

ГОДОГРАФЫ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ПОДЗЕМНЫХ ВЗРЫВОВ НА ОСТРОВЕ АМЧИТКА

© 2021 г. К. С. Непейна^а, *, В. А. Ан^б, **

^аНаучная станция РАН, Бишкек, 720049 Кыргызстан

^бИнститут динамики геосфер РАН им. академика М.А. Садовского,
Ленинский пр-т. 38, корп. 1, Москва, 119334 Россия

*e-mail: nepaina.k@mail.ru

**e-mail: vadiman33@gmail.com

Поступила в редакцию 17.06.2021 г.

После доработки 06.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Приводятся параметры времен пробега сейсмических волн от трех событий искусственного происхождения, полученные из архива Института динамики геосфер (ИДГ РАН). Для исследования выбраны подземные ядерные испытания (Long Shot, Milrow и Cannikin), с магнитудами $6.1 < m_b < 6.8$, проведенные Соединенными Штатами Америки с 1965 по 1971 гг. на острове Амчитка Алеутской дуги. Исследование содержит результаты наблюдений, полученных с различных типов сейсмических каналов. Построены годографы и получены линейные уравнения распространения продольных волн для эпицентральных расстояний $\Delta \sim 8^\circ\text{--}85^\circ$ и $\Delta \sim 134^\circ\text{--}160^\circ$. Сделаны оценки интегральной скорости верхней мантии и внешнего ядра Земли. Значения времени пробега волн предназначены для дальнейших исследований сейсмических волн от источников искусственного происхождения неглубокого заложения (701–1791 м) и уточнения строения Земли.

Ключевые слова: взрыв, шельф, время пробега, годограф, глубинные фазы продольных волн, эпицентрального расстояние

DOI: 10.31857/S0320791921060125

1. ВВЕДЕНИЕ

Объектом исследования является массив времен пробега продольных сейсмических волн, распространяющихся в земной коре и верхней мантии. В качестве исходных данных используются архивные материалы Института динамики геосфер РАН (ИДГ РАН): сейсмограммы от событий искусственной природы – подземных ядерных взрывов (ПЯВ). В основу данной статьи положены архивные материалы о сейсмических событиях искусственного происхождения, произошедших с 1965 по 1971 гг. на испытательном полигоне о. Амчитка Алеутской дуги, полученные в результате обращения к базе данных архива ИДГ РАН [1]. Три крупных испытания интересны тем, что мощность заложенных зарядов была беспрецедентной (табл. 1), сравнима только с испытаниями на Новой Земле [2]. Таблица 1 составлена с привлечением параметров о ПЯВ из [1]. Основным изучаемым параметром является время пробега (t_p), определенное по времени вступления продольной волны Р на записи вертикального сейсмометра. Для отображения информации эти

значения сведены в табличный вид для последующего анализа. В таблице использованы следующие обозначения столбцов: 1 – название испытания, 2 – календарная дата проведения испытания, 3 – время (T_0) приведено по Гринвичу, 4–5 географические координаты испытания: 4 – широта (градус), 5 – долгота (градус), 6 – глубина заложения заряда (h , м); 7 – высота поверхности в месте заложения заряда (H , м); 8 – магнитуда по объемным волнам (m_b), 9 – магнитуда по поперечным волнам (M_s) по [3]; 10 – примерная мощность подземного ядерного взрыва в килотоннах.

На о. Амчитка, относящемся к Алеутской дуге, Соединенные Штаты Америки провели три подземных испытания ядерных зарядов (табл. 1). Два взрыва, Milrow (1969 г.) и Cannikin (1971 г.), были заложены в андезитах и вызвали несколько сотен небольших землетрясений с магнитудой по объемным волнам (m_b) до 4, которые, как считается, были связаны с разрушением полости взрыва. Последовательности завершились крупными сложными событиями (камнепадами и движениями почвы по всему острову) и одновременным

Таблица 1. Параметры подземных ядерных взрывов (ПЯВ), рассматриваемых в данном исследовании, проведенных на испытательной площадке Амчитка

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	Long Shot	29.10.1965	21:00:00.08	51.424	179.179	701	42	6.1	4.6	80
II	Milrow	02.10.1969	22:06:00.04	51.403	179.179	1217	40	6.5	5.0	1.1×10^3
III	Cannikin	06.11.1971	22:00:00.06	51.456	179.102	1791	63	6.8	5.7	5×10^3

проседанием поверхности в результате окончательного обрушения полости взрыва. В случае испытания Cannikin небольшие события продолжались на расстояниях до 13 км от пункта взрыва в течение нескольких недель. Изучением последствий от этих испытаний занимаются ученые из разных областей науки [4, 5], в том числе и гидрогеологии [6]. Эти события вызывают особый интерес еще и за счет удаленности источника от приемных станций на эпицентральных расстояниях от $\Delta \approx 8^\circ$ до $\Delta \approx 160^\circ$, что делает возможным изучение глубинного строения Земли. Рассмотрение удаленных (телесейсмических событий) по данным станций СССР подробно исследуется в работах О.К. Кедрова [7–9]. Таким образом, наблюдаются телесейсмические фазы продольных волн – отраженные от границы внутреннего ядра Земли. С помощью таких построений изучают плотностные свойства среды распространения, в особенности от источников, расположенных в шельфовых зонах [10]. Такие импульсные события производят эффекты как акустические, инфразвуковые и сейсмические, зарегистрированные ам-

плитуды которых позволяют оценить энергетические свойства источника возбуждения волн вне зависимости от природы события – искусственного или природного происхождения [11–13]. Удастся решать задачи по выявлению структурных особенностей внутреннего строения Земли [14, 15], в особенности при распространении волн от шельфовых областей к материковым [16]. Так, например, в работах [17, 18] развит подход к определению спектральных отношений P_cP/P , основанный на соотношении их с тонкослойными моделями границы кора–мантия. Одна из разработанных моделей, Я-10, по их мнению, состоит из двух слоев: первый, толщиной около 7 км, имеет скорость P-волн 12.7 км/с, а другой – толщиной 8 км – обладает скоростью P-волн 17 км/с. Для станций, расположенных в Индии, времена пробега для фаз iP , eP , PP , P_cP , S и SKS получены еще в 1974 [3]. Для станций на полуострове Аляска получены записи взрыва Long Shot iP , eP , P_cP в диапазоне 0° – 27° в 1967 г. [19]. Поэтому полученные в данной работе результаты по записям советских станций дополняют исследования о распространении продольных волн в верхней мантии Земли от ПЯВ о. Амчитка [20]. В дальнейшем интерес представляет сравнение результатов, полученных в диапазоне $\Delta^\circ \sim 8^\circ$ – 85° , для станций Индии [3] и СССР.

Рассматриваемые ПЯВ для построения годографа примечательны тем, что их удалось зарегистрировать сразу несколькими сейсмическими станциями СССР. Сейсмограммы записывались на различных сейсмических станциях Советского Союза аппаратурой с разными типами сейсмоизмерительных каналов.

Пример регистрации ПЯВ Cannikin (06.11.1971), произведенного на острове Амчитка, станциями Центральной Азии показан на рис. 1. Станция Талгар ($\varphi = 43.2300^\circ$, $\lambda = 77.2300^\circ$) относилась к Казахской ССР, Фрунзе ($\lambda = 42.8333^\circ$, $\varphi = 74.6167^\circ$) и Нарын ($\varphi = 41.4333^\circ$, $\lambda = 76.00008^\circ$) – к Киргизской ССР.

По данным Института динамики геосфер РАН все три испытания на территории СССР были зафиксированы на многих сейсмических станциях. Первое испытание (Long Shot) было зарегистрировано 30 станциями СССР, второе (Milrow) – 66,

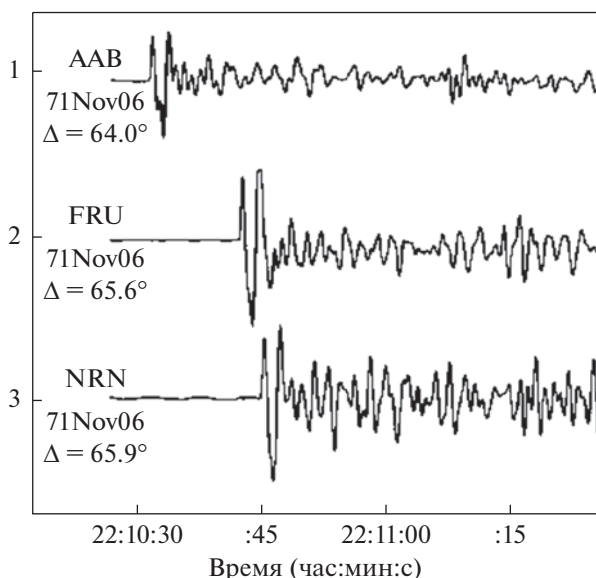


Рис. 1. Пример сейсмограмм подземного ядерного взрыва Cannikin (06.11.1971 г.) на о. Амчитка (Алеутские о-ва, США) на станциях Талгар (AAB), Фрунзе (FRU), Нарын (NRN) [21].

Таблица 2. Параметры регистрации продольных волн от испытания Long Shot (№ I, табл. 1)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	PET	Петропавловск-Камчатский	53.0169	158.6500	12.6855	285.25	СКМ	+iP	21:03:02.4
2	SKR	Северо-Курильск	50.6830	156.1170	14.5145	276.11	ВЭГ	iP	21:03:26.4
3	YAK	Якутск	62.0167	129.7170	28.4188	311.13	СК	+iP	21:05:55.2
4	TIK	Тикси	71.6333	128.8667	29.9720	330.77	СКМ	+iP	21:06:06.6
5	VLA	Владивосток	43.1200	131.8933	32.6435	274.16	СКМ	+iP	21:06:32.3
6	BOD	Бодайбо	57.8500	114.1833	36.8302	306.06	СКМ	+iP	21:07:07.3
7	IRK	Иркутск	52.2717	104.3100	44.3092	301.88	СК	eP	21:09:55.1 21:07:55.1
8	ZAK	Закаменск	50.3833	103.2833	45.8385	300.06	СКМ	+iP	21:08:22.2
9	MOY	Монды	51.6833	100.9833	46.3752	302.66	СКМ	+iP	21:08:26.1
10	UER	Усть-Элегест	51.5630	94.0870	50.0134	305.74	СКМ	+iP	21:08:54.1
11	ELT	Ельцовка	53.2530	86.2770	52.8261	311.14	СКМ	+iP	21:09:14.7
12	CUR	Чаган-Узун	50.1000	88.3500	53.7937	307.06	СКМ	+iP	21:09:23.0
13	SEM	Семипалатинск	50.4083	80.2500	57.5173	311.47	СКМ	+iP	21:09:48.1
14	APA	Апатиты	67.5690	33.4050	58.5763	345.35	СКМ	+iP	21:09:53.0
15	SVE	Свердловск	56.8270	60.6370	60.8644	326.43	СКМ	+iP	21:10:13.1
16	TLG	Талгар	43.2300	77.2300	64.0613	307.33	СКМ	+iP	21:10:34.0
17	PRZ	Пржевальск	42.4833	78.4000	64.0613	306.06	СК	+iP	21:10:34.5
18	FRU	Фрунзе	42.8333	74.6167	65.6445	308.60	СКМ	+iP	21:10:44.6
19	ANR	Андижан	40.7550	72.3600	68.3188	308.51	СК	+iP	21:10:30.4
20	TAS	Ташкент	41.3250	69.2950	69.3571	310.81	СК	+iP	21:11:00.9
21	KHO	Хорог	37.4833	71.5333	71.2460	306.82	СК	+iP	21:11:20.4
22	KAT	Кизил-Арват	39.0280	56.2700	77.0530	317.86	СК	eP	21:11:53.3
23	ASH	Ашхабад	37.9500	58.3500	77.0645	315.85	СК	+iP	21:11:55.3
24	UZH	Ужгород	48.6310	22.2930	78.3796	344.58	СКМ	+iP	21:11:59.4
25	SOC	Сочи	43.5833	39.7167	79.0541	331.25	СКМ	eP	21:12:04.9
26	TIF	Тбилиси	41.7167	44.8000	79.1003	326.98	СК	eP	21:12:05
27	SIM	Симферополь	44.9490	34.1160	79.3662	335.56	СХ	eP	21:12:05.6
28	BKR	Бакуриани	41.7333	43.5167	79.5182	327.86	СКМ	+iP	21:12:06.5
29	KRV	Кировобад	40.6470	46.3190	79.5197	325.44	СХ	+iP	21:12:05.7 21:12:06.7
30	GRS	Горис	39.5000	46.3333	80.5282	324.89	СК	+eP	21:12:13.7

третье (Cannikin) – 69. Результаты регистрации основных фаз продольных волн (P) приведены в табл. 2–4. Фазы обозначены следующими индексами, принятыми в период регистрации событий. Для случая отражения от границы внутреннего ядра Земли: i – “четкое вступление”, e – “слабое вступление”, “+” – положительное вступление,

“–” – отрицательное вступление. Если индекс отсутствует, оператор сейсмостанции не смог определить характер вступления. Обозначения для телесейсмических фаз, прошедших через ядро Земли: iPKiKP – отраженная от границы внутреннего ядра P-волна, iPKHKP – устаревшее название отраженной продольной сейсмической

Таблица 3. Параметры регистрации продольных волн от испытания Milrow (№ II, табл. 1)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BKI	Беринг о.	55.2040	165.9720	8.7751	300.85	СКМ	iP	22:08:07.2
2	PET	Петропавловск-Камчатский	53.0169	158.6500	12.6910	285.34	СКМ	iP	22:09:05
3	ESO	Эссо	55.9250	158.7000	14.3113	314.53	СКМ	iP	22:09:00.7 22:09:15
4	SKR	Северо-Курильск	50.6830	156.1170	14.5167	276.19	ВЭГ	eP	22:09:22.9
5	ILT	Иульгин	67.8700	-178.7300	16.5520	2.78	СКМ	iP	22:09:52
6	MAG	Магадан	59.5540	150.8050	17.9126	308.11	СК	+iP	22:10:10.0
7	KUR	Курильск	45.2333	147.8667	21.6070	265.74	СК	+iP	22:10:51.6
8	YSS	Южно-Сахалинск	46.9583	142.7610	24.0495	273.76	СКД	+iP	22:11:16.2
9	KLR	Кульдур	49.2300	131.7500	29.9521	284.78	СК	iP	22:12:07.9
10	TIK	Тикси	71.6333	128.8667	29.9904	330.79	ВК	iP	22:12:08
11	VLA	Владивосток	43.1200	131.8933	32.6450	274.19	СК	iP	22:12:33
12	TUP	Тупик	54.4333	119.9000	34.9563	298.77	СКМ	iP	22:12:50.4
13	BOD	Бодайбо	57.8500	114.1833	36.8426	306.08	СКМ	+iP	22:13:07.6
14	KAB	Кабанск	52.0500	106.6540	43.1747	300.58	СКД	iP	22:14:00.7
15	KHE	Хейс	80.6167	58.0500	44.2917	348.39	СКМ	+iP	22:14:09
16	IRK	Иркутск	52.2717	104.3100	44.3203	301.89	СК	eP	22:14:10
17	ZAK	Закаменск	50.3833	103.2833	45.8490	300.08	СКМ	iP	22:14:22.4
18	MOY	Монды	51.6833	100.9833	46.3865	302.68	СКМ	+eP	22:14:09.5 22:14:19.5
19	ELT	Ельцовка	53.2530	86.2770	52.8399	311.15	СКМ	+iP	22:15:14.6
20	NVS	Новосибирск	54.8404	83.2346	53.2491	314.11	СКМ	+iP	22:15:18.0
21	CUR	Чаган-Узун	50.1000	88.3500	53.8064	307.07	СКМ	-iP	22:15:22.4
22	SEM	Семипалатинск	50.4083	80.2500	57.5313	311.48	СМЗ	iP	22:15:48.4
23	APA	Апатиты	67.5690	33.4050	58.5966	345.35	СД	iP	22:15:54.2
24	BRVK	Боровое	53.0581	70.2828	60.0624	318.78	СКМ	+iP	22:16:06.6
25	SVE	Свердловск	56.8270	60.6370	60.8819	326.44	СКМ	iP	22:16:02
26	KRM	Курменты	42.9870	78.2750	63.4886	306.25	СКМ	+iP	22:16:32
27	PRZ	Пржевальск	42.4833	78.4000	64.0317	306.07	СКМ	iP	22:16:34.5
28	TLG	Талгар	43.2300	77.2300	64.0741	307.34	СКМ	iP	22:16:33.5
29	FRU	Фрунзе	42.8333	74.6167	65.6576	308.61	СКМ	iP	22:16:45
30	NRN	Нарын	41.4333	76.0000	66.0148	306.74	СКМ	iP	22:16:47.0
31	PUL	Пулково	59.7667	30.3167	66.3587	343.40	СГ	iP	22:16:46
32	ANR	Андижан	40.7550	72.3600	68.3319	308.51	СКМ	eP	22:17:02.1
33	MOS	Москва	55.7383	37.6250	68.5673	337.80	СХ	P	22:17:04
34	FRG	Фергана	40.3833	71.7833	68.8987	308.62	СК	+iP	22:17:05
35	MXV	Михнево	54.9595	37.7664	69.2426	337.38	СКМ	iP	22:17:05
36	MUR	Мургаб	38.3667	73.9333	69.3686	305.87	СК	iP	22:17:09.6
37	TAS	Ташкент	41.3250	69.2950	69.3709	310.82	СКМ	iP	22:17:08
38	GAR	Гарм	39.0000	70.3167	70.6845	308.62	СКМ	iP	22:17:16.3
39	KHO	Хорог	37.4833	71.5333	71.2586	306.82	СК	iP	22:17:19.8
40	SAM	Самарканд	39.6733	66.9900	71.7551	311.20	СК	+iP	22:17:23
41	DSH	Душанбе	38.5583	68.7750	71.7803	309.32	СК	+iP	22:17:22.4
42	KUL	Куляб	37.9000	69.7800	71.8052	308.24	СК	iP	22:17:22.8
43	LVV	Львов	49.8190	24.0310	76.9550	343.77	СКД	iP	22:17:51
44	KAT	Кизил-Арват	39.0280	56.2700	77.0686	317.86	СК	iP	22:17:54
45	MAK	Махачкала	42.9610	47.5050	77.0806	325.77	СК	eP	22:17:54.0
46	GRO	Грозный	43.3200	45.7500	77.3723	327.10	СК	iP	22:18:01

Таблица 3. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
47	KSV	Косов	48.3150	25.0667	78.2152	342.68	СКД	iP	22:17:58
48	MEZ	Межгорье	48.5140	23.5140	78.3044	343.75	СКМ	iP	22:17:58.6
49	UZH	Ужгород	48.6310	22.2930	78.3999	344.58	СКМ	iP	22:18:00
50	BAK	Баку	40.3833	49.9000	78.4547	322.88	СК	+iP	22:18:04
51	SOC	Сочи	43.5833	39.7167	79.0725	331.25	СМ	eP	22:18:03
52	GOR	Гори	41.9833	44.1167	79.1119	327.57	СКМ	iP	22:18:04.0
53	TIF	Тбилиси	41.7167	44.8000	79.1180	326.98	СК	eP	22:18:04
54	ZUG	Зугдиди	42.5167	41.8833	79.3656	329.32	СК	-iP	22:18:05
55	SIM	Симферополь	44.9490	34.1160	79.3854	335.56	СК	eP	22:18:05
56	BKR	Бакуриани	41.7333	43.5167	79.5360	327.86	СКМ	iP	22:18:06.5
57	KRV	Кировобад	40.6470	46.3190	79.5370	325.45	СКМ	iP	22:18:01.2
58	ALU	Алушта	44.6820	34.4030	79.5590	335.27	СХ	eP	22:18:05.3
59	ABS	Абастумани	41.7500	42.8100	79.7549	328.35	СМЗ	eP	22:17:43.0
60	YAL	Ялта	44.4875	34.1547	79.8049	335.36	СХ	+	22:18:06
61	STE	Степанован	41.0000	44.3700	79.9030	326.95	СХ	eP	22:17:37.0
62	LNK	Ленкорань	38.7580	48.8520	80.2666	322.79	СХ	eP	22:18:18
63	ERE	Ереван	40.1700	44.4700	80.5045	326.29	СК	+iP	22:18:12.0
64	GRS	Горис	39.5000	46.3333	80.5454	324.89	СК	eP	22:18:14
65	MIR	Мирный	-66.5510	93.0170	134.2336	213.87	СКМ	+iPKiKP	22:25:12
66	NVL	Новолазаревская	-70.7667	11.8333	159.7180	192.09	УСФ	iPKiKP	22:25:57

волны (нынешнее PKP_{grg}) в результате рассеяния вблизи границы ядра, волна-предшественник PKP_{df}.

Во всех таблицах столбцы пронумерованы в следующем порядке: 1 – порядковый номер, 2–5 – параметры сейсмостанции: 2 – код сейсмостанции, 3 – название сейсмостанции, 4 – широта (градус), 5 – долгота (градус), 6 – эпицентральный расстояние от испытания до сейсмостанции (Δ°), 7 – азимут от эпицентра (Az°), 8 – тип сейсмического канала (ВЭГ – вертикальный гальванометрический сейсмограф Голицына, СД – сейсмограф длиннопериодный, СК – сейсмограф Кирноса, СМЗ – магнитоэлектрический сейсмоприемник, СКМ – сейсмограф Кирноса модифицированный, СХ – сейсмограф Харина, СКД – сейсмограф Кирноса длиннопериодный, КГ – сейсмограф Кирноса гальванометрический, УСФ – универсальный сейсмометр Федосеенко), 9 – тип фазы вступления продольной сейсмической волны (если указан “+”, то наблюдалась положительная амплитуда, если “–”, то отрицательная, если знак отсутствует, то “неизвестно” (ошибка оператора), 10 – время вступления сейсмической волны (t_p) (в формате час:мин:с).

Жирным шрифтом выделены времена вступления сигнала, не соответствующие эпицентральному расстоянию. Вероятно, при регистрации были допущены описки. В результате обра-

ботки в ходе построения годографов в данные о временах пробега внесены изменения, которые отмечены курсивом. В противном случае, использование исходных значений вносит существенные отклонения от линейной зависимости. В остальных случаях время пробега укладывается в прямую линию годографа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Времена пробега принято использовать для построения годографов, по наклону которых можно судить об интегральной скорости распространения сейсмических волн. Для их построения применяется стандартная процедура регрессионного анализа путем нахождения зависимости $t_p = F(\Delta^\circ) = k\Delta^\circ + b$, как это было сделано в предыдущих работах [22, 23]. Для этого использовались параметры времени пробега отраженных продольных волн для всех расстояний для каждого отдельного взрыва и эпицентрального расстояния (Δ°). Значения величин эпицентральных расстояний (Δ°) и времен пробега (t_p) взяты из таблиц 2–4. Общий вид линейного годографа для трассы приемная станция–место взрыва представлен на рис. 2–4. Таким образом, результаты, полученные по всем трем испытаниям, аппроксимируются несколькими отрезками линейных функций. Однако для отображения годографов результаты для дальних эпицентральных расстоя-

Таблица 4. Параметры регистрации продольных волн от испытания Cannikin (№ III, табл. 1)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	BKI	Беринг о.	55.2040	165.9720	8.7065	300.66	СКМ	iP	22:02:05.6
2	PET	Петропавловск-Камчатский	53.0169	158.6500	12.6306	88.95	СМЗ	iP	22:02:59
3	ESO	Эссо	55.9250	158.7000	14.2357	314.46	СКМ	iP	22:03:13.5
4	SKR	Северо-Курильск	50.6830	156.1170	14.4632	278.95	СД	+iP	22:03:24.0
5	ILT	Иультин	67.8700	-178.7300	16.5013	2.89	СКМ	iP	22:03:51.7
6	MAG	Магадан	59.5540	150.8050	17.8419	308.01	СКМ	eP	22:04:09.0
7	SEY	Сеймчан	62.9330	152.3730	18.3209	319.11	СКМ	+iP	22:04:13.3
8	KUR	Курильск	45.2333	147.8667	21.5630	265.54	СД	+iP	22:04:52
9	OKH	Оха	53.5500	142.9330	21.9700	289.73	СК	+iP	22:04:54.5
10	UGL	Углегорск	49.0780	142.0660	23.6321	278.89	СД	+iP	22:05:12.3
11	YSS	Южно-Сахалинск	46.9583	142.7610	23.9980	273.59	СМЗ	+iP	22:05:15.5
12	YAK	Якутск	62.0167	129.7170	28.3614	311.08	СМЗ	iP	22:05:52
13	TIK	Тикси	71.6333	128.8667	29.9205	330.76	СКМ	iP	22:06:06
14	VLA	Владивосток	43.1200	131.8933	32.5931	274.06	СКМ	iP	22:06:32
15	TUP	Тупик	54.4333	119.9000	34.8885	298.67	СКМ	+iP	22:06:49.8
16	BOD	Бодайбо	57.8500	114.1833	36.7724	306.00	СКМ	+iP	22:07:06.9
17	NRI	Норильск	69.4300	88.0830	43.4639	329.09	СМЗ	iP	22:08:02
18	KHE	Хейс	80.6167	58.0500	44.2300	348.37	СКМ	iP	22:08:09
19	IRK	Иркутск	52.2717	104.3100	44.2514	301.81	СКМ	+iP	22:08:08.5
20	ZAK	Закаменск	50.3833	103.2833	45.7807	300.00	СКМ	iP	22:08:21.4
21	MOY	Монды	51.6833	100.9833	46.3173	302.60	СКМ	+iP	22:08:25.8
22	ELT	Ельцовка	53.2530	86.2770	52.7687	311.08	СМЗ	iP	22:09:14.1
23	NVS	Новосибирск	54.8404	83.2346	53.1776	314.04	СКМ	+iP	22:09:16.1
24	APA	Апатиты	67.5690	33.4050	58.5331	345.31	СМ	iP	22:09:54
25	BRVK	Боровое	53.0581	70.2828	59.9907	318.72	СКМ	+iP	22:10:06.0
26	SVE	Свердловск	56.8270	60.6370	60.8110	326.39	СМЗ	iP	22:10:11
27	AAA	Алма-Ата	43.2717	78.9467	63.1129	306.28	?	iP	22:10:33
28	PRZ	Пржевальск	42.4833	78.4000	63.9615	306.00	СК	iP	22:10:34
29	TLG	Талгар	43.2300	77.2300	64.0036	307.27	СМЗ	iP	22:10:33.4
30	FRU	Фрунзе	42.8333	74.6167	65.5868	308.54	СМ	iP	22:10:45
31	NRN	Нарын	41.4333	76.0000	65.9445	306.68	СМ	iP	22:10:47.0
32	PUL	Пулково	59.7667	30.3167	66.2941	343.36	СГ	iP	22:10:46
33	ANR	Андижан	40.7550	72.3600	68.2611	308.45	СК	+iP	22:11:01.2
34	MOS	Москва	55.7383	37.6250	68.4999	337.75	СК	+iP	22:11:08
35	FRG	Фергана	40.3833	71.7833	68.8275	308.55	СК	+iP	22:11:04
36	OBN	Обнинск	55.1667	36.6000	69.2629	338.07	СКМ	+iP	22:11:05.2
37	MUR	Мургаб	38.3667	73.9333	69.2985	305.80	СК	iP	22:11:09
38	TAS	Ташкент	41.3250	69.2950	69.2997	310.75	СК	iP	22:11:07.5
39	GAR	Гарм	39.0000	70.3167	70.6137	308.55	СКМ	+iP	22:11:15.3
40	KHO	Хорог	37.4833	71.5333	71.1882	306.76	СК	iP	22:11:20
41	SAM	Самарканд	39.6733	66.9900	71.6838	311.13	СК	+iP	22:11:22
42	DSH	Душанбе	38.5583	68.7750	71.7094	309.26	СК	iP	22:11:23
43	KAT	Кизил-Арват	39.0280	56.2700	76.9969	317.80	СК	iP	22:11:53
44	ASH	Ашхабад	37.9500	58.3500	77.0080	315.79	СК	+iP	22:11:53.7
45	MAK	Махачкала	42.9610	47.5050	77.0096	325.71	СК	iP	22:11:51.8
46	GRO	Грозный	43.3200	45.7500	77.3016	327.04	СК	iP	22:11:53
47	PYA	Пятигорск	44.0333	43.0583	77.5567	329.16	СК	iP	22:11:55.1
48	CRA	Черновцы	48.2833	25.9333	78.0161	342.05	СКД	eP	22:11:56.2

Таблица 4. Окончание

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
49	KSV	Косов	48.3150	25.0667	78.1502	342.63	СМ3	iP	22:11:57.5
50	MEZ	Межгорье	48.5140	23.5140	78.2399	343.70	СМ3	iP	22:11:58.7
51	UZH	Ужгород	48.6310	22.2930	78.3359	344.53	СМ	iP	22:11:57.5
52	BAK	Баку	40.3833	49.9000	78.3833	322.82	СК	iP	22:12:00
53	ANN	Анапа	44.8000	37.4330	78.5578	333.23	СД	iP	22:11:40 22:12:00
54	KIS	Кишинев	46.9980	28.8180	78.6515	339.75	СК	iP	22:12:00
55	DUS	Душети	42.0833	44.7000	78.7552	327.16	СК	+iP	22:12:02.4
56	SOC	Сочи	43.5833	39.7167	79.0028	331.19	СД	iP	22:12:02
57	TIF	Тбилиси	41.7167	44.8000	79.0472	326.93	КГ	+iP	22:12:03
58	ZUG	Зугдиди	42.5167	41.8833	79.2059	329.27	СХ	-iP	22:12:05
59	SIM	Симферополь	44.9490	34.1160	79.3171	335.50	СК	eP	22:12:04
60	BKR	Бакуриани	41.7333	43.5167	74.4654	327.81	СМ3	iP	22:12:06.0 22:11:50
61	KRV	Кировобад	40.6470	46.3190	79.4660	325.39	СМ	iP	22:12:05.3
62	ALU	Алушта	44.6820	34.4030	79.4906	335.21	СК	+iP	22:12:05 22:12:06
63	ABS	Абастумани	41.7500	42.8100	79.6844	328.30	СМ3	+iP	22:12:07.0
64	YAL	Ялта	44.4875	34.1547	79.7366	335.21	СХ	eP	22:12:05.9
65	STE	Степанаван	41.0000	44.3700	79.8322	326.89	СКМ	eP	22:12:08.0
66	LNK	Ленкорань	38.7580	48.8520	80.1952	322.73	СК	eP	22:12:10.5
67	GRS	Горис	39.5000	46.3333	80.4743	324.84	СК	+iP	22:12:11
68	MIR	Мирный	-66.5510	93.0170	134.2508	213.88	СКМ	iPKHKP	22:19:02
69	NVL	Новолазаревская	-70.7667	11.8333	159.7598	192.19	УСФ	iPKiKP	22:19:56

ний $\Delta \sim 134^\circ$ (станция MIR) и $\Delta \sim 160^\circ$ (станция NVL) на этих рисунках не приведены, главным образом, из-за соображений удобства отображения и унификации вида графиков для трех взрывов в диапазоне $\Delta \sim 8^\circ-85^\circ$. Поэтому результаты построений годографов для взрывов Milrow и Cannikin в диапазоне $\Delta \sim 134^\circ-160^\circ$ приведены на рис. 5. Очевидно, что поскольку взрывы Milrow и

Cannikin были мощнее, чем первый взрыв Long Shot, то продольные волны только от них были зарегистрированы на телесеизмических расстояниях более 130° . Такими станциями оказались антарктические – на Южном полюсе Земли [24]. На станции Новолазаревская для взрывов Milrow и Cannikin зарегистрирована фаза iPKiKP отраженной волны от границы внутреннего ядра Р-волна.

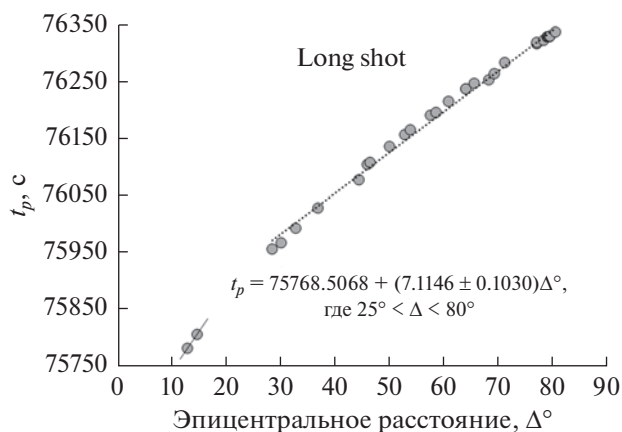


Рис. 2. Годограф для фаз iP/eP испытания Long Shot.

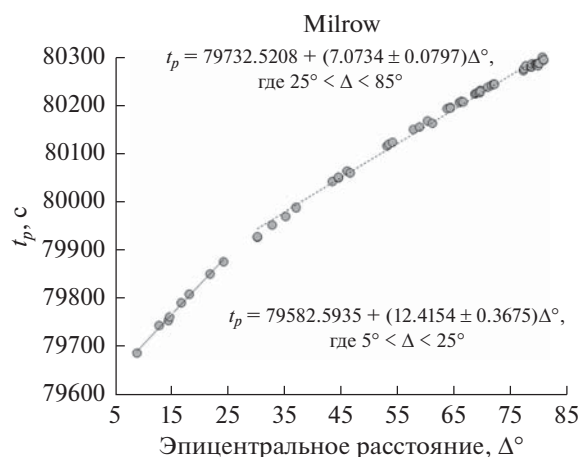


Рис. 3. Годограф для фаз iP/eP испытания Milrow.

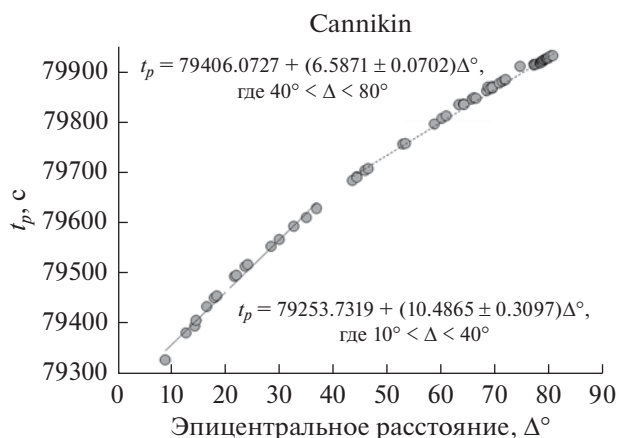


Рис. 4. Годограф для фаз iP/eP испытания Cannikin.

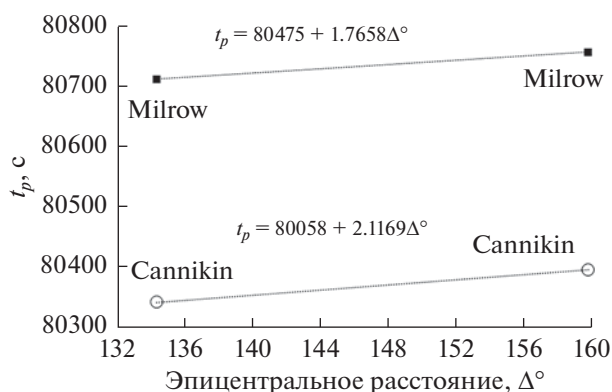


Рис. 5. Годограф для фаз iPKiKP/iPKHKP испытаний Milrow и Cannikin в диапазоне эпицентральных расстояний $\Delta \sim 134^\circ - 160^\circ$.

На станции Мирный для взрыва Cannikin получено время пробега для другой фазы продольной волны iPKHKP (нынешнее обозначение PKPpre).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате использования времен пробега продольных волн для трех различных по мощности сейсмических событий искусственного происхождения, произведенных на о. Амчитка в 1965, 1969 и 1971 гг., получены линейные зависимости уравнения регионального годографа, где t_p – время пробега волны, Δ – эпицентральный расстояние:

Long Shot:

$$t_p(c) = 75615.9418 + 13.1219\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 10^\circ < \Delta < 25^\circ;$$

$$t_p(c) = 75768.5068 + (7.1146 \pm 0.1030)\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 25^\circ < \Delta < 80^\circ;$$

Milrow:

$$t_p(c) = 79582.5935 + (12.4154 \pm 0.3675)\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 5^\circ < \Delta < 25^\circ;$$

$$t_p(c) = 79732.5208 + (7.0734 \pm 0.0797)\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 25^\circ < \Delta < 85^\circ;$$

$$t_p(c) = 80475 + 1.7658\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 134^\circ < \Delta < 160^\circ;$$

Cannikin:

$$t_p(c) = 79253.7319 + (10.4865 \pm 0.3097)\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 10^\circ < \Delta < 40^\circ;$$

$$t_p(c) = 79406.0727 + (6.5871 \pm 0.0702)\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 40^\circ < \Delta < 80^\circ;$$

$$t_p(c) = 80058 + 2.1169\Delta^\circ \text{ в диапазоне } 134^\circ < \Delta < 160^\circ.$$

Обобщенная интегральная скорость принимаемой сейсмической волны iP, исходя из графического решения, равна:

Long Shot:

$$V_p \approx 13 \text{ км/с для } 10^\circ < \Delta < 25^\circ;$$

$$V_p \approx 7 \text{ км/с для } 25^\circ < \Delta < 80^\circ;$$

Milrow:

$$V_p \approx 12 \text{ км/с для } 5^\circ < \Delta < 25^\circ;$$

$$V_p \approx 7 \text{ км/с для } 25^\circ < \Delta < 80^\circ;$$

Cannikin:

$$V_p \approx 10 \text{ км/с для } 10^\circ < \Delta < 40^\circ;$$

$$V_p \approx 7 \text{ км/с для } 40^\circ < \Delta < 80^\circ.$$

Полученные величины скорости продольных волн согласуются с данными, полученными И.П. Пасечником [11], И.С. Берзон [17] и С.Д. Коган [18], а также приведенным годографом IASPEI 1991 г.

Авторы благодарят сотрудников ИДГ РАН Л.Д. Годунову и Т.В. Челюбееву за неоценимую помощь в подборе материала для статьи. Систематизация данных о параметрах сейсмических волн получена благодаря доступу к архиву Института динамики геосфер РАН, созданному при поддержке гранта РФФИ № 97-07-90225. Работа выполнена по Государственному заданию Научной станции РАН в г. Бишкеке АААА-А19-119020190064-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Springer D.L., Pawloski G.A., Ricca J.L., Rohrer R.F., Smith D.K. Seismic Source Summary for All U.S. Below-Surface Nuclear Explosions // Bull. Seism. Soc. Am. 2002. V. 92. № 5. P. 1806–1840. <https://doi.org/10.1785/0120010194>
2. McKeown F.A., Dickey D.D. Fault displacements and motion related to nuclear explosions // Bull. Seism. Soc. Am. 1969. T. 59. № 6. P. 2253–2269.

3. *Srivastava H.N., Chaudhury H.M.* P-wave anomalies from CANNIKIN at the Indian stations // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1974. V. 64. № 4. P. 1329–1335.
4. *Engdahl E.R.* Seismic effects of the Milrow and Cannikin Nuclear Explosions (in Cannikin Nuclear Explosion) // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1972. V. 62. № 6. P. 1411–1423.
5. *Foulger G.R., Wilson M.P., Gluyas J.G., Julian B.R., Davies R.J.* Global review of human-induced earthquakes // *Earth-Science Reviews*. 2018. V. 178. P. 438–514.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.008>
6. *Горбунова Э.М., Виноградов Е.А., Беседина А.Н., Гашиев Д.В.* Реакция подземных вод на землетрясения и крупномасштабные взрывы // *ГИАБ*. 2017. № 1. С. 273–290.
7. *Кедров О.К., Ан В.А., Лаушкин В.А., Люкэ Е.И., Овчинников В.М., Поликарпова Л.А.* Методы контроля подземных ядерных взрывов по сейсмическим данным на эпицентральных расстояниях свыше 500 километров // *Изв. АН СССР, Физика Земли*. 1990. № 12. С. 31–46.
8. *Kedrov E.O., Kedrov O.K.* Spectral time method of identification of seismic events at distances of 15°–40° // *Izv. Phys. Solid Earth*. 2006. V. 42. P. 398–415.
<https://doi.org/10.1134/S1069351306050041>
9. *Кедров О.К.* Сейсмические методы контроля ядерных испытаний. М.: Ин-т физики Земли РАН, 2005.
10. *Рутенко А.Н.* Влияние внутренних волн на распространение звука в шельфовой зоне Японского моря в разные сезоны года // *Акуст. журн.* 2005. Т. 51. № 4. С. 527–535.
11. *Пасечник И.П.* Характеристики сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях. М.: Наука, 1970. 193 с.
12. *Садовский М.А., Кедров О.К., Лаушкин В.А., Пасечник И.П.* Сейсмический эффект подземных взрывов и проблема оценки полной энергии землетрясений // *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 281. № 4. С. 825–829.
13. *Краснов В.М., Дробжева Я.В., Салихов Н.М., Жумабаев Б.Т., Лазуркина В.Б.* Оценка мощности взрыва челябинского метеороида на основе данных оптических, сейсмических и инфразвуковых наблюдений // *Акуст. журн.* 2014. Т. 60. № 2. С. 152–159.
14. *Адушкин В.В., Ан В.А., Овчинников В.М.* Структурные особенности внутреннего строения Земли по результатам сейсмических наблюдений за подземными ядерными взрывами // *Физика Земли*. 2000. № 12. С. 3–26.
15. *Chebotareva I.Y.* Methods for passive study of the geological environment using seismic noise // *Acoust. Phys.* 2011. V. 57. P. 857–865.
<https://doi.org/10.1134/S1063771011060042>
16. *Rutenko A.N., Manul'chev D.S., Kozitskii S.B.* Study of acoustic signal propagation from sea to land // *Acoust. Phys.* 2019. V. 65. P. 279–287.
<https://doi.org/10.1134/S1063771019030060>
17. *Berzon I.S., Kogan S.D., Pasechnik I.P.* The character of the mantle-core boundary from observations of PcP waves // *Earth Planet. Sci. Letters*. 1972. V. 16. P. 166–170.
18. *Kogan S.D.* A study of the dynamics of a longitudinal wave reflected from the earth's core // *Izv. Phys. Solid Earth*. 1972. V. 6. P. 3–20.
19. *Carder D.S., Tocher D., Buee C., Stewart S.W., Eisler J., Berg E.* Seismic wave arrivals from LONGSHOT, 0° to 27° // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1967. V. 57. P. 573–590.
20. *Biswas N.N., Bhattacharya B.* Travel-time relations for the upper mantle P-wave phases from central Alaskan data // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1974. V. 64. № 6. P. 1953–1965.
21. *Ан В.А., Башилов И.П., Каазик П.Б., Коновалов В.А.* О нормальных магнитной цифровой записи архива геофизической обсерватории “Боровое” // *Вестник НЯЦ РК*. 2010. Вып. 3. С. 62–69.
22. *Непееина К.С., Ан В.А.* Вариации времен пробега продольных волн по массиву цифровых сейсмограмм // *Акуст. журн.* 2020. Т. 66. № 6. С. 647–653.
<https://doi.org/10.31857/S0320791920060064>
23. *Ан В.А., Люкэ Е.И., Пасечник И.П.* Вариации параметров сейсмических волн при просвечивании Земли на расстоянии 90° // *Докл. АН СССР*. 1985. Т. 285. № 4. С. 836–840.
24. *Непееина К.С., Ан В.А.* РКІКР_{ВС} на трассе Невада-станция Мирный (Антарктида) // *Вестник НЯЦ РК*. 2020. Вып. 3 (83). С. 81–88.