

Е. Ф. САВАРЕНСКИЙ

**К ВОПРОСУ О НЕОДНОРОДНОСТИ В ГЛУБИННОМ СТРОЕНИИ
ЗЕМЛИ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

(Представлено академиком С. И. Вавиловым 10 II 1940)

Наблюдения над распространением упругих волн, возникающих при землетрясениях и проникающих на любые глубины, позволяют определить скорости распространения упругих волн на различных глубинах. Характер зависимости скорости от глубины и перемены в этой зависимости указывает нам на наличие границ раздела физических свойств вещества (^{1,2}).

Однако до сих пор наблюдения над распространением упругих волн, представляемые годографами, исследовались для всей земли в целом, при этом использовались землетрясения и сейсмические станции, разбросанные по всему земному шару. По этой причине найденные внутри земли границы раздела представлялись в виде концентрических сфер, которые могут быть верны для всей земли только в среднем.

В настоящей работе излагаются результаты исследования региональных годографов, полученных для различных, правда больших, участков земного шара с использованием станций и очагов землетрясений, лежащих в выбранной области, с целью построения границ раздела в свойствах вещества под разными частями земного шара.

Для указанной цели были использованы данные о временах пробега продольных волн, помещенные в Международных сейсмических сводках (³) с 1923 по 1933 г. Данные были сгруппированы по трем районам, указанным на карте (фиг. 1), где большие заштрихованные площади включают сейсмические станции, а окружности оконтуривают взятые для данного района эпицентры землетрясений. В европейско-азиатском районе использованы 90 станций и 34 землетрясения, давшие 1 031 точку при составлении европейско-азиатского годографа. Для тихоокеанского района, где были использованы главным образом островные и австралийские станции, взяты 44 станции и 77 землетрясений, давшие 615 точек тихоокеанского годографа. В районе Америки использованы 67 станций и 31 землетрясение, давшие 610 точек американского годографа.

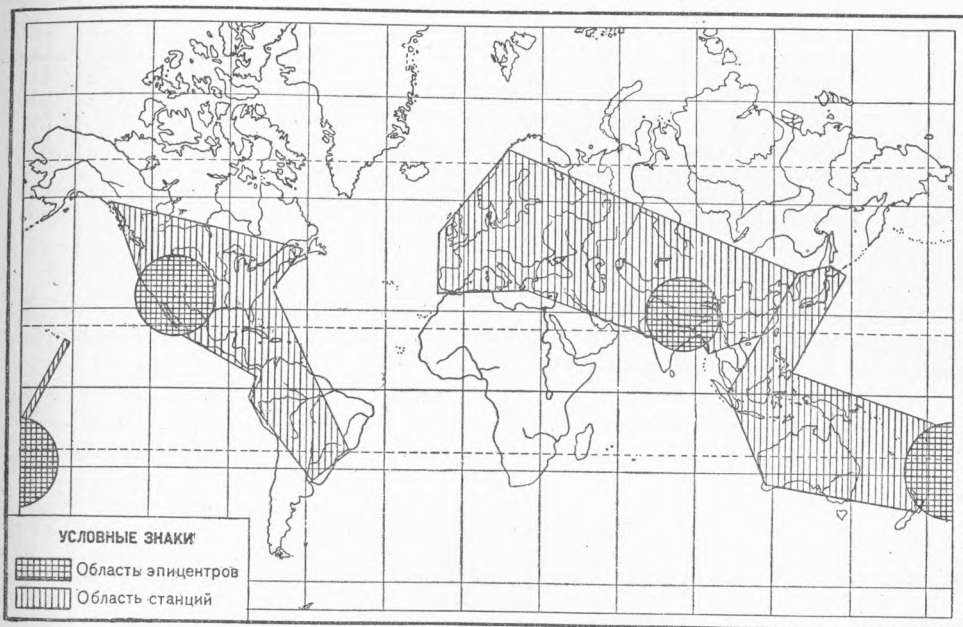
Полученные годографы разбивались затем на участки через 4° эпицентрального расстояния и для каждого из участков были вычислены средние значения времени пробега и средние квадратические отклонения (рассеяния) σ_t .

Результаты обработки годографов представлены в табл. 1, где второй столбец дает указанный ниже годограф Джефрейса. Столбцы n выражают

числа точек, содержащихся в упомянутых интервалах годографа. $\frac{\sigma_t}{\sqrt{n}}$ указывает рассеяние средних времен. Следующие столбцы выражают выравненные значения средних времен пробега.

Скорость распространения упругих волн вычисляется с помощью метода Вихерта, практическое применение которого весьма сложно, так как сначала требуется численное дифференцирование, а затем численное интегрирование.

Для решения поставленной в настоящей работе задачи достаточно знать только приращение скорости δv к некоторому среднему распределению скоростей внутри земли. С этой целью был использован приводимый ниже метод.



Фиг. 1.

Пусть по некоторому годографу с временами пробега t , принятому за стандартный, получена совокупность скоростей по формуле Вихерта. Имея в виду известное уравнение сейсмологии

$$\frac{v_c}{r_c} = \frac{\bar{v}}{r_0}, \quad (1)$$

где v_c и r_c — скорость и радиус-вектор средней (наиболее глубокой) точки траектории, r_0 — радиус земли, \bar{v} — кажущаяся скорость; $\bar{v} = \frac{1}{dt}$;

$\frac{dt}{d\Delta}$ — производная годографа.

Вводя величину $\eta_c = \frac{1}{v_c}$, перепишем (1):

$$\eta_c = \frac{r_0}{r_c} \frac{dt}{d\Delta}. \quad (2)$$

Δ°	Годограф Джефрейса	Европейско-азиатский годограф						Тихо-	
	t сек.	n	t сек.	τ_t	$\frac{\sigma_t}{\sqrt{n}}$	t сек. выравненное	δt	n	t сек.
10	141,2	29	145,1	18	3,4	145,1	58,5	29	144,4
14	195,0	29	202,6	9	1,6	203,6	48,9	23	200,9
18	245,5	48	253,5	14	2,0	252,5	41,0	34	261,5
22	291,7	82	293,5	13	1,4	293,5	39,3	81	292,5
26	333,1	58	332,8	14	1,8	332,8	38,5	75	337,6
30	370,8	51	371,3	17	2,4	371,3	38,2	56	377,7
34	405,9	22	412,5	12	2,6	409,5	35,5	26	402,7
38	439,6	38	442,0	11	1,8	445,0	33,4	22	445,5
42	472,4	58	478,4	11	1,4	478,4	32,0	17	479,4
46	503,9	83	510,4	10	1,1	510,4	31,0	14	504,0
50	533,9	83	541,4	10	1,1	541,4	27,7	40	544,7
54	562,6	102	567,1	9	0,9	569,1	26,4	39	570,0
58	590,4	107	597,9	8	0,8	595,9	27,0	49	597,3
62	617,5	124	622,5	8	0,7	622,5	24,6	59	622,0
66	644,0	117	647,1	8	0,7	647,1		51	651,4

Положим, что исследуемый нами годограф с временами пробега t_1 , составленный для какой-либо области, дает иное распределение скоростей, что мы выразим формулой:

$$\eta_c + \delta\eta_c = \frac{r_0}{r_c} \frac{dt_1}{d\Delta}. \quad (3)$$

Заменяя далее r_c через $r_0 - h$, а индекс c индексом h , приходим к формуле

$$\delta\eta_h = \frac{r_0}{r_0 - h} \left(\frac{dt_1}{d\Delta} - \frac{dt}{d\Delta} \right). \quad (4)$$

Возвращаясь теперь к скорости и пренебрегая бесконечно малыми более высокого порядка, имеем $d\eta_h = -\frac{dv_h}{v_h^2}$ и, таким образом,

$$dv_h = \frac{r_0}{r_0 - h} v_h^2 \left(\frac{dt}{d\Delta} - \frac{dt_1}{d\Delta} \right); \quad (5)$$

$t - t_1$ является отклонением исследуемого годографа от стандартного. Заменяя $t - t_1$ через τ_1 , получаем следующее выражение:

$$dv_h = \frac{r_0}{r_0 - h} v_h^2 \frac{d\tau_1}{d\Delta}. \quad (6)$$

В качестве стандартного годографа нами принят годограф Джефрейса 1932 г.⁽⁴⁾ и распределение скоростей, вычисленное Витте⁽⁵⁾ по этому годографу.

Первый, второй и четвертый столбцы табл. 2 содержат данные, вычисленные Витте. В следующих за производными* столбцах табл. 2 помещены приращения скорости dv в км/сек. В последнем столбце показаны разности между значениями скоростей, вычисленными Витте, и Дамом⁽⁶⁾, обработанным методом Вихерта годограф, составленный по данным калифорнийского землетрясения. Последний столбец следует сравнивать со столбцом приращений скорости под Америкой. Из сравнения видно, что характер

* Производные $\frac{d\tau}{d\Delta}$ найдены численным дифференцированием.

Таблица 1

океанский годограф				Американский годограф					
σ_f	$\frac{\sigma_f}{\sqrt{n}}$	t сек. выравненное	δt	n	t сек.	σt	$\frac{\sigma_f}{\sqrt{n}}$	t сек. выравненное	δt
17	3,1	144,4	59,5	43	146,3	19	2,9	146,3	
15	3,1	203,9	54,6	45	200,3	12	1,9	200,3	54,0
15	2,6	258,5	37,0	61	254,5	13	1,7	252,5	52,2
13	1,5	295,5	42,1	88	292,5	13	1,4	292,5	40,0
12	1,4	337,6	38,1	105	331,4	8	0,8	332,4	39,9
12	1,6	375,7	30,0	79	371,7	9	1,0	371,7	39,3
12	2,4	405,7	36,8	93	403,5	13	1,3	403,5	31,8
13	2,9	442,5	29,6	44	434,5	12	1,8	434,5	31,0
16	3,9	479,4	29,6	16	469,7	7	1,8	467,7	33,2
19	5,1	509,0	30,7	20	497,8	13	2,9	499,3	31,6
10	1,7	539,7	30,3	16	532,0	9	2,2	530,5	31,2
9	1,4	570,0	27,3	—	—	—	—	—	—
10	1,4	597,3	26,2	—	—	—	—	—	—
8	1,0	623,5	26,4	—	—	—	—	—	—
11	1,5	649,9	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 2

Δ°	h км	$\frac{r_0}{r_0-h}$	v_h км/сек	v_h^2	$\frac{dv}{d\Delta}$ сек/км			dv км/сек			Разность $v_{Вите} - v_{Дам}$
					Европейско-азиатский	Тихоокеанский	Американский	Азия	Тихий океан	Америка	
11,0	100	1,01	8,08	65,3	-0,0108	-0,0108	-0,0108	-0,71	-0,71	-0,12	-0,12
19,0	300	1,05	8,75	76,6	+0,0122	+0,0059	+0,0040	+0,98	+0,47	+0,32	-0,07
25,0	500	1,07	9,48	89,9	+0,0027	+0,0112	+0,0054	+0,26	+1,07	+0,52	+0,22
28,0	700	1,12	10,38	107,7	-0,0014	+0,0081	+0,0054	-0,17	+0,98	+0,65	+0,26
34,0	900	1,16	11,09	123,0	-0,0049	-0,0009	+0,0036	-0,70	-0,13	+0,51	+0,32
43,0	1 100	1,21	11,55	133,4	-0,0018	-0,0032	-0,0014	-0,29	-0,52	-0,23	+0,28
49,0	1 300	1,26	11,95	142,8	0,0000	-0,0005	-0,0018	-0,00	-0,09	-0,32	+0,12
56,5	1 500	1,31	12,29	151,0	+0,0018	0,0000	—	+0,36	0,00	—	+0,03
65,5	1 700	1,36	12,47	155,5	+0,0036	+0,0018	—	+0,76	+0,38	—	+0,06
			$\pm 0,05$								

распределения приращений dv под Америкой согласуется с ходом приращения в последнем столбце. Диаграммы выражают распределение частоты глубоких землетрясений по глубине (?). Ход кривых показывает нам их подобие. Наибольший интерес представляют максимумы и минимумы, которые указывают на изменение в характере роста скорости с глубиной. Первые, наиболее отчетливые максимумы dv характеризуют следующее замедление в росте скорости с глубиной, причем под Азией максимум кривой лежит примерно на глубине 300—350 км, под Тихим океаном на глубине 550—600 км и под Америкой на глубине около 700 км. Менее отчетливые минимумы dv , характеризующие дальнейшее усиление роста скорости с глубиной, располагаются на глубинах: около 900 км под Азией, около 1 100 км под Тихим океаном и приблизительно около

1200 км под Америкой. Упомянутые границы изображены на фиг. 2 жирным пунктиром. Менее характерными являются пересечения кривых с осью, так как точки указывают лишь на перемену знака. Верхняя граница пересечения погружается под Тихим океаном, следующая граница погружается при переходе от Азии к Америке. Границы эти указаны на чертеже тонкими пунктиром. Отметим, что граница замедления роста скорости с глубиной погружается от Азии к Америке, проходя через глубинные максимумы частоты глубоких землетрясений. Ниже этой границы глубоких землетрясений нет под Азией и Америкой и очень мало имеется под Тихим океаном.

Все сказанное выше приводит нас к следующим замечаниям, имеющим характер гипотез.

1. Существование очагов глубоких землетрясений и весьма интенсивные поперечные волны, излучаемые ими, повидимому, свидетельствуют о слое со свойствами твердого тела, простирающегося до первой границы уменьшения приращений скорости.

2. Замедление в росте скорости, начиная с указанной границы, может быть объяснено тем, что материал земли выше указанной границы находится в кристаллическом состоянии, а ниже — в стеклообразном. Это обстоятельство находит подтверждение в работе Бриджмена (8).

3. Переход из одной кристаллической фазы в другую сопровождается выделением или поглощением энергии и изменением объема (8), что может служить причиной глубоких землетрясений (9).

4. Кристаллизация внутри земли может происходить вследствие медленного охлаждения (10).

В заключение укажем, что прежнее представление о строении земли с расчленением на твердую и вязкую оболочку со «спокойной» границей раздела между ними чрезвычайно схематично и противоречит как существованию глубоких землетрясений, так и результатам настоящей работы.

Центральная Сейсмическая станция «Москва»
Сейсмологического института
Академия Наук СССР

Поступило
10 II 1940

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Тверской, Курс геофизики, гл. IV (1936). 2 Macelwane, Introduction to theoretical Seismology, part I (1936). 3 International Seismological Summary, Oxford. 4 Jeffreys, Tables the time of transmission of the p and s Waves of Earthquakes, Gray-Miln trust (1932). 5 Witte, Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, pp. 199—241 (1932). 6 Dahm, Bull. Seism. Soc. of America, 26, № 2 (1936). 7 Gutenberg a. Richter, Bull. Geological Soc. of America, 49, pp. 249—288 (1937). 8 Бриджмен, Физика высоких давлений, стр. 391—392; 229 (1935). 9 Macelwane, Bull. of the National research council physics of the earth, Seismology, p. 32 (1934). 10 Тамман, Стеклообразное состояние, стр. 134 (1935).