

УДК 550.34

О НАДЕЖНОСТИ ОЦЕНКИ ВРЕМЕННЫХ ТРЕНДОВ ВРЕМЕНИ ПРОБЕГА ВОЛН P ОТ ВЗРЫВОВ

© 2025 г. В. М. Овчинников*

*Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского РАН, Москва, Россия***E-mail: ovтч@idg.ras.ru*

Проведена оценка надежности определения временного тренда времени пробега продольных волн P , возбужденных ядерными взрывами на Невадском испытательном полигоне и зарегистрированных на сейсмической станции BRVK, на основе множественного регрессионного анализа, дополненного методом начальной выборки. Показано, что вклад временного фактора в вариации времен пробега волн P по наблюдениям за 248 взрывами на станции BRVK статистически значим, величина тренда равна 4.31 ± 0.8 мс/год, хотя его доля в вариациях времени пробега составляет менее 0.1%. При отдельной оценке по взрывам на Юкка-Флет и Пахьют-Меса величина тренда составила 3.18 ± 1.15 и 4.24 ± 1.23 мс/год соответственно.

Ключевые слова: временной тренд времени пробега, регрессионный анализ, метод начальной выборки.

Для цитирования: Овчинников В.М. О надежности оценки временных трендов времени пробега волн P от взрывов // Динамические процессы в геосферах. Т. 17. № 3. С. 15–27. https://doi.org/10.26006/29490995_2025_17_3_15

Введение

Динамические процессы, происходящие в Земле, имеют важное значение для понимания эволюции Земли и процессов самоорганизации геофизической среды [Садовский и др., 1983]. Информация о таких процессах может быть получена при длительном наблюдении за временами пробега сейсмических волн на неизменной трассе от источников с хорошо известными параметрами очага [Адушкин и др., 2001]. Вариации времен пробега связывают с планетарными процессами [Авсюк, 1983; Ан и др., 1985; Адушкин и др., 1999], имеющими различную периодичность. Так как приведенные данные в публикациях охватывают временной интервал в 20–30 лет, то наблюдаемый при этом линейный тренд времен пробега, возможно, связан с периодами 50–100 лет. Временные тренды времен пробега волн на различных станциях, зондирующих внутреннее ядро Земли, могут быть использованы для оценки скорости дифференциального вращения внутреннего ядра Земли [Song, Richards, 1996]. В некоторых публикациях на эту тему, например, [Адушкин и др., 1999; 2001] используется линейный регрессионный анализ дифференциальных времен пробега P -волн в зависимости от эпицентрального расстояния и календарного времени.

Однако такой подход может приводить к смещенным оценкам скорости изменения времени пробега сейсмических волн за счет влияния других факторов (магнитуды, глубины сейсмического источника и др.). Более того, оценки погрешности величины тренда времени пробега на основе линейной регрессии опираются на предположение, что случайная составляющая в уравнениях имеет нормальное распределение с нулевым средним.

В настоящей работе рассмотрены оценки линейного временного тренда времен пробега продольных волн на основе метода множественной регрессии [Вучков и др., 1987], дополненного методом начальной выборки (*bootstrapping*) [Efron, Tibshirani, 1993] для выбора количества независимых переменных и оценки погрешности коэффициентов множественной регрессии, когда случайная составляющая имеет произвольное распределение.

Метод обработки

Методы построения регрессионных моделей широко доступны в статистических пакетах (например, SPSS_Statistics_v23, Origin_2021, Matlab_2014). Основное предположение в них состоит в том, что для оценки факторов, влияющих на вариации времени пробега продольных волн, рассматривается следующая модель множественной регрессии:

$$t_i = \sum_{k=0}^{k=4} a_k f_{ik} + \varepsilon_i, \quad (1)$$

где a_k ($k = 0, 1, 2, 3, 4$) – параметры (предикаторы) модели, подлежащие определению, и $f_{i0} = 1$, $f_{i1} = \Delta i$ (эпицентрально расстояние в градусах), $f_{i2} = m_i$ (магнитуда), $f_{i3} = h_i$ (высота заложения заряда над уровнем моря сейсмического источника в метрах), $f_{i4} = T_i$ (календарное время в годах).

Тогда решение уравнения (1) для вектора неизвестных a_k в матричном виде методом наименьших квадратов представимо как [Вучков и др., 1987]:

$$A = (F^T F)^{-1} F^T b, \quad (2)$$

где

$$A = (a_0 \ a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4)^T, \quad b = (b_1 \ b_2 \ b_3 \dots b_{n-1} \ b_n)^T,$$

$$F = \begin{pmatrix} 1 & \Delta_1 & m_1 & h_1 & T_1 \\ 1 & \Delta_2 & m_2 & h_2 & T_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \Delta_{n-1} & m_{n-1} & h_{n-1} & T_{n-1} \\ 1 & \Delta_n & m_n & h_n & T_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{10} & f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{20} & f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{(n-1)0} & f_{(n-1)1} & f_{(n-1)2} & f_{(n-1)3} & f_{(n-1)4} \\ f_{n0} & f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & f_{n4} \end{pmatrix}.$$

Для оценки качества полученного решения вычисляются следующие параметры: коэффициент множественной детерминации $R^2 = 1 - SS_{res}/SS_{tot}$, показывающий какая часть вариабельности времени пробега t объясняется моделью (1), ковариационная $(F^T F)^{-1}$ и корреляционная матрицы. Здесь $SS_{tot} = \sum_i (t_i - \bar{t})^2$, $SS_{res} = \sum_i (t_i - \hat{t}_i)^2$, $\bar{t} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i=N} t_i$, $\hat{t}_i$ – оценка времени пробега из уравнения (1).

В классическом регрессионном анализе, во-первых, матрица F (матрица ошибок) состоит из неслучайных элементов и, во-вторых, случайный параметр ε имеет нормальное распределение с нулевым средним. Рассматриваемые в работе экспериментальные данные этим условиям не удовлетворяют, так как, например, магнитуда является случайным фактором для взрывов, для землетрясений все элементы матрицы F являются случайными величинами, а распределение фактора ε неизвестно.

В связи с этим для корректного определения погрешности коэффициентов a_k , полученные регрессионным методом данные, дополнительно обрабатываются методом начальной выборки *bootstrapping* [Efron, Tibshirani, 1993], который можно использовать для оценки статистических характеристик коэффициентов a_k , когда распределение ε_i неизвестно.

Суть этого метода состоит в многократном случайном формировании с возвратом новой выборки из первоначальных значений ε_i , с последующим многократным решением системы уравнений (1).

Таким образом, численный алгоритм множественного регрессионного анализа с использованием метода начальной выборки для определения коэффициентов a_k и их ошибок или доверительных интервалов можно кратко записать следующим образом:

1. Рассчитать a_k из уравнения (2) и остаточную среднеквадратичную ошибку, основываясь на первичных данных.
2. Рассчитать ε_i из уравнения $\varepsilon_i = t_i - (a_0 + a_1 \Delta_i + a_2 m_i + a_3 h_i + a_4 T_i)$.
3. Для $b = 1, 2, \dots, B$ из ε_i создать новую выборку ε_i^b (B – число повторных выборок).

4. По t_i^b рассчитать коэффициенты регрессии a_k^b из уравнения (2).
5. По a_k^b ($b = 1, 2, \dots, B$) определить статистические характеристики (среднее, RSE, гистограммы, доверительные интервалы и др.).

Оценка временного тренда по данным взрывов на Невадском испытательном полигоне (НИП), зарегистрированных на станции BRVK (Казахстан)

Для анализа использованы данные цифровой регистрации сейсмической станцией BRVK (широта $\varphi = 53.05^\circ$ с.ш., долгота $\lambda = 70.28^\circ$ в.д., высота над уровнем моря $H = 330$ м) 248 подземных ядерных взрывов, проведенных на испытательном полигоне в шт. Невада, США (см. Приложение). Количественные значения четырех факторов, определяющих вариабельность времен пробега волн P , – эпицентральный расстояние, магнитуда, высота над уровнем моря, календарное время проведения взрыва – взяты из [United States Nuclear Tests..., 2000], а измеренные времена пробега из работы [Nepeina, An, 2021]. Пространственное распределение взрывов представлено на рис. 1, на котором показаны три основные площадки проведения взрывов – Пахьют-Меса, Рейниер и Юкка-Флэт.

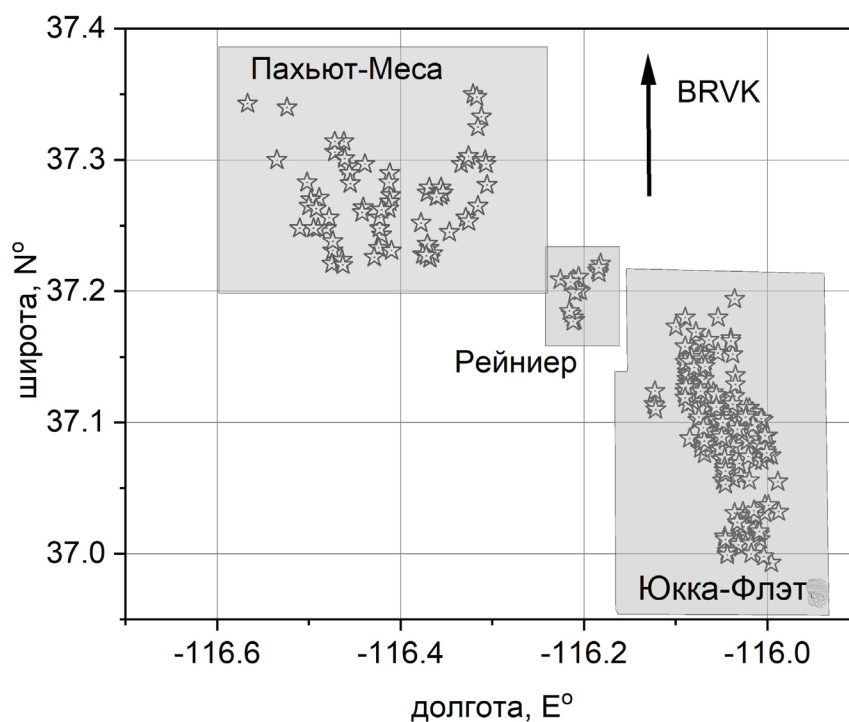


Рис. 1. Схема расположения взрывов на НИП: стрелкой указано направление на станцию BRVK

Гистограммы распределения влияющих факторов взрыва – календарное время (t), эпицентральный расстояние (Δ), высота (h) над уровнем моря и магнитуда (m_b) – показаны на рис. 2. Время на рис. 2а отсчитывается от 00 ч 00 мин 00 с 1 января 1970 г. Все факторы могут иметь взаимные корреляционные связи. В частности, это относится к факторам m_b и h , поскольку они связаны между собой через финансовую экономичность и радиационную безопасность проведения взрыва.

Таким образом, полная выборка описывается четырьмя факторами, имеющими количественное описание. Дополнительным фактором, не имеющим количественного описания, может быть разделение полной выборки на две группы для двух площадок с различными физико-механическими характеристиками среды. На площадке Юкка-Флет взрывы проводились в аллювиальных и сланцевых сложно построенных геологических с наклонными и круто падающими границами структурах. Площадка Пахьют-Меса – более однородная, сложенная вулканическими туфами.

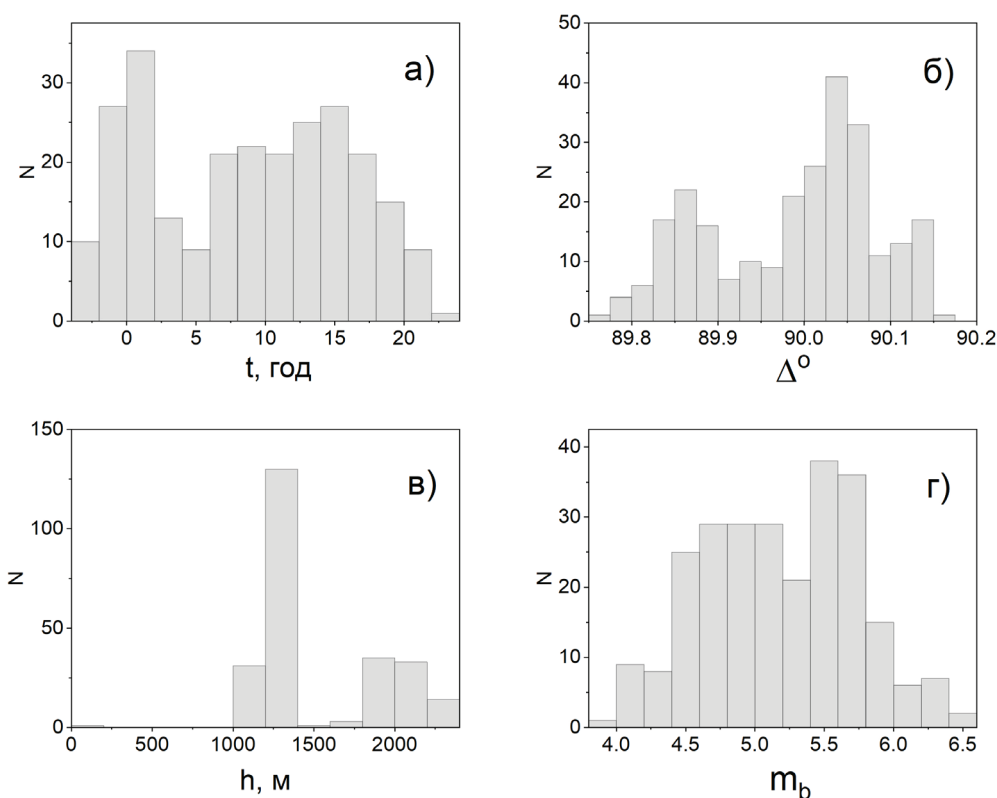


Рис. 2. Гистограммы влияющих факторов: а) календарное время (нулевое значение на оси соответствует 00 ч 00 мин 00 с 1 января 1970 г.), б) эпицентрального расстояния, в) высота над уровнем моря, г) магнитуда

Результаты и обсуждение

Оценка регрессионных коэффициентов проведена для различных вариантов модели (1): сначала для полного набора факторов, а затем последовательно, исключая магнитуду m и высоту h над уровнем моря.

В табл. 1 приведены оценки регрессионных коэффициентов для полной выборки из 248 измерений времени пробега и пяти коэффициентов регрессии без использования метода начальной выборки.

Таблица 1.

Значения регрессионных коэффициентов для полной выборки данных

Коэффициент, размерность	Значение	Ошибка
a_0 – свободный член, с	407.39472	11.0078
a_1 – с/град	4.16295	0.12167
a_2 – с	0.01735	0.01274
a_3 – с/м	$-2.95174 \cdot 10^{-5}$	$2.88686 \cdot 10^{-5}$
a_4 – тренд, с/год	0.00431	0.000818

Из данных табл. 1 следует, что наиболее существенное влияние на вариабельность времен пробега оказывает, как и следовало ожидать из физических оснований, эпицентрального расстояния. Полученное значение медленности (величина, обратная кажущейся скорости) $s = a_1 = 4.163 \pm 1.122$ с/градус. Величина полученного тренда составила 4.31 ± 0.82 мс/год. Несмотря на малое значение, гипотеза о нулевом значении тренда на основании t -критерия Стьюдента ($t = 4.93$; число оцениваемых параметров – 5, число степеней свободы – 243) [Мюллер и др., 1982] не может быть принята с вероятностью близкой

к 1. Более того, корреляционная связь временного тренда с другими факторами мала: с высотой над уровнем моря 0.04, магнитудой 0.1, эпицентральной расстоянием 0.12.

При использовании дополнительно метода начальной выборки ошибка определения медленности s увеличивается на 6% и указывает, что распределение остатков ε_i имеет более тяжелые хвосты, чем распределение Гаусса. Другие факторы имеют хотя и меньшее влияние, но они значимы. Это следует из характера изменения коэффициента детерминации R и остаточной ошибки (табл. 2), полученных для трех вариантов обработки при: 1) полном наборе факторов, 2) исключении магнитуды из определяющих факторов и 3) исключении магнитуды и высоты над уровнем моря, представленных в табл. 2.

Таблица 2.

Значения коэффициента детерминации R и остаточной ошибки σ^2

Факторы	Коэффициент детерминации R	σ^2
Δ, T, m, h	0.94932	0.209
Δ, T, h	0.94886	2.269
Δ, T	0.94415	2.477

То есть наблюдается последовательное уменьшение коэффициента детерминации R и увеличение величины ошибки, что указывает на значимое влияние факторов. Таким образом, при оценке временного тренда следует учитывать все четыре физических фактора.

Полученная оценка тренда отличается от опубликованного в работе [Адушкин и др., 2001] тренда 6.97 ± 1.27 мс/год, полученного при использовании другой параметризации времени пробега, включающей эпицентральное расстояние, календарное время и поправку на различие в глубине, и локальную скорость волны в месте проведения взрыва.

Рассмотрим возможное влияние кривизны годографа, разделив выборку данных времен пробега отдельно для взрывов на площадках Пахьют-Меса и Юкка-Флэт. В результате такого разбиения диапазон рассматриваемых эпицентральных расстояний сокращается примерно в два раза. В этих условиях величина тренда времен пробега по данным 154 измерений для взрывов на Юкка-Флэт составила 3.18 ± 1.15 мс/год, а на площадке Пахьют-Меса по данным 90 измерений – 4.24 ± 1.23 мс/год. Во всех 3-х рассмотренных вариантах выборки коэффициент корреляции оцениваемого фактора, характеризующего вариации времени пробега в календарном времени, с другими факторами составил порядка 0.1. Таким образом, этот фактор как бы обособлен от других и его значение не может быть полностью компенсировано за счет других факторов.

В заключение рассмотрим, как влияет на величину тренда размер обрабатываемой выборки при сохранении максимальной длительности временного интервала в 24 года. Для этого из полной выборки данных, состоящей из 248 измерений, случайным образом извлекались данные, соответствующие только одному взрыву в году. То есть, объем анализируемой выборки состоял из 24 измерений. По данным 20 выборок получено, что среднее значение тренда составило 4.708 ± 1.641 мс/год. При этом в трех случаях были получены отрицательные значения тренда, которые связаны с резким уменьшением в этих выборках диапазона рассматриваемых расстояний. Полученные для них значения медленности $s < 3.9$ с/градус трудно согласовать с известными значениями в моделях ak135, PREM, IASP91 скоростного разреза Земли. К приведенным для этого случая результатам следует относиться критически, поскольку использованная в каждом случае выборка из 24 данных мала для надежного определения влияния пяти факторов. Тем не менее, оставляя место для дальнейших оценок, проведенный анализ все же дает основание предположить, что положительный временной тренд времени пробега сейсмических волн скорее существует.

Таким образом, анализируемая выборка должна иметь достаточную представительность данных как по календарному времени, так и по эпицентральному расстоянию. Другим вариантом может быть рассмотрение более сложной регрессионной модели с ограничениями на исследуемые факторы, устанавливаемые из физических представлений.

Выводы

1. На основе множественного регрессионного анализа показано, что вклад временного фактора в вариации времени пробега волн P статистически значим, хотя его доля составляет порядка 0.1%.
2. Величина временного тренда времени пробега на станции BRVK по наблюдениям за 248 взрывами составляет 4.31 ± 0.8 мс/год, а дополненное методом начальной выборки различие оценок не превышает 1%.
3. Для 90 взрывов на площадке Пахьют-Меса величина тренда составила 4.24 ± 1.23 мс/год, а для 154 взрывов на площадке Юкка-Флэт – 3.18 ± 1.15 мс/год.
4. Учет таких факторов как магнитуда и высота над уровнем моря оказывает влияние на оценку тренда.
5. Несмотря на то, что включение в обработку метода начальной выборки не приводит к существенному изменению оценки величины тренда и его погрешности по полной выборке данных, метод дает нам возможность исследовать неопределенность, количественно оценивать изменчивость и делать надежные статистические выводы без жестких предположений о статистических свойствах обрабатываемых данных.

Финансирование

Исследования выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № 125012200561-3).

Благодарности

Автор благодарит анонимных рецензентов за критические замечания и полезные рекомендации.

Список литературы

- Авсюк Ю.Н. Механическая интерпретация некоторых особенностей лунной сейсмичности // ДАН СССР. 1983. Т. 268. № 1. С. 51–55. <https://www.mathnet.ru/rus/dan45846>
- 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. <https://elibrary.ru/ktxpdc>
- Адушкин В.В., Ан В.А., Гамбурцева Н.Г., Дараган С.К., Люкэ Е.И., Овчинников В.М. Сейсмический мониторинг литосферы при помощи ядерных взрывов. Атлас временных вариаций природных, антропогенных и социальных процессов. М. : Научный Мир. 1999. Том 2 «Циклическая динамика в природе и обществе». С. 145–150.
- Ан В.А., Люкэ Е.И., Пасечник И.П. Вариации параметров сейсмических волн при просвечивании Земли на расстоянии 90° // ДАН СССР. 1985. Т. 285. № 4. С. 836–840. <https://www.mathnet.ru/rus/dan47267>
- Вучков И., Бояджиева Л., Солаков Е. Прикладной линейный регрессионный анализ. М. : Финансы и статистика. 1987. – 240 с.
- Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. М. : Финансы и статистика. 1982. – 271 с.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф., Родионов В.Н. От сейсмологии к геомеханике. О модели геофизической среды // Вестн. АН СССР. 1983. № 1. С. 82–88.
- Efron B., Tibshirani R.J. An Introduction to the Bootstrap. New York : Chapman & Hall. 1993. – 436 с. <https://doi.org/10.1201/9780429246593>
- Nepeina K.S., An V.A. Travel Time Curves and Isochron Maps from the Borovoye Digital Archive for the Nevada and Semipalatinsk Nuclear Test Sites // Results in Geophysical Sciences. 2021. Vol. 6. P. 100014. <https://doi.org/10.1016/j.ringps.2021.100014>

Song X., Richards P.G. Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core // Nature. 1996. Vol. 382 (6588). P. 221–224. <https://doi.org/10.1038/382221a0>
United States Nuclear Tests. July 1945–September 1992. P. 150. DOE/NV–209-REV, 15 December 2000.

Приложение

Дата dd.mm.yyyy	Время в очаге(UTC) hh:mm:ss.**	Широта N°	Долгота E°	m_b	Высота над уровнем моря, м	Расстояние, Δ°	Время пробега, с
23.05.1967	14:00:00.04	37.275	-116.371	5.7	2034	89.8514	781.461
26.05.1967	15:00:01.50	37.248	-116.481	5.5	1878	89.8711	781.603
22.03.1968	15:00:00.04	37.333	-116.312	5.6	2035	89.7969	781.213
26.04.1968	15:00:00.07	37.295	-116.457	6.3	1914	89.8267	781.336
15.06.1968	13:59:59.97	37.265	-116.316	5.9	2116	89.8644	781.514
08.12.1968	16:00:00.14	37.343	-116.567	4.8	1668	89.7726	781.576
19.12.1968	16:30:00.04	37.231	-116.474	6.3	1887	89.8894	781.526
07.05.1969	13:45:00.04	37.283	-116.502	5.8	1828	89.836	781.589
16.09.1969	14:30:00.04	37.314	-116.462	6.2	1898	89.8074	781.287
26.03.1970	19:00:00.20	37.3	-116.535	6.5	1772	89.8172	781.357
06.06.1973	13:00:00.08	37.245	-116.347	6.1	2069	89.8826	781.592
14.05.1975	14:00:00.16	37.221	-116.475	6	1219	89.8993	781.84
03.06.1975	14:20:00.17	37.34	-116.524	5.9	1667	89.778	781.281
19.06.1975	13:00:00.09	37.35	-116.321	6.1	2068	89.7795	781.183
26.06.1975	1230:00.16	37.279	-116.369	6.2	2033	89.8475	781.409
28.10.1975	14:30:00.16	37.29	-116.412	6.4	1957	89.8342	781.372
20.11.1975	15:00:00.09	37.225	-116.368	6	2025	89.9013	781.765
03.01.1976	19:15:00.16	37.297	-116.334	6.2	2082	89.8315	781.333
14.02.1976	11:30:00.16	37.243	-116.421	6	1947	89.8805	781.564
14.03.1976	12:30:00.16	37.306	-116.472	6.3	1904	89.8148	781.303
17.03.1976	14:15:00.09	37.256	-116.329	6.1	2076	89.8726	781.596
11.04.1978	15:30:00.16	37.3	-116.328	5.3	2072	89.8289	781.427
11.04.1978	17:45:00.07	37.233	-116.369	5.5	2040	89.8933	781.736
31.08.1978	14:00:00.16	37.276	-116.358	5.6	2013	89.8511	781.516
16.12.1978	15:30:00.16	37.273	-116.411	5.5	1979	89.8511	781.36
11.06.1979	14:00:00.17	37.29	-116.456	5.5	1913	89.8317	781.411
26.09.1979	15:00:00.09	37.229	-116.365	5.6	2033	89.8975	781.765
26.04.1980	17:00:00.08	37.248	-116.423	5.4	1946	89.8754	781.598
12.06.1980	17:15:00.09	37.282	-116.455	5.6	1911	89.8397	781.505
25.07.1980	19:05:00.08	37.256	-116.478	5.5	1859	89.8643	781.576
17.12.1980	15:10:00.09	37.325	-116.316	5.1	2029	89.8047	781.245
06.06.1981	18:00:00.08	37.303	-116.326	5.6	2073	89.826	781.387
12.02.1982	14:55:00.08	37.224	-116.464	5.4	1873	89.8969	781.68
12.02.1982	15:25:00.09	37.348	-116.317	5.4	2076	89.7817	781.219
25.04.1982	18:05:00.01	37.256	-116.423	5.4	1937	89.8674	781.652
24.06.1982	14:15:00.09	37.236	-116.371	5.6	2038	89.8902	781.721
26.03.1983	20:20:00.09	37.301	-116.461	5.2	1907	89.8204	781.454
01.09.1983	14:00:00.08	37.273	-116.356	5.5	2013	89.8542	781.606
25.07.1984	15:30:00.08	37.268	-116.412	5.4	1982	89.8561	781.534

Продолжение

Приложение

09.12.1984	19:40:00.09	37.27	-116.498	5.5	1839	89.8492	781.588
15.12.1984	14:45:00.00	37.281	-116.306	5.4	2118	89.849	781.616
02.05.1985	15:20:00.08	37.253	-116.326	5.7	2085	89.8758	781.709
12.06.1985	15:15:00.06	37.248	-116.49	5.4	1873	89.8716	781.511
25.07.1985	14:00:00.09	37.297	-116.439	5.2	1942	89.8257	781.383
28.12.1985	19:01:00.09	37.238	-116.474	5.3	1887	89.8824	781.774
22.04.1986	14:30:00.09	37.264	-116.441	5.3	1955	89.8584	781.521
25.06.1986	20:27:45.09	37.265	-116.5	5.5	1849	89.8541	781.659
17.07.1986	21:00:00.06	37.279	-116.356	5.7	2017	89.8482	781.607
30.09.1986	22:30:00.10	37.3	-116.308	5.5	2100	89.83	781.445
16.10.1986	19:25:00.09	37.22	-116.463	5.6	1871	89.901	781.771
13.12.1986	17:50:05.09	37.263	-116.413	5.5	1991	89.861	781.553
18.04.1987	13:40:00.60	37.248	-116.51	5.5	1875	89.8704	781.875
30.04.1987	13:30:00.09	37.233	-116.424	5.5	1943	89.8902	781.695
24.09.1987	15:00:00.06	37.228	-116.376	5.7	2045	89.8979	781.773
15.02.1988	18:10:00.09	37.314	-116.472	5.3	1899	89.8069	781.46
02.06.1988	13:00:00.09	37.26	-116.442	5.4	1960	89.8623	781.648
07.07.1988	15:05:30.07	37.252	-116.378	5.6	1964	89.8739	781.675
17.08.1988	17:00:00.09	37.297	-116.307	5.5	2102	89.833	781.44
22.06.1989	21:15:00.08	37.283	-116.413	5.3	1980	89.8411	781.504
27.06.1989	15:30:00.02	37.275	-116.354	4.9	2019	89.8523	781.502
31.10.1989	15:30:00.09	37.263	-116.492	5.7	1846	89.8565	781.76
08.12.1989	15:00:00.09	37.231	-116.41	5.5	2031	89.893	781.847
13.06.1990	16:00:00.09	37.262	-116.421	5.7	1950	89.8615	781.678
12.10.1990	17:30:00.08	37.248	-116.495	5.6	1871	89.8713	781.819
14.11.1990	19:17:00.07	37.227	-116.372	5.4	2031	89.8991	781.776
14.09.1991	19:00:00.08	37.226	-116.429	5.5	1951	89.8969	781.906
26.03.1992	16:30:00.00	37.272	-116.361	5.5	2013	89.8549	781.587
18.08.1967	20:12:30.04	37.012	-116.037	4.6	1183	90.1315	782.742
18.10.1967	14:30:00.08	37.116	-116.059	5.7	1255	90.0267	782.675
25.10.1967	14:30:00.06	37.032	-116.027	4.8	1191	90.1121	782.807
15.12.1967	15:00:00.04	37.037	-116.003	4.6	1204	90.1084	782.649
21.02.1968	15:30:00.00	37.117	-116.055	5.8	1253	90.026	782.195
10.04.1968	14:00:00.00	37.157	-116.083	4.6	1310	89.9846	782.125
18.04.1968	14:05:00.00	37.152	-116.038	4.9	1279	89.992	781.929
03.05.1968	16:00:00.04	37.029	-116.021	4.1	1188	90.1154	782.5
04.11.1968	15:15:00.09	37.13	-116.087	5	1287	90.0113	782.07
12.12.1968	15:10:00.08	37.119	-116.083	5.2	1273	90.0225	782.099
20.03.1969	18:12:00.04	37.022	-116.031	4.6	1187	90.1219	782.86
21.03.1969	14:30:00.41	37.133	-116.088	4.9	1291	90.0083	782.141
27.05.1969	14:15:00.04	37.075	-115.996	5	1270	90.0709	782.5
12.06.1969	14:00:00.04	37.009	-116.031	4.4	1181	90.1348	782.74
16.07.1969	13:02:30.04	37.119	-116.056	4.7	1256	90.0239	782.26
16.07.1969	14:55:00.04	37.139	-116.088	5.6	1300	90.0023	782.119
27.08.1969	13:45:00.04	36.993	-115.996	4.7	1174	90.1526	782.748

Продолжение

Приложение

21.11.1969	14:52:00.04	37.031	-116.003	5	1195	90.1144	782.648
10.12.1969	15:30:00.07	37.169	-116.078	4.7	1320	89.973	782.083
17.12.1969	15:00:00.04	37.083	-116.002	5.5	1274	90.0626	782.407
17.12.1969	15:15:00.04	37.007	-116.024	4.8	1181	90.1372	782.805
18.12.1969	19:00:00.04	37.12	-116.036	5.2	1264	90.024	782.22
30.01.1970	17:00:00.04	37.031	-116.036	4.6	1191	90.1126	782.828
04.02.1970	17:00:00.04	37.098	-116.027	5.6	1268	90.0464	782.308
05.02.1970	15:00:00.04	37.164	-116.04	4.6	1286	89.9799	781.899
25.02.1970	14:28:38.04	37.037	-115.999	5.2	1206	90.1086	782.64
23.03.1970	23:05:00.04	37.086	-116.022	5.5	1252	90.0586	782.357
21.04.1970	14:30:00.04	37.055	-115.989	4.4	1253	90.0912	782.465
21.04.1970	15:00:00.04	37.116	-116.081	4.6	1268	90.0256	782.306
01.05.1970	14:13:00.04	37.059	-116.029	4.2	1209	90.0851	782.5
01.05.1970	14:40:00.17	37.136	-116.035	4.3	1266	90.0081	782.053
15.05.1970	13:30:00.17	37.162	-116.04	5.1	1286	89.9819	781.951
21.05.1970	14:15:00.03	37.071	-116.014	5.1	1237	90.074	782.441
26.05.1970	15:00:00.05	37.113	-116.063	5.5	1251	90.0295	782.27
26.06.1970	13:00:00.04	37.114	-116.087	4.3	1270	90.0272	782.27
05.11.1970	15:00:00.04	37.029	-116.013	4.9	1188	90.1158	782.671
16.12.1970	16:00:00.09	37.1	-116.009	5.1	1302	90.0453	782.278
17.12.1970	16:05:00.16	37.129	-116.084	5.8	1284	90.0125	782.188
18.12.1970	15:30:00.20	37.173	-116.1	5.1	1367	89.9678	781.973
16.06.1971	14:50:00.04	37.033	-116.015	4.9	1191	90.1117	782.539
23.06.1971	15:30:00.04	37.022	-116.024	4.8	1186	90.1222	782.573
24.06.1971	14:00:00.16	37.147	-116.068	4.9	1287	89.9954	781.986
08.07.1971	14:00:00.08	37.11	-116.052	5.5	1247	90.0331	782.169
18.08.1971	14:00:00.03	37.057	-116.037	5.4	1206	90.0867	782.497
29.09.1971	14:00:00.04	37.011	-116.008	4.4	1180	90.134	782.547
08.10.1971	14:30:00.15	37.114	-116.038	4.7	1261	90.0299	781.914
14.10.1971	14:30:00.16	37.18	-116.054	3.9	1286	89.9633	781.862
30.11.1971	15:45:00.15	37.16	-116.071	4.4	1302	89.9823	781.932
14.12.1971	21:09:59.16	37.124	-116.09	4.7	1281	90.0171	782.193
21.09.1972	15:30:00.19	37.082	-116.037	5.7	1225	90.0618	782.382
21.12.1972	20:15:00.24	37.14	-116.084	4.8	1296	90.0015	781.949
08.03.1973	16:10:00.19	37.104	-116.028	5.4	1279	90.0403	782.239
25.04.1973	22:25:00.03	37.005	-116.029	4.7	1180	90.1389	782.586
26.04.1973	17:15:00.17	37.123	-116.059	5.6	1261	90.0198	782.136
21.06.1973	14:45:00.08	37.092	-116.028	5.1	1255	90.0523	782.247
28.06.1973	19:15:12.40	37.148	-116.087	4.9	1311	89.9934	782.153
30.08.1974	15:00:00.16	37.152	-116.084	5.8	1313	89.9896	782.028
26.09.1974	15:05:00.17	37.133	-116.069	5.6	1275	90.0093	782.086
28.02.1975	15:15:00.00	37.106	-116.057	5.7	1245	90.0368	782.316
04.02.1976	14:20:00.11	37.069	-116.031	5.8	1182	90.075	782.457
17.03.1976	14:45:00.09	37.107	-116.053	5.8	1243	90.036	782.283
27.07.1976	20:30:00.08	37.075	-116.045	5.3	1179	90.0683	782.43

Продолжение

Приложение

08.12.1976	14:49:30.08	37.079	-116.002	4.9	1269	90.0666	782.456
28.12.1976	18:00:00.08	37.1	-116.037	5.5	1255	90.0439	782.239
16.02.1977	17:53:00.16	37.007	-116.032	4.3	1181	90.1367	782.838
05.04.1977	15:00:00.17	37.12	-116.063	5.6	1259	90.0226	782.174
27.04.1977	15:00:00.08	37.095	-116.029	5.4	1560	90.0493	782.299
25.05.1977	17:00:00.08	37.094	-116.046	5.3	1237	90.0493	782.277
04.08.1977	16:40:00.07	37.087	-116.008	5	1273	90.0583	782.395
19.08.1977	17:55:00.08	37.11	-116.055	5.6	1246	90.0329	782.206
27.09.1977	14:00:00.16	37.151	-116.068	4.8	1292	89.9914	781.967
26.10.1977	14:15:00.08	37.008	-116.018	4.4	1180	90.1365	782.549
09.11.1977	22:00:00.08	37.072	-116.051	5.7	1221	90.071	782.499
17.11.1977	19:30:00.08	37.021	-116.026	4.7	1186	90.1231	782.73
14.12.1977	15:30:00.17	37.136	-116.087	5.7	1290	90.0053	782.133
23.02.1978	17:00:00.16	37.124	-116.065	5.6	1261	90.0185	782.165
23.03.1978	16:30:00.20	37.102	-116.052	5.6	1239	90.0411	782.35
12.07.1978	17:00:00.08	37.079	-116.045	5.5	1225	90.0643	782.448
27.09.1978	17:00:00.07	37.074	-116.021	5	1234	90.0706	782.465
27.09.1978	17:20:00.08	37.08	-116.052	5.7	1226	90.063	782.472
18.11.1978	19:00:00.17	37.127	-116.085	5.1	1275	90.0144	782.181
24.01.1979	18:00:00.10	37.105	-116.013	4.5	1311	90.0401	782.091
08.02.1979	20:00:00.09	37.102	-116.056	5.5	1241	90.0408	782.29
15.02.1979	18:05:00.16	37.152	-116.073	4.8	1297	89.9902	782.004
20.06.1979	15:00:13.54	37.108	-116.016	4	1309	90.037	782.368
28.06.1979	14:44:00.17	37.143	-116.088	5	1303	89.9983	782.106
03.08.1979	15:07:30.16	37.084	-116.071	4.5	1235	90.058	782.397
08.08.1979	15:00:00.11	37.015	-116.009	4.8	1182	90.13	782.663
29.08.1979	15:08:00.17	37.121	-116.067	4.7	1260	90.0213	782.046
06.09.1979	15:00:00.09	37.088	-116.054	5.8	1232	90.0549	782.409
28.02.1980	15:00:00.09	37.127	-116.089	4.4	1280	90.0142	782.305
03.04.1980	14:00:00.09	37.15	-116.083	4.7	1304	89.9916	782.168
16.04.1980	20:00:00.09	37.101	-116.031	5.3	1266	90.0432	782.266
02.05.1980	18:46:30.09	37.056	-116.02	4.5	1211	90.0886	782.63
25.09.1980	14:45:00.09	37.056	-116.049	4.6	1209	90.087	782.568
14.11.1980	16:50:00.08	37.111	-116.02	4.1	1306	90.0338	782.287
15.01.1981	20:25:00.09	37.087	-116.046	5.7	1232	90.0563	782.359
29.05.1981	16:00:00.09	37.102	-116.005	4.8	1311	90.0436	782.347
10.07.1981	14:00:00.10	37.129	-116.035	4.5	1266	90.0151	782.046
01.10.1981	19:00:00.10	37.082	-116.01	5.1	1260	90.0632	782.425
11.11.1981	20:00:00.09	37.076	-116.069	4.9	1232	90.066	782.474
12.11.1981	15:00:00.10	37.108	-116.05	5.4	1243	90.0352	782.247
03.12.1981	15:00:00.10	37.148	-116.072	4.8	1293	89.9942	781.976
16.12.1981	21:05:00.09	37.114	-116.124	4.4	1348	90.0253	782.379
28.01.1982	16:00:00.10	37.091	-116.052	5.6	1233	90.052	782.337
17.04.1982	18:00:00.09	37.017	-116.011	4.5	1177	90.1279	782.723
07.05.1982	18:17:00.11	37.069	-116.046	5.7	1217	90.0742	782.538

Продолжение

Приложение

29.07.1982	20:05:00.08	37.102	-116.076	4.4	1253	90.0398	782.356
05.08.1982	14:00:00.09	37.084	-116.007	5.7	1268	90.0614	782.388
12.11.1982	19:17:00.10	37.024	-116.033	4.1	1187	90.1198	782.846
10.12.1982	15:20:00.09	37.08	-116.073	4.8	1236	90.0619	782.144
17.02.1983	17:00:00.09	37.163	-116.064	4	1239	89.9797	782.025
14.04.1983	19:05:00.12	37.073	-116.047	5.7	1191	90.0702	782.539
22.04.1983	13:53:00.08	37.111	-116.023	4	1296	90.0336	782.068
05.05.1983	15:20:00.08	37.146	-116.09	4.4	1309	89.9952	782.151
26.05.1983	15:00:00.09	37.103	-116.007	4.5	1312	90.0425	782.332
09.06.1983	17:10:00.09	37.158	-116.09	4.5	1327	89.9833	782.103
03.08.1983	13:33:00.10	37.119	-116.09	4.2	1276	90.0221	782.07
11.08.1983	14:00:00.12	36.998	-116.004	4.4	1175	90.1472	782.674
21.09.1983	16:25:00.08	37.121	-116.056	4.2	1256	90.0219	782.376
22.09.1983	15:00:00.12	37.106	-116.05	4.1	1241	90.0372	782.221
09.12.1983	16:00:00.11	37.013	-116.047	4	1188	90.13	782.69
16.12.1983	18:30:00.09	37.14	-116.073	5.2	1287	90.0021	782.102
31.01.1984	15:30:00.08	37.113	-116.123	4.3	1344	90.0263	782.323
01.03.1984	17:45:00.09	37.066	-116.047	5.9	1216	90.0772	782.568
31.03.1984	14:30:00.08	37.146	-116.085	4.5	1304	89.9955	782.292
01.05.1984	19:05:00.09	37.106	-116.023	5.4	1292	90.0386	782.259
31.05.1984	13:04:00.10	37.103	-116.049	5.8	1237	90.0402	782.277
20.06.1984	15:15:00.09	37	-116.044	4.7	1180	90.1431	782.776
02.08.1984	15:00:00.09	37.017	-116.009	4.6	1182	90.128	782.689
30.08.1984	14:45:00.10	37.09	-116	4.5	1291	90.0558	782.295
13.09.1984	14:00:00.00	37.087	-116.072	5	1238	90.0549	782.529
10.11.1984	16:40:00.09	37	-116.018	4.4	1177	90.1445	782.717
15.03.1985	16:31:00.10	37.058	-116.046	4.8	1211	90.0852	782.62
23.03.1985	18:30:00.08	37.18	-116.09	5.3	1362	89.9613	781.987
02.04.1985	20:00:00.09	37.095	-116.033	5.8	1251	90.049	782.315
12.06.1985	17:30:00.09	37.088	-116.085	4.6	1250	90.0532	782.318
26.06.1985	18:03:00.08	37.124	-116.123	4.9	1352	90.0154	782.274
17.08.1985	16:25:00.09	37.002	-116.044	4.6	1181	90.1411	782.854
27.09.1985	14:15:00.08	37.09	-116.003	4.7	1274	90.0556	782.404
16.10.1985	21:35:00.09	37.11	-116.122	4.6	1341	90.0294	782.257
05.12.1985	15:00:00.07	37.053	-116.046	5.7	1208	90.0902	782.625
22.03.1986	16:15:00.08	37.083	-116.067	5.1	1233	90.0592	782.403
05.06.1986	15:04:00.06	37.098	-116.016	5.3	1289	90.047	782.378
24.07.1986	15:05:00.09	37.143	-116.072	4.4	1287	89.9992	782.195
14.11.1986	16:00:00.07	37.1	-116.049	5.8	1236	90.0432	782.398
11.02.1987	16:45:00.07	37.011	-116.046	4.5	1186	90.132	782.795
18.06.1987	15:20:00.08	37.194	-116.036	4.6	1318	89.9503	781.963
30.06.1987	16:05:00.10	36.999	-116.044	4.1	1179	90.1441	782.783
16.07.1987	19:00:00.08	37.104	-116.024	4.8	1284	90.0406	782.28
13.08.1987	14:00:00.09	37.061	-116.046	5.9	1212	90.0822	782.537
23.10.1987	16:00:00.09	37.142	-116.08	5.2	1294	89.9997	782.119

Продолжение

Приложение

13.05.1988	15:35:00.11	37.124	-116.073	4.8	1268	90.018	782.318
21.05.1988	22:30:00.14	37.032	-115.988	4.3	120	90.1142	782.69
30.08.1988	18:00:00.09	37.086	-116.069	5	1236	90.0561	782.42
13.10.1988	14:00:00.08	37.089	-116.05	5.9	1229	90.0541	782.415
10.02.1989	20:06:00.06	37.077	-116.001	5.2	1267	90.0687	782.432
09.03.1989	14:05:00.09	37.143	-116.068	5	1280	89.9994	782.135
10.03.1990	16:00:00.08	37.112	-116.056	5	1246	90.0309	782.435
08.03.1991	21:02:45.08	37.104	-116.075	4.4	1254	90.0378	782.376
18.10.1991	19:12:00.00	37.063	-116.046	5.2	1213	90.0802	782.573
26.11.1991	18:35:00.07	37.096	-116.07	4.6	1246	90.0461	782.516
26.06.1967	16:00:00.08	37.202	-116.209	5.1	2200	89.933	781.791
31.08.1967	16:30:00.04	37.178	-116.21	5	2295	89.9569	781.968
15.01.1969	19:30:00.04	37.209	-116.226	5.3	2263	89.9251	781.822
05.12.1969	17:00:00.04	37.18	-116.212	5	2247	89.9548	781.867
11.02.1970	19:15:00.04	37.201	-116.206	4.7	2229	89.9342	781.768
05.05.1970	15:30:00.17	37.216	-116.185	5	2094	89.9204	781.715
26.05.1970	14:16:00.17	37.183	-116.214	5	2274	89.9517	781.84
29.06.1971	18:30:00.16	37.177	-116.212	4.9	2289	89.9577	781.828
02.05.1972	19:15:00.04	37.208	-116.21	5	2199	89.927	781.824
20.07.1972	17:16:00.16	37.214	-116.184	4.9	2113	89.9224	781.688
05.06.1973	17:00:00.17	37.185	-116.216	5.1	2247	89.9496	782.049
12.10.1973	17:00:00.08	37.2	-116.204	4.8	2238	89.9353	781.711
13.09.1978	15:15:00.16	37.209	-116.212	4.6	2212	89.9259	781.77
31.10.1980	18:00:00.09	37.211	-116.206	4.7	2212	89.9242	781.803
15.02.1984	17:00:00.11	37.221	-116.182	5.1	2044	89.9156	781.705
06.04.1985	23:15:00.09	37.201	-116.208	4.8	2212	89.9341	781.814
10.04.1986	14:08:30.10	37.218	-116.184	4.9	2084	89.9184	781.703
10.12.1988	20:30:00.06	37.199	-116.21	5	2232	89.936	781.828
25.07.1990	15:00:00.06	37.207	-116.215	4.7	2216	89.9277	781.826

ON THE RELIABILITY OF ESTIMATING TIME TRENDS IN THE TRAVEL TIME OF P WAVES FROM EXPLOSIONS

© 2025 V. M. Ovtchinnikov*

Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**E-mail: ovtch@idg.ras.ru*

The reliability of determining the time trend of the travel time of longitudinal waves P excited by nuclear explosions at the Nevada Test site and recorded at the BRVK seismic station was assessed based on multiple regression analysis supplemented by the initial sampling method. It is shown that the contribution of the time factor to the variations in the travel times of the P waves according to observations of 248 explosions at the BRVK station is statistically significant, the trend value is 4.31 ± 0.8 ms/year, although its share in the travel time variations is less than 0.1%. When the explosions at Yucca Flat and Pahute Mesa were evaluated separately, the trend values were 3.18 ± 1.15 and 4.24 ± 1.23 ms/year, respectively.

Keywords: time trend of travel time, regression analysis, bootstrapping.