ГОССТРОЙ РСФСР
РОСГЛАВНИИСТРОЙПРОЕКТ
Производственное объединение "Стройизыскания"

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И

по определению скоростей распространения поперечных волн по данным регистрации поверхностных волн типа Релея и Лява

ИМД 75 - 80
Стройизыскания

Утверждены ПО "Стройизыскания"

Москва - 1980

gost.e-ecolog.ru

ГОССТРОЙ РСФСР
РОСГЛАВНИИСТРОЙПРОЕКТ
Производственное объединение "Стройизыскания"

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И

по определению скоростей распространения поперечных волн по данным регистрации поверхностных волн типа Релея и Лява

ИМД 75 - 80

Стройизыскания

Утверждены ПО "Стройизыскания"

Москва - 1980

Настоящая работа выполнена кафедрой геофизики Свердловского ордена Трудового Красного Знамени горного института им. В.В.Вахрушева на основании договора № 62-202-78 с объединением "Стройизыскания".

В Рекомендациях приводится методика использования поверхностных волн типа Релея и Лява для изучения строения среды по величине скорости распространения поперечных волн, достаточно подробно изложена методика регистрации поверхностных волн, а также последовательность обработки полученного полевого материала. В приложении к Рекомендациям приводятся теоретические основы предлагаемой методики.

В окончательной редакции учтены замечания и предложения ряда организаций (ЦТИСИЗ,МГУ,ПНИИИС и др.). Рекомендации одобрены на заседании инженерно-геологической секции технического совета П О "Стройизыскания".

Составители: В.И.Бондарев, В.Б.Пивоцкий,С.М.Крылатков (СТИ).

Редакторы: В.В. Лисицын и Н.П.Курандин.

ВВЕДЕНИЕ

Все возрастающее использование сейсмической разведки при инженерно-строительных изысканиях на нескальных грунтах обусловлено главным образом возможностью использования ее для определения важнейших физико-механических свойств грунтов в естественном залегании [1-3]. Использование сейсмических методов исследований важнейших физико-механических свойств грунтов основано на тесной взаимосвязи этих свойств с упругими характеристиками и прежде всего со скоростью распространения поперечных (сдвиговых) волн. При этом наиболее точная и достоверная информация о характере распределения значения скорости распространения поперечных волн в сейсморазведке может быть получена при наблюдениях объемных поперечных волн типа *SH* или *SV*.

Трудности методического характера зачастую не позволяют получить в отдельных районах четкие и определенные записи поперечных волн. В этих случаях единственно приемлемым путем изучения распределения в плане и в разрезе значений скорости распространения поперечных волн является использование поверхностных волн типа Релея и Лява.

Использованию поверхностных волн типа Релея и Лява для изучения строения среды по скорости распространения поперечных волн благоприятствует относительная простота методики полевых наблюдений, ее высокая экономическая эффективность и простота регистрации существующей сейсмической аппаратурой, прежде всего станцией типа СМОВ-О-24. Необходимо, однако, иметь в виду, что в силу интерференционного характера поверхностных волн, разрешающая способность этой методики, как правило, ниже, чем у методики, использующей объемные волны. По этой причине использование предлагаемой методики изучения распространения в плане и в разрезе значений скорости распространения поперечных волн в каждом конкретном случае должно быть всесторонне обосновано.

Предлагаемая ниже методика использования поверхностных волн типа Релея и Лява для изучения строения среды по величине скорости распространения поперечных волн является составной частью сейсмического способа определения важнейших

физико-механических характеристик нескальных грунтов в строительных целях и предназначена для лиц и организаций, выполняющих сейсмические исследования с названной целью.

I. МЕТОДИКА РЕГИСТРАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

I.I. Выбор методики полевых наблюдений обусловливается знанием основных кинематических и динамических характеристик поверхностных волн рассматриваемого типа, распространяющихся в реальных средах, теоретические основы которых приведены в приложении.

Основные кинематические и динамические особенности поверхностных волн

I.2. Для характеристики кинематических особенностей поверхностных волн особое значение имеет понятие фазового годографа. Фазовым годографом поверхностных волн называется заданная каким-либо образом (аналитически, таблично или графически) зависимость времени регистрации какой-либо одноименной особенности (фазы) волны от расстояния вдоль профиля наблюдений. С понятием фазового годографа тесно связано понятие фазовой скорости. Фазовая скорость поверхностных волн - это скорость распространения вдоль профиля одноименной особенности (фазы) волны. Примеры корреляции фазовых годографов поверхностных волн приведены на рис. I-4.

I.3. Фазовая скорость V_ϕ зависит от частоты ее регистрации. Повышение частоты регистрируемых колебаний приводит к уменьшению фазовой скорости гармоник поверхностных волн.

I.4. Спектр рассматриваемых волн преимущественно низкочастотный и, как правило, ограничен сверху частотами порядка 30-50 Гц. Увеличение эффективной чувствительности сейсмического тракта в области низких частот (5-20Гц) улучшает четкость записи гармоник поверхностных волн. Волны типа Релея и Лява регистрируются всегда в последующих вступлениях сейсмической записи и не имеют четкого вступления, а форма их записи в большинстве случаев имеет интерференционный ха-

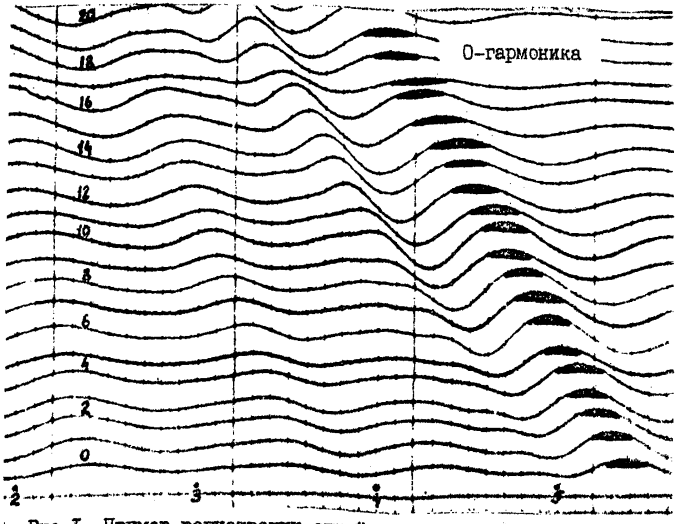


Рис.I. Пример регистрации одной гармоники поверхностных (релеевских) волн

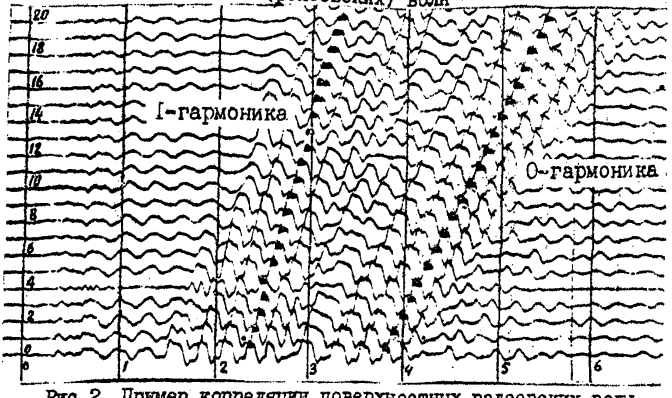


Рис.2. Пример корреляции поверхностных релеевских волн, отчетливо прослеженных по всей сейсмограмме

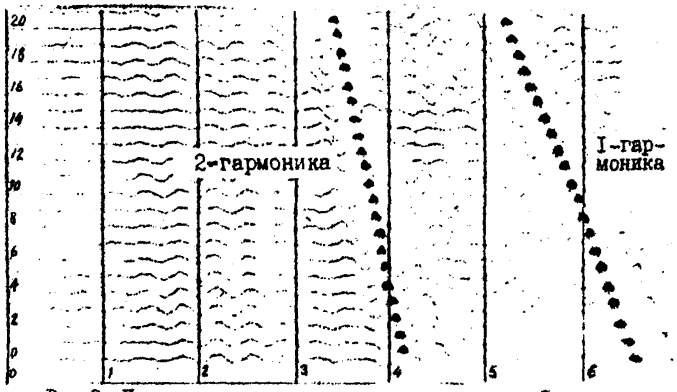


Рис.3. Пример корреляции поверхностных волн Лява, отчетливо прослеженных по всей сейсмограмме

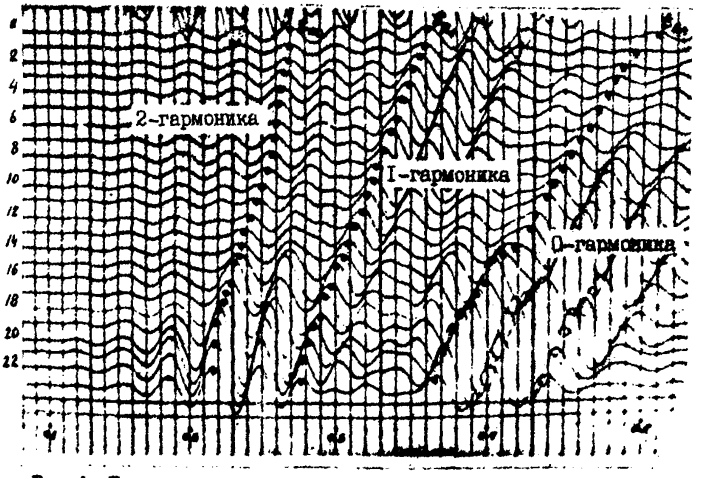


Рис.4. Пример регистрации трех гармоник поверхностных (релеевских) волн

рактер. При этом на сейсмограммах в зависимости от сейсмогеологических условий, параметров регистрирующей аппаратуры и методики наблюдений может регистрироваться от одной до нескольких гармоник поверхностных волн (см.рис. I-4).

I.5. Энергия поверхностных волн локализуется в виде изолированной сейсмической волны на расстоянии от пункта возбуждения не менее (3-5)λ , но, как правило, не ближе 20-25 м до центра базы наблюдения. В силу различия поглощающих свойств отдельных частей разреза, в которых распространяется основная часть энергии каждой гармоники, интенсивность гармоник затухает по профилю различным образом. Затухание интенсивности гармоник с расстоянием обратно пропорционально их номеру. Это приводит к тому, что для каждой гармоники существует определенная зона расстояний от пункта возбуждений, на котором наилучшим образом может регистрироваться та или иная гармоника. При неправильном выборе расстояния от пункта возбуждения до базы наблюдения возможно ошибочное отождествление номера гармоники.

I.6. Чтобы избежать ошибок, связанных с неверным определением номера зарегистрированной гармоники, необходимо на каждом участке проводить опытные работы, направленные на выбор оптимального расстояния от пункта возбуждения до базы наблюдений. При этом выбор оптимальных расстояний необходимо начинать с минимально возможных значений с постепенным их увеличением (например, I0,20,30,40,50 м и т.д.). На рис. 5 и 6 отчетливо видна зависимость характера записей гармоник волн типа Релея и Лява при изменении расстояния от пункта возбуждения до базы наблюдений. Расстояние от пункта возбуждения колебаний до центра базы наблюдений должно быть таким, чтобы каждая гармоника регистрировалась вне области интерференции ее с другими гармониками (рис.7).

I.7. В целях повышения точности последующих расчетов, а также частичного учета горизонтальных неоднородностей среды обычно целесообразно получать с выбранных расстояний систему двух встречных годографов.

I.8.Возбуждение и регистрация релеевских волн производится по системеZ-Z. Возбуждение и регистрация волн Лява -

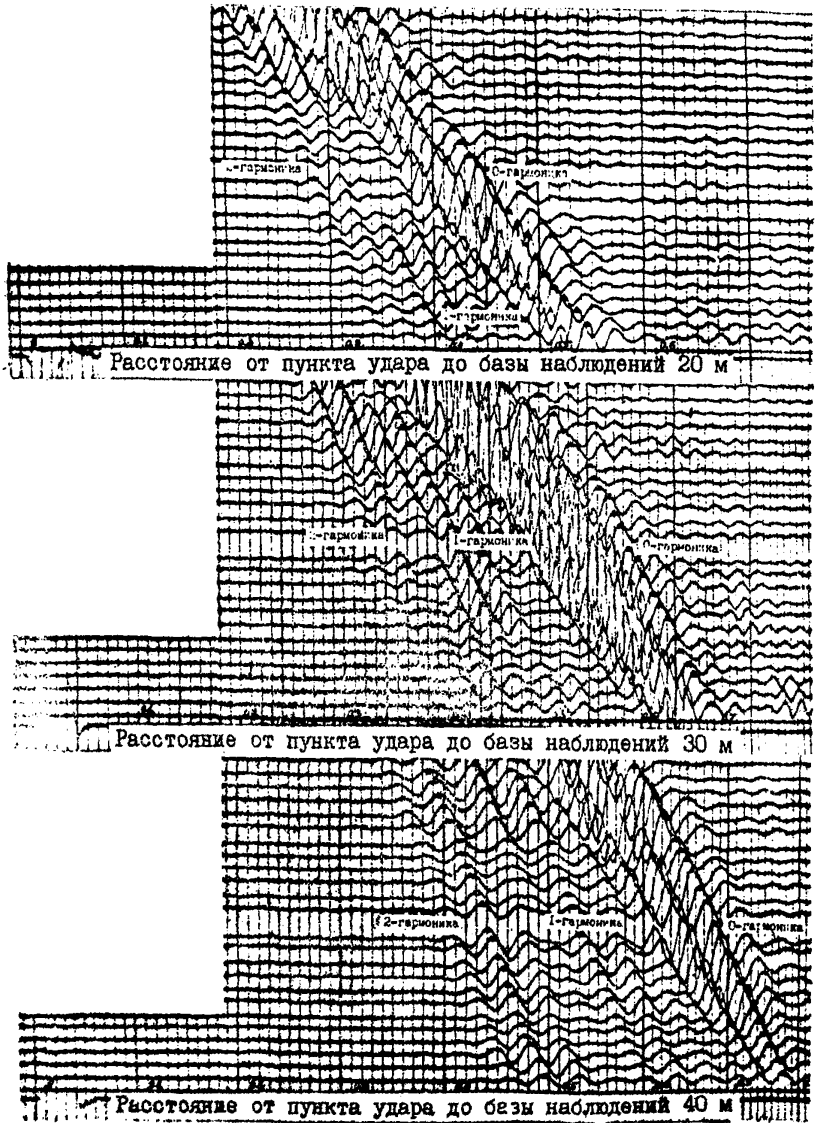


Рис.5. Характер изменения записей гармоник релеевских волн при изменении расстояния от пункта возбуждения до базы наблюдений

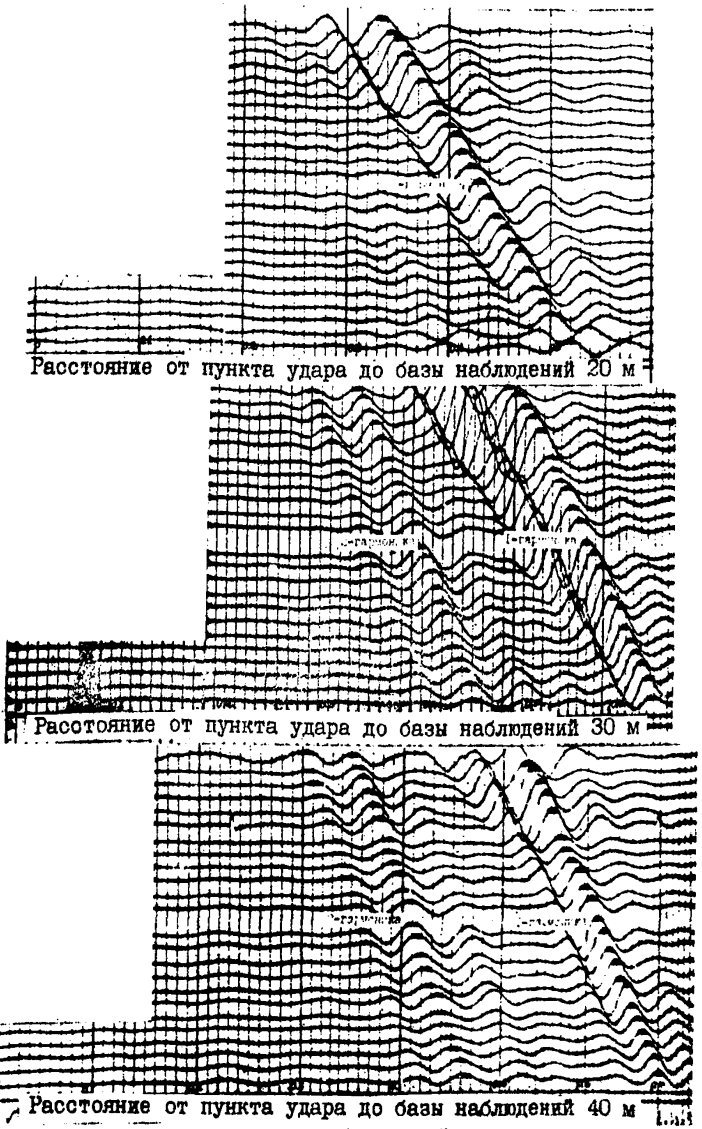


Рис.6. Характер изменений записей гармоник волн Лява при изменении расстояния от пункта возбуждения до базы наблюдений

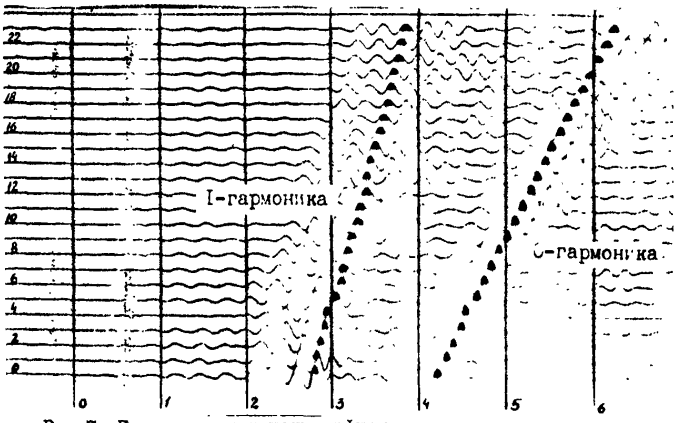


Рис.7. Пример записи неинтерфирирующих в пределах базы наблюдений гармоник поверхностных(релеевских) волн

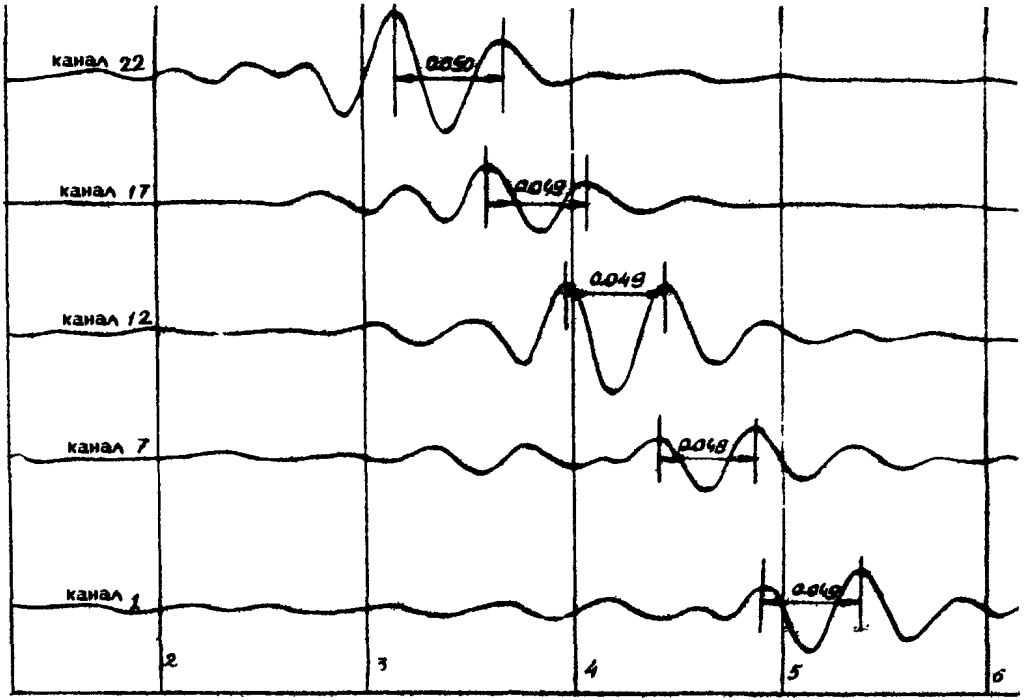
– по системе У–У, при этом изменение направления удара на противоположное на сейсмограммах вызывает обращение фаз поверхностных волн. Это является надежным признаком корреляции волн Лява.

Сейсмическая аппаратура и оборудование для регистрации поверхностных волн

I.9. Для регистрации поверхностных волн при изучении нескальных грунтов могут быть использованы многоканальные сейсморазведочные станции и сейсмоприемники любого типа. При этом необходимо учитывать следующие обстоятельства:

аппаратура должна предусматривать возможность узкополосной частотной селекции в диапазоне частот I0–70 Гц;

минимальное число сейсмических каналов для уверенной регистрации и идентификации гармоник поверхностных волн – I2 каналов.



$T_{ср}$= (0,050+0,049+0,049+0,048+0,049)/5=0 049 (с)

Рис.8. Пример определения видимого периода колебаний по какой-либо фазе поверхностной волны (в данном случае по записи волн Лява)

I.IO. В таблице приведены параметры частотных фильтров серийной сейсмической аппаратуры. Здесь же даются рекомендуемые параметры сейсмического тракта при регистрации поверхностных волн.

Частотные параметры сейсмической серийной аппаратуры

Поиск - I 48-МОВ-ОВ		Поиск - I 48-КМПВ-ОВ		Поиск - I 6/I2-АСМ-ОВ		СМОВ-О-24	
ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ	ФНЧ	ФВЧ
Граничные частоты среза, предусмотренные аппаратурой, Гц							
ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК
20	25	7	8	20	25	I4	I4
30	35	I0	II	30	35	20	20
50	50	I5	I5	50	50	28	28
70	70	22	20	70	70	40	40
I00	I00	30	ОК	I00	I00	56	56
						80	80
Рекомендуемые частотные параметры регистрации поверхностных волн, Гц							
ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК	ОК
20	ОК	7	ОК	20	ОК	I4	ОК
30	25	I0	8	30	25	20	20
50	50	22	I5	50	50	28	28
70	70	30	20	70	70	40	40
						80	56

I.II. Надежные и детальные сведения о кинематических и динамических особенностях поверхностных волн могут быть получены только при многократной регистрации (воспроизведение на СМОВ-О-24) их на различных частотах во всем возможном на данной аппаратуре частотном диапазоне. Наилучшие результаты могут быть достигнуты на аппаратуре типа Поиск-I с двумя типами фильтров (МОВ и КМПВ) В этом случае предоставляется возможность осуществить регистрацию поверхностных

волн на 8-9 фиксированных частотах.

I.I2. Учитывая необходимый частотный диапазон регистрации поверхностных волн, при выборе сейсмоприемников следует отдать предпочтение низкочастотным сейсмоприемникам электродинамического типа (С2-05,СI-I0 для регистрации релеевских волн и СГ-II0 для регистрации волн типа Лява).

Корреляция поверхностных волн и определение их основных кинематических и динамических характеристик

I.I3. Корреляция гармоник поверхностных волн проводится по обычным правилам. Целесообразнее всего брать фазу, которая наиболее четко прослежена по всей сейсмограмме (см.рис. I-7). По выделенной фазе стандартными приемами выполняется построение фазовых годографов гармоник поверхностных волн.

I.I4. Определение фазовой скорости по построенному годографу гармоники поверхностных волн следует проводить каким-либо аналитическим методом, учитывая всю совокупность точек наблюдений на годографе. С целью экспресс-оценки фазовой скорости можно пользоваться формулой численного дифференцирования по пяти точкам (точки выбираются с равным шагом по оси ОХ так, чтобы участок определения скорости охватывал почти весь годограф):

$$V_{\phi} = \frac{10\Delta X}{-2t_{i-2} - t_{i-1} + t_{i+1} + 2t_{i+2}}, \qquad (I)$$

где ΔX – расстояние между расчетными точками по оси ОХ;

t_i – времена в пяти расчетных точках (i =-2,-I,0 I,2).

I.I5. Видимый период определяется по наиболее четким трассам (рис.8). В качестве расчетного следует брать средний период, определенный не менее чем по каждой четвертой или пятой трассе сейсмической записи.

I.I6. Корреляция волн Лява проводится по тем же правилам, что и корреляция релеевских волн. Дополнительным признаком, облегчающим отождествление волн Лява, является наблюдаемое на сейсмограммах обращение фаз в записях волн Лява

при изменении направления удара (при возбуждении) на противоположное.

1.17. Полученные в результате предварительной обработки первичные характеристики гармоник поверхностных волн рассматриваемого типа - номер гармоники, ее фазовая скорость и средний период - служат основой для всей последующей количественной обработки.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРОЕНИЯ СРЕДЫ ПО СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕЕВСКИХ ВОЛН

2.1. Кинематические и динамические характеристики гармоник релеевских волн зависят преимущественно от строения среды (скорости распространения поперечных волн в них.) Это открывает реальные перспективы изучения разреза среды по скоростям $V_S(Z)$ (см.приложение), а точность и надежность определения скоростного разреза среды на основе гармоник релеевских волн пропорциональны количеству зарегистрированных гармоник и общему числу их фазовых голографов. При этом исходными данными для всех последующих расчетов являются усредненные значения фазовой скорости и периода одной или нескольких низших гармоник релеевских волн.

Интерпретационная модель среды

2.2. На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований и учета реальных технических возможностей в качестве основной интерпретационной модели среды выбрана модель градиентного полупространства, скорости распространения упругих волн в котором увеличиваются с глубиной по линейному закону. Ее основными параметрами являются $V_S(0)$, $V_S'(0)$ и $V_S(0)/V_P(0)$.

2.3. В качестве основных теоретических формул, описывающих зависимость кинематических и динамических характеристик релеевских волн от параметров выбранной модели разреза, взяты формулы асимптотической теории распространения поверхностных волн [7,8], в которые внесены усовершенствования для

первой и последующих гармоник.

2.4. Для определения фазовой скорости нулевой гармоники релеевских волн исходя из параметров разреза и частоты регистрации построены следующие теоретико-экспериментальные зависимости:

$$V_0^{\Phi}/V_S(0) = 1{,}060 - 0{,}303\Gamma + \frac{1{,}522 + 1{,}312\Gamma}{y}$$

$$при\ 0 \leqslant \Gamma \leqslant 0{,}4\ ;$$

$$и\quad V_0^{\Phi}/V_S(0) = 1{,}026 - 0{,}219\Gamma + \frac{1{,}654 + 0{,}984\Gamma}{y} \qquad (2)$$

$$при\ 0{,}4 \leqslant \Gamma \leqslant 0{,}7,$$

где $\Gamma = V_S(0)/V_P(0)$; $y = \omega/V_S'(0)$; $5 \leqslant y \leqslant 70$,

дающие относительную погрешность не более 2–3% в указанном диапазоне относительных частот.

2.5. По усовершенствованной асимптотической формуле фазовая скорость первой гармоники релеевских волн зависит от параметров разреза и относительной частоты следующим образом:

$$V_1^{\Phi}/V_S(0) = (0{,}938\Gamma^2 - 0{,}789\Gamma + 1{,}0286) -$$
$$-(-18{,}772\Gamma^2 + 16{,}639\Gamma + 2{,}089)\cdot(1/y)^{2/3} + \qquad (3)$$
$$+(28{,}410\Gamma^2 - 27{,}480\Gamma + 3{,}296)\cdot(1/y)$$

$$при\ 0 \leqslant \Gamma \leqslant 0{,}7,$$

что позволяет определить фазовую скорость в диапазоне относительных частот $5 \leqslant y \leqslant 70$ с погрешностью не более $\pm$ 2 – 3%.

2.6. Приведенные формулы позволяют по экспериментальным данным определять параметры линеаризированной модели среды с относительной погрешностью не более $\pm$ 5%.

Методика определения параметров линеаризированной модели среды

2.7. Определение параметров линеаризированной модели среды по экспериментальным данным возможно тремя способами.

2.8. Если получены только фазовые голографы нулевой гармоники (не менее трех), то искомые параметры модели среды могут быть определены по формулам:

$$V_s(0)=\frac{\sum_{i=1}^{n} \tau_i^3 V_{0i}^{\Phi}}{\alpha\sum_{i=1}^{n}\tau_i^3+\beta U_0^3\sum_{i=1}^{n}\tau_i^6};$$

$$V_s'(0)=\frac{2\pi}{T_{00}}\cdot\frac{\alpha\left[n\sum_{i=1}^{n}V_{0i}^{\Phi}\tau_i^3-\sum_{i=1}^{n}\tau_i^3\sum_{i=1}^{n}V_{0i}^{\Phi}\right]}{\beta\left[\sum_{i=1}^{n}\tau_i^6\sum_{i=1}^{n}V_{0i}^{\Phi}-\sum_{i=1}^{n}\tau_i^3\sum_{i=1}^{n}V_{0i}^{\Phi}\tau_i^3\right]}. \qquad (4)$$

Здесь и далее обозначено:

$$\alpha=\begin{cases}1{,}060-0{,}303\cdot\Gamma, & 0\le\Gamma\le 0{,}4,\\ 1{,}026-0{,}219\cdot\Gamma, & 0{,}4\le\Gamma\le 0{,}7,\end{cases}$$

$$\beta=\begin{cases}1{,}522+1{,}312\cdot\Gamma, & 0\le\Gamma\le 0{,}4,\\ 1{,}654+0{,}984\cdot\Gamma, & 0{,}4\le\Gamma\le 0{,}7,\end{cases}$$

$$U_0=\left(\frac{T_{00}\cdot V_s'(0)}{2\pi}\right)^{1/3};\quad \tau_i=\left(T_i/T_{00}\right)^{1/3};$$

$$\Gamma=V_s(0)/V_p(0)\approx V_{0i}^{\Phi}/V_p(0);\quad T_{00}=0{,}04.$$

V_{0i}, T_i – фазовые скорости и периоды наблюдаемой гармоники ($i=1\div n$),

2.9. По данным наблюдений только первой гармоники соответствующие расчетные формулы, полученные методом наименьших квадратов, имеют вид:

$$V_s(0)=\frac{\sum_{i=1}^{n} V_{1i}^{\Phi}\left(A+B(\tau U_0)^2+C(\tau U_0)^3\right)}{\sum_{i=1}^{n}\left(A+B(\tau U_0)^2+C(\tau U_0)^3\right)^2}, \qquad (5)$$

где U_0 – корень трансцендентного уравнения

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} V_{1i}^{\Phi}(2BU_0l^2+3CU_0l^3)}{\sum_{i=1}^{n}(A+B(lU_0)^2+C(lU_0)^3(2BU_0l^2+3CU_0^2l^3)} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n} V_{1i}^{\Phi}(A+B(U_0l)^2+C(U_0l)^3)}{\sum_{i=1}^{n}(A+B(U_0l)^2+C(U_0l)^3)^2}; \qquad (6)$$

$$A = 0{,}938\,\Gamma^2 - 0{,}789\,\Gamma + 1{,}0286,$$

$$B = 18{,}772\,\Gamma^2 + 16{,}639\,\Gamma + 2{,}089,$$

$$C = 28{,}41\,\Gamma^2 - 27{,}48\,\Gamma + 3{,}296.$$

Остальные обозначения совпадают с ранее введенными.

2.10. Если получено только по одной записи нулевой и первой гармоники, то соответствующие расчетные формулы имеют вид:

$$V_S(0) = \frac{V_0^{\Phi}}{\alpha + \beta U_0^3 l_0^3}, \qquad (7)$$

где U_0 – является корнем кубического уравнения

$$U_0^3\left(Cl_1^3 - \beta l_0^3 \frac{V_1^{\Phi}}{V_0^{\Phi}}\right) + U_0^2 Bl_1^2 + A - \alpha \frac{V_1^{\Phi}}{V_0^{\Phi}} = 0. \qquad (8)$$

2.11. По найденным параметрам линеаризированной модели $V_S(0)$ и $V_S'(0)$ вычисляются значения относительной частоты $y_i = 2\pi f / V_S'(0)$ и относительной фазовой скорости $x_i = V_i^{\Phi}/V_S(0)$, через которые определяются значения глубин, истинные значения скорости распространения поперечных волн на которых приближенно равны значениям фазовой скорости гармоник релеевских волн.

2.12. Значения фазовой скорости нулевой гармоники, умноженные на коэффициент $K(y_0)$, равный

$$K(y_0) = \frac{1}{x_0\left(1 - \frac{2\pi}{y_0}\left[0{,}25 + 0{,}005\,y_0(1-\Gamma)\right]\right)}, \qquad (9)$$

относят на глубину

$$Z_0 = \left[0{,}25 + 0{,}005\,y_0(1-\Gamma)\right]\lambda, \qquad (10)$$

где полученное значение скорости равно скорости распространения поперечных волн на этой глубине.

2.I3. Значение скорости распространения поперечных волн на глубине

$$Z_1=\left(\frac{\xi_1}{2\pi}\cdot\frac{(y_1/2)^{1/3}}{x_1}+0{,}20+0{,}004y_1\right)\lambda, \qquad (II)$$

где ξ_1 – корень интеграла Эйри;

x_1 – относительная фазовая скорость первой гармоники, численно равно значению фазовой скорости первой гармоники релеевских волн V_1^{Φ}.

2.I4. По совокупности значений скоростей (пп. 2.I2 и 2.I3) путем линейной интерполяции строят разрез среды по скоростям распространения поперечных волн. Этот прием дает хорошие результаты в тех случаях, когда имеется значительное (более 4–5) число наблюдений нулевой и первой гармоник релеевских волн на сильно различающихся частотах.

2.I5. При небольшом числе наблюдений на каждой гармонике скоростной разрез среды строится путем выполнения корреляции между значениями скоростей распространения поперечных и продольных волн по формуле

$$V_S(Z)=V_P(Z)\cdot K,$$

где

$$K=\frac{\sum_{i=1}^{n_0}(V_{0_i}(Z_i)/V_P(Z_i))+\sum_{i=1}^{n_1}(V_{1_i}(Z_i)/V_P(Z_i))}{n_0+n_1}; \qquad (I2)$$

n_0 – число фазовых годографов нулевой;

n_1 – число фазовых годографов первой гармоники релеевских волн.

2.I6. Для практической реализации изложенной методики построения скоростного разреза среды по кинематическим и динамическим характеристикам релеевских волн следует пользоваться специальными алгоритмами, реализованными в виде программы для ЭВМ.

2.I7. Для обработки результатов наблюдений на ЭВМ типа "Наири-К" следует пользоваться программой "Релей", реализую-

щей приведенные способы расчета скоростного разреза среды по фазовым годографам релеевских волн.

2.18. В состав системы "Грунт-2" входит комплекс программ, также построенных на вышеописанных алгоритмах и дающих скоростной разрез среды на основе кинематических и динамических характеристик релеевских волн.

2.19. В качестве иллюстрации описанной методики на рис. 9 и 10 приведены результаты работ в районе г.Ирбит (Свердловская область). Наблюдения поверхностных волн проводились в широком диапазоне частот (8–100 Гц). По полученным экспериментальным зависимостям фазовых скоростей релеевских волн от частоты (см.рис. 9) были рассчитаны параметры скоростного разреза $V_S(Z)$. На этом же участке одновременно были проведены работы по методике ВСП. Разрезы $V_S(Z)$, полученные двумя различными методами, хорошо согласуются друг с другом (см.рис. 10), что позволяет оценить количественно точность метода определения скоростного разреза $V_S(Z)$ по данным релеевских волн.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРОЕНИЯ СРЕДЫ ПО СКОРОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛН ЛЯВА

3.1. Кинематические и динамические характеристики волн Лява определяются исключительно строением среды по скорости распространения поперечных волн, а точность и надежность определения скоростного разреза среды по данным кинематических и динамических характеристик волн Лява тем выше, чем больше числа фазовых годографов разных гармоник используется при интерпретации.

3.2. Исходными данными для количественной интерпретации являются усредненные значения фазовых скоростей и периодов одной или нескольких низших гармоник волн Лява.

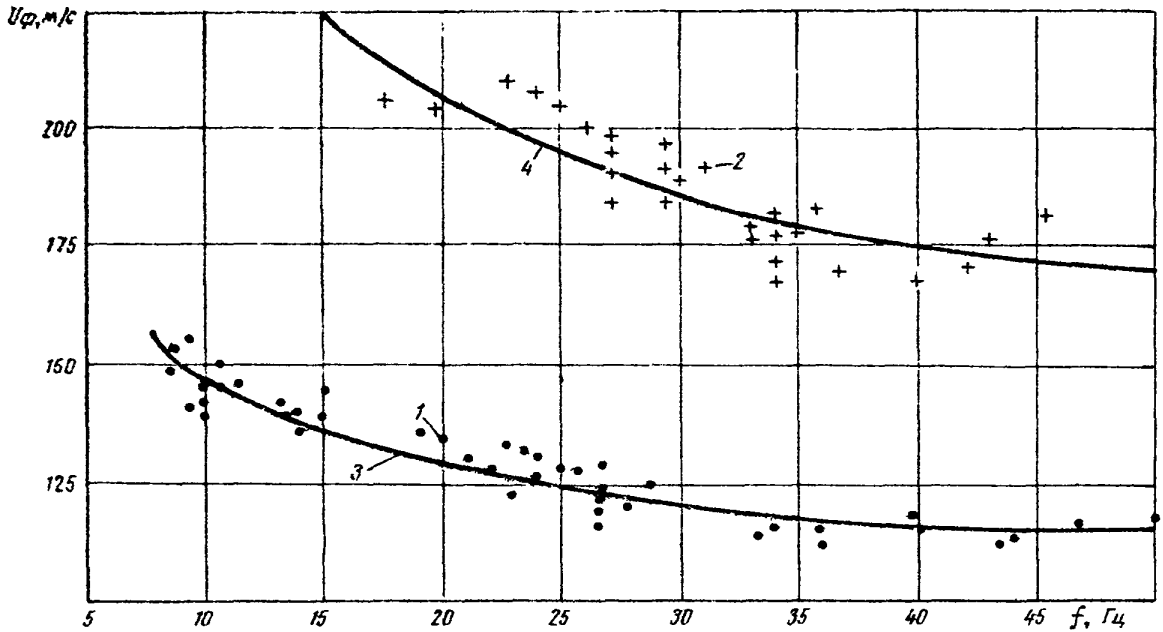


Рис.9. Экспериментальная зависимость фазовой скорости первой (I) и второй (2) гармоники релеевских волн от частоты. Сплошные линии – аппроксимирующие теоретические зависимости для нулевой (3) и первой (4) гармоник соответственно

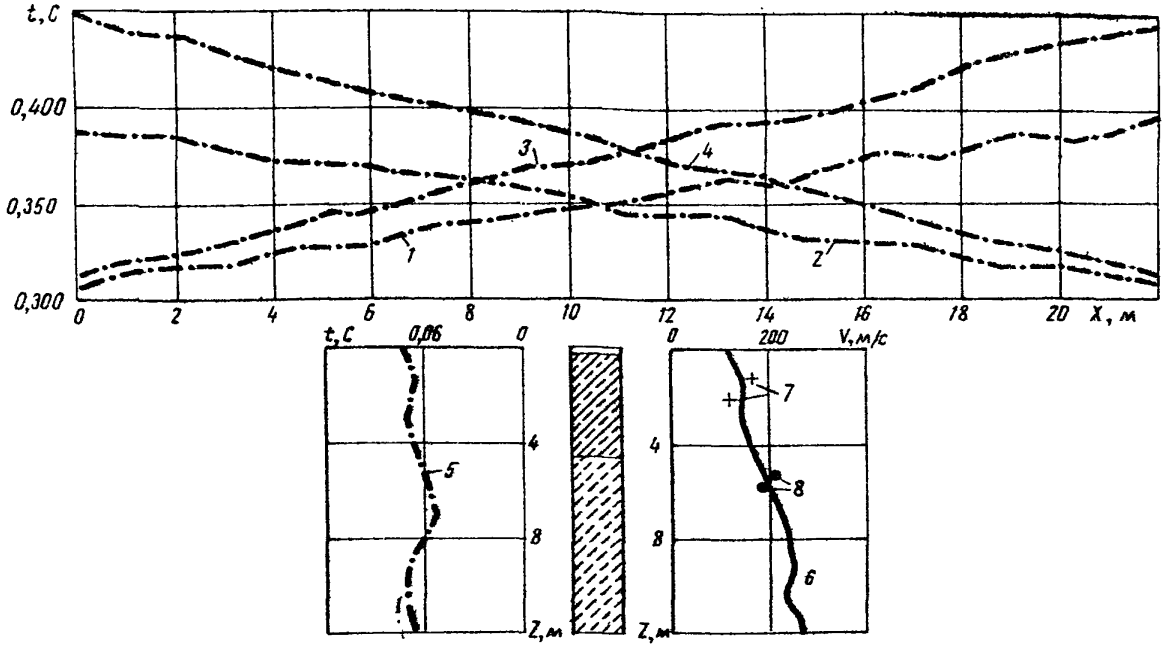


Рис.10. Сопоставление результатов определения скоростей распространения поперечных волн по результатам ВСП и регистрации первых двух гармоник релеевских волн. 1,2 – фазовые годографы нулевой гармоники; 3,4 – фазовые годографы первой гармоники; 5,6 – годограф и соответствующие ему скоростной разрез S_H – волн; 7,8 – значения скоростей распространения поперечных волн, рассчитанных по нулевой и первой гармоникам релеевских волн

Интерпретационная модель среды

3.3. По результатам теоретических и экспериментальных построений с учетом реальных технических возможностей в качестве основной интерпретационной модели среды взята модель среды в виде градиентного полупространства, скорость распространения поперечных волн в котором увеличивается с глубиной по линейному закону. Основными параметрами модели являются $V_s(0)$ и $V_s'(0)$ (см. приложение).

3.4. Для теоретического описания зависимости фазовой скорости гармоник волн Лява от параметров выбранной модели среды и условий регистрации взяты формулы асимптотической теории распространения поверхностных волн [9,10]. В целях повышения точности в указанные формулы на основе математического моделирования внесены необходимые дополнения.

3.5. Фазовая скорость гармоник волн Лява по усовершенствованным формулам асимптотической теории для градиентного полупространства, скорость распространения поперечных волн в котором возрастает по линейному закону, может быть вычислена по формуле

$$V_\varphi^m = \frac{V_s(0)}{1 - \frac{\varepsilon_m}{2^{1/3} y^{2/3}} - \frac{\varepsilon_m^2}{2^{5/3} y^{4/3}} \left[1 - \frac{2}{\varepsilon_m^3} - \left(\frac{25}{14} - \frac{6}{10\varepsilon_m^3}\right)\right] \cdot a_m}, \quad (13)$$

где m – номер гармоники;

ε_m – последовательные положительные корни производной функции Эйри $A_i'(\varepsilon) = 0$;

$$a_1 = -0{,}30;\ a_2 = 0{,}86 \text{ и т. д.};\ y = \omega / V_s'(0);\ 5 \leqslant y \leqslant 70.$$

Относительная погрешность определения фазовой скорости гармоник волн Лява по приведенным формулам не более 2–3%.

Определение параметров линеаризованной модели среды

3.6. На основе приведенных формул определение параметров линеаризованной модели среды возможно тремя способами.

3.7. Если в результате полевых исследований получены фазовые годографы только первой или второй гармоник волн Лява в количестве не меньше трех, то, решая трансцендентное уравнение

$$\frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{V_{m_i}^{\Phi}}{1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2)^2}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{V_{m_i}^{\Phi}(\alpha_m t_i + 2\beta_m t_i^2 U_0)}{(1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2)^2}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\alpha_m t_i + 2\beta_m t_i^2 U_0}{(1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2)^2}}, \quad (14)$$

можно получить значение параметра U_0, на основе которого искомые параметры определяются по формулам:

$$V_s'(0) = \frac{2\pi}{T_{00}} \cdot U_0^{3/2};$$

$$V_s(0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{V_{m_i}^{\Phi}}{(1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2)}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{(1-\alpha_m t_i U_0 - \beta_m t_i^2 U_0^2)^2}}; \quad (15)$$

$$x_i = V_i^{\Phi} / V_s(0),$$

где $t_i = (T/T_{00})^{2/3}$; $T_{00} = 0{,}04$;

$$\alpha_m = \frac{\varepsilon_m}{2^{1/3}}; \quad \beta_m = \frac{\varepsilon_m^2}{2^{5/3}} \left[1 - \frac{2}{\varepsilon_m^3} - \left(\frac{24}{15} - \frac{6}{10 \cdot \varepsilon_m^3}\right)\right] \cdot a_m.$$

3.8. В случае, если имеются результаты наблюдений и первой и второй гармоник, то после решения уравнения

$$\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{V_i^{(1)}}{1-\alpha_1 t_i U_0 - \beta_1 t_i^2 U_0^2} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{V_i^{(2)}}{1-\alpha_2 t_i U_0 - \beta_2 t_i^2 U_0^2}}{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{1}{(1-\alpha_1 t_i U_0 - \beta_1 t_i^2 U_0^2)^2} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{1}{(1-\alpha_2 t_i U_0 - \beta_2 t_i^2 U_0^2)^2}} =$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{V_i^{(1)}(\alpha_1 t_i + 2\beta_1 t_i^2 U_0)}{(1-\alpha_1 t_i U_0 - \beta_1 t_i^2 U_0^2)^2} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{V_i^{(2)}(\alpha_2 t_i + 2\beta_2 t_i^2 U_0)}{(1-\alpha_2 t_i U_0 - \beta_2 t_i^2 U_0^2)^2}}{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{(\alpha_1 t_i + 2\beta_1 t_i^2 U_0)}{(1-\alpha_1 t_i U_0 - \beta_1 t_i^2 U_0^2)^3} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{(\alpha_2 t_i + 2\beta_2 t_i^2 U_0)}{(1-\alpha_2 t_i U_0 - \beta_2 t_i^2 U_0^2)^3}} \quad (16)$$

искомые параметры находят по формулам:

$$V_s'(0) = \frac{2\pi}{T_{00}} \cdot U_0^{3/2};$$

$$V_s(0) = \frac{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{V_i^{(1)}(\alpha_1 l_i + 2\beta_1 l_i^2 U_0)}{(1-\alpha_1 l_i U_0 - \beta_1 l_i^2 U_0^2)^2} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{V_i^{(2)}(\alpha_2 l_i + 2\beta_2 l_i^2 U_0)}{(1-\alpha_2 l_i U_0 - \beta_2 l_i^2 U_0^2)}}{\sum_{i=1}^{n_1} \frac{\alpha_1 l_i + 2\beta_1 l_i^2 U_0}{(1-\alpha_1 l_i U - \beta_1 l_i^2 U_0^2)^3} + \sum_{i=1}^{n_2} \frac{\alpha_2 l_i + 2\beta_2 l_i^2 U_0}{(1-\alpha_2 l_i U_0 - \beta_2 l_i^2 U_0^2)^3}}; \quad (17$$

$$x_i = V_i^{\phi} / V_s(0).$$

3.9. На основе найденных значений параметров $V_s(0)$, $V_s'(0)$ x_i, y по формуле

$$(h/\lambda)_1 = \frac{\varepsilon_1}{2^{1/3} 2\pi} \cdot \frac{y_1^{1/3}}{x_1} + 0{,}1$$

вычисляется глубина, на которой истинное значение скорости поперечных волн численно равно фазовой скорости первой гармоники.

3.10. Значение фазовой скорости второй гармоники численно равно истинной скорости распространения поперечных волн на глубине

$$(h/\lambda)_2 = \frac{\varepsilon_2}{2\pi \cdot 2^{1/3}} \cdot \frac{y_2^{1/3}}{x_2} + 0{,}275. \quad (18)$$

3.11. По совокупности значений скоростей (пп. 3.7 и 3.8) путем линейной интерполяции строится скоростной разрез среды по скорости распространения поперечных волн. Этот прием дает хорошие результаты в тех случаях, когда имеется значительное (более пяти) число наблюдений первой и второй гармоник волн Лява на сильно различающихся частотах.

3.12. При небольшом числе наблюдений на каждой гармонике построение скоростного разреза среды по скоростям поперечных волн осуществляется на основе его корреляции со скоростным разрезом среды по продольным волнам по формулам (12).

3.13. Для практической реализации предложенной методики построения скоростного разреза среды по данным волн Лява следует пользоваться специально разработанными алгоритмами, реализованными в ряде программ для ЭВМ.

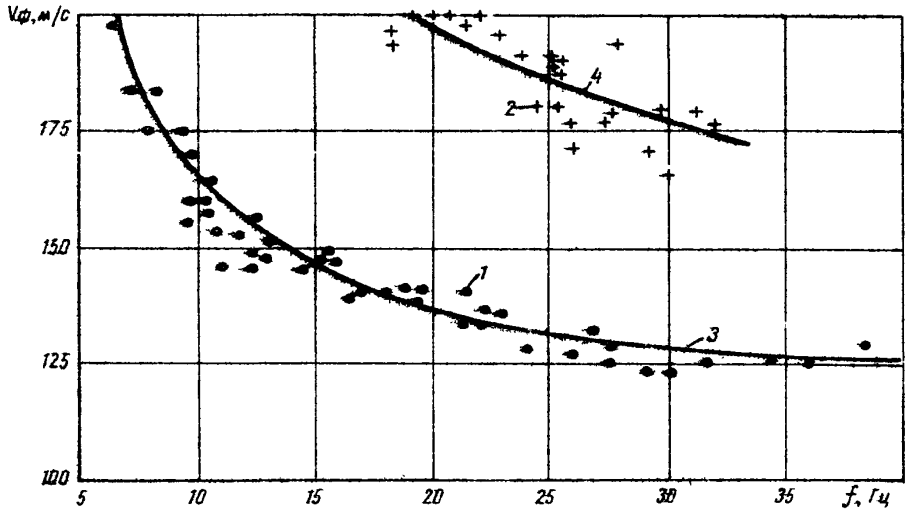


Рис.II. Экспериментальная зависимость фазовой скорости первой (I) и второй (2) гармоники волн лява от частоты; 3,4 – теоретические дисперсионные зависимости фазовой скорости от частоты соответственно для первой и второй гармоники

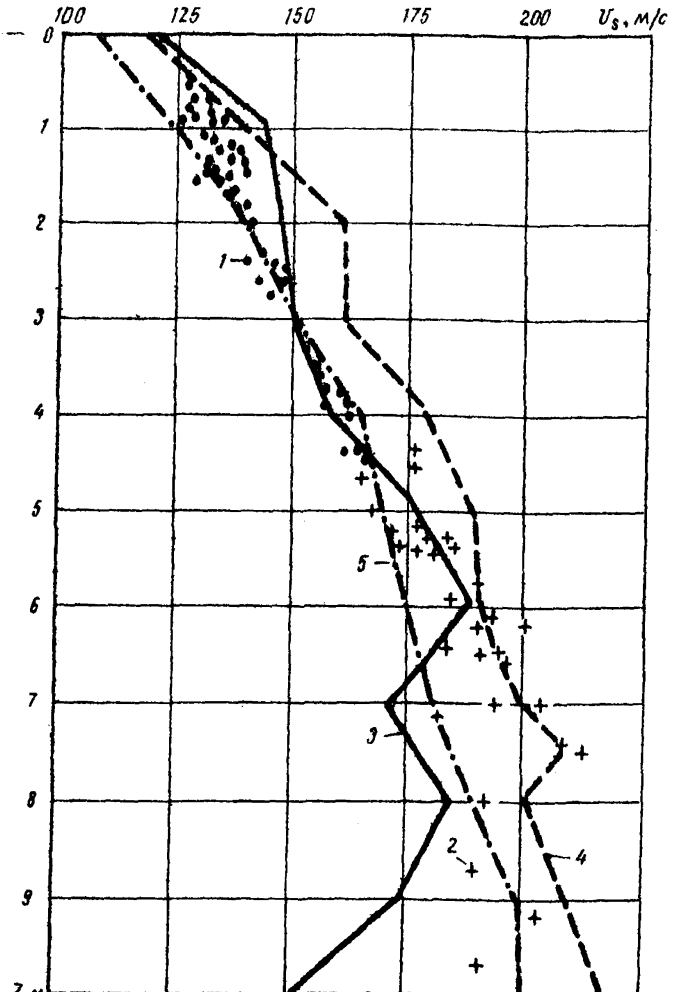


Рис.12. Пример восстановления скоростного разреза по данным нулевой (1) и первой (2) гармоник релеевских волн. 3,4 – скоростные разрезы, полученные по данным ВСП и наземного профилирования; 5 – скоростной разрез по волнам Лява

3.I4. Обработку результатов наблюдений на ЭВМ типа "Наири-К" следует производить по программе "Ляв", реализующей описанный способ расчета скоростного разреза среды по фазовым годографам волн Лява.

3.I5. В состав системы "Грунт-2" входит комплекс программ, реализующих построение скоростного разреза среды по описанной методике.

3.I6. В примере, описанном в п.2.I9, были выполнены наблюдения поверхностных волн Лява совместно с наблюдениями релеевских волн. Экспериментальные зависимости фазовых скоростей волн Лява от частоты приведены на рис. II. Сопоставление скоростных разрезов $V_3(Z)$, полученных по методике, описанной в настоящей работе по волнам Лява и релеевским волнам, с данными ВСП приведены на рис. I2.

Литература

I. Бондарев В.И. Рекомендации по применению сейсмической разведки для изучения физико-механических свойств рыхлых грунтов в естественном залегании для строительных целей. М., Стройиздат, I974.

2. Бондарев В.И., Писецкий В.Б., Агеев В.Н., Вербицкий Г.Г. Рекомендации по применению вертикального сейсмического профилирования в инженерно-геологических скважинах с целью оценки физико-механических свойств рыхлых грунтов. М., Стройиздат, I976.

3. Госстрой РСФСР. Инструкция по применению сейсморазведки в инженерных изысканиях для строительства./РСН 45-77/. Составители: Курандин Н.Н., Шемшурин В.А., Бондарев В.И., и др. М., Стройиздат, I977.

4. Саваренский Е.Ф. Сейсмические волны. М., Недра, I972.

5. Левшин А.Л. Поверхностные и канальные сейсмические волны. М., Наука, I973.

6. Левшин А.Л. Распространение поверхностных волн в рыхлых породах. - Изв. АН СССР. Сер. геофиз., I962, № I2.

7. Бабич В.М., Молотков И.А. Применение асимптотических методов в теории поверхностных волн.-В кн.: Тр. V Всесоюзн. сим-

позиума по дифракции и распространению волн.Л.,Наука,1971.

8.Мухина И.В.,Молотков И.А. О распространении волн Релея в упругом полупространстве, неоднородном по двум координатам. - Изв.АН СССР,Физика Земли 1967, № 4.

9.Бабич В.М.,Молотков И.А. О распространении волн Лява в упругом полупространстве, неоднородном по двум координатам. - Изв. АН СССР,Физика Земли, 1968, № 6.

10. Бабич В.М.,Бабич Г.Н.,Фомина Н.А. О расчете волн Лява с использованием асимптотических формул метода ВКБ. - Вычислительная сейсмология. М.,Наука,1968,вып.4.

11. Стретт Дж.В. (лорд Релей).Теория звука. Т.I и 2, ГИТТЛ,1940.

Приложение
Справочное

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ТЕОРИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

При теоретических исследованиях в зависимости от характера распределения физических свойств среды подразделяются на однородные и неоднородные.

Однородное полупространство – полупространство, в котором скорость распространения упругих волн и плотность среды остаются всюду постоянными – является простейшей физической моделью среды, для которой получается сравнительно простое по структуре аналитическое решение о распространении поверхностных волн. Так как эта модель среды весьма приближенно отражает реальные закономерности природы, то она используется относительно редко и главным образом для приближенных оценок.

Неоднородным называется полупространство, в котором скорости распространения упругих волн и плотность являются функциями координат точки. Если упругие свойства среды меняются одновременно по горизонтали и по вертикали, то такую среду принято называть неоднородной.

Если физические свойства меняются только по горизонтали или только по вертикали, то такую среду называют соответственно горизонтально- или вертикально-неоднородной. В зависимости от характера изменения физических свойств горизонтально- и вертикально-неоднородные среды могут быть слоисто-однородными, градиентными и градиентно-слоистыми.

Слоисто-однородные среды – это такие среды, которые состоят из отдельных однородных слоев, на границах которых физические свойства меняются скачкообразно.

Градиентными называются такие среды, в которых физические свойства по всем направлениям меняются непрерывно (плавно).

Градиентно-слоистыми средами называются такие среды, которые состоят из отдельных слоев, физические свойства в

которых меняются непрерывно.

Теоретические модели среды тем лучше соответствуют реальным средам, чем более сложное распределение физических свойств они допускают.

Усложнение характера распределения физических свойств в модели среды существенно усложняет теоретическое рассмотрение задачи о распространении поверхностных волн. В настоящее время теоретически изучены преимущественно вертикально-неоднородные среды.

При анализе динамических характеристик релеевских волн и волн Лява значительную роль играет модуль вектора плотности сейсмической энергии (модуль вектора Умова) [4], определяемый по формуле

$$E(Z) = \frac{1}{2} = \rho(Z) V_R \cdot \omega^2 A^2(Z), \qquad (I)$$

где ρ - объемная масса среды;

A - амплитуда вектора смещения.

Изучение особенностей распространения поверхностных волн в вертикально-неоднородных средах осуществляется либо путем теоретического решения соответствующей динамической задачи, либо путем численного интегрирования исходных дифференционных уравнений, либо путем построения асимптотических формул в высокочастотном приближении.

Аналитическое решение динамической задачи о распространении поверхностных волн в неоднородных средах возможно только для некоторых сравнительно простых моделей сред. В частности, авторами подробно изучены особенности распространения поверхностных волн в градиентном полупространстве, скорость распространения упругих волн в котором меняется по некоторым сравнительно простым законам. Подобный подход позволяет достаточно просто получить целый ряд общих закономерностей, которые другими способами либо не могут быть получены, либо получение их связано со значительными трудностями.

Численными методами возможно изучение особенностей распространения поверхностных волн практически в любых вертикально-неоднородных средах. Наиболее эффективный метод такого

решения предложен А.Л.Левшиным [5,6] .

Приближенное изучение главных кинематических особенностей распространения поверхностных волн в неоднородных средах возможно на основе так называемых асимптотических методов. Основные результаты в этом направлении применительно к изучению распространения релеевских волн изложены в работах [7,8] , а применительно к изучению распространения волн Лява - в работах [9,10] .

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РЕЛЕЕВСКИХ ВОЛН

Поверхностные волны релеевского типа являются наиболее интенсивными сейсмическими волнами, регистрируемыми при проведении работ на нескальных грунтах. Их главными отличительными особенностями являются: высокая интенсивность, большая длительность колебаний, интерференционный характер записи, низкие фазовые скорости, большее по сравнению с объемными волнами время регистрации и прямолинейность фазовых годографов.

Распространение релеевских волн теоретически изучается на основе анализа решений задач динамики упругих волн для каких-либо конкретных моделей среды. Решение таких задач, как правило, осуществляется относительно упругих потенциалов продольных $\varphi(x,y,z,t)$ и поперечных $\vec{\psi}(x,y,z,t)$ волн. Первый из них является скалярным, второй векторным. Компоненты вектора смещения в релеевской волне определяются через введенные потенциалы по формуле

$$\vec{U} = grad\,\varphi(x,y,z,t) + rot\,\vec{\psi}(x,y,z,t). \qquad (2)$$

В средах, физические свойства которых зависят только от одной координаты (вертикально-неоднородные среды), распространение плоских упругих волн описывается скалярным потенциалом $\varphi(x,y,z,t)$ и y -компонентой векторного потенциала $\psi(x,z,t)$, которые соответственно удовлетворяют уравнениям:

$$[1+W(z)]\left(\frac{\partial^2\varphi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\varphi}{\partial z^2}\right) = \frac{1}{V_p^2(z)}\cdot\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2}; \qquad (3)$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2} = \frac{1}{V_s^2(z)}\cdot\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2},$$

где $W(z)$ – некоторая достаточно малая по модулю функция, зависящая от $V_s(z), V_p(z), V_s'(z), V_s''(z)$.

Если искать решение уравнений (3) для потенциалов в виде плоских волн, описываемых уравнениями

$$\varphi(x,z,t) = C_1 \cdot A(z) \cdot e^{-i\omega(t-\frac{x}{V_R})}; \qquad (4)$$
$$\psi(x,z,t) = C_2 \cdot B(z) \cdot e^{-i\omega(t-\frac{x}{V_R})},$$

где ω – круговая частота колебаний; V_R – фазовая скорость распространения релеевских волн вдоль профиля,

то для приближенного определения неизвестных функций $A(z)$ и $B(z)$ получаются следующие дифференциальные уравнения:

$$A''(z) - \left(\frac{\omega^2}{V_R^2} - \frac{\omega^2}{V_p^2(z)}\right) \cdot A(z) = 0;$$
$$B''(z) - \left(\frac{\omega^2}{V_R^2} - \frac{\omega^2}{V_s^2(z)}\right) \cdot B(z) = 0. \qquad (5)$$

Искомые функции $A(z)$ и $B(z)$ должны удовлетворять физически обоснованным требованиям для упругих потенциалов.

Из условия отсутствия напряжений на свободной границе полупространства для определения фазовой скорости гармоник релеевских волн получаем характеристическое уравнение:

$$4 \cdot \frac{V_R^2}{\omega^2} \cdot A'(0) \cdot B'(0) - \left(2 - \frac{V_R^2}{V_3^2(0)}\right)^2 \cdot A(0) \cdot B(0) = 0. \qquad (6)$$

Кинематические и динамические особенности гармоник релеевских волн полностью определяются свойствами функций $A(z)$ и $B(z)$, которые в свою очередь зависят от характера распределения упругих свойств в среде.

Однородное полупространство

В однородном полупространстве распространяется одна поверхностная волна релеевского типа, которую принято называть волной Релея. Она представляет собой эллиптически поляризованные колебания с преобладанием на поверхности полу-

пространства вертикальной компоненты вектора смещения.

Фазовая скорость волны Релея не зависит от частоты и определяется из уравнения типа (6), которое для этого случая принимает вид:

$$\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^4 + \left[24 - 16\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2\right]\left(\frac{V_R}{V_S}\right)^2 - 16\cdot\left(1 - \frac{V_S^2}{V_P^2}\right)^2 = 0. \quad (7)$$

Это уравнение позволяет по фазовой скорости волны Релея при известном значении скорости распространения продольных волн находить значение скорости распространения поперечных волн в среде. Для экспресс-оценки можно полагать, что скорость распространения поперечных волн приближенно (с точностью ± 4%) равна:

$$V_S = 1{,}10 \cdot V_R . \quad (8)$$

Относительная плотность сейсмической энергии $E(z)/E(0)$ у волны Релея зависит только от коэффициента Пуассона среды и длины волны λ . Она максимальна на поверхности полупространства или вблизи нее и далее монотонно убывает с глубиной z/λ (рис. 13).

Темп убывания относительной энергии по глубине заметным образом зависит от величины коэффициента Пуассона. В средах с большим значением коэффициента Пуассона (водонасыщенные среды) сейсмическая энергия волны Релея преимущественно сосредоточена в приповерхностных частях разреза.

Эффективная толщина слоя - мощность слоя, в котором распространяется не менее 95% общей энергии волны Релея, - зависит только от значения коэффициента Пуассона и длины волны и приближенно может быть оценена по формуле

$$(z/\lambda)_{эф} = 0{,}6(1+\mu). \quad (9)$$

Волна Релея распространяется в тонком приповерхностном слое и, следовательно, несет информацию о скоростном строении только этой части разреза.

Величина отношения V_S/V_P заметным образом влияет на плотность сейсмической энергии на поверхности полупространства. Увеличение отношения V_S/V_P приводит к уменьшению плотнос-

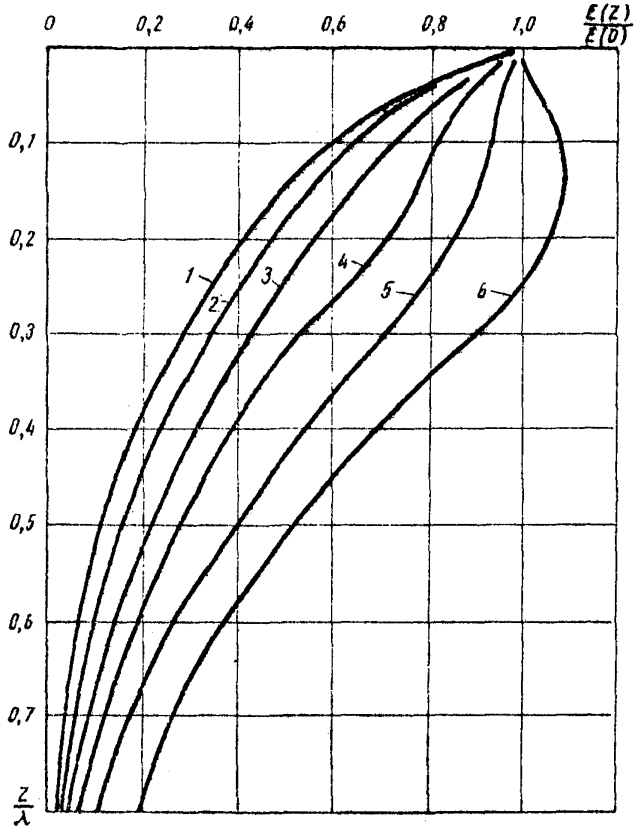


Рис.13. Графики зависимости относительной плотности энергии волны Релея от глубины при различных значениях коэффициента Пуассона: 1-0,0; 2-0,10; 3-0,20; 4-0,30; 5-0,40; 6-0,50.

ти энергии на поверхности полупространства (рис.I4).Это означает, что возбуждение поверхностных волн в водонасыщенных разрезах существенно эффективнее и проще, чем в разрезах, где скорости продольных и поперечных волн различаются незначительно.

Вертикально-неоднородное полупространство

Характер изменения упругих свойств по глубине в реальных средах может быть очень сложным. Однако главной, характерной чертой всех реальных сред является возрастание скоростей распространения упругих волн с глубиной. Поэтому математические модели сред, в которых скорости распространения упругих волн увеличиваются с глубиной, являются основой для выяснения главных кинематических и динамических особенностей поверхностных волн, распространяющихся в реальных средах. Для моделей вертикально-неоднородных сред следует применять такие законы изменения скоростей распространения упругих волн с глубиной, для которых возможно интегрирование дифференциальных уравнений (5) в замкнутой форме. Детально изучены модели сред, скорости распространения поперечных волн в которых возрастают по законам:

$$V_S(z) = \alpha z + b = V_0(1+\beta z); \qquad (10)$$

$$V_S(z) = V_S(0)\cdot e^{b_S z/2}. \qquad (11)$$

Характер изменения скорости распространения продольных волн может быть любым, однако учитывая, что всегда должно иметь место неравенство $V_p(z) \geqslant \sqrt{2}\,V_S(z)$, а также наблюдающуюся тенденцию в коррелируемости значений скоростей распространения продольных и поперечных волн, для описания скоростных разрезов $V_p(z)$ следует выбирать функции вида, аналогичного используемым для описания скоростного разреза $V_S(z)$.

Если скорости распространения поперечных и продольных волн в полупространстве возрастают с глубиной экспоненциально, то обобщенное характеристическое уравнение Релея для определения фазовой скорости гармоник релеевских волн примет вид:

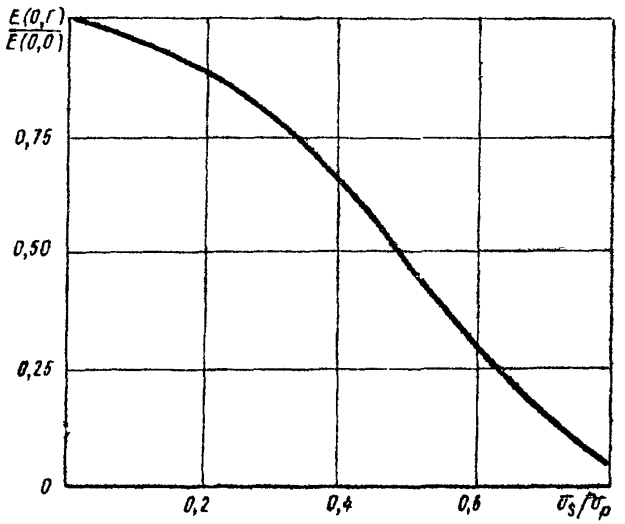


Рис.I4. Зависимость относительной плотности энергии волны Релея на поверхности земли от величины отношения

$$x^2 \cdot \Gamma\left[J_{\nu_1-1}(y/\lambda)-J_{\nu_1+1}(y/\lambda)\right]\cdot\left[J_{\nu_2-1}(y)-J_{\nu_2+1}(y)\right]=(2-x^2)^2 J_{\nu_1}(y/\lambda)J_{\nu_2}(y), \quad (12)$$

где $x = V_R/V_S(0)$ -относительная фазовая скорость;

$y=\dfrac{\omega}{V_S'(0)}=\dfrac{2\omega}{b_S V_S(0)}$ -относительная частота колебаний;

$\Gamma=V_S(0)/V_P(0)$; $\lambda=V_P'(0)/V_S'(0)=b_P V_P(0)/b_S V_S(0)$; $\nu_1=y/x\lambda\Gamma$; $\nu_2=y/x$.

Существует бесчисленное множество зависимостей относительной фазовой скорости релеевских волн от относительной частоты колебаний $x_K(y)$,удовлетворяющих уравнению (12). Каждая из них соответствует определенной фазе поверхностной волны релеевского типа, которую принято называть гармоникой (модой,обертоном и т.п.). Графическая зависимость $x_K(y)$ называется дисперсионной кривой. Нумерацию гармоник ведут, начиная с номера К=0. Этому номеру соответствует так называемая нулевая (основная) гармоника релеевских волн. Каждая гармоника существует только на частотах, начиная с некоторого минимального значения относительной частоты. При увеличении относительной частоты фазовая скорость нулевой гармоники приближается к фазовой скорости волны Релея в полупространстве, параметры которого равны $V_P(0)$ и $V_S(0)$, а фазовая скорость высших гармоник - к поперечной волне $V_S(0)$. Общий вид дисперсионных кривых представлен на рис. 15.

Динамические характеристики гармоник релеевских волн обладают рядом характерных особенностей, которые определяют методику их использования в целях определения строения среды по скорости распространения поперечных волн. Характерной особенностью вертикальной компоненты нулевой гармоники релеевских волн является быстрое и монотонное уменьшение ее интенсивности с глубиной без обращения фаз. Вертикальная компонента высших гармоник характеризуется обязательным обращением фаз, число которых равно номеру гармоники. Амплитуда высших гармоник, осциллируя, возрастает до максимального значения и далее монотонно убывает. Как видно из рис. 16 интенсивность колебаний в высших гармониках во внутренних точках среды может весьма заметно превосходить интенсивность

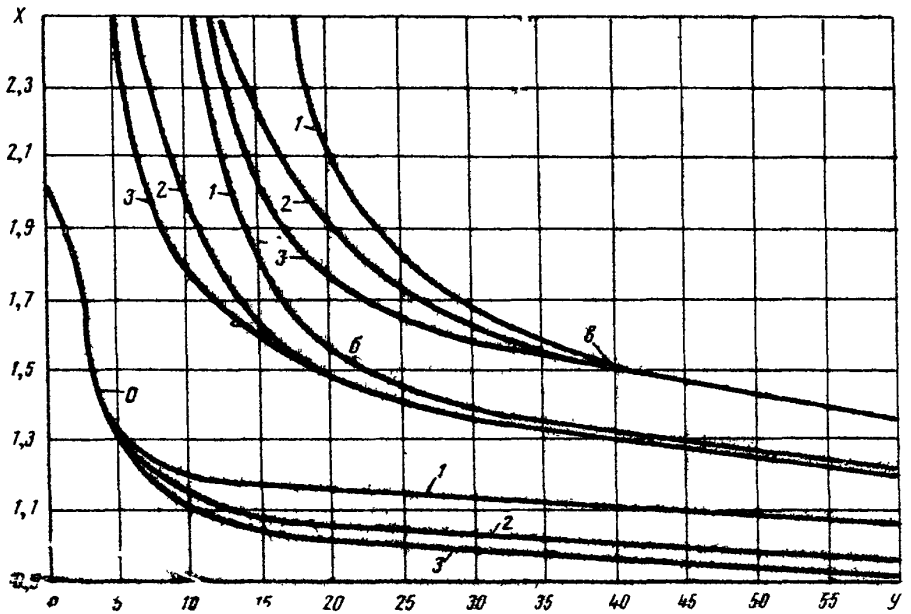


Рис.I5. Дисперсионные кривые нулевой (а), первой (б),второй (в) гармоник релеевских волн для модели среды с экспоненциальным нарастанием скоростей распространения упругих волн с глубиной. Зависимости расчитаны при: I-Г=0,0;2-Г=0,4;3-Г=0,7

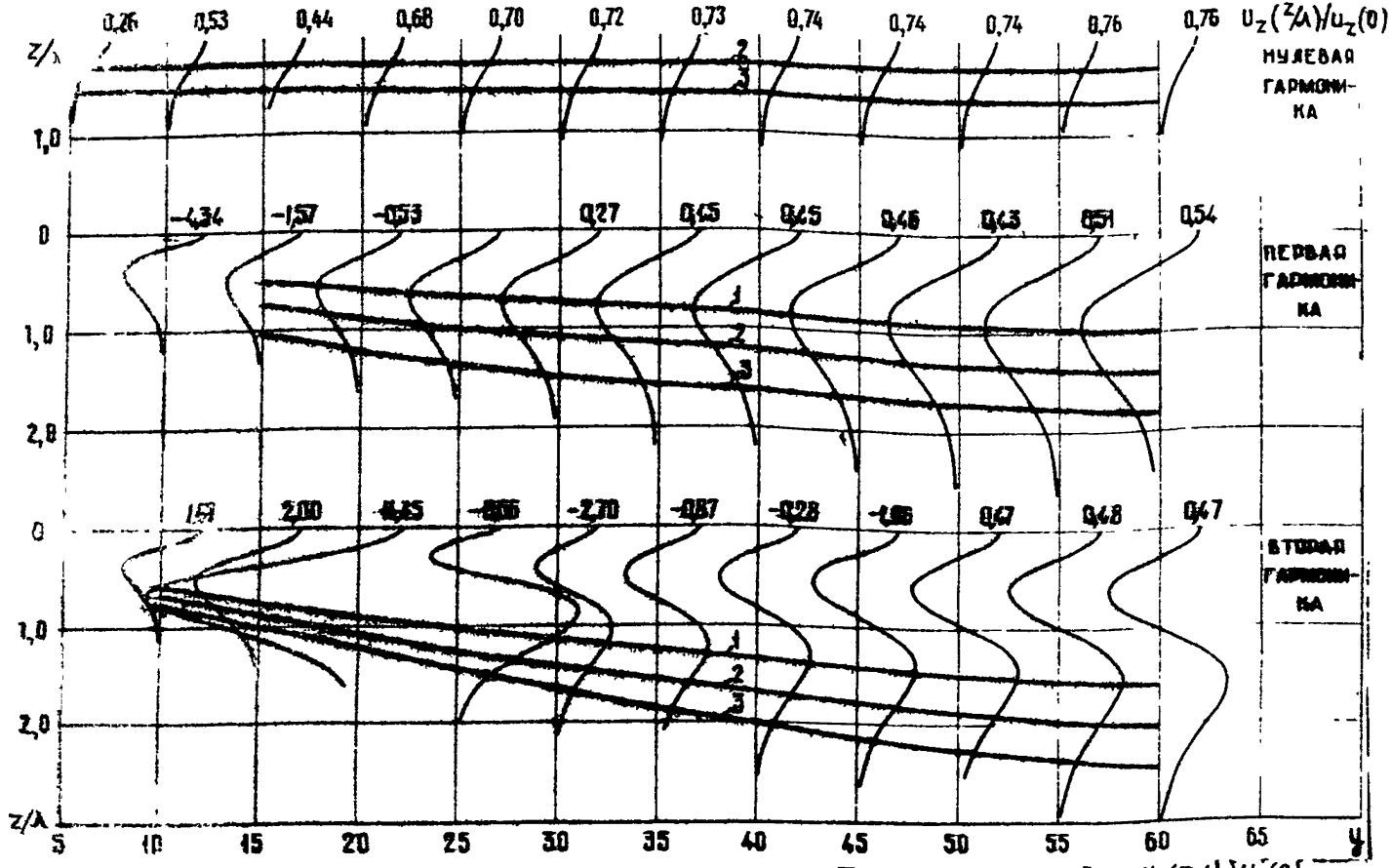


Рис.I6. Графики зависимости значений относительной вертикальной компоненты $u_z(z/\lambda)/u_z(0)$ первых трех гармоник релеевских волн от относительной частоты ψ и глубины z/λ (I – относительная глубина проникновения гармоник по асимптотической теории; 2 – расчетные глубины отнесения скоростей; 3 – предельная глубина распространения гармоник релеевских волн)

колебаний на поверхности земли.

Сейсмическая энергия нулевой гармоники сосредоточена в тонком приповерхностном слое, эффективная мощность которого приближенно равна:

$$(Z/\lambda)_{эф.} = 0{,}5 + 0{,}01(1-\Gamma)\,y. \qquad (13)$$

В высших гармониках основная часть переносимой энергии сосредоточена в глубинных частях разреза и, следовательно, их кинематические и динамические особенности контролируются именно этими частями разреза. Эффективная мощность слоя, вовлекаемого в колебательный процесс первой и второй гармониками, приближенно определяется формулами:

$$(Z/\lambda)^1_{эф} \approx \frac{\varepsilon_1}{2\pi} \cdot \frac{(y/2)^{1/3}}{x_1} + 0{,}40 + 0{,}008\,y; \qquad (14)$$

$$(Z/\lambda)^2_{эф} \approx \frac{\varepsilon_2}{2\pi} \cdot \frac{(y/2)^{1/3}}{x_2} + 0{,}20 + 0{,}012\,y, \qquad (15)$$

где ε_1, ε_2 – нули интеграла Эйри;

x_1, x_2 – корни обобщенного уравнения Релея, соответствующие первой и второй гармоникам.

Теоретические расчеты с использованием различных моделей сред показали, что строение среды по скорости распространения продольных волн оказывает незначительное влияние на кинематические и динамические особенности релеевских волн. Поэтому учет конкретных особенностей скоростного разреза $V_p(Z)$ можно делать приближенно на основе какой-либо упрощенной модели среды. При этом основным параметром, подлежащим учету, является величина скорости распространения продольных волн на поверхности земли $V_p(0)$.

Весьма слабое влияние на кинематические и динамические особенности строения среды оказывает плотность $\rho(Z)$. Теоретические расчеты показывают, что на сейсмических частотах $f > 5$ Гц влияние реальных изменений плотности среды не превышает 1–3% и поэтому может не учитываться.

Приведенные выше выводы проверены численным путем по методике А.Л.Левшина и подтверждены на целом ряде других

моделей сред, для которых получение аналитического решения невозможно. Это позволяет считать сделанные общие выводы справедливыми для весьма широкого класса реальных сред.

ОСНОВЫ ТЕОРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН ЛЯВА

Поверхностные волны Лява являются теоретически наиболее простым типом поверхностных волн. Смещения частиц горных пород под их действием происходит перпендикулярно вертикальной плоскости, содержащей направление распространения волны.

Волны Лява могут существовать только в средах, неоднородных по плотности или по скорости распространения поперечных волн. Характер изменения скорости распространения продольных волн в среде не влияет на кинематические и динамические характеристики волн Лява.

Распространение плоских волн Лява в средах, физические свойства которых зависят только от глубины (вертикально-неоднородные среды), удобно изучать на основе анализа вектора смещения $\vec{U}(x,z,t)$, амплитуда которого $B(z)$ должна удовлетворять обыкновенному дифференциальному уравнению

$$B''(z)+\left[\frac{\rho'(z)}{\rho(z)}+\frac{2V_s'(z)}{V_s(z)}\right]B'(z)+\left[\frac{\omega^2}{V_s^2(z)}-\frac{\omega^2}{V_\phi^2}\right]B(z)=0, \quad (16)$$

где $V_s(z)$ и $V_s'(z)$ – функция и ее производная, описывающая зависимость скорости распространения поперечных волн от глубины;

$\rho(z)$ и $\rho'(z)$ – объемная масса и ее производная по глубине;

ω – круговая частота колебаний;

V_ϕ – фазовая скорость распространения волны Лява.

Для выявления главных кинематических и динамических особенностей волн Лява в вертикально-неоднородных средах авторами подробно изучены случаи, когда скорость поперечных волн и плотность среды меняются по экспоненциальному или по линейному законам:

$$V_s(z) = V_s(0)e^{\beta z/2},\ \rho(z) = \rho(0)e^{\beta z/2}; \qquad (17)$$

или

$$V_s(z) = az + b,\ \rho(z) = const. \qquad (18)$$

Для случая, когда скорость и плотность среды экспоненциально возрастают с глубиной, уравнение для определения фазовой скорости волн Лява имеет вид:

$$\frac{2(1+P)}{y} J_\nu(y) + J_{\nu-1}(y) - J_{\nu+1}(y) = 0, \qquad (19)$$

где $\nu = \sqrt{(y/x)^2 + (1+P)^2}$; $x = V_\phi / V_s(0)$; $y = \omega / V_s'(0)$;

$P = \beta/2b$;

$J_\nu(y)$ – функция Бесселя первого рода.

Если скорость распространения поперечных волн возрастает с глубиной по линейному закону (при постоянной плотности), то характеристическое уравнение, определяющее зависимость фазовой скорости от параметров разреза и частоты, принимает вид:

$$\frac{2y}{x} K_\nu'(y/x) - K_\nu(y/x) = 0, \qquad (20)$$

где $\nu = \sqrt{0{,}25 - y^2}$; $x = V_\phi / V_s(0)$; $y = \omega/a$

K_ν и K_ν' – функция Макдональда и ее производная по аргументу.

Уравнениями (19) и (20) определяется бесчисленное множество зависимостей относительной фазовой скорости волн Лява от относительной частоты $x_n(y)$. Каждая из этих зависимостей соответствует определенным гармоникам волн Лява. Графическую зависимость $x_n(y)$ принято называть дисперсионной кривой. Нумерацию гармоник волн Лява ведут, начиная с номера К=1. Этому номеру соответствует основная гармоника. Каждая гармоника существует только на частотах выше некоторой критической. С увеличением частоты относительная фазовая скорость

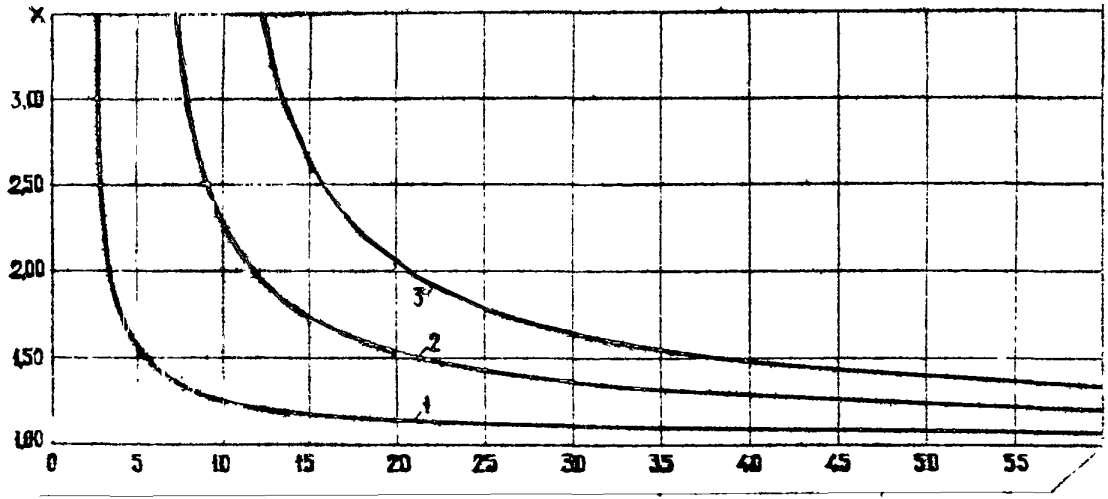


Рис.17. Дисперсионные кривые первых трех гармоник волн Лява для градиентного полупространства, скорость распространения поперечных волн в котором меняется по закону $V(z)=V(0)e^{kz/2}$. Индекс кривой – номер гармоники.

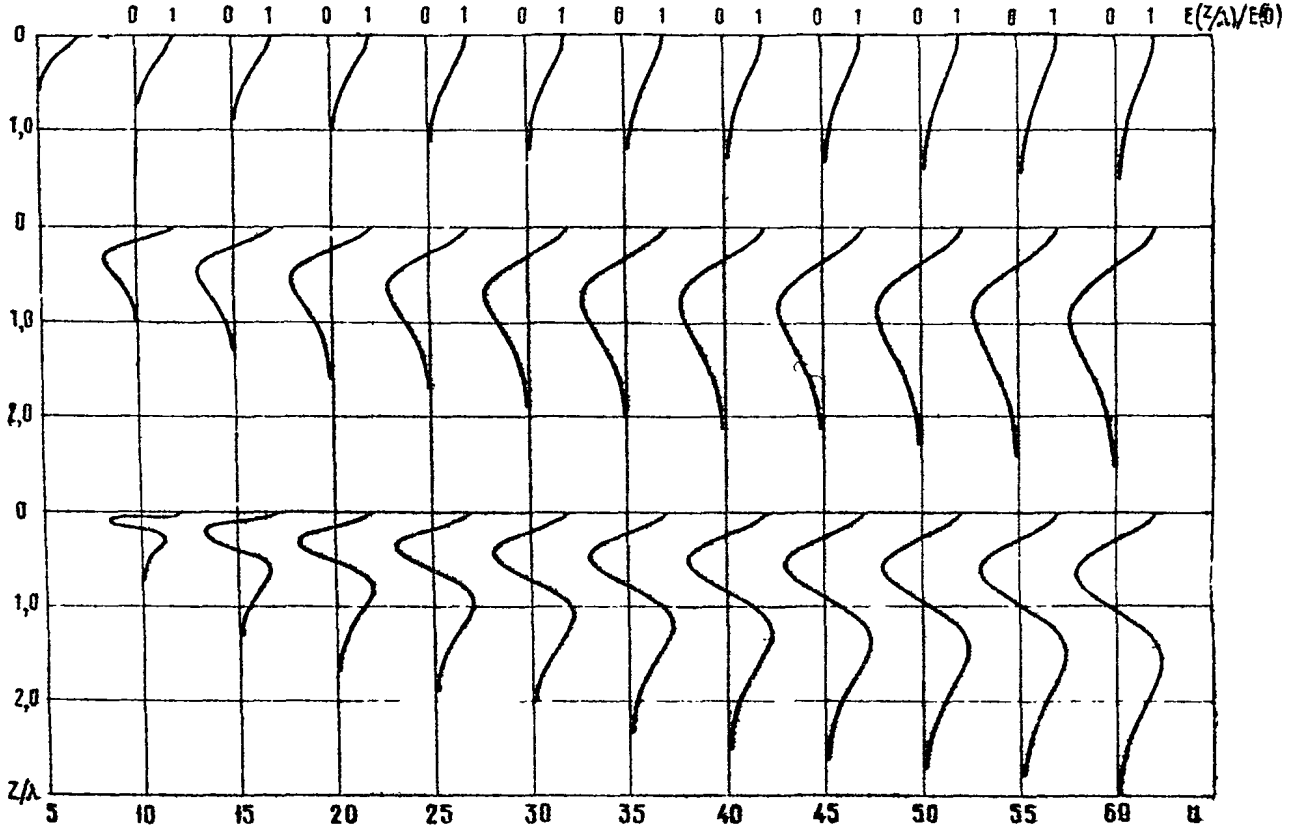


Рис. 18. Графики зависимости горизонтальной компоненты вектора смещения первых трех гармоник волн Лява от относительной частоты g и глубины Z/λ для градиентного полупространства $V(Z)=V(0)e^{bZ/2}$

всех гармоник уменьшается (нормальная дисперсия) и при неограниченном увеличении отремится к единице. Общий вид дисперсионных кривых представлен на рис. I7.

Интенсивность вектора смещения первой гармоники волн Лява монотонно убывает с глубиной. Для высших гармоник характерно наличие обращения фаз вектора смещения, число которых на единицу меньше номера гармоники. Интенсивность высших гармоник во внутренних точках среды может превосходить интенсивность этой же гармоники на поверхности земли. Это означает, что основная доля сейсмической энергии высших гармоник распространяется в глубинных частях разреза (рис.I8).

Теоретические расчеты убеждают, что на кинематические и динамические особенности гармоник волн Лява на сейсмических частотах ($f > 5$ Гц) практически не влияют реальные по значениям изменения плотности среды.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

Введение 3
I. Методика регистрации поверхностных волн 4
2. Определение строения среды по скорости распространения поперечных волн на основе кинематических и динамических характеристик релеевских волн I4
3. Определение строения среды по скорости распространения поперечных волн на основе кинематических и динамических характеристик волн Лява 19
Литература 27
Приложение 29

Центральный трест инженерно-строительных изысканий

Подписано в печать 20.XI.1980 г.
Отдел механизации проектных работ и выпуска проектов

Зак. 437 Объем 3 п.л. Цена 30 коп Тир. 300

gost.e-ecolog.ru