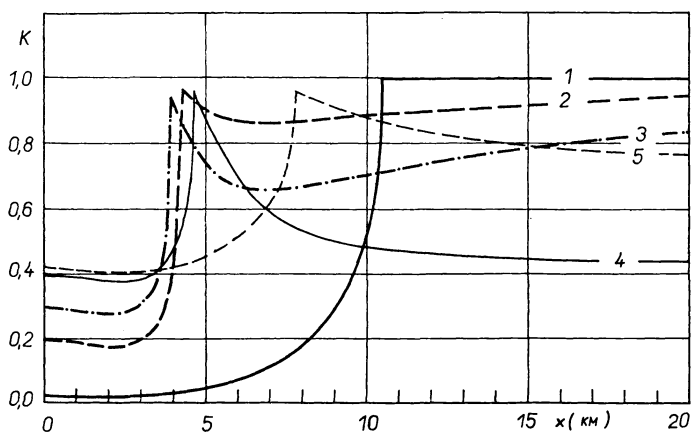


Рис. 3а. Графики $K(x)$ для моделей E1 (влияние скорости V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

Зв,г показывает, что с изменением V_1 и V_2 происходит изменение величины и характера спада с расстоянием амплитуд отраженных и головных волн и их отношения. Эти изменения различны при $V_2 > V_1$ и $V_2 < V_1$. При $V_2 > V_1$ с переходом от однородной к слоистой покрывающей среде происходит увеличение наклона графиков амплитуд запредельных отраженных волн $A_w(x)$ и уменьшение абсолютных значений амплитуд. Изменение A_w и A_w^* для разных моделей происходит по разному: чем меньше скачек скоростей на основной границе, тем меньше амплитуда отраженной волны и тем больше амплитуда головной волны (для головных волн это связано с меньшим удалением от начальной точки).

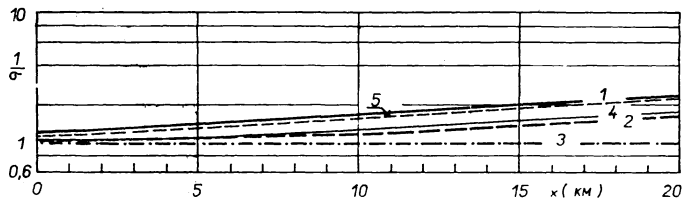
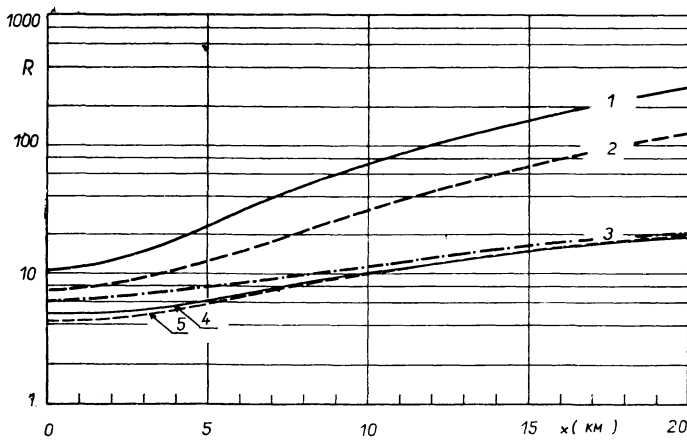


Рис. 36 Графики $R(x)$ и $1/\sigma(x)$ для моделей E1 (влияние скорости V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).



Отношение амплитуд отраженных и головных волн (величина ϵ_w) существенно различно для разных моделей (рис. 3г). Наибольшее значение оно имеет для однородной покрывающей толщи; величина ϵ_w при больших x около 130—140. При двуслойной покрывающей толще величина ϵ_w уменьшается с увеличением V_2 . При $V_2 = 5,2$ км/сек и при $x = 20$ км ϵ_w около 8, т. е. по сравнению с однородной покрывающей средой ϵ_w уменьшилось больше чем на по-

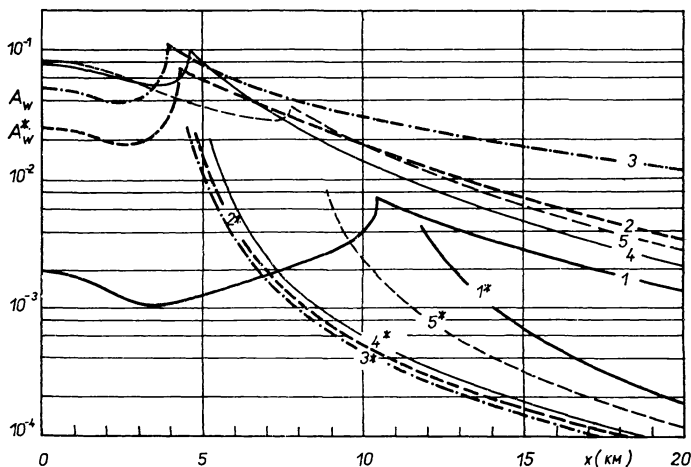


Рис. 3в Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей E1 (влияние скорости V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

Рис. 3г Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей E1 (влияние скорости V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

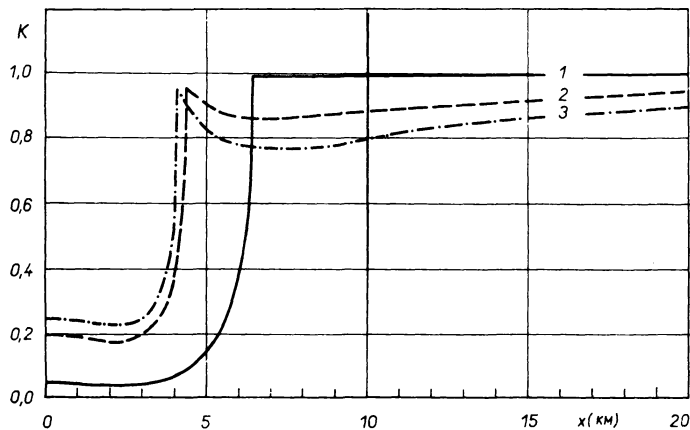
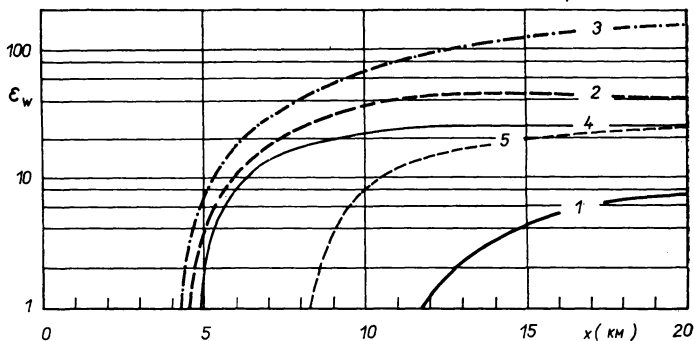


Рис. 4а Графики $K(x)$ для моделей E2 (влияние h_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

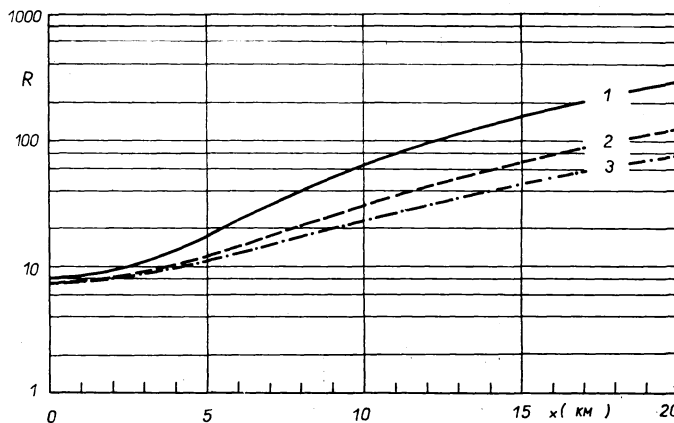
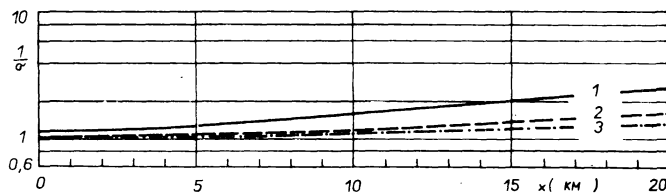


Рис. 4б Графики $R(x)$ и $1/\sigma(x)$ для моделей E2 (влияние h_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

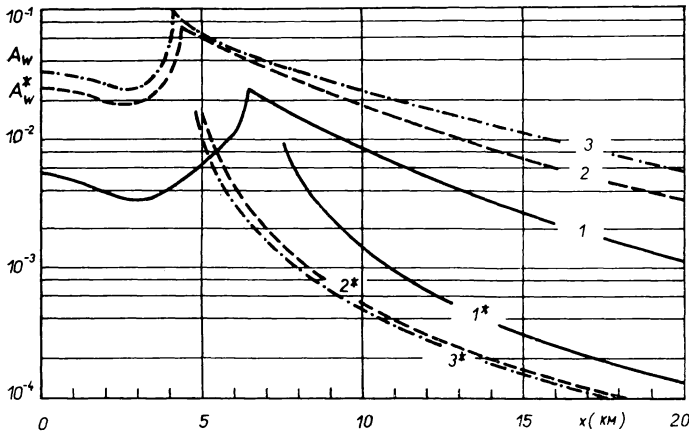


Рис. 4в Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей E2 (влияние h_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

рядок. Главной причиной изменения ε_w является различие в функции расхождения R для отраженных волн в разных моделях (рис. 3б). Менее влияет функция прохождения σ и еще меньше - коэффициенты отражения и амплитуды головных волн (рис. 3а, б, в).

При $V_2 < V_1$ графики $A_w(x)$ для слоистой покрывающей толщи более крутые, величины амплитуд при больших x меньше, чем для однородной покрывающей толщи (рис. 3в). Величины ε_w наименьшие для моделей с наиболее резкими различиями V_2 и V_1 (рис. 3г). Различия в ε_w в основном определяется поведением функций σ и коэффициентов отражения K . Функция R для всех трех моделей практически одинакова (рис. 3а, б). В этом существенное отличие от случая ($V_2 > V_1$), в котором главное влияние на ε_w оказывает различие в функции расхождения для отраженных волн.

2. Влияние мощности слоя h_2 и скорости в нем при $\bar{V} = \text{const}$ и $V_1 = \text{const}$ (сер. E2). Чем ближе скорость V_2 к V_1 и чем при этом меньше мощность слоя h_2 тем больше изменение в амплитудах волн (рис. 4в). Происходит уменьшение абсолютных значений амплитуд отраженных волн с расстоянием, увеличение их затухания с расстоянием. Для головных волн закономерность обратная - абсолютные значения амплитуд при том же тем больше чем меньше

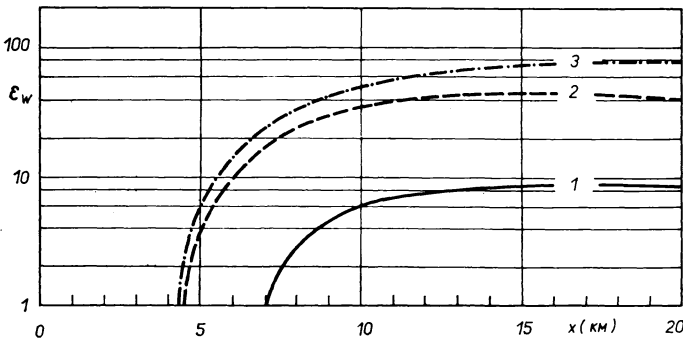
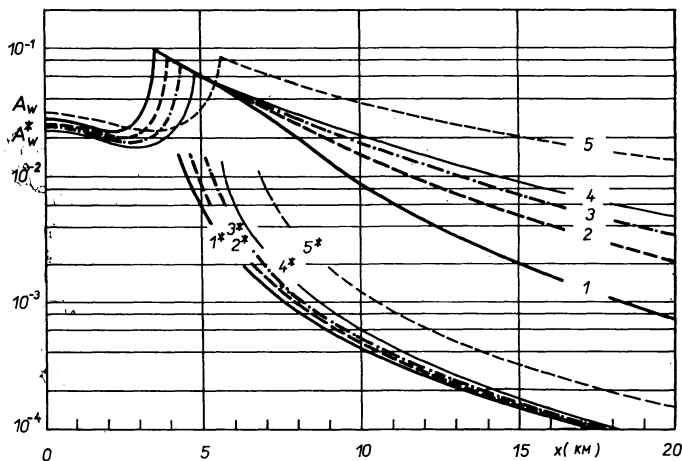


Рис. 4г Графики $\varepsilon_w(x)$ для моделей E2 (влияние h_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

Рис. 5а Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей ЕЗ (влияние h_2 при $n = 0,68$).



h_2 и чем ближе V_2 к $V_Г$ (что связано с меньшим удалением от начальной точки). Отношения амплитуд ϵ_w при этом уменьшаются. На больших удалениях отношение амплитуд ϵ_w для модели 1 на рис. 4г ($h_2 = 1$ км; $V_2 = 5,0$ км/сек; $V_Г = 5,5$ км/сек) уменьшается больше чем на порядок по сравнению с однородной средой.

Главное влияние на поведение амплитуд отраженных волн и ϵ_w оказывает функция расхождения (рис. 4б).

3. Влияние мощностей слоев h_1 и h_2 при сохранении постоянными скоростей в них (серия Е3 и Е4). В этих расчетах сохранялось постоянным отношение скоростей на основной границе и параметры на промежуточной границе, так что изучалось влияние только мощностей слоев. Из рис. 5а, б видно следующее. Чем меньше h_2 , тем больше наклон графиков $A_w(x)$ запредельных отраженных волн; меньше величины A_w при том же и тем меньше отношение ϵ_w амплитуд отраженных и головных волн. При $n = 0,68$ при переходе от однородной модели (модель 5) к слоистой модели 1 величина ϵ_w при $x = 20$ км изменяется от 90 до 10.

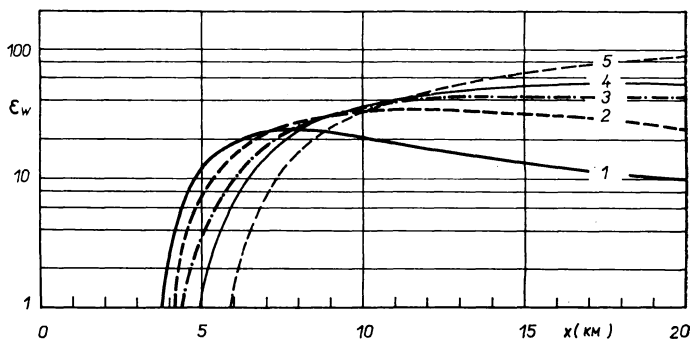


Рис. 5б Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей ЕЗ (влияние h_2 при $n = 0,68$).

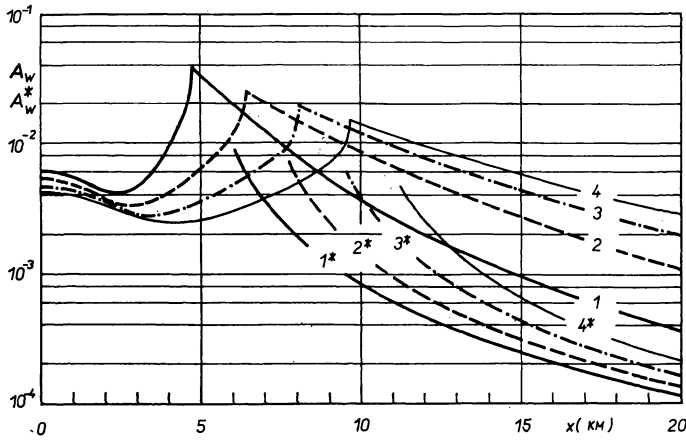


Рис. 6а Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей Е4 (влияние h_2 при $n = 0,909$).

Графики $A_w^*(x)$ головных волн для разных моделей мало отличаются (различье не больше 2).

Главной причиной изменения ε_w является поведение амплитуд отраженных волн, которые в свою очередь в основном определяется функцией расхождения.

Увеличение n приводит к более резко выраженным изменениям в динамике волн. На рис. 6а, б приведены результаты расчетов при $n = 0.909$. При малой мощности слоя h_2 (при $h_2 = 0,5$ км) при $V_2 = 2,7$ км/сек (рис. 5б) и $V_2 = 5,0$ км/сек. (рис. 6б) на графиках $\varepsilon_w(x)$ четко виден максимум за начальной точкой и далее ε_w уменьшается с расстоянием. При $x = 20$ км ε_w уменьшается до 10 при $V_2 = 2,7$ км/сек и до 3 при $V_2 = 5,0$ км/сек. Изменения ε_w с расстоянием за максимумом небольшие. Так на рис. 6б ε_w изменяется от 4.2 в области максимума ($x = 8,5$ км) до 3.0 при $x = 20$ км.

4. Случай однородной покрывающей толщи при разном n (серия 5).

Из рис. 7а, б, в видно, что при изменении n от 0,546 до 0,947 графики $A_w(x)$ запредельных отраженных волн все находятся примерно на одном уровне. В то же время при $x < x_H$ величина A_w при разных n сильно отличается. При n от 0,546 до 0,947 различие примерно в 12 раз. Величина ε_w на больших удалениях от начальных точек превышает 100.

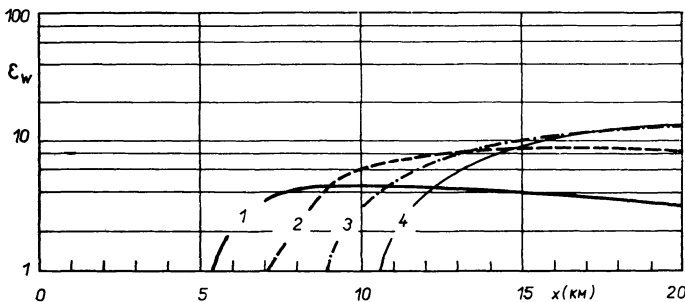


Рис. 6б Графики $\varepsilon_w(x)$ для моделей Е4 (влияние h_2 при $n = 0,909$).

Рис. 7а Графики $K(x)$ для моделей E5 (однородная покрывающая толщина при разных n).

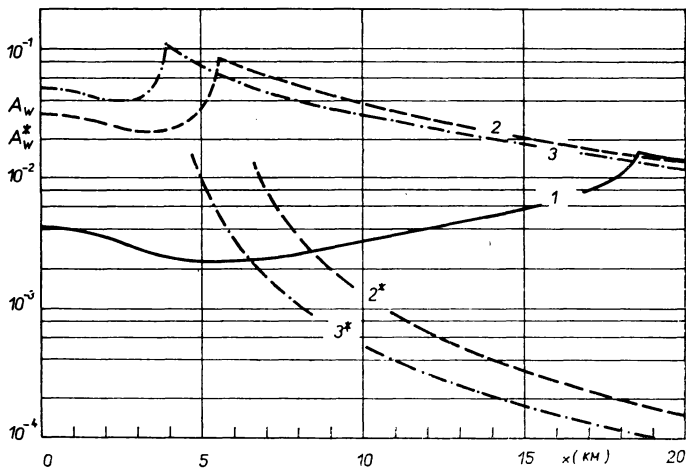
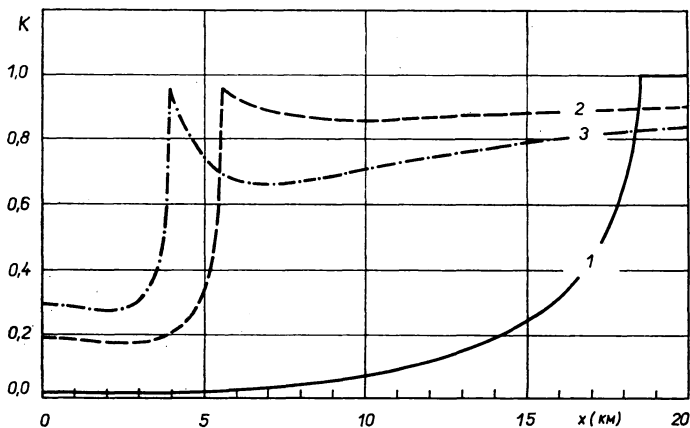
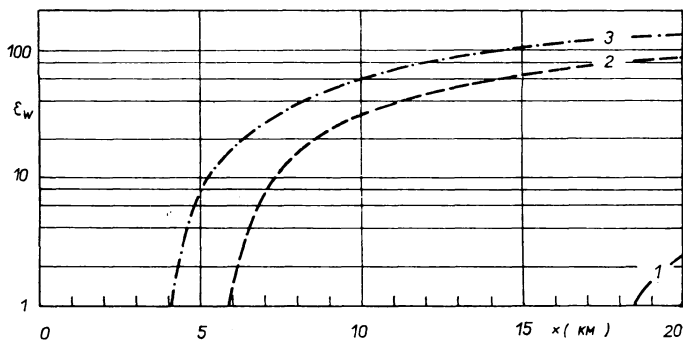


Рис. 7б Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей E5 (однородная покрывающая толщина при разных n).

Рис. 7в Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей E5 (однородная покрывающая толщина при разных n).



Расчеты для однородной покрывающей толщи еще раз подтверждают вывод, о том, что для слоистой покрывающей толщи различие в уровнях амплитуд отраженных волн и в характере их спада с расстоянием при $x > x_H$ связаны преимущественно со слоистостью покрывающей толщи, а не с изменением параметров на основной границе.

5. Общие выводы. На основании проведенных расчетов выявлены следующие основные особенности в изменении амплитудных характеристик волн в случае двуслойной покрывающей толщи.

1. Слоистость покрывающей толщи приводит к изменению амплитуд отраженных и головных волн и их соотношения. Изменения зависят от значений скоростей в слоях покрывающей толщи (V_1 и V_2), мощностей слоев (h_1 и h_2) и скачка скоростей на основной границе (V_2 и V_T).

2. При сохранении постоянной средней скорости в покрывающей толще амплитуды отраженных и головных волн меняются по разному. Амплитуда отраженной волны при $x = \text{const}$ тем больше, чем больше скоростная дифференциация на основной границе (чем меньше n) и чем ближе друг к другу скорости V_1 и V_2 ; она максимальна для однородной покрывающей толщи ($V_1 = V_2 = \bar{V}$).

Амплитуда головной волны при $x = \text{const}$ увеличивается с уменьшением скоростной дифференциации на основной границе, что связано с меньшим удалением от начальной точки.

3. При сохранении постоянными V_1 , V_2 и V_T а при изменении мощностей слоев покрывающей толщи h_1 и h_2 амплитуды отраженных и головных волн меняются однотипно: они тем больше, чем больше мощность слоя h_2 с большей скоростью в покрывающей толще.

4. Для каждой серии моделей различие между амплитудами отраженных волн увеличивается с расстоянием; различие между амплитудами отраженных волн больше, чем между амплитудами головных волн, т. е. амплитуды отраженных волн в большей степени зависят от строения покрывающей толщи, чем амплитуды головных волн.

5. Отношение амплитуд отраженных и головных волн (ε_w) тем меньше, чем ближе скорость в одном из слоев покрывающей толщи к скорости V_T , чем меньше мощность слоя с повышенной скоростью в покрывающей толще. Величина ε_w меньше в том случае, когда слой с повышенной скоростью залегает на основной границе ($V_2 > V_1$). Величина ε_w меняется с расстоянием. Для однородной покрывающей толщи с той же \bar{V} , что и слоистая, величина ε_w максимальна.

6. Главные изменения в ε_w связаны с поведением амплитуд отраженных волн, изменение которых в свою очередь обусловлено преимущественно функцией расхождения R . Второй причиной является функция прохождения σ . Различие в поведении коэффициентов отражения K на основной границе при больших удалениях от начальных точек очень не велико. Величина K для разных моделей в пределах одной серии отличаются не более, чем в 1,2—2,0 раза; эти изменения гораздо меньше, чем изменения R и σ .

§ 4. Амплитудные характеристики волн при трехслойной покрывающей среде

Рассматривается влияние параметров слоя (h_2, V_2) расположенного в однородной покрывающей толще ($V_1 = V_3$).

1. Влияние скорости V_2 в слое (сер. F1, F2 и F3). Включение слоя с повышенной скоростью ($V_2 > V_1$) приводит к изменениям в амплитудных харак-

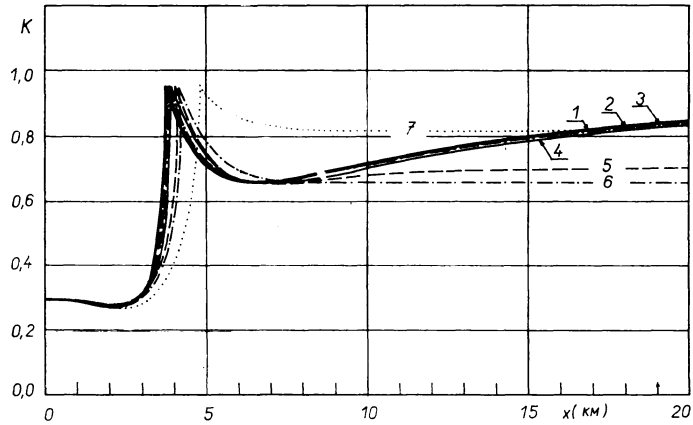


Рис. 8а Графики $K(x)$ для моделей F1 (влияние V_2 при $n = \text{const.}$).

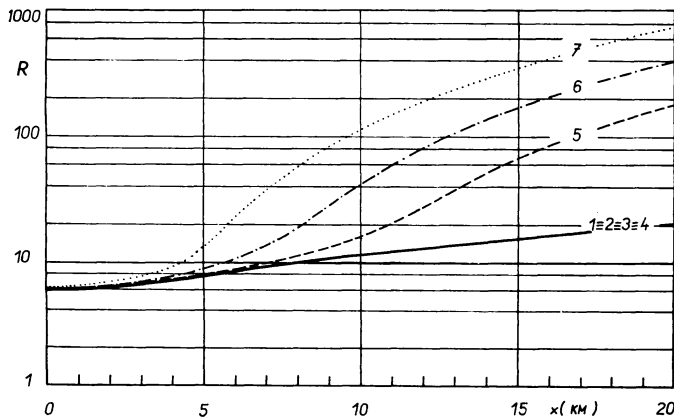
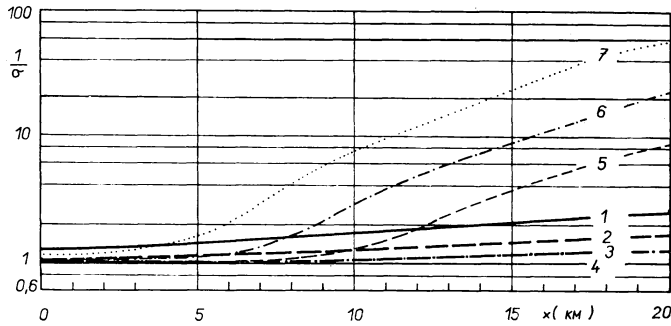


Рис. 8б Графики $R(x)$ и $1/\sigma(x)$ для моделей F1 (влияние V_2 при $n = \text{const.}$).

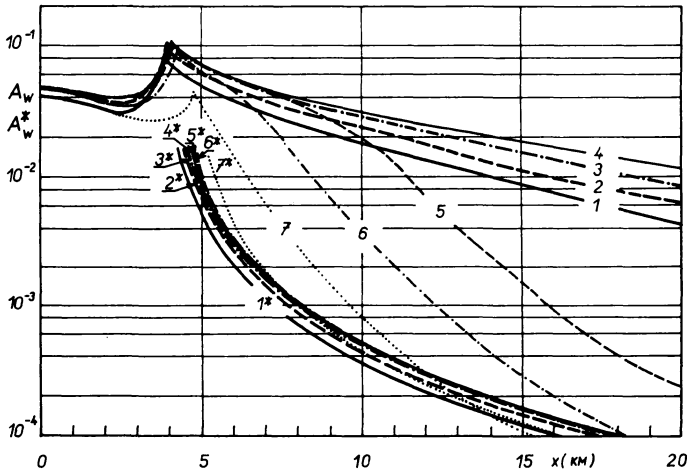


Рис. 8в Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F1 (влияние V_2 при $n = \text{const.}$).

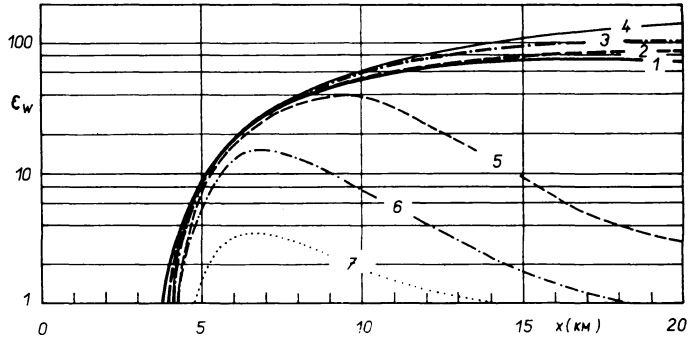


Рис. 8г Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F1 (влияние V_2 при $n = \text{const.}$).

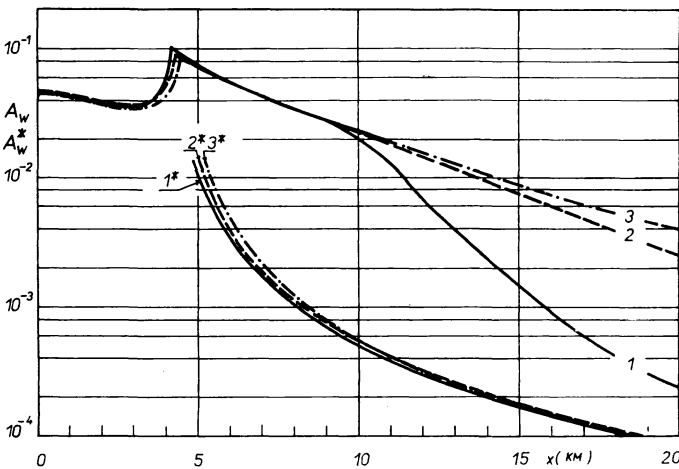
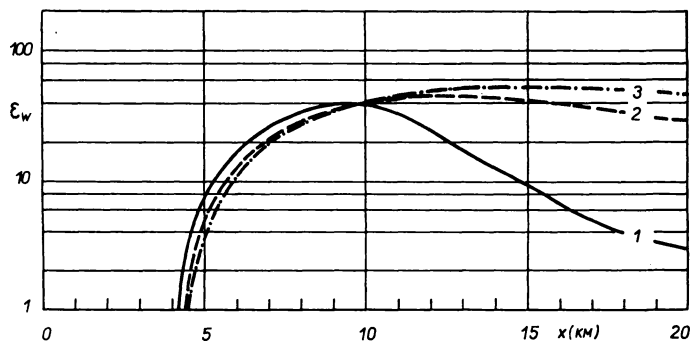


Рис. 9а Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F9 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $V_2 = 3,5 \text{ км/сек}$ и $n = \text{const.}$).

Рис. 96 Графики $\varepsilon_W(x)$ для моделей F9 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $V_2 = 3,5$ км/сек и $n = \text{const.}$).



теристиках волн тем большим, чем ближе V_2 к V_F (рис. 8в). Величина ε_W (рис. 8г) сначала возрастает, достигает максимума и далее уменьшается с ростом x . При $x = 20$ км величина ε_W для однородной покрывающей среды около 140, а при $V_2 = 5,0$ км/сек и $h_2 = 0,5$ км ε_W меньше 1, т. е. головная волна сильнее отраженной. Причиной изменения ε_W является поведение амплитуд отраженных волн (рис 8в) амплитуда головных волн меняется очень мало при сильных изменениях V_2 (при удалении x_H большем чем 2,5 км различие не более, чем

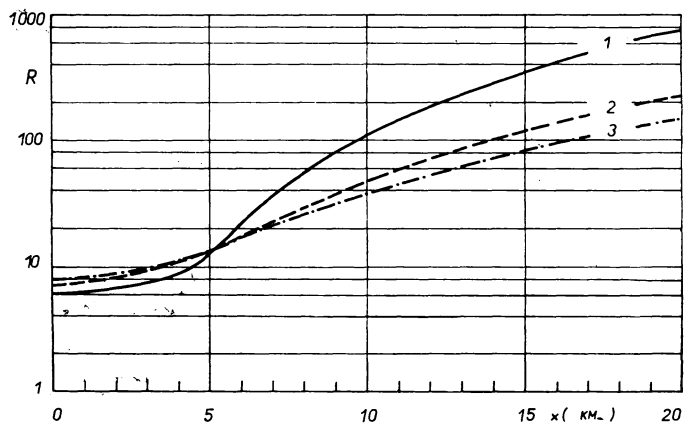
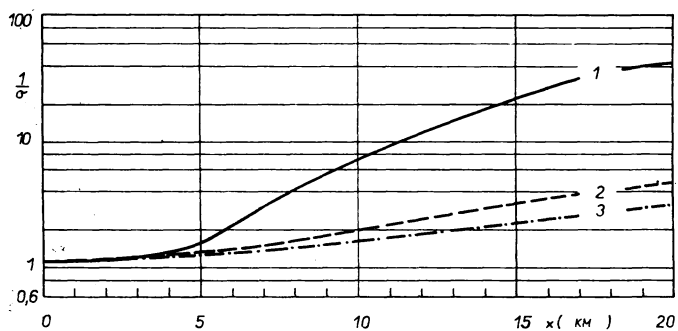


Рис. 10а Графики $R(x)$ и $1/\sigma(x)$ для моделей F10 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $V_2 = 5$ км/секи и $n = \text{const.}$).

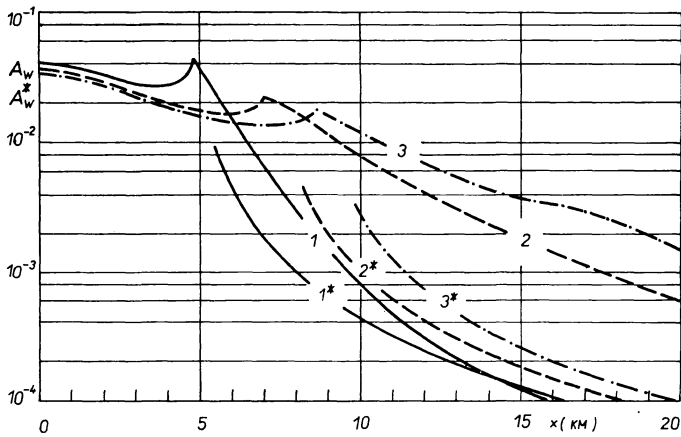


Рис. 10б Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F10 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $V_2 = 5$ км/сек и $n = \text{const.}$).

Рис. 10в Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F10 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $V_2 = 5$ км/сек и $n = \text{const.}$).

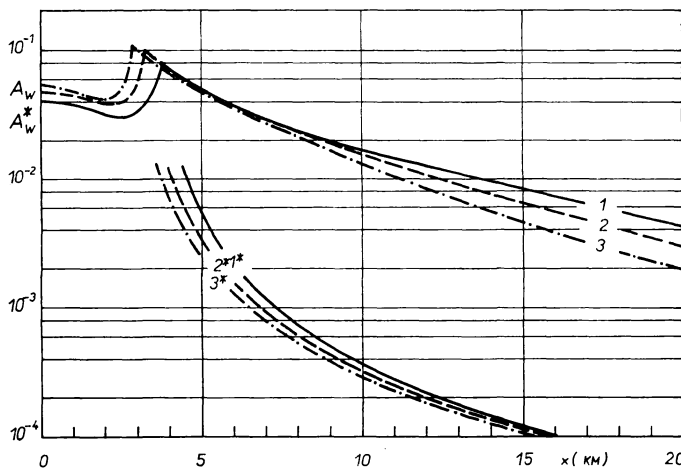
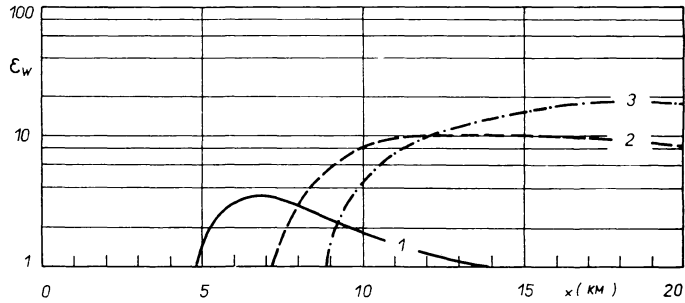
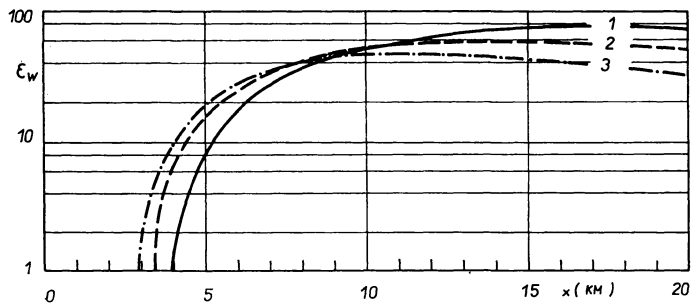


Рис. 11а Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F7 (влияние h_2 при $V_2 < V_1$ и $V_2 = 1,5$ км/сек и $n = \text{const.}$).

Рис. 11б Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F7 (влияние h_2 при $V_2 < V_1$ и $V_2 = 1,5$ км/сек и $n = \text{const.}$).



в 1,5 раза). Изменение амплитуд отраженных волн при переходе от одной модели к другой обусловлены поведением функций R и σ (рис. 8а, б).

При $V_2 > V_1$ динамические характеристики волн меньше зависят от скорости в слое. При изменении V_2 от 3000 м/сек до 1500 м/сек величины A_w и A_w^* наклон графиков $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$, меняются мало и мало меняется величина ϵ_w . Для разных моделей ϵ_w отличается в 1,5—2,0 раза (рис. 8г); различие в ϵ_w обусловлено главным образом поведением функции σ (рис. 8б).

2. Влияние мощности слоя h_2 (серии F7—F10). Влияние различно при $V_2 > V_1$ и $V_2 < V_1$. При $V_2 > V_1$ чем тоньше слой, тем меньше амплитуда запредельных отраженных волн, резче спад кривых $A_w(x)$ и тем меньше величина ϵ_w (рис. 9а, б).

При $V_2 = 3,5$ км/сек. и $x = 20$ км и при изменении мощности слоя h_2 от 0,3 до 1,5 км величина ϵ_w меняется от 3 до 45.

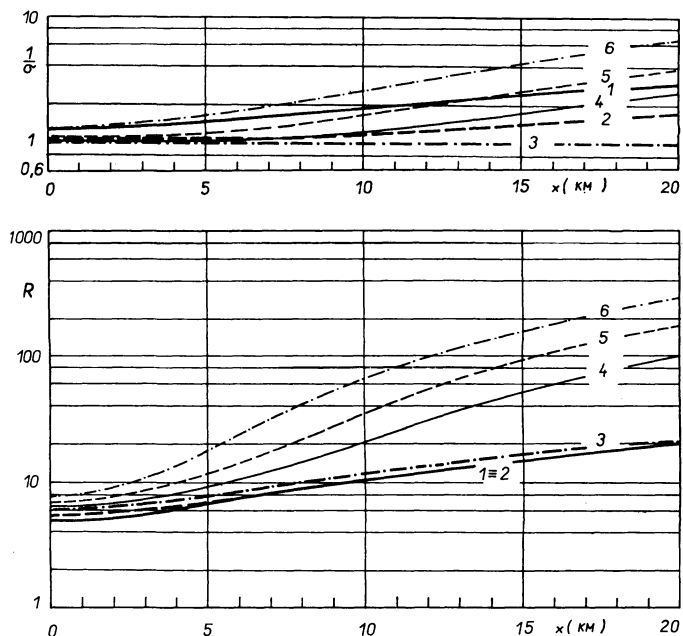


Рис. 12а Графики $R(x)$ и $1/\sigma(x)$ для моделей F4 (влияние V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

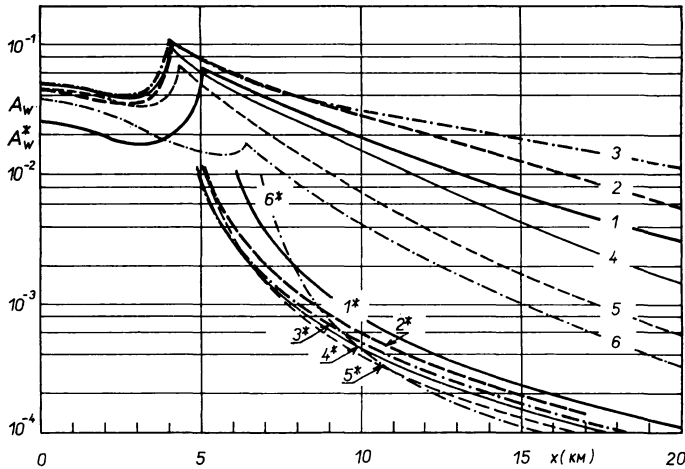


Рис. 12б Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F4 (влияние V_2 при $n = \text{const.}$).

При увеличении скорости в слое все закономерности проявляются гораздо резче (рис. 10а, б в.). При $V_2 = 5,0$ км/сек и при $x = 20$ км, ϵ_w изменяется при тех же мощностях слоя от 0,8 до 20.

Для этих моделей величина σ оказывает влияние на амплитуды отраженных волн и ϵ_w большее или примерно равное влиянию R (рис. 10а).

При $V_2 < V_1$ когда h_2 не очень велико, включение слоя с пониженной скоростью меньше влияет на величину амплитуд, поведение с расстоянием амплитуд отраженных и головных волн и ϵ_w (рис. 11а, б), чем в случае $V_2 > V_1$.

3. Влияние скорости V_2 (при $\bar{V} = \text{const.}$; см. серию F4). При $V_2 > V_1$, при переходе от однородной покрывающей среды к среде, содержащей слой с повышенной скоростью, уменьшается величина амплитуды отраженной волны (рис. 12б), увеличивается ее затухание с расстоянием и уменьшается ϵ_w (рис. 12в). Изменения тем больше, чем больше V_2 . При $V_2 = 5$ км/сек и $h_2 = 1$ км при $x = 13-20$ км $\epsilon_w \approx 10$, в то время как для однородной покрывающей среды $\epsilon_w \geq 100$.

Причиной изменения ϵ_w является поведение амплитуд отраженных волн, которые в свою очередь меняются за счет изменений R и σ (рис. 12а). Измене-

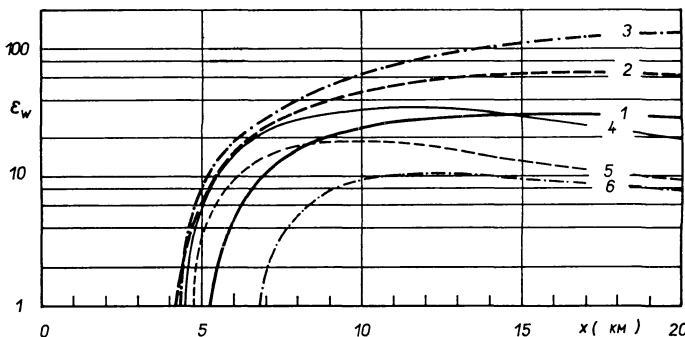


Рис. 12в Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F4 (влияние V_2 при $\bar{V} = \text{const.}$).

Рис. 13а Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F5 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $\bar{V} = \text{const.}$).

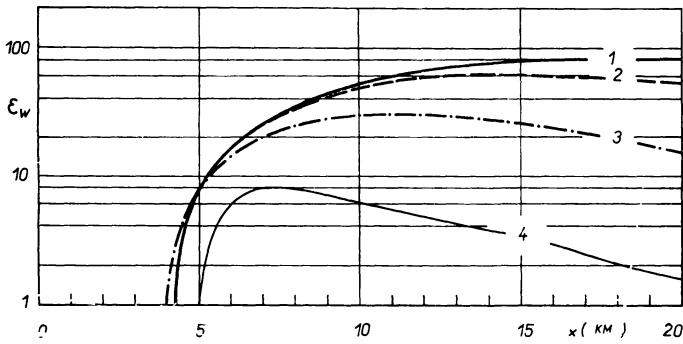
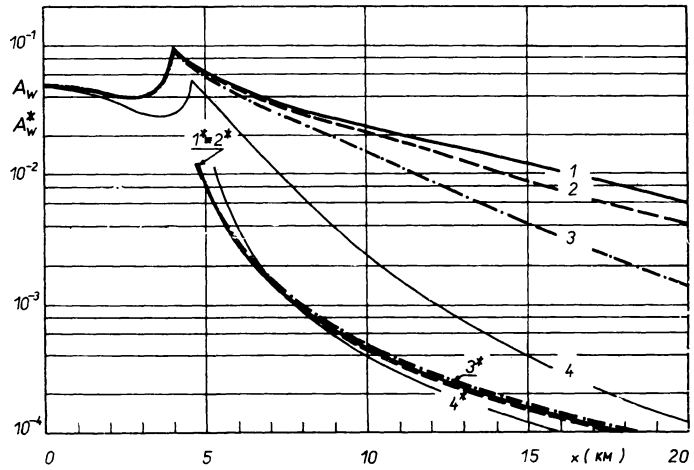


Рис. 13б Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F5 (влияние h_2 при $V_2 > V_1$ и $\bar{V} = \text{const.}$).

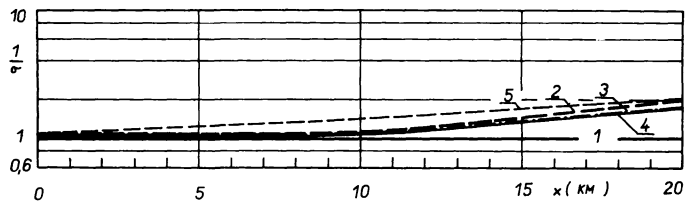
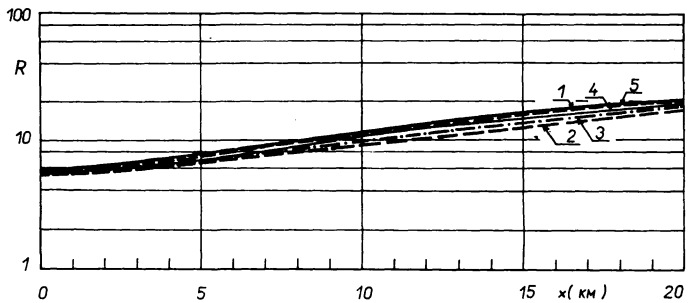


Рис. 14а Графики $R(x)$ и $I/\sigma(x)$ для моделей F6 (влияние h_2 при $V_2 < V_1$ и $\bar{V} = \text{const.}$).



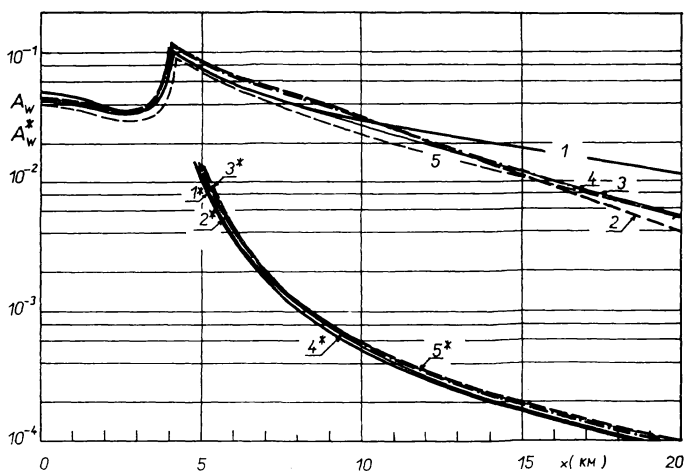


Рис. 14б Графики $A_w(x)$ и $A_w^*(x)$ для моделей F6 (влияние h_2 при $V_2 < V_1$ и $\bar{V} = \text{const.}$).

ния амплитуд головных волн небольшие; для разных моделей при больших x они отличаются не более чем в 2,5 раза.

При $V_2 < V_1$ изменения меньше. Но тоже наличие слоя приводит к уменьшению A_w , увеличению резкости кривых $A_w(x)$ и уменьшению ϵ_w . Величина K практически одинакова при разных V_2 ; главной причиной изменений A_w и ϵ_w является поведение функции σ .

4. Влияние мощности h_2 при $\bar{V} = \text{const}$ (сер. F5 и F6). При $V_2 > V_1$ уменьшение мощности слоя h_2 приводит к уменьшению абсолютной величины амплитуды A_w запредельных отраженных волн, увеличению резкости спада графиков $A_w(x)$ и уменьшению отношения амплитуд отраженных и головных волн (рис. 13а, б). Величина ϵ_w при $h_2 = 0,5$ км и $V_2 = 4,67$ км/сек уменьшается до 1,6 при $x = 20$ км, а на этом же расстоянии ϵ_w для модели 1 равно 90.

Графики амплитуд головных волн для разных моделей очень близки; различие не больше чем в 1,5 раза. Изменения ϵ_w в основном обусловлены поведением амплитуд отраженных волн, которые в свою очередь определяются поведением функций R и σ .

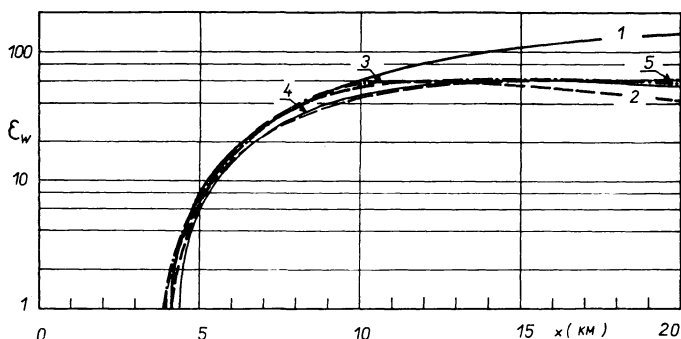


Рис. 14в Графики $\epsilon_w(x)$ для моделей F6 (влияние h_2 при $V_2 < V_1$ и $\bar{V} = \text{const.}$).

Наличие слоя с пониженной скоростью ($V_2 < V_1$) не вызывает больших изменений в динамике волн. Графики $A_w(x)$ и $\varepsilon_w(x)$ до расстояний $x = 10$ км близки для всех моделей (рис. 14а,б, в). На больших x различия больше, причем величины A_w и ε_w наиболее резко уменьшаются для модели 2 (наибольшая мощность h_2 слоя с пониженной скоростью).

Графики амплитуд головных волн для разных моделей близки друг к другу; различие в 1,2—1,5 раза. Различие в величинах ε_w и A_w в основном определяется поведением функции σ (рис. 14а).

5. Общие выводы. На основании выполненных расчетов можно отметить следующие закономерности в изменении динамики волн в случае трехслойной покрывающей толщи, содержащей слой с пониженной или повышенной скоростью, при одних и тех же параметрах на основной границе.

1. Наличие в покрывающей толще слоя с повышенной скоростью или пониженной может изменить амплитудные характеристики волн и отношение амплитуд отраженных и головных волн.

2. Влияние неоднородности покрывающей толщи выражается в уменьшении амплитуды запредельных отраженных волн; увеличении резкости спада кривых амплитуд $A_w(x)$ отраженных волн, уменьшении отношения амплитуд отраженных и головных волн. Изменения амплитуд головных волн при этом небольшое.

Для некоторых моделей графики $A_w(x)$ запредельных отраженных волн имеют наклон близкий или даже больший, чем графики $A_w^*(x)$ головных волн.

3. Слой в повышенной скоростью оказывает гораздо большее влияние на амплитуды отраженных волн и величину ε_w , чем слой с пониженной скоростью.

4. Чем тоньше слой с повышенной скоростью в покрывающей среде и чем больше в нем скорость, тем больше отличаются A_w , ε_w и крутизна графиков $A_w(x)$ от случая однородной покрывающей среды. Различия в величине ε_w для некоторых моделей на больших расстояниях от источника превышают 100 и амплитуда головной волны равна или даже больше амплитуды отраженных волн.

Полученные результаты о характере затухания с расстоянием амплитуд отраженных волн, прошедших в покрывающей среде через слой с повышенной скоростью, находятся в качественном согласии с результатами работы [8]. В этой работе рассматривались большие расстояния от источника и учитывались многократные волны в слое.

5. Главными причинами изменений A_w и ε_w является поведение функций расхождения R и прохождения σ для отраженных волн, при этом в большом числе случаев роль σ больше чем R . По сравнению со случаем двухслойной покрывающей среды увеличивается роль функции прохождения (волна проходит две границы).

§ 5. Общие результаты и их обсуждение

При изменении параметров двуслойной и трехслойной покрывающих толщ происходит однотипные изменения амплитуд отраженных и головных волн и их отношения.

1. Амплитуда отраженных волн зависит от параметров на основной границе и слоистости покрывающей толщи. Относительная роль этих факторов различна при малых и больших удалениях от источника. При малых x (в допределной области) амплитуды отраженных волн сильно зависят от параметров на основной границе (от величины K) и мало зависят от слоистости покрывающей толщи. При больших x (в запределной области) картина обратная: амплитуды отраженных волн очень мало зависят от параметров на основной границе и очень сильно — от слоистости покрывающей толщи.

Слоистость покрывающей толщи обуславливает уменьшение амплитуд запределных отраженных волн и увеличение их затухания с расстоянием. Увеличение числа промежуточных границ приводит к увеличению величины и относительство значения члена, учитывающего прохождение волн (волна проходит через большее число границ). За счет этого изменения амплитуд отраженных волн в случае трехслойной среды больше, чем в случае двуслойной. Для некоторых параметров сред амплитуда отраженных волн и их затухание с расстоянием при больших примерно такие же, как для головных волн.

2. Амплитуды головных волн и закон их уменьшения с расстоянием при изменении параметров покрывающей толщи меняются не сильно. Для большей части рассмотренных моделей на больших расстояниях изменения не более, чем в 1,5—2,0 раза.

3. Слоистость покрывающей толщи приводит к уменьшению отношения амплитуд отраженных и головных волн ε_w . Для некоторых параметров сред и больших расстояний ε_w уменьшается более чем на два порядка по сравнению со случаем однородной среды и амплитуда отраженных волн может стать близкой или даже меньшей амплитуды головных волн.

Главными причинами изменения ε_w является поведение амплитуд отраженных волн; изменение последних в свою очередь обуславливается поведением функций расхождения и прохождения. Относительная роль этих факторов разная для разных типов моделей.

4. Слои с повышенными скоростями оказывают гораздо большее влияние на амплитуды волн и их отношения, чем слои с пониженными скоростями. Чем меньше мощность слоя с повышенной скоростью в покрывающей среде и чем больше в нем скорость, тем больше изменение амплитудных характеристик волн и отношения амплитуд ε_w .

Общность выводов для двуслойной и трехслойной покрывающей толщи позволяет считать, что и большее число слоев покрывающей толщи будет при-

водить к таким же качественным результатам. При сохранении неизменной средней скорости в среде наличие промежуточных границ раздела скоростей будет приводить к уменьшению абсолютных величин амплитуд запредельных отраженных волн, увеличению резкости спада графиков $A_w(x)$ и уменьшению отношения амплитуд отраженных и головных волн по сравнению с однородной средой. С увеличением числа слоев покрывающей толщи возрастает роль функции прохождения σ в изменении амплитуд отраженных волн и величине ϵ_w . На основании полученных результатов можно ожидать, что в некоторых средах за счет слоистости покрывающей толщи амплитуды отраженных и головных волн будут одного порядка. Однако, это происходит не за счет усиления абсолютной интенсивности головных волн (она меняется мало), а за счет резкого ослабления отраженных волн. Могут ли при этом головные волны лучше выделяться на записях, сказать трудно. Повидимому, это возможно при условии, когда абсолютная интенсивность головных волн больше, чем фон микросейсм и различных других помех в области регистрации головных волн.

Главные ограничения выполненных расчетов могут быть связаны со следующими положениями:

1. Несправедливость лучевого метода в области близкой к начальной точке.
2. Несправедливость предположения о толстых слоях при больших удалениях от источника, больших длинах волн и малых мощностях слоев покрывающей толщи. Необходимость учета многократных волн в слоях.

Для количественной оценки каждого из этих положений необходимы специальные расчеты. Однако и по имеющимся данным можно выделить области расстояний и параметров сред, в пределах которых полученные результаты заведомо справедливы.

Определение протяженности зоны интерференции отраженных и головных волн за начальной точкой для случая однородной покрывающей толщи дано в работах [4; 9].

Протяженность зоны интерференции определяется формой годографов отраженной и головной волн и продолжительностью записи головной волны. Основываясь на этих расчетах можно считать, что при $f = 50$ гц и рассмотренных нами разрезах, лучевые представления справедливы при удалениях от начальных точек больших примерно 1,0—3,5 км, т. е. при больших x выполненные расчеты справедливы.

Расчеты разности времен прихода однократных волн (отраженной или головной) и волн претерпевших двукратное отражение в слоях покрывающей толщи показывают, что для большей части рассмотренных моделей, расстояний и частот многократные волны не должны искажать записей однократных волн. Разность времен прихода однократной волны и волны многократной больше, чем возможная продолжительность Δ записи первой волны. Исключение составляет только несколько моделей, для которых мощность некоторого слоя в покрывающей среде $h \leq 0,5$ км. Для них разность времен прихода однократ-

ной и многократной волн при $x > 10$ км может быть в некоторых случаях меньше возможной продолжительности записи волны, принятой равной 0,05 сек (при $f = 50$ Гц). Для детального изучения особенностей многократных отражений и интерференционных явлений в тонких слоях будут сделаны специальные расчеты.

Таким образом можно заключить, что полученные результаты, с учетом сделанных замечаний, могут использоваться при анализе явлений происходящих в реальных средах.

Результаты проведенных расчетов могут иметь значение для разных разделов сейсмических исследований, связанных с изучением и использованием волн, регистрируемых на больших удалениях от источника. Остановимся на некоторых из них.

1. Теоретические расчеты динамики сейсмических волн и сравнение результатов расчета и экспериментов. При расчетах амплитуд сейсмических волн сложную реальную среду нередко заменяют однородной средой с некоторыми средними параметрами. Как показано в настоящей работе, амплитудные характеристики волн для слоистой и однородной сред, покрывающих исследуемую границу могут сильно отличаться.

Амплитуда отраженных волн сильно зависит от параметров на основной границе в допредельной области и очень мало в запредельной. Из рис. 7б видно, что в области $x > x_H$ амплитуды отраженных волн при V_1/V_T от 0,55 до 0,95 практически совпадают, а при $x \approx 0$ амплитуда различается примерно в 12 раз.

В то же время изменение мощности слоев покрывающей толщи почти не оказывает влияния на амплитуды отраженных волн при $x = 0$, а при $x = 20$ км эти амплитуды отличаются примерно в 20 раз. Это же хорошо видно из всей системы расчетов для трехслойной среды. При неизменных параметрах на основной границе и при самых различных сочетаниях параметров трехслойной среды амплитуды отраженных волн при нормальном падении отличаются не более чем в 1,5—2,0 раза, а при $x = 20$ км различие до двух порядков.

В слоистой среде по сравнению с однородной амплитуды запредельных отраженных волн меньше и они резче убывают с расстоянием, меньше отношение амплитуд отраженных и головных волн и иной характер изменения этого отношения с расстоянием.

Поэтому замена при расчетах слоистой среды однородной может привести к несовпадению расчетных и экспериментальных данных. Особенно опасен неучет слоев с повышенными скоростями в покрывающей толще.

В общем случае при расчетах амплитудных характеристик сейсмических волн необходим учет слоистости покрывающей толщи.

2. Определение природы волн. Определение природы волн, регистрируемых на больших удалениях, от источника часто очень трудно т. к. кинематические характеристики волн головных, отраженных и рефрагированных могут быть очень близки. В то же время для целей интерпретации знание типа

волны необходимо. Так если принять отраженную волну за головную, то будут допущены серьезные ошибки в определении скоростного разреза и неточно определены глубины и форма границ.

Пытаются привлечь для определения природы волн динамические критерии. Такими критериями является значительно меньшая амплитуда головной волны, чем отраженной, различие в показателях степени функции расхождения, которые могут быть определены по графикам $A_w(x)$, и другие.

Расчеты показывают, что в некоторых, правда довольно редких случаях, строение покрывающей толщи может привести к тому, что на большом расстоянии амплитуды и наклоны графиков амплитуд отраженных волн могут быть близкими к головным волнам. В этих случаях амплитудные критерии недостаточны для разделения отраженных и головных волн.

3. Определение коэффициентов поглощения. В сейсморазведке и ГСЗ известны способы определения средних коэффициентов поглощения в покрывающей толще, в теоретической своей части основанные на предположении об однородности покрывающей толщи [10]. Слоистость покрывающей толщи может изменить наклон графиков амплитуд и внести погрешности в коэффициенты поглощения.

По полученным выше данным можно определить, какие могут быть получены фиктивные коэффициенты поглощения α_ϕ в случае идеально упругой среды, если слоистую толщу принимать за однородную. Определение проведено по графикам $A_w(x)$ запредельных отраженных волн на удалениях $x = 15$ — 20 км.

Величины α_ϕ для некоторых моделей с $\bar{V} = \text{const}$ приведены в таблице 3. Величины α_ϕ равны $a \cdot 10^{-4}\text{м}^{-1}$ при a от 0,5 до 2,0.

Для перехода к средам с другими мощностями слоев и глубинами залегания основной границы (при пропорциональном их изменении) надо ввести коэффи-

Таблица 3

Модель	E1—1	E1—2	E1—4	E1—5	E2—1	E2—2	E2—3
$\alpha_\phi \cdot 10^{-4}\text{м}^{-1}$	0,728	0,797	0,687	0,756	0,889	0,743	0,525

Модель	F4—1	F4—2	F4—4	F4—5	F4—6	F5—1	F5—2
$\alpha_\phi \cdot 10^{-4}\text{м}^{-1}$	0,628	0,615	1,11	1,23	1,208	0,331	0,615

Модель	F5—3	F5—4	F6—2	F6—3	F6—4	F6—5
$\alpha_\phi \cdot 10^{-4}\text{м}^{-1}$	1,119	1,455	1,14	0,715	0,615	0,462

циент ρ равный отношению глубин и мощностей слоев. На этот коэффициент надо поделить величину α_ϕ и умножить расстояния x , на которых получен график $A_w(x)$.

Так при $H = 30$ км (вместо $H = 3$ км при настоящих расчетах) величины α_ϕ будут $a \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-1}$ при определении по графикам $A_w(x)$ отраженных волн на расстояниях $x = 150\text{—}200$ км (вместо $15\text{—}20$ км при настоящих расчетах). При $H = 300$ м α_ϕ будет равным $a \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ на горизонтальных расстояниях $1,5\text{—}2,0$ км от источника.

Эти величины α_ϕ такого же порядка, как и коэффициенты поглощения, определяемые по экспериментальным данным.

4. Связь волновой картины со свойствами основной границы.

Очень часто изменение амплитуд волны и областей их прослеживания связывают с изменением свойств основной границы, на которой волны претерпевают отражение или преломление.

Проведенные расчеты показывают, что для отраженных волн эти характеристики могут существенно меняться за счет строения покрывающей толщи при неизменности свойств основной границы.

При более однородной покрывающей толще запредельные отраженные волны интенсивны, медленно затухают с расстоянием и за счет этого должны быть больше области их прослеживания. При более неоднородной покрывающей толще, особенно когда она содержит слои с повышенными скоростями (близкими, но меньшими V_T) амплитуда запредельных отраженных волн меньше, они быстрее затухают с расстоянием и за счет этого области их прослеживания меньше.

На основании проведенных расчетов создается впечатление о том, что скоростная дифференциация на основной границе (при возможных в реальных средах параметрах) меньше влияет на уровень амплитуд запредельных отраженных волн и характер уменьшения амплитуд с расстоянием, чем слоистость покрывающей толщи. Поэтому при трактовке причин изменения динамики запредельных отраженных волн по площади необходимо учитывать возможное влияние покрывающей толщи.

5. Методика сейсмических исследований. Из проведенных расчетов и анализа их результатов следует, что при выборе моделей аппроксимирующих сред, необходимых для решения прямых и обратных задач сейморазведки, необходимо знать строение толщ, покрывающих исследуемые сейсмические границы. Особенно важно определить наличие и параметры слоев с повышенными скоростями. Поэтому методика сейсмической разведки, основанная на регистрации волн при наклонном наведении (КМПВ, ГСЗ, МОВ при значительных удалениях от источника) должна обеспечивать изучение всей покрывающей толщи а не только узкого интервала глубин, представляющего практический интерес.

Литература

1. Смирнова Н. С., Ермилова Н. И.: О построении теоретических сейсмограмм в окрестности начальных точек. Сборник «Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн III.», Изд. ЛГУ, Ленинград 1959.
2. Červený V.: The amplitude curves of reflected harmonic waves around the critical point. *Studia geoph. et geod.*, 5 (1961).
3. Файзуллин И. С., Епинатьева А. М.: Отраженные и головные волны от тонких слоев по наблюдениям на твердых трехмерных моделях. Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, сдано в печать.
4. Епинатьева А. М.: Изучение продольных сейсмических волн, распространяющихся в реальных слоистых средах. Труды ИФЗ АН СССР, № 14, 1961.
5. Петрашень Г. И.: Элементы динамической теории распространения сейсмических волн. Сборник «Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн III.», Изд. ЛГУ, Ленинград 1959.
6. Červený V., Mádr I.: Amplitude curves of reflected and head waves for some simple models of the layered media. *Geof. sborník* 1967, сдано в печать.
7. Ивакин Б. Н.: Подobie упругих волновых явлений. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 11, 12, 1956.
8. Гурвич И. И.: О подэкранных отраженных волнах в сейсморазведке. Известия высших учебных заведений, Геология и разведка, № 1, 1961.
9. Červený V.: On the length of the interference zone of a reflected and head waves beyond the critical point and on the amplitudes of head waves. *Studia geoph. et geod.*, 6 (1962).
10. Берзон И. С., Епинатьева А. М., Парийская Г. Н., Стародубровская С. П.: Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. Изд. АН СССР, Москва 1962.
11. Červený V.: On some kinematic and dynamic properties of reflected and head waves in the case of layered overburden. *Geof. sborník* 1966, сдано в печать.
12. Červený V.: Theory of reflected and head waves in the case of layered overburden. *Geof. sborník* 1967, сдано в печать.

The influence of the structure of the overburden on the amplitudes of reflected and head waves

(Summary)

In this paper the dependence of the amplitude curves of reflected and head waves on the layered structure of the overburden is investigated. The theoretical computations were made for 48 simple models of the layered media. In the case of the models of the system E the overburden is supposed to be one-layer or two-layer, in the case of the models of the system F three-layer. The parameters of the models of both systems are given in §1 (Tabs. 1,2 and Figs. 1, 2). The theoretical formulae for the computations are given in §2. The numerical calculations were carried out by means of electronic computer SIRIUS.

The detailed discussion of the amplitude properties of reflected and head waves is made in §3 and §4 (§3- two-layer overburden, §4 – three-layer overburden). The most important conclusions are given in §5.

The important conclusions, following from the computations:

1. The amplitudes of reflected waves A_W depend on the structure of the overburden and on the parameters of the reflecting interface. The influence of both factors is different in both

small and large epicentral distances. At large epicentral distances the amplitudes of reflected waves depend very strongly on the layered structure of the overburden and very slightly on the parameters of the interface. This dependence is opposite at short epicentral distances. In the case of layered overburden the amplitude curves of reflected waves decrease with the epicentral distance much more quickly than in the case of the homogeneous one. The decrease of the amplitude curves of reflected waves for some models of media is near to those of head waves.

2. The amplitudes of head waves A_W^* depend on the inner structure of the overburden only slightly.

3. The layered structure of the overburden has a great influence on the proportion of the amplitudes of reflected and head waves ε_W . ε_W always is smaller in the case of the layered overburden than in the case of the homogeneous one. In some cases the amplitudes of reflected waves are near to those of head waves.

4. The high velocity layer lying in the overburden has very strong influence on the amplitudes of reflected waves and on the value of ε_W . On the contrary, the influence of the low-velocity layer is weaker.

The results of computations have the importance in some branches of seismic research, based on the registration of seismic waves at large epicentral distances (e.g. for the determination of the absorption coefficients, for the correct determination of the type of the wave a.s.o.). The short discussion of these problems is given in the final part of the paper.

**Acta Universitatis Carolinae
Mathematica et Physica I/1967**

Redakční rada série Mathematica et Physica: prof. dr. J. Mohr (předseda), dr. J. Bouška (tajemník),
doc. dr. K. Havlíček, doc. dr. K. Vacek, prof. dr. A. Zátopek

© Universita Karlova, Praha 1967
Grafická úprava: Jaroslav Přibramský

Z nové sazby písmem Plantin vytiskla Polygrafia, n. p., záv. 1 - A 01*71012 - Náklad 400 výtisků
Cena Kčs 10,—