

ТРЕНД ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ПРОДОЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ НА ИНТЕРВАЛЕ 1961 – 1992 гг.

В.А. Ан, Л.Д. Годунова, П.Б. Каазик

Институт динамики геосфер РАН, г. Москва. vadiman@idg.chph.ras.ru

Аннотация. В процессе контроля за проведением подземных ядерных испытаний были обнаружены вариации времени пробега продольной волны. Приведён краткий обзор 14-тилетних исследований линейного тренда времени пробега продольной сейсмической волны в календарном времени на тридцати трассах с эпицентрными расстояниями от 1° до 146° . Для этих исследований систематизированы и использованы точные гипоцентрные координаты и времена ядерных испытаний, произведенных на участках Балапан, Дегелен, Сары-Узень Семипалатинского испытательного полигона, а также на площадках Pahute, Rainier, Yucca полигона в Неваде. Установлена достаточно чёткая зависимость линейного тренда времени пробега от эпицентрального расстояния: уменьшение до 5120 км и увеличение на расстояниях более 5450 км. Даны рекомендации по продолжению исследования вариаций скоростей сейсмических волн в календарном времени для повышения оценки сейсмической безопасности прилегающих территорий.

Введение

В процессе сейсмологического контроля за проведением подземных ядерных испытаний было обнаружено изменение времени пробега продольной сейсмической волны в календарном времени на одной и той же трассе. После публикации точных гипоцентрных координат и времени испытаний стало возможным исследовать вариации времени пробега сейсмических волн, как правило, не превышающие ± 0.5 секунды вне зависимости от эпицентрального расстояния. В результате исследований была обнаружена достаточно чёткая зависимость линейного тренда времени пробега от эпицентрального расстояния: уменьшение до 5120 км и увеличение на расстояниях более 5450 км (соответственно 46.09° и 49.03°). Методика и результаты исследования линейного тренда времени пробега продольной волны на различных трассах опубликованы в [1, 3–8]. В настоящей работе они сведены воедино с некоторыми исправлениями и дополнениями.

Для анализа времён пробега сейсмических волн рассмотрены результаты наблюдений сейсмическими станциями «Семипалатинск» (SEM), «Боровое» (BRVK), «Талгар» (AAB), «Пржевальск» (PRZ), «Фрунзе» (Бишкек, FRU), «Каджи-Сай» (KDS), «Манас» (MNS), «Арал» (ARL), «Нарын» (NRN), «Свердловск» (SVE), «Норильск» (NRI), «Хейс» (KHE), «Иультин» (ILT), «Сеймчан» (SEY), «Бодайбо» (BOD), «Закаменск» (ZAK), «Мирный» (MIR), «Новолазаревская» (NVL) подземных ядерных испытаний на Невадском (NTS) и Семипалатинском (STS) полигонах. На сейсмической станции «Боровое» с 23 июля 1966 г. осуществлялась цифровая регистрация [2], а на остальных фотооптическая со скоростью записи 60 – 120 мм/мин стандартными короткопериодными каналами СКМ с увеличениями порядка 25000 – 100000 [9].

На трёх основных площадках Невадского полигона в период 1961 – 1992 гг. проведено 872 испытаний. Из них 85 в скважинах на площадке Пахьют (Pahute), 51 в штольнях на площадке Рейниер (Rainier) и на площадке Юкка (Yucca) с $m_b > 4.1$ порядка 300 [13]. Наиболее мощные испытания выполнялись на площадке Пахьют (Pahu).

На Семипалатинском полигоне в период 1961 – 1989 гг. выполнено 352 испытания: 106 в скважинах на площадке Балапан (Bal), 219 в штольнях на площадке Дегелен (Deg) и 27 в скважинах на площадках Сары-Узень и Телькем [8].

Методика исследования

Методика исследования линейного тренда времени пробега в календарном времени $t = F(T_{\text{years}})$ достаточно проста [3]. По координатам станции и эпицентра испытания рассчитывается эпицентрное расстояние Δ , а по времени испытания в гипоцентре, пересчитанном к уровню моря в соответствии с геолого-геофизическим строением, и времени вступления (или первого положительного экстремума) продольной волны на станции определяется время пробега t . По результатам анализа рассчитывается локальный годограф продольной волны $t = F(\Delta)$ на интервале наблюдений, в соответствии с которым все времена пробега отдельных испытаний пересчитываются

к среднему значению Δ . Изменение приведённого времени пробега продольной волны в календарном времени δt является оценкой линейного тренда.

Линейный тренд волны PKiKP на трассе Bal – BRVK исследовался по иной методике [1]. Выбирались участки цифровых записей длиной 40 секунд и ожидаемым вступлением волны PKiKP по годографу примерно в их середине. Амплитуда записей на выбираемых участках должна, с одной стороны, значительно превышать сейсмический фон, а с другой не иметь ограничений амплитуды. По таким критериям удалось отобрать 31 сейсмограмму за период с 1976 по 1989 гг. На первом этапе в соответствии с ожидаемым частотным составом волны PKiKP выбранные участки были отфильтрованы полосовым фильтром Баттерворта с угловыми частотами 1 и 4 Гц и логарифмическим склоном 4. На втором этапе были определены относительные временные сдвиги между волнами PKiKP в пределах предполагаемого их вступления. Предварительный анализ показал, что волна PKiKP представляет собой волновой пакет, состоящий обычно из двух минимумов и двух максимумов. При этом доминируют первый минимум («ведущий») и второй максимум, а остальные элементы сильно варьируют и могут даже отсутствовать. Поэтому за основу был выбран один полный период, местоположение которого на сейсмограмме определяется «ведущим» минимумом. На последнем этапе вычислялись окончательные временные сдвиги волны PKiKP.

Тренд волны PKiKP_{DF} на трассе Семипалатинский полигон (STS) – станция «Новолазаревская» с целью увеличения количества измерений определялся по взрывам, выполненным на площадках Балапан (72 с $m_b > 4.9$), Дегелен (35 с $m_b > 5.0$) и Сары-Узень (10 с $m_b > 5.2$). При этом времена испытаний не приводились к уровню моря. Кроме того, для более надёжного определения времени пробега измерения проводились для 3-его положительного экстремума, имеющего наибольшую амплитуду.

Для Семипалатинского полигона наибольшее число исследований выполнено по результатам регистрации подземных испытаний на площадке Балапан. Это обусловлено двумя причинами. Во-первых, на этой площадке произведены испытания наибольшей мощности и, во-вторых, известны скорости продольных волн в гипоцентре для пересчёта времени испытания к уровню моря [8]. В нашем распоряжении не оказалось данных по скоростям пробега продольных волн для испытаний в штольнях площадки Дегелен. В связи с этим в наших расчётах приведения времени испытания к уровню моря для всех испытаний на площадке Дегелен была принята одна и та же скорость $V_p=5.4$ км/сек, что, безусловно, не соответствует действительности, но позволяет сравнивать результаты анализа по этой площадке на различных трассах.

Исследование линейного тренда времени пробега продольной волны сейсмических станций Талгар, Пржевальск, Фрунзе (Бишкек), Нарын выполнена по данным оперативных донесений этих станций [5]. Обработка материалов станций Каджи-Сай, Манас, Арал выполнялась по фотокопиям фрагментов сейсмограмм [7]. Обработка сейсмограмм станции Семипалатинск выполнена сотрудниками института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан [3]. Измерение времён вступлений волны P на остальных станциях выполнено по сейсмограммам архива Геофизической службы РАН. Вариации времён пробега по данным станции Боровое анализировались в основном по цифровым сейсмограммам [2].

Результаты исследования

В таблице 1 приведены основные характеристики исследованных сейсмических трасс: Δ , t_p , T – интервалы эпицентрального расстояния (в километрах или градусах), времени пробега продольной волны и годы принятых в обработку испытаний, t_{cp} – среднее значение времени пробега, N – количество испытаний, H_{max} – максимальная глубина траектории сейсмического луча по модели ak135 [12].

Эпицентрального расстояния приведено в километрах или градусах, как оно использовалось в цитируемой работе по данной трассе. Количество и годы принятых в обработку испытаний по одной и той же площадке полигона для различных станций существенно различаются. Это связано со многими причинами: период работы станции, увеличение вертикального короткопериодного канала, надёжность поправок станционной службы времени, а иногда чисто организационными. Так, например, сейсмической станции «Семипалатинск» в некоторые интервалы времени было предписано прекращать регистрацию.

В таблице 2 для каждой трассы представлены уравнения локального годографа и локального линейного тренда, а также оценка линейного тренда δt на интервале времени исследования в миллисекундах за год и в процентах от среднего значения времени пробега на данной трассе t_{cp} . В [1] линейный тренд на трассах Bal – BRVK, NTS – BRVK (волна P) и Bal – BRVK (волна PcP)

рассчитывался для среднегодовых значений времён пробега продольной волны. В дальнейшем мы отказались от среднегодовых значений. В настоящей работе тренд вычислен по календарному распределению испытаний. При разной методике оценки тренда тенденция изменения времени пробега продольной волны в календарном времени сохраняется.

Таблица 1. Основные характеристики сейсмических трасс

№ п/п	Трасса	Тип волны	Δ км или °	t_p сек	t_{cp} сек	T год	N	H_{max} км
1	Bal – SEM [3]	P_g	97 – 130 км	15.8 – 21.3	18.5	1978 – 1989	66	20.0
2	STS – SEM [8]	P_g	97 – 177 км	15.8 – 29.4	22.6	1964 – 1989	126	35.2
3	Deg – SEM [8]	P_g	164 – 177 км	27.1 – 29.4	28.2	1964 – 1989	60	35.2
4	Deg – BRVK [8]	P_n	645 – 659 км	88.1 – 89.8	88.9	1961 – 1989	160	42.1
5	STS – BRVK [8]	P_n	645 – 698 км	88.1 – 93.8	91.0	1961 – 1989	249	43.1
6	Bal – BRVK [1]	P_n	678 – 698 км	91.6 – 93.8	92.7	1968 – 1989	89	43.1
7	Bal – AAB [5]	P	740 – 767 км	99.5 – 102.5	101.0	1965 – 1989	92	45.0
8	Bal – PRZ [5]	P	820 – 846 км	108.9 – 113.8	111.3	1965 – 1989	78	47.4
9	Bal – FRU [5]	P	841 – 872 км	110.3 – 115.2	112.7	1969 – 1989	75	48.3
10	Bal – KDS [7]	P	7.82° – 8.05°	114.7 – 117.6	116.1	1972 – 1989	48	49.1
11	Bal – MNS [7]	P	8.52° – 8.82°	122.4 – 126.2	124.3	1973 – 1989	40	52.2
12	Bal – ARL [7]	P	8.56° – 8.85°	125.9 – 129.5	127.7	1968 – 1989	53	52.3
13	Bal – NRN [5]	P	961 – 989 км	126.8 – 130.8	128.8	1965 – 1989	75	52.5
14	Bal – SVE [4]	P	1417 – 1437 км	179.2 – 181.5	180.3	1971 – 1989	53	74.1
15	Bal – NRI [4]	P	2212 – 2238 км	270.5 – 273.4	271.9	1971 – 1989	82	449.2
16	Deg – NRI [8]	P	2250 – 2262 км	273.9 – 275.6	274.7	1970 – 1989	61	452.5
17	Bal – KHE [4]	P	3489 – 3513 км	382.8 – 384.8	383.8	1965 – 1989	77	780.8
18	Pahu – ILT [3]	P	5065 – 5085 км	502.7 – 504.1	503.4	1968 – 1992	60	1104.2
19	NTS – ILT [6]	P	45.56° – 46.09°	502.3 – 506.2	504.2	1964 – 1992	198	1114.3
20	Bal – ILT [3]	P	5448 – 5480 км	526.8 – 529.5	528.1	1965 – 1989	84	1207.1
21	NTS – SEY [6]	P	58.00° – 58.44°	594.7 – 598.2	596.4	1969 – 1992	71	1496.6
22	NTS – BOD [6]	P	76.11° – 76.51°	709.0 – 711.1	710.0	1963 – 1992	71	2157.1
23	NTS – ZAK [6]	P	85.90° – 86.29°	761.6 – 763.9	762.7	1966 – 1992	59	2574.3
24	Pahu – BRVK [4]	P	9977 – 9992 км	781.2 – 782.1	781.6	1962 – 1991	66	2740.7
25	NTS – BRVK [1]	P	89.78° – 90.14°	781.2 – 783.2	782.2	1962 – 1991	319	2741.2
26	Bal – KHE [4]	PcP	3492 – 3513 км	555.3 – 556.4	555.8	1965 – 1989	79	2891.5
27	Bal – ILT [4]	PcP	5448 – 5480 км	611.0 – 612.3	611.6	1965 – 1989	85	2891.5
28	Pahu – MIR [4]	$PKiKP_{BC}$	16237 – 16256 км	1179.9 – 1180.9	1180.4	1966 – 1991	57	4648.7
29	Bal – BRVK [1]	$PKiKP$	6.11° – 6.25°	991.8 – 992.2	992.0	1976 – 1989	31	5153.5
30	STS – NVL	$PKiKP_{DF}$	129.143° – 129.686°	1148.5 – 1150.2	1149.4	1964 – 1989	117	5167.6

Оценка линейного тренда времени пробега продольной волны в календарном времени изменяет свою полярность в интервале между трассами NTS–ILT и Bal–ILT, т.е. на глубинах в пределах 1114 км и 1207 км по модели ak135. На всех трассах, менее протяжённых NTS–ILT, время пробега t уменьшается, а на трассах, протяжённые Bal–ILT, t увеличивается.

Исключения составляют трассы Bal–MNS (волна P) и Bal–ILT (волна PcP). На трассе Bal – MNS наблюдается увеличение времени пробега продольной волны P на интервале 1973 – 1989 гг. Пока нет веских оснований утверждать реальность этого факта по следующим причинам. Как видно из таблицы 1, на этой трассе наименьшее количество экспериментальных данных и наиболее короткий календарный интервал наблюдений. На трассе Bal–ILT приведенное время пробега волны PcP уменьшается в календарном времени в отличие от трассы Bal–KHE, где оно увеличивается. Эпицентральное расстояние Bal–ILT почти на 2000 км больше Bal–KHE. Станция Иультин расположена на Чукотке, а станция Хейс на архипелаге Земля Франца-Иосифа. Одним словом, исследования вариаций времени пробега волны P в среднеазиатском регионе и волны PcP в различных регионах Земли необходимо продолжить.

Погрешность определения момента вступления волны P на различных трассах различная. На станции BRVK поправка станционной службы времени определялась по сигналам точного времени (СТВ) с погрешностью до 0.001 – 0.01 секунды. Время вступления волны P на сейсмограммах станций SEM, AAB, PRZ, FRU, NRN определено сотрудниками станций с точностью до 0.1 с. На фрагментах сейсмограмм KDS, MNS, ARL поправка времени указана также с точностью до 0.1 с. На остальных станциях погрешность на момент вступления определялась по ближайшим сигналам (предыдущему и последующему) проверки времени (СПВ). Отметим, что СПВ передавались «с погрешностью, не превышающей 0.3 с для европейской территории СССР и 0.5 с для других

районов страны» [13]. Однако, маршруты ретрансляции СПВ на сейсмические станции в этот период мало изменялись, так что с некоторой вероятностью можно считать их относительно постоянными. Другими словами, с метрологической точки зрения только на станции BRVK времена вступления сейсмических сигналов можно считать наиболее надёжными.

Таблица 2. Локальные годографы и оценки линейного тренда времени пробега продольной волны

Трасса	Тип волны	Локальный годограф на интервале анализа $t = F(\Delta^\circ \text{ или } \Delta_{\text{км}})$ сек	Линейный тренд времени пробега на интервале анализа $t = F(T_{\text{years}})$ сек	Оценка линейного тренда времени пробега	
				δt мс/год	$\frac{\delta t}{t_{\text{cp}}}$ $10^{-3} \%$ в год
Bal-SEM	P_g	$0.25 + (0.1640 \pm 0.0040) \times \Delta_{\text{км}}$	$19.25 - (0.0057 \pm 0.0089) \times T$	-5.7 ± 8.9	-30.8
STS-SEM	P_g	$0.11 + (0.1651 \pm 0.0008) \times \Delta_{\text{км}}$	$23.52 - (0.0094 \pm 0.0068) \times T$	-9.4 ± 6.8	-41.6
Deg-SEM	P_g	$3.57 + (0.1441 \pm 0.0146) \times \Delta_{\text{км}}$	$28.64 - (0.0073 \pm 0.0071) \times T$	-7.3 ± 7.1	-25.9
Deg-BRVK	P_n	$7.69 + (0.1245 \pm 0.0038) \times \Delta_{\text{км}}$	$88.89 - (0.0006 \pm 0.0016) \times T$	-0.6 ± 1.6	-0.7
STS-BRVK	P_n	$22.31 + (0.1022 \pm 0.0006) \times \Delta_{\text{км}}$	$91.13 - (0.0026 \pm 0.0013) \times T$	-2.6 ± 1.3	-2.9
Bal-BRVK	P_n	$6.68 + (0.1250 \pm 0.0018) \times \Delta_{\text{км}}$	$93.06 - (0.0046 \pm 0.0015) \times T$	-4.6 ± 1.5	-5.0
Bal-AAB	P	$18.45 + (0.1094 \pm 0.0048) \times \Delta_{\text{км}}$	$101.63 - (0.0102 \pm 0.0059) \times T$	-10.2 ± 5.9	-10.1
Bal-PRZ	P	$-31.59 + (0.1717 \pm 0.0077) \times \Delta_{\text{км}}$	$112.53 - (0.0128 \pm 0.0084) \times T$	-12.8 ± 8.4	-11.5
Bal-FRU	P	$-16.47 + (0.1509 \pm 0.0055) \times \Delta_{\text{км}}$	$115.00 - (0.0270 \pm 0.0072) \times T$	-27.0 ± 7.2	-24.0
Bal-KDS	P	$34.28 + (10.3649 \pm 0.5866) \times \Delta^\circ$	$117.58 - (0.0132 \pm 0.0074) \times T$	-13.2 ± 7.4	-11.4
Bal-MNS	P	$16.16 + (12.4866 \pm 0.4612) \times \Delta^\circ$	$123.82 + (0.0069 \pm 0.0078) \times T$	$+6.9 \pm 7.8$	+5.6
Bal-ARL	P	$22.07 + (12.1076 \pm 0.3077) \times \Delta^\circ$	$127.74 - (0.0031 \pm 0.0042) \times T$	-3.1 ± 4.2	-2.4
Bal-NRN	P	$2.64 + (0.1294 \pm 0.0071) \times \Delta_{\text{км}}$	$129.45 - (0.0074 \pm 0.0088) \times T$	-7.4 ± 8.8	-5.7
Bal-SVE	P	$12.73 + (0.1174 \pm 0.0043) \times \Delta_{\text{км}}$	$180.37 - (0.0019 \pm 0.0047) \times T$	-1.9 ± 4.7	-1.1
Bal-NRI	P	$269.49 + (0.0929 \pm 0.0039) \times \Delta_{\text{км}}$	$272.12 - (0.0008 \pm 0.0058) \times T$	-0.8 ± 5.8	-0.3
Deg-NRI	P	$93.08 + (0.0806 \pm 0.0085) \times \Delta_{\text{км}}$	$275.12 - (0.0043 \pm 0.0053) \times T$	-4.3 ± 5.3	-1.6
Bal-KHE	P	$78.86 + (0.0871 \pm 0.0032) \times \Delta_{\text{км}}$	$384.05 - (0.0034 \pm 0.0033) \times T$	-3.4 ± 3.3	-0.9
Pahu-ILT	P	$241.67 + (0.0516 \pm 0.0055) \times \Delta_{\text{км}}$	$503.46 - (0.0009 \pm 0.0036) \times T$	-0.9 ± 3.6	-0.2
NTS-ILT	P	$166.51 + (7.3668 \pm 0.0997) \times \Delta^\circ$	$504.24 - (0.0013 \pm 0.0020) \times T$	-1.3 ± 2.0	-0.3
Bal-ILT	P	$104.07 + (0.0776 \pm 0.0020) \times \Delta_{\text{км}}$	$528.03 + (0.0001 \pm 0.0028) \times T$	$+0.1 \pm 2.8$	+0.02
NTS-SEY	P	$227.23 + (6.3429 \pm 0.1986) \times \Delta^\circ$	$595.66 + (0.0105 \pm 0.0042) \times T$	$+10.5 \pm 4.2$	+1.8
NTS-BOD	P	$387.86 + (4.2210 \pm 0.1504) \times \Delta^\circ$	$709.50 + (0.0059 \pm 0.0026) \times T$	$+5.9 \pm 2.6$	+0.8
NTS-ZAK	P	$740.51 + (3.7446 \pm 0.1842) \times \Delta^\circ$	$762.23 + (0.0082 \pm 0.0036) \times T$	$+8.2 \pm 3.6$	+1.1
Pahu-BRVK	P	$373.33 + (0.0409 \pm 0.0034) \times \Delta_{\text{км}}$	$781.47 + (0.0017 \pm 0.0017) \times T$	$+1.7 \pm 1.7$	+0.2
NTS-BRVK	P	$384.56 + (4.4190 \pm 0.0973) \times \Delta^\circ$	$781.68 + (0.0054 \pm 0.0010) \times T$	$+5.4 \pm 1.0$	+0.7
Bal-KHE	PcP	$452.02 + (0.0297 \pm 0.0030) \times \Delta_{\text{км}}$	$555.41 + (0.0065 \pm 0.0031) \times T$	$+6.5 \pm 3.1$	+1.2
Bal-ILT	PcP	$609.31 + (0.0379 \pm 0.0019) \times \Delta_{\text{км}}$	$611.80 - (0.0008 \pm 0.0028) \times T$	-0.8 ± 2.8	-0.1
Pahu-MIR	$PKiKP_{BC}$	$1013.07 + (0.0103 \pm 0.0058) \times \Delta_{\text{км}}$	$1180.10 + (0.0034 \pm 0.0027) \times T$	$+3.4 \pm 2.7$	+0.3
Bal-BRVK	$PKiKP$	constant 6.18°	$991.42 + (0.0067 \pm 0.0043) \times T$	$+6.7 \pm 4.3$	+0.7
STS - NVL	$PKiKP_{DF}$	$-283.369 + (2.262 \pm 0.102) \times \Delta^\circ$	$1149.35 + (0.0005 \pm 0.0026) \times T$	$+0.5 \pm 2.6$	+0.04

Примечание: T_{years} – десятки и единицы календарных годов (например, 70 это 1970 г.).

Приведение времени испытания к уровню моря для площадки Балапан выполняется по скорости продольной волны V_p [8]. Поправка составляет от -0.027 с до $+0.049$ с, если принимать значение V_p на всю глубину до уровня моря. Для площадок Pahu, Rainier и Yucca поправки находятся в пределах $+0.125$ с ... $+0.520$ с. При этом эти поправки определены по скоростному разрезу не каждой отдельно взятой скважины, а по осреднённому разрезу всей испытательной площадки [14]. Очевидно, что в обоих случаях допускается некоторое приближение.

Заключение

Результаты анализа линейного тренда времени пробега волны $PKiKP_{DF}$ на трассе Семипалатинский полигон – станция «Новолазаревская» недостаточно надёжны по следующей причине. До 29.03.1981 г. на станции использовались сейсмометрические каналы на базе сейсмографов УСФ, а с 27.05.1981 г. – на базе СКМ-3м. При обработке сейсмограмм изменение амплитудно-частотных характеристик по этой причине не учитывалось.

Несмотря на многие вопросы, на которые пока нет ответа, предварительные выводы можно сделать. Время пробега продольной волны на одной и той же трассе в период 1961 – 1992 гг. изменяется. Обращает на себя внимание достаточно чёткая смена полярности оценки линейного тренда времени пробега продольной волны в интервале максимальной глубины траектории сейсмического луча в пределах 1114 – 1207 км по модели ak135. На трассах до $H_{\text{max}}=1114$ км оно

уменьшается, а на трассах с H_{\max} больше 1207 км – увеличивается. В первом приближении это можно объяснить увеличением плотности среды выше 1114 км и уменьшением на глубинах более 1207 км в период 1961 – 1992 гг., если тренд времени пробега считать равномерным по всей траектории сейсмической волны. Последнее требует дальнейшего исследования.

Исследование вариаций времени пробега сейсмических волн, по нашему мнению, необходимо продолжить путём наблюдений на сейсмических станциях за взрывами на постоянно действующих промышленных карьерах. Необходимо выбрать в асейсмичных и сейсмоактивных регионах такие трассы, на которых можно организовать наблюдения в течение длительного времени. Правда, затруднение может вызвать необходимость регистрации координат эпицентра не хуже одной угловой секунды и времени взрыва с погрешностью менее 0.01 секунды. В настоящее время это не техническая, а скорее организационная проблема. Сложнее поддерживать эту программу в течение многих десятилетий. Безусловно, мощность карьерных промышленных взрывов недостаточна для зондирования больших глубин. Тем не менее, такая методика позволит исследовать вариации внутреннего строения Земли в календарном времени.

Благодарности

Авторы благодарят А.А. Маловичко, О.Е. Старовойта, С.Г. Пойгину, Е.Б. Терехову, Л.С. Петухову (Геофизическая служба РАН, г. Обнинск) за многолетнюю помощь в выполнении данных исследований, а также сотрудников института динамики геосфер РАН В.В. Адушкина, В.М. Овчинникова, Д.Н. Краснощёкова, Т.В. Челюбееву за постоянное внимание и поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адушкин В.В., Ан В.А., Каазик П.Б., Овчинников В.М. О динамических процессах во внутренних геосферах Земли по временам пробега сейсмических волн // ДАН, 2001, – Т. 381, № 6, – С. 822 – 824.
2. Ан В.А., Башилов И.П., Каазик П.Б., Коновалов В.А. О нормальных магнитных цифровых записей архива геофизической обсерватории «Боровое» // Вестник НЯЦ РК, 2010. – Вып. 3. – С. 62 – 69.
3. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б., Челюбеева Т.В. Подземный ядерный взрыв в исследованиях динамики внутреннего строения Земли // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 14 – 19.
4. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. К вопросу об изменении времени пробега сейсмической волны в календарном времени // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Второй Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 8 – 12.
5. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. Линейный тренд времени пробега продольной сейсмической волны по наблюдениям на станциях Казахстана и Кыргызстана // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Шестой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 14 – 18.
6. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. Изменения времени пробега продольной волны Р на трассе Невадский полигон – сейсмические станции Иультин, Сеймчан, Бодайбо, Закаменск // Вестник НЯЦ РК, 2013. – Вып. 2. – С. 56 – 63.
7. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. Оценка тренда времени пробега волны Р на сейсмических станциях Каджи-Сай, Манас, Арал // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Восьмой Международной сейсмологической школы. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 28 – 31.
8. Ан В.А., Годунова Л.Д., Каазик П.Б. Линейный тренд времени пробега продольной сейсмической волны // 8-ая Международная конференция «Мониторинг ядерных испытаний и их последствий» г. Курчатов, Казахстан, 04-08 августа 2014 г. Вестник НЯЦ РК, 2014. Вып. 2 (58), С. 81-94.
9. Кондорская Н.В., Фёдорова И.В. Сейсмические станции Единой системы сейсмических наблюдений СССР (ЕССН) на 01.01.1990 г. // М.: ОИФЗ РАН, 1996. – 36 с.
10. Эталонные сигналы частоты и времени. Бюллетень В-07-1986. – М.: Изд-во стандартов. – 1986. – 26 с.
11. Ядерные испытания СССР. Под ред. В.Н. Михайлова. – М.: ИздАТ, 1997. – 304 с.
12. Kennett B.L.N., Engdahl E.R., Buland R. Constrains on seismic velocities in the Earth from traveltimes // Geophys. Journal International, 1995. – V. 122. – P. 108 – 124.
13. 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, No. 5. – P. 1806 – 1840.
14. Taylor S.R. Three dimensional crust and upper mantle structure at the Nevada test site // J. Geophys. Res., 1983. – V. 88, No. 133. – P. 2220 – 2232.