

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 (<sup>1,2</sup>).

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 (<sup>3</sup>) 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.

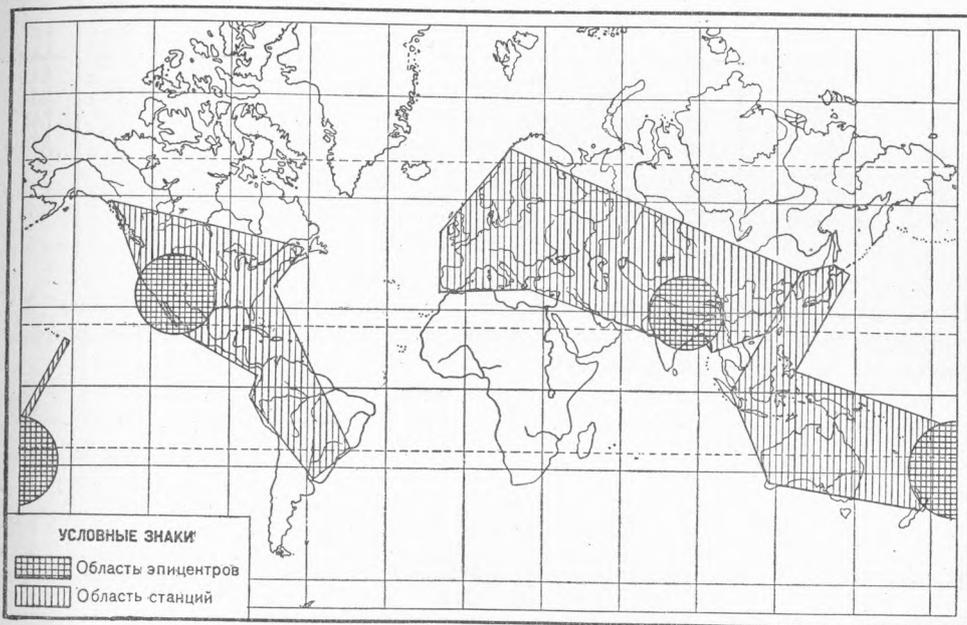
Полученные годографы разбивались затем на участки через  $4^\circ$  эпицентрального расстояния и для каждого из участков были вычислены средние значения времени пробега и средние квадратические отклонения (рассеяния)  $\sigma_t$ .

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  $\delta v$  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;  $\bar{v} = \frac{1}{dt} \frac{d\Delta}{d\Delta}$

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

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

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

$\Delta^\circ$	Годограф Джефрейса	Европейско-азиатский годограф						Тихо-	
	$t$ сек.	$n$	$t$ сек.	$\tau_t$	$\frac{\sigma_t}{\sqrt{n}}$	$t$ сек. выравненное	$\delta t$	$n$	$t$ сек.
10	141,2	29	145,1	18	3,4	145,1		29	144,4
14	195,0	29	202,6	9	1,6	203,6	58,5	23	200,9
18	245,5	48	253,5	14	2,0	252,5	48,9	34	261,5
22	291,7	82	293,5	13	1,4	293,5	41,0	81	292,5
26	333,1	58	332,8	14	1,8	332,8	39,3	75	337,6
30	370,8	51	371,3	17	2,4	371,3	38,5	56	377,7
34	405,9	22	412,5	12	2,6	409,5	38,2	26	402,7
38	439,6	38	442,0	11	1,8	445,0	35,5	22	445,5
42	472,4	58	478,4	11	1,4	478,4	33,4	17	479,4
46	503,9	83	510,4	10	1,1	510,4	32,0	14	504,0
50	533,9	83	541,4	10	1,1	541,4	31,0	40	544,7
54	562,6	102	567,1	9	0,9	569,1	27,7	39	570,0
58	590,4	107	597,9	8	0,8	595,9	26,4	49	597,3
62	617,5	124	622,5	8	0,7	622,5	27,0	59	622,0
66	644,0	117	647,1	8	0,7	647,1	24,6	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  $\tau_1$ , 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.<sup>(4)</sup> и распределение скоростей, вычисленное Витте<sup>(5)</sup> 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<sup>(6)</sup>, 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					
$\sigma_f$	$\frac{\sigma_f}{\sqrt{n}}$	$t$ сек. выравненное	$\delta t$	$n$	$t$ сек.	$\sigma t$	$\frac{\sigma_t}{\sqrt{n}}$	$t$ сек. выравненное	$\delta t$
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

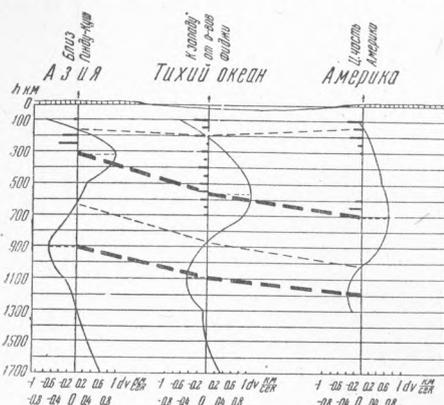
$\Delta^\circ$	$h$ км	$\frac{r_0}{r_0-h}$	$v_h$ км/сек	$v_h^2$	$\frac{dv}{dh}$ сек/км			$dv$ км/сек			Разность $v_{Вите}-v_{Дам}$
					Европейско-азиатский	Тихоокеанский	Американский	Азия	Тихий океан	Америка	
11,0	100	1,01	8,08	65,3	-0,0108	-0,0108	-0,0108	-0,71	-0,71	-0,12	-0,12
19,0	300	1,05	8,75	76,6	+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



Фиг. 2.

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).