



## Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик

П. Н. Александров<sup>@1</sup>, Л. В. Стасенко<sup>2</sup>

@E-mail: alexandr@igemi.troitsk.ru

<sup>1</sup> Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН,  
Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup> Научная станция РАН в г. Бишкек, Киргизская Республика

**Резюме.** В статье рассматриваются методические вопросы применения фазовых характеристик к определению моментов прихода сейсмических волн. Точность локации землетрясений зависит от точности определения времен прихода продольных, поперечных и поверхностных волн. Определение фазовых характеристик сейсмических волн имеет особое значение для локации близких землетрясений, поскольку для дальних событий эти волны разделяются. Исследованы способы определения моментов вступления сейсмических волн различной природы, характеризующихся разными частотами, на основе анализа фазовых характеристик сигналов от сейсмических событий. Рассмотрены теоретические основы данного подхода и приведены результаты обработки сейсмических данных по определению времен прихода волновых пакетов соответствующих упругих волн, связанных с землетрясениями.

**Ключевые слова:** землетрясения, преобразование Гильберта, фазовый спектр, время вступления

## Determination of the arrival time of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics

Pavel N. Aleksandrov<sup>@1</sup>, Liya V. Stasenko<sup>2</sup>

@E-mail: alexandr@igemi.troitsk.ru

<sup>1</sup> Geoelectromagnetic Research Centre, Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Troitsk, Russia

<sup>2</sup> Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

**Abstract.** The article discusses methodological issues of applying phase characteristics in determining the arrival time of seismic waves. The accuracy of earthquake location depends on the precision with which the arrival times of longitudinal, transverse, and surface waves can be determined. Determining the phase characteristics of seismic waves is crucial for locating nearby earthquakes, since these waves are different for distant earthquakes. Methods for determining the arrival times of seismic waves of various natures characterized by different frequencies are investigated based on the analysis of the phase characteristics of signals from seismic events. Theoretical underpinnings of this approach are considered, and the results of processing seismic data on determining the arrival times of wave packets of the corresponding elastic waves associated with earthquakes are presented.

**Keywords:** earthquakes, Hilbert transform, phase spectrum, arrival time

**Для цитирования:** Александров П.Н., Стасенко Л.В. Определение моментов времени вступления сейсмических сигналов на основе анализа их фазовых характеристик. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 3, 355. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.doa-355>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-355.pdf>; <https://www.elibrary.ru/pnohgu>

**For citation:** Aleksandrov P.N., Stasenko L.V. Determination of the arrival time of seismic signals based on the analysis of their phase characteristics. *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 3, 355. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.0.doa-355>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f2025-0-355.pdf>

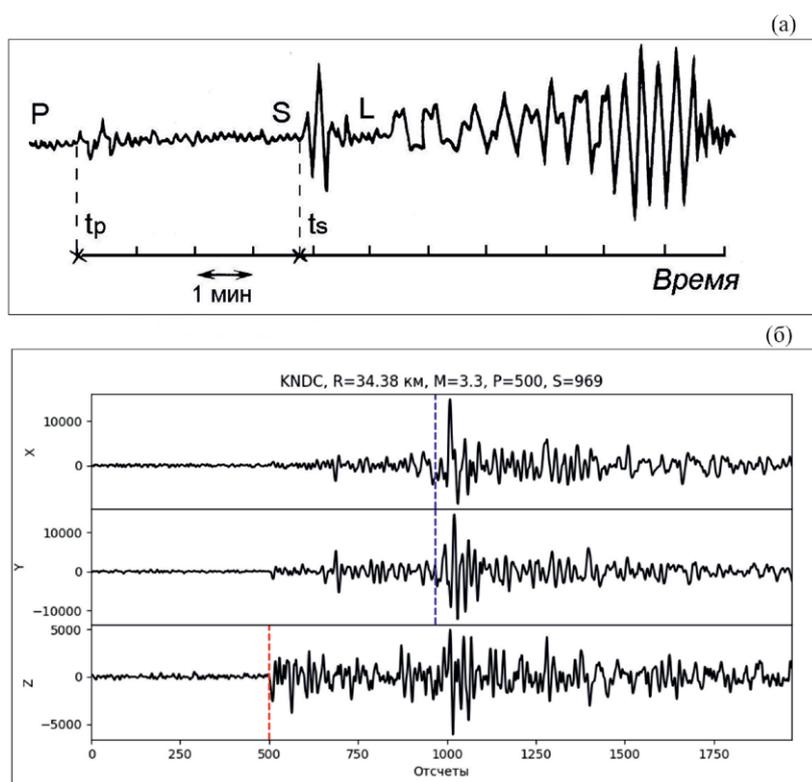
## Введение

Изучение сейсмических волн, возникающих при землетрясениях, играет важную роль, поскольку позволяет определить основные характеристики как среды распространения, так и очага события. При изучении землетрясений основное внимание уделяется оценке геометрических и кинематических параметров сейсмического поля, включая местоположение, магнитуду, размеры разломов и очаговые механизмы. Сейсмические волны, связанные с землетрясениями, по характеру распространения делятся на продольные, поперечные и поверхностные. Продольная Р-волна (primary, первичная) – это волна типа звуковой, связанная

с процессами сжатия и растяжения горной породы при распространении в геологической среде. Поперечная S-волна (secondary, вторичная) обладает сдвиговым механизмом передачи возмущения. Поверхностные волны называют L-волнами, или длинными (long), так как период колебаний у них больше, чем у Р- и S-волн. Эти волны представляют собой сочетание двух типов: волн Лява LQ (поперечные колебания), и волн Релея LR (частицы перемещаются по эллипсам вдоль и поперек поверхности границы раздела сред) [1]. Характерный вид сигналов от удаленного и близкого землетрясений представлен на рис. 1.

Точность определения амплитуд и времени прихода сейсмической волны обуславливается отношением сигнал/шум и степенью совпадения спектрального состава волны с полосой пропускания регистрирующей аппаратуры. Первоочередной задачей в процессе обработки сейсмических сигналов является обнаружение самого сигнала – определение моментов вступления волн. Очень важно в этих случаях правильно интерпретировать фазы Р-, S- и L-волн [3]. Для дальних землетрясений проблема определения моментов прихода волн стоит не так остро, как в случае ближних землетрясений. Поскольку при близких расстояниях от эпицентра землетрясений происходит очевидное наложение сейсмических волн, в процессе обработки могут возникать трудности в определении фаз первых вступлений Р-, S- и L-волн.

Задачу локации землетрясений можно разделить на две подзадачи – обнаружение сигнала и его анализ. Для определения моментов времени вступлений Р-, S- и L-волн сейсмология стала использовать широкий спектр разнообразных методов.



**Рис. 1.** Характер распространения упругих волн в сплошной среде для удаленного (регионального) сейсмического события (а) [2] и близкого (локального) сейсмического события (б) из регионального сейсмического каталога Научной станции РАН, по данным сети KNET (Киргизской сейсмической телеметрической сети; <https://doi.org/10.7914/SN/KN>). Показано последовательное вступление волн продольных Р, поперечных S и поверхностных L соответствующих волновых пакетов.

**Fig. 1.** The nature of the propagation of elastic waves in a continuous medium for a remote (regional) seismic event (a) [2] and for a nearby (local) seismic event (b) from the regional seismic catalog of the Research Station of the RAS, according to the KNET network data (Kyrgyz Seismic Telemetry Network; <https://doi.org/10.7914/SN/KN>). The sequential arrival of waves in the form of longitudinal P-waves, transverse S-waves, and surface L-waves of corresponding wave packets is illustrated.

## Обзор методов анализа сейсмических сигналов

В сейсмологии на сегодняшний день наиболее распространенным алгоритмом детектирования является алгоритм STA/LTA. Данный метод по обнаружению фаз сейсмических волн основан на анализе отношения амплитуд в коротком и длинном временных окнах. Эта методика описана в работах [3–5]. В публикациях [6, 7] предложен подход, основанный на вейвлет-преобразовании сейсмических сигналов. Данный метод позволяет отображать сигнал как во временной, так и в частотной областях, может разделять сигнал и шум, связанный с P-волнами. Применениям фрактальных свойств сигналов от землетрясений посвящены многочисленные публикации [8–10]. В работе [11] показано, что свойства мультифрактального спектра могут быть использованы для обнаружения прихода сейсмической волны, оценки ее длительности и разделения P-, S- и L-волн. В основе фрактального анализа выявлено, что фоновые шумовые участки сигналов демонстрируют монофрактальное поведение. Изменение фрактальных свойств записи землетрясения позволяет определить момент прихода сейсмической волны. Для анализа записей сигналов и обнаружения первых вступлений сейсмических волн также применяются модели глубокого машинного обучения [12, 13]. В статьях [14, 15] рассматривается архитектура и апробация модели разработанной авторами нейронной сети, основной функционал которой направлен на автоматическое выделение фаз P- и S-волн. Указанные методы, как и другие методы по обнаружению первых вступлений сейсмических волн, основаны на индивидуальных положениях и математических техниках, используемых для решения задачи локации землетрясений. Все они сталкиваются с проблемой определения первых моментов вступления сейсмических сигналов для близких землетрясений.

В настоящей работе предложен способ определения моментов вступления волн, основанный на анализе фазовых характеристик

сейсмических сигналов, прежде всего от близких землетрясений, когда происходит суперпозиция P-, S-, L-волн, что затрудняет определение моментов их вступлений. Фазовые характеристики сигналов анализируются как во временной, так и в частотной областях.

## Теория и методика анализа фазовых характеристик сейсмических сигналов

Во временной области фазовые характеристики широко используются в сейсморазведке с целью получения мгновенных частот [2]. Рассмотрим этот подход для определения моментов вступления сейсмических волн.

### Мгновенные частоты

Пусть имеется сигнал по времени  $S(t)$ , состоящий из разных частот. Полагая, что спектр этого сигнала определен только на положительной оси частот (при отрицательных частотах спектр полагается равным нулю), то во временной области сигнал будет удовлетворять преобразованию Гильберта [2]. Отсюда мнимую часть временного сигнала  $I(t)$  можно найти из выражения [16]:

$$I(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{S(v)}{t-v} dv.$$

Тогда комплексный сигнал во времени будет иметь вид

$$\check{S}(t) = S(t) + iI(t) = |S(t) + iI(t)|e^{i\varphi(t)},$$

где  $\varphi(t)$  – фаза комплексного сигнала;  $|S(t) + iI(t)| = |\check{S}(t)|$  – модуль комплексного сигнала (огibaющая сигнала во времени  $S(t)$ );  $i = \sqrt{-1}$  – мнимая единица. Фаза комплексного сигнала, как и фазовый спектр в случае использования преобразования Фурье, определяется с точностью  $2\pi m$  ( $m$  – целое число). Однако существуют приемы восстановления непрерывного фазового спектра, например, с помощью оператора `unwrap` программного пакета MATLAB. Оператор `unwrap` корректирует

фазовые углы в радианах вектора  $P$ , добавляя значения, кратные  $\pm 2\pi$ , когда абсолютные значения скачков между последовательными элементами  $P$  больше или равны допуску скачков по умолчанию, равному  $\pi$  радианам. Далее будем использовать только восстановленный фазовый спектр.

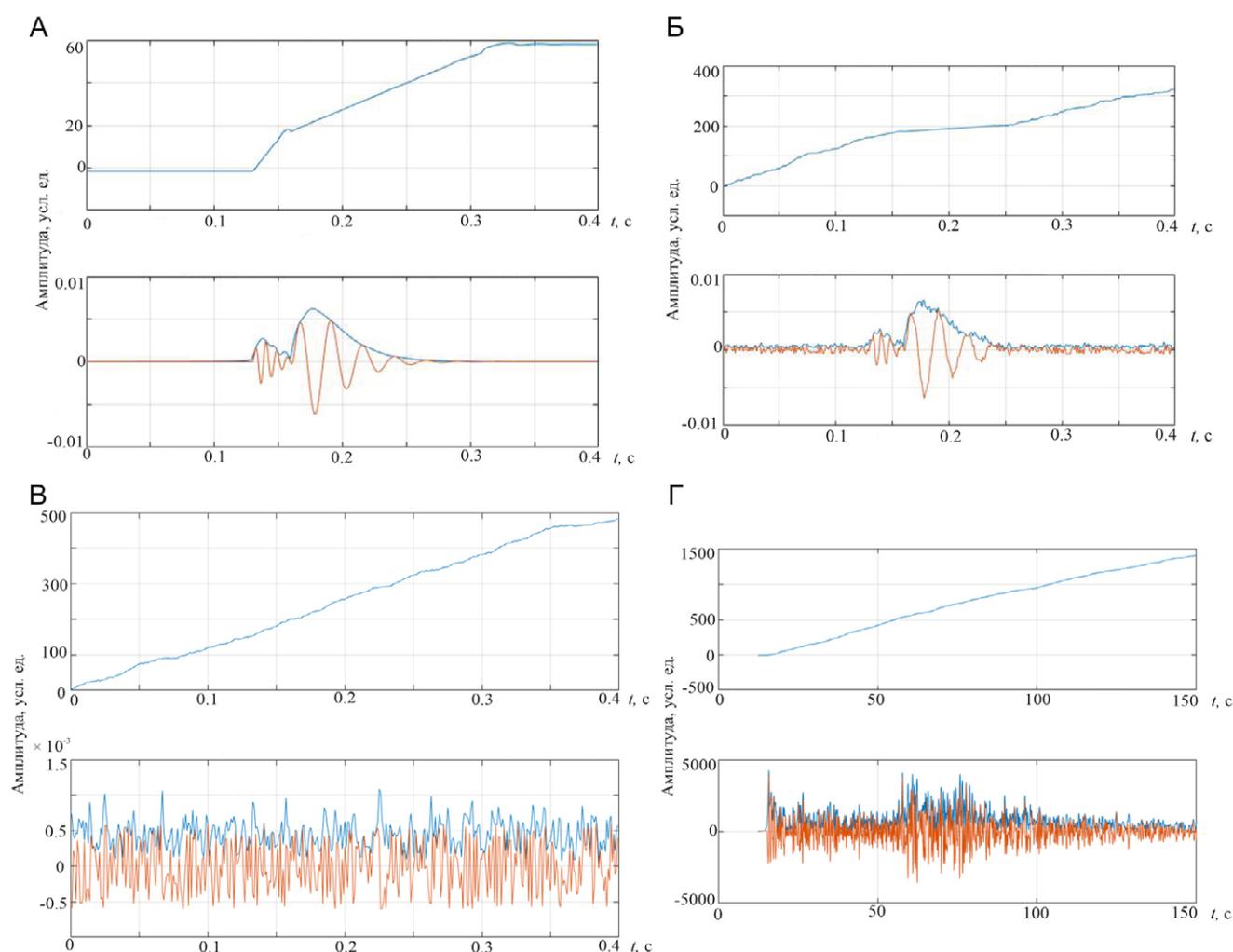
Производная по времени от фазы  $\varphi(t)$  определяет мгновенную частоту  $\omega = \frac{\partial}{\partial t} \varphi(t)$ , которая эквивалентна наклону графика фазы комплексного сигнала  $\varphi(t)$ . Результаты ис-

пользования преобразования Гильберта представлены на рис. 2.

Как следует из рис. 2 А, излом графика фазы указывает на момент времени вступления волны, а наклон – на частоту этой волны.

На рис. 2 Б представлен тот же результат с наложенной помехой (случайная последовательность чисел, распределенных по нормальному закону)  $P(t)$  в 10 раз меньше, чем максимальная амплитуда сигнала:

$$|P(t)| < \max|S(t)|/10: \tilde{S}(t) = \tilde{S}(t) + P(t).$$



**Рис. 2.** Результаты использования преобразования Гильберта.

На верхних графиках частей А–Г фаза комплексного сигнала. Нижние графики: А – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая); Б – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая) с наложенной помехой в 10 раз меньше, чем максимальная амплитуда сигнала; В – результат применения преобразования Гильберта к помехе: сигнал помехи во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя кривая); Г – сигнал во времени (красная кривая) и его огибающая (синяя) для реального сигнала зарегистрированного сейсмического поля от землетрясения.

**Fig. 2.** Upper plots illustrate the complex signal phase. Bottom plots: А, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve); Б, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve) with superimposed interference 10 times less than the maximum signal amplitude; В, the results of using the Hilbert transform to the interference in time (red curve) and its envelope (blue curve); Г, the signal in time (red curve) and its envelope (blue curve) for the actual seismic field signal recorded from the earthquake.

Из рис. 2 Б следует, что при наличии помех установить момент вступления сигналов затруднительно, хотя наклоны позволяют определять частоты сигналов.

Рис. 2 В показывает результаты обработки в случае отсутствия искомым сигналов.

На рис. 2 Г представлен практический пример применения преобразования Гильберта для реального сигнала от землетрясения. Для этого использовались данные регионального сейсмического каталога Научной станции РАН (<https://doi.org/10.7914/SN/KN>). На рис. 2 Г на верхнем графике приведен фрагмент записи сейсмического события со станции BOOM  $R = 132.56$  км,  $M = 4.4$  (Z-компонента), с шагом дискретизации  $\Delta t = (1/40)$  с, на нижнем – результат использования преобразования Гильберта. Практический пример показывает, что использование мгновенных частот, как следует из рис. 2, для анализа сигналов от землетрясений не дало положительных результатов.

Таким образом, на основе математического моделирования проведен анализ использования преобразования Гильберта для обработки сейсмических сигналов от землетрясений с целью выделения времени вступления сигналов различной частоты. При применении данного подхода помеха осложняет определение моментов вступления волн. Однако этот подход может быть использован для выделения сигналов от сейсмических событий при регистрации упругих полей.

### Анализ фазового спектра

Рассмотрим следующую задачу – анализ фазового спектра в частотной области при применении к регистрируемым сигналам преобразования Фурье с целью определения моментов прихода сейсмических волн от землетрясений.

Пусть выделено зарегистрированное поле от сейсмического события во временной области  $S(t)$ . Перейдем в частотную область с использованием преобразования Фурье в

виде  $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)e^{i\omega t} dt = |F(\omega)|e^{i\varphi(\omega)}$ , где  $F(\omega)$  – спектр сигнала  $S(t)$ ;  $t$  – время;  $\omega$  – круговая частота ( $\omega = 2\pi f$  ГЦ);  $|F(\omega)|$  – амплитудный спектр;  $\varphi(\omega)$  – фазовый спектр.

Рассмотрим несколько случаев. Пусть сигнал во временной области имеет вид дельта-функции Дирака, появляющейся в момент времени  $t_0$ :  $S(t) = \delta(t - t_0)$  (рис. 3 а). Тогда фазовый спектр имеет вид линейной функции частоты  $\varphi(\omega) = \omega t_0$ . Наклон этой функции определяется временем  $t_0$ . Следовательно, по наклону фазового спектра можно судить о времени появления сигнала. Схематически это показано на рис. 3 б.

Рассмотрим волновой пакет с ограниченным носителем, например типа импульса Рикера [17]. В дискретном виде волновой пакет в частотной области будем описывать в следующем виде:

$$S(\omega) = \sum_{j=1}^N I_j \int_{t_j-\Delta t/2}^{t_j+\Delta t/2} e^{i\omega t} dt, \quad (1)$$

где  $\Delta t$  – шаг дискретизации по времени,  $j$  – номер отсчета во временной области,  $N$  – количество отсчетов в волновом пакете,  $I_j$  – амплитуда сигнала для номера отсчета  $j$ ,  $\omega$  – частота.

Тогда

$$\begin{aligned} S(\omega) &= \sum_{j=1}^N I_j \frac{e^{i\omega(t_j+\frac{\Delta t}{2})} - e^{i\omega(t_j-\frac{\Delta t}{2})}}{i\omega} = \\ &= \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} 2i \frac{\text{Sin}(\frac{\omega\Delta t}{2})}{\omega}. \end{aligned}$$

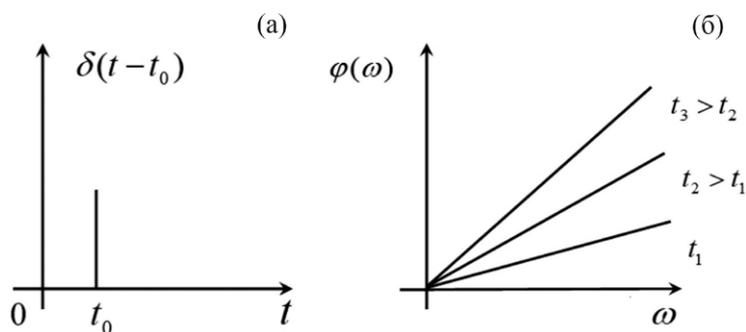


Рис. 3. Схематическое изображение дельта-функции Дирака (а) и ее фазового спектра (б) в зависимости от времени начала сигнала. Времена начала сигнала обозначены знаками  $t_0 = \{t_1, t_2, t_3\}$ .

Fig. 3. Schematic representation of the Dirac delta function (a) and its phase spectrum (b), depending on the signal arrival time; arrival times are indicated by signs  $t_0 = \{t_1, t_2, t_3\}$ .

Полагая аргумент синуса малым, получим:

$S(\omega) \approx \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} \Delta t$ , что представляет собой интегральную сумму [16] для эквидистантного способа регистрации сигнала. Устремляя  $\Delta t$  к нулю, в пределе получим

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \sum_{j=1}^N I_j e^{i\omega t_j} \Delta t = \int_{t_0}^{t_0+T} I(\tau) e^{i\omega \tau} d\tau,$$

где  $t_0$  – момент начала волнового пакета,  $T$  – его длительность, которую можно устремить в бесконечность. Отсюда получим спектр волнового пакета в амплитудно-фазовом виде:

$$\int_{t_0}^{t_0+T} I(\tau) e^{i\omega \tau} d\tau = |S(\omega)| e^{i\varphi(\omega)} e^{i\omega t_0},$$

где учтено, что начало сигнала может быть сдвинуто от начала координат на величину  $t_0$ .

Таким образом, фазовый спектр волнового пакета будет описываться функцией  $\tilde{\varphi} = \varphi(\omega) + \omega t_0$ . Согласно теории преобразования Фурье, большие частоты в спектре сигналов описывают сигнал на ранних временах регистрации. Это позволяет определить фазовые характеристики волнового пакета при анализе фазового спектра на больших частотах. В случае рассмотрения сейсмических сигналов это позволяет исследовать свойства сигналов для продольных волн.

Проведем анализ средних и нижних частот фазового спектра.

Волновой пакет во временной области, иллюстрирующий выражение (1), представлен на рис. 4 а, фазовый спектр – на рис. 4 б.

Дополним высокочастотный сигнал низкочастотными и рассмотрим суперпозицию волновых пакетов с целью их разделения. При этом не обязательно, чтобы низкочастотный сигнал появлялся после высокочастотного. Пусть суперпозиция волновых пакетов  $f_1$  и  $f_2$  волн, возможно разных типов, распространяющихся в среде от одного источника в одном направлении с разными скоростями, имеет вид, изображенный на рис. 5.

На рис. 5 б виден излом в фазовом спектре. Аппроксимируем этот график кусочно-линейной функцией. Построим функционал

$$\sum_{j=1}^n (\varphi_j - a_1 \omega_j - b_1)^2 + \sum_{j=n+1}^N (\varphi_j - a_2 \omega_j - b_2)^2 = \delta^2,$$

где  $a_1, b_1$  – константы первой прямой,  $a_2, b_2$  – константы второй прямой,  $n$  – номер отсчета, где сочленяются прямые.

Нахождение констант  $a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$  методом наименьших квадратов сводится к решению двух систем линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{j=1}^n \omega_j^2 + b_1 \sum_{j=1}^n \omega_j = \sum_{j=1}^n \varphi_j \omega_j, \\ a_1 \sum_{j=1}^n \omega_j + b_1 n = \sum_{j=1}^n \varphi_j \end{cases}$$

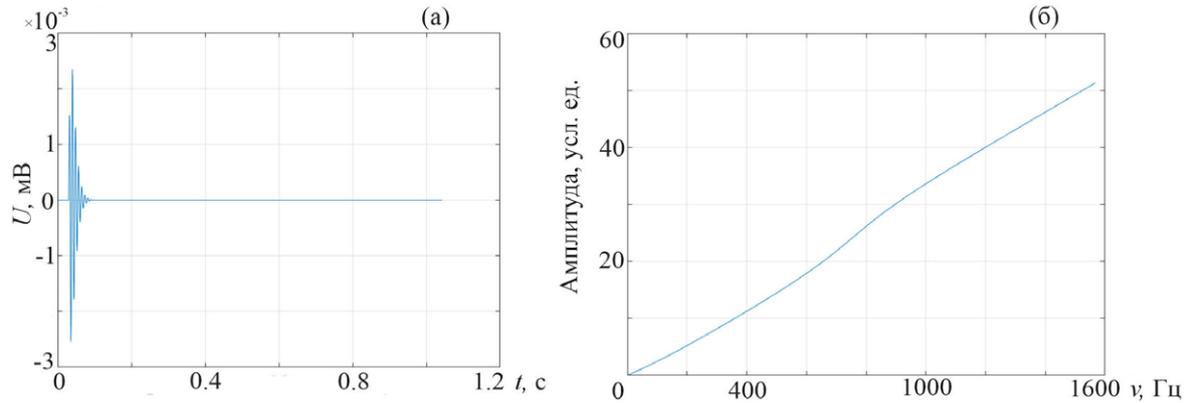
и

$$\begin{cases} a_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j^2 + b_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j = \sum_{j=n+1}^N \varphi_j \omega_j, \\ a_2 \sum_{j=n+1}^N \omega_j + b_2 (N - n) = \sum_{j=n+1}^N \varphi_j. \end{cases}$$

Основная задача – нахождение номера  $n$ . Для ее решения, после нахождения коэффициентов  $a_1, b_1$  и  $a_2, b_2$ , найдем  $\delta^2 = \delta^2(n)$ , перебирая значения  $n$ . По минимуму этой функции найдем номер отсчета  $n_m$ , где соединяются прямые. Аппроксимация ломаной фазового спектра будет равна

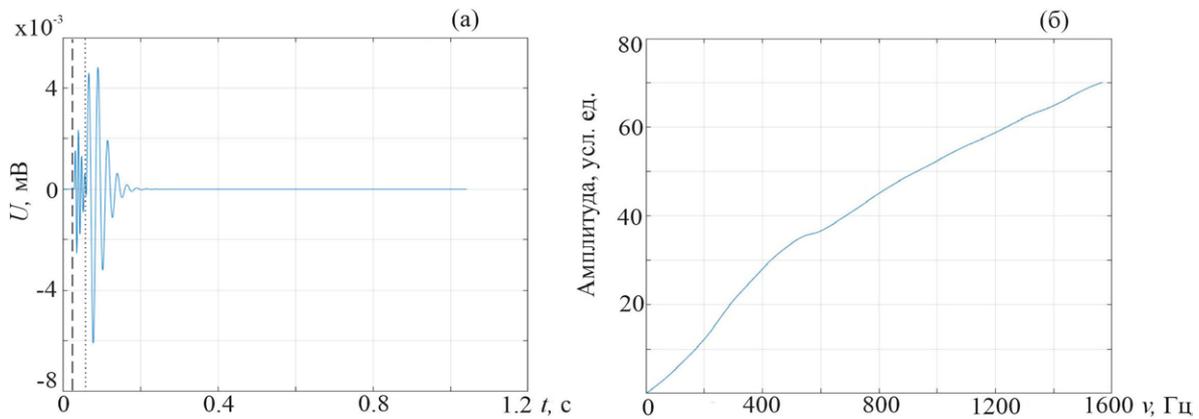
$$\varphi(\omega) = \begin{cases} a_1 \omega + b_1, & \omega_1 < \omega < \omega_{n_m} \\ a_2 \omega + b_2, & \omega_{n_m+1} < \omega < \omega_N \end{cases}$$

Результат вычисления функционала  $\delta^2 = \delta^2(n)$  представлен на рис. 6 а, фазовый спектр (восстановленный) и результаты его аппроксимации – на рис. 6 б.



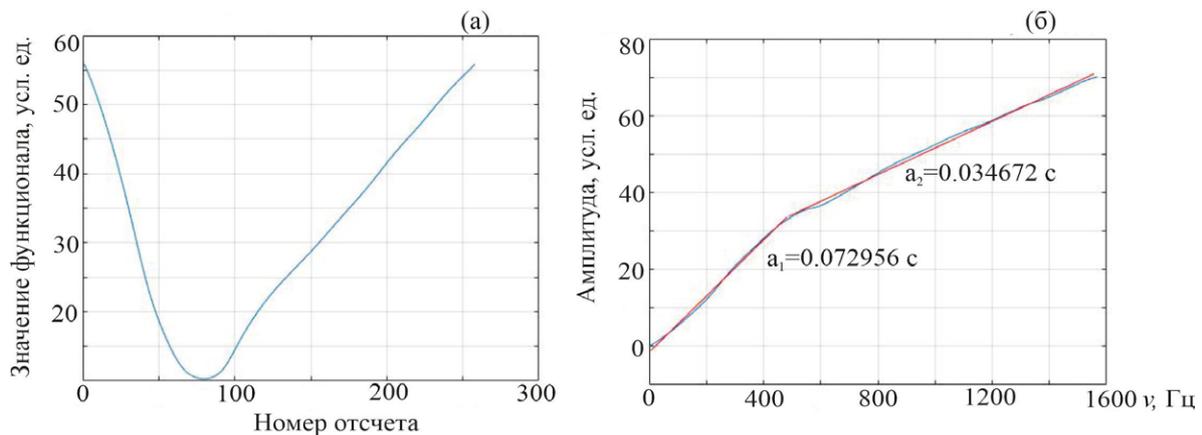
**Рис. 4.** Пример волнового пакета во временной области на основе формы импульса вида  $te^{-at} \sin(\omega t)$  с параметрами  $a = 140 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega = 753 \text{ Гц}$ , с шагом дискретизации  $\Delta t = 1 \text{ мс}$  (а); его фазовый спектр (б); время начала высокочастотного сигнала  $0.025787 \text{ с}$ .

**Fig. 4.** An example of a time domain wave packet based on the pulse shape  $te^{-at} \sin(\omega t)$  with parameters  $a = 140 \text{ s}^{-1}$ ,  $\omega = 753 \text{ Hz}$  and a sampling step  $\Delta t = 1 \text{ ms}$  (a); its phase spectrum (б); the arrival time of the high-frequency signal is  $0.025787 \text{ s}$ .



**Рис. 5.** Пример суперпозиции «высокочастотного»  $f_1$  (штриховая линия) и «низкочастотного»  $f_2$  (пунктирная линия) волновых пакетов (а); фазовый спектр суперпозиции высокочастотного и низкочастотного сигналов во временной области (б).

**Fig. 5.** An example of a superposition of “high-frequency”  $f_1$  (dashed line) and “low-frequency”  $f_2$  (dotted line) wave packets (a); the phase spectrum of superposition of high-frequency and low-frequency signals in the time domain (б).



**Рис. 6.** (а) Минимум функционала находится в точке с номером отсчета  $n_m = 80$ . Он соответствует частоте  $\omega_{n_m} = 482.3943 \text{ Гц}$ . (б) Фазовый спектр (восстановленный) (синяя линия) и результат его аппроксимации (красная линия).  $a_1$  и  $a_2$  – время начала низкочастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

**Fig. 6.** (a) The minimum of the functional is located at the point with the reference number  $n_m = 80$ . It corresponds to the frequency  $\omega_{n_m} = 482.3943 \text{ Hz}$ . (б) The phase spectrum (reconstructed) (blue line) and the result of the polyline approximation (red line).  $a_1$  and  $a_2$  indicate the arrival time of low-frequency and high-frequency signals, respectively.

## Практический пример разделения упругого поля

Применим рассмотренный подход к обработке сейсмических данных, зарегистрированных от сейсмических событий. Как известно, сейсмические сигналы состоят из трех типов волн (суперпозиции) – высокочастотные (продольные волны, приходящие раньше других), среднечастотные (поперечные, приходящие позже продольных) и низкочастотные (поверхностные, приходящие после поперечных). Пусть выделено зарегистрированное поле от сейсмического события во временной области  $S(t)$ . График фазового спектра представляет собой совокупность трех прямых, осложненных отклонениями. Следовательно, необходимо аппроксимировать их ломаной (кусочно-линейными функциями), состоящей из трех прямых.

Построим функционал:

$$\sum_{j=1}^{n_1} (\varphi_j - a_1 \omega_j - b_1)^2 + \sum_{j=n_1+1}^{n_2} (\varphi_j - a_2 \omega_j - b_2)^2 + \sum_{j=n_2+1}^N (\varphi_j - a_3 \omega_j - b_3)^2 = \delta^2,$$

где  $a_1, b_1$  – константы первой прямой,  $a_2, b_2$  – константы второй прямой,  $a_3, b_3$  – константы третьей прямой,  $n_1, n_2$  – номера отсчетов, где сочленяются прямые.

Следовательно, функционал является функцией номеров отсчетов  $\delta^2 = \delta^2(n_1, n_2)$ . Задача заключается в нахождении номеров отсчетов  $n_1, n_2$ , где функционал  $\delta^2$  принимает минимальное значение. Решение этой задачи может быть получено простым перебором значений  $n_1, n_2$  при условии  $n_1 < n_2$ . Это требование следует из учета принципа причинности в том смысле, что сначала приходят продольные высокочастотные волны, далее среднечастотные поперечные волны и последними – низкочастотные поверхностные волны [2].

Кроме того, с формальной точки зрения, фазовый спектр как функция частоты должен быть однозначной функцией [16].

Нахождение констант  $a_1, b_1; a_2, b_2$  и  $a_3, b_3$  методом наименьших квадратов сводится к решению двух систем линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} a_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j^2 + b_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j = \sum_{j=1}^{n_1} \varphi_j \omega_j \\ a_1 \sum_{j=1}^{n_1} \omega_j + b_1 n_1 = \sum_{j=1}^{n_1} \varphi_j \end{cases},$$

$$\begin{cases} a_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j^2 + b_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \varphi_j \omega_j \\ a_2 \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \omega_j + b_2 (n_2 - n_1) = \sum_{j=n_1+1}^{n_2} \varphi_j \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} a_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j^2 + b_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j = \sum_{j=n_2+1}^N \varphi_j \omega_j \\ a_3 \sum_{j=n_2+1}^N \omega_j + b_3 (N - n_2) = \sum_{j=n_2+1}^N \varphi_j \end{cases}.$$

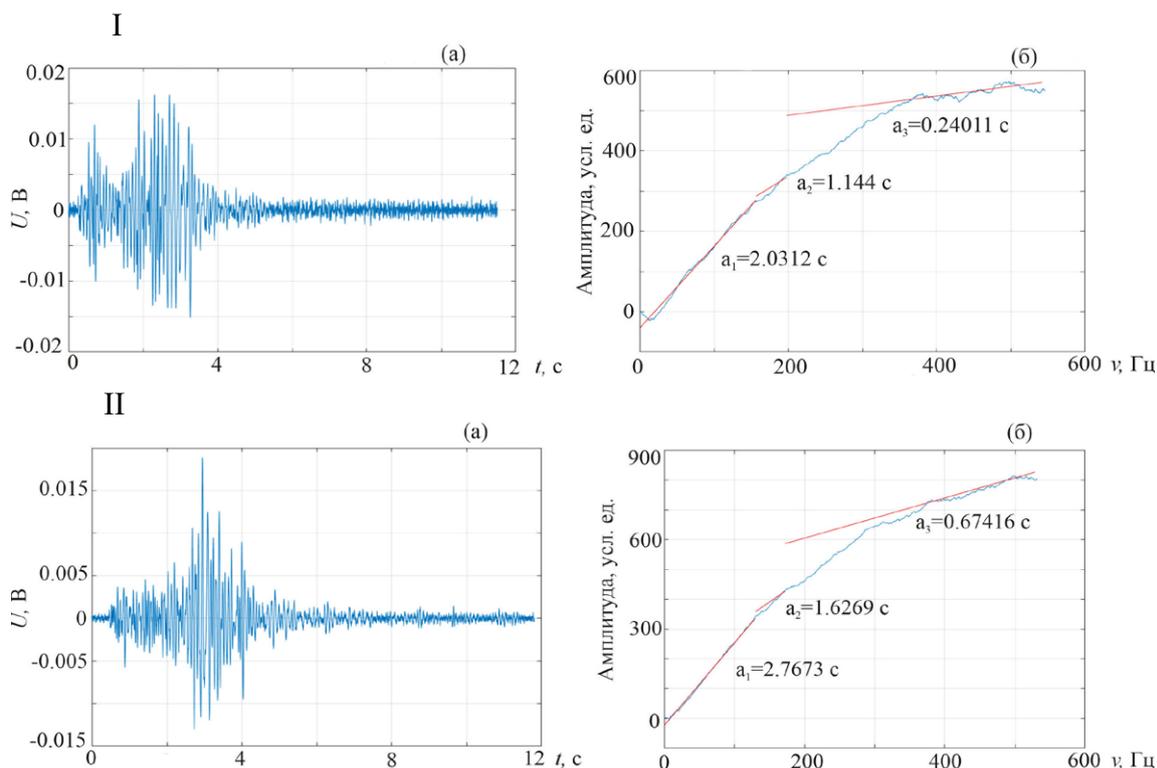
Основная задача – нахождение номеров  $n_1, n_2$ . Для ее решения, после нахождения коэффициентов  $a_1, b_1; a_2, b_2; a_3, b_3$ , найдем  $\delta^2 = \delta^2(n_1, n_2)$ . По минимуму этой функции найдем номера отсчетов  $n_1, n_2$ , где соединяются прямые. Аппроксимация ломаной фазового спектра будет равна:

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} a_1 \omega + b_1, \omega_1 < \omega < \omega_{n_1} \\ a_2 \omega + b_2, \omega_{n_1+1} < \omega < \omega_{n_2} \\ a_3 \omega + b_3, \omega_{n_2+1} < \omega < \omega_N. \end{cases}$$

Рассмотрим два примера обработки записей от землетрясений, произошедших на территории Тянь-Шаня, с использованием данной методики (см. таблицу). Для практического примера применялись данные градиентной установки, расположенной на Научной станции

РАН [18, 19]. В качестве сейсмических датчиков для установки используются датчики скорости смещения GS-20DX фирмы Geospace. Градиентная установка обеспечивает непрерывную синхронную регистрацию сейсмических сигналов (абсолютная погрешность 10.5 мкс), с частотой дискретизации сигналов 1000 Гц.

Для первого примера взят фрагмент записи сигнала от землетрясения, зарегистрированного градиентной установкой 03.04.2024 г.,  $M = 0.62$  (Z-компонента), эпицентр Таш-Мойнок на расстоянии 7 км от измерительного пункта (рис. 7, I а). Для данного фрагмента записи на основе изложенного алгоритма получена



**Рис. 7.** Фрагменты записи сигналов I и II от землетрясений (а) и результаты аппроксимации фазового спектра кусочно-линейной функцией (б).  $a_1, a_2, a_3$  – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

**Fig. 7.** The fragments of the recordings of earthquake signals I and II (a) and the results of approximating the phase spectrum with a piecewise linear function (b);  $a_1, a_2,$  and  $a_3$  indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

**Таблица.** Результаты обработки сигналов от сейсмических событий

**Table.** The results of signal processing of seismic events

№	Время начала сигнала, с			Разность времен прихода волн, с			Стандартное отклонение сигнала		
	P, $a_3$ (с)	S, $a_2$	L, $a_1$	S–P, $a_2 - a_3$	L–P, $a_1 - a_3$	L–S, $a_1 - a_2$	$P_{ст}$	$S_{ст}$	$L_{ст}$
I	0.24011	1.144	2.0312	0.90386	1.7911	0.8872	48.1194	7.5066	9.4734
II	0.67416	1.6269	2.7673	0.95269	2.0931	1.1404	48.4982	6.6005	5.4793

*Примечание.* L – низкочастотный сигнал, S – среднечастотный, P – высокочастотный.  $a_1, a_2, a_3$  – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

*Note.* L indicates low-frequency signal; S, mid-frequency signal; P, high-frequency signal.  $a_1, a_2,$  and  $a_3$  indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

аппроксимация кусочно-линейной функцией фазового спектра (рис. 7, I б).

Для второго примера взят фрагмент записи от землетрясения, зарегистрированного градиентной установкой 03 21.06.2024 г.  $M = 0.6$  (Z-компонента), эпицентр Теплые ключи на расстоянии 8 км от измерительного пункта. Результат аппроксимации для записи землетрясения (рис. 7, II а) представлен на рис. 7, II б.

Изложенная интерпретация результатов обработки основана на рабочей гипотезе о P-, S-, L-волнах от землетрясений. Модель не отражает в полной мере реальную ситуацию.

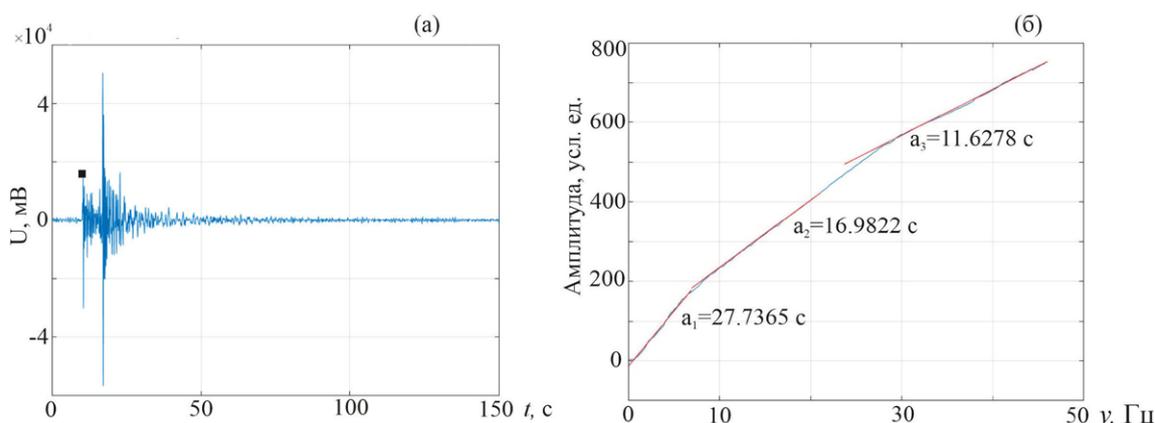
Отметим, что в случае регистрации сигналов с большим шагом дискретизации (40 Гц), использованных для стандартной регистрации сейсмических событий, применение рассмотренного подхода затруднительно.

Однако даже в случае стандартной регистрации с частотой 40 Гц применение этого подхода позволяет определить момент вступления продольных волн. Проиллюстрируем этот вывод на примере данных, отраженных на рис. 8. Для примера были взяты данные регионального сейсмического каталога Научной станции РАН (<https://doi.org/10.7914/SN/KN>). На рис. 8 а приведен фрагмент записи сейсмического события со станции KNDC  $R = 17.15$  км,  $M = 2.9$  (Z-компонента).

Время вступления высокочастотного сигнала  $a_3 = 11.6278$  с отличается от визуально определяемого момента времени, который отмечен на рис. 8 темным квадратиком. Это связано с тем обстоятельством, что продольные волны, приходящие прежде других, обладают более высокочастотным спектром, что и обуславливает ограничение к применению данного подхода. Иначе говоря, применение данного подхода ограничено шагом дискретизации. Этот параметр должен быть таким, который позволил бы надежно выделять высокочастотную часть спектра сигналов на фоне помех.

## Выводы

Близкие по расположению, локальные землетрясения образуют группы сейсмических волн, которые, распространяясь в волновом поле, накладываются друг на друга и регистрируются в виде сложного волнового пакета (см. рис. 1). При изучении таких волновых пакетов очень важно определить моменты первых вступлений фаз сейсмических волн. Применение анализа фазовых характеристик к определению моментов прихода сейсмических волн от землетрясений на близких расстояниях позволило дифференцировать



**Рис. 8.** Фрагмент записи сигналов с шагом дискретизации  $\Delta t = 0.025$  с (а); результат обработки сигнала, представленного на рис. 8 а, по определению моментов вступления волновых пакетов (б).  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – время начала низкочастотного, среднечастотного и высокочастотного сигналов соответственно.

**Fig. 8.** The fragment of signal recording with a sampling step  $\Delta t = 0.025$  s (a); the result of signal processing shown in fig. 8 a, of determining the arrival times of wave packets (b).  $a_1$ ,  $a_2$ , and  $a_3$  indicate the arrival time of low-frequency, mid-frequency, and high-frequency signals, respectively.

сигналы продольных, поперечных, поверхностных волн и определить моменты времени их вступления. Для применения изложенного подхода к обработке сейсмических данных необходимо уменьшение шага дискретизации при регистрации сигналов регистрирующей аппаратурой ее полосой пропускания.

## Список литературы

1. Эйби Дж.А. **1982**. *Землетрясения*: пер. с англ. М.: Недра, 209 с.
2. Морозов А.Н., Ваганова Н.В. **2022**. *Руководство по обработке локальных и региональных землетрясений западной части Евразийской Арктики*. Архангельск: ФИЦКИА УрО РАН, 65 с.
3. Хритова М.А., Гилева Н.А. **2012**. Автоматическая обработка региональных землетрясений Прибайкалья и Забайкалья. *Сейсмические приборы*, 48(2): 15–27. EDN: RANAYL
4. Шулаков Д.Ю. **2014**. Развитие системы сейсмического мониторинга г. Березники. В кн.: *Современные методы обработки и интерпретации сейсмических данных: Материалы Девятой Междунар. сейсмол. школы*. Обнинск: ГС РАН, с. 358–361.
5. Freiberger W.F. **1963**. An approximate method in signal detection. *Quarterly of Applied Mathematics*, 20: 373–378.
6. Kaveh M.S., Mansouri R., Keshavarz A. **2019**. Automatic P-wave picking using undecimated wavelet transform. *Journal of Seismology*, 23: 1031–1046. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09852-z>
7. Jiang W., Ding W., Zhu X., Hou F. **2022**. A recognition algorithm of seismic signals based on wavelet analysis. *Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse10081093>
8. Рыбин А.К., Нигматуллин Р.Р., Непейна К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. **2019**. Аналитическое описание сейсмических сигналов методом фрактального неортогонального амплитудно-частотного анализа // *Вестник КРАУНЦ. Науки о земле*, 1(41): 15–24. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-15-24>
9. Любушин А.А. **2009**. Тренды и ритмы синхронизации мультифрактальных параметров поля низкочастотных микросейсм. *Физика Земли*, 5: 15–28. EDN: KAVJQX
10. Долгополов Б.К., Сычев В.Н., Имашев С.А. **2017**. Методика мультифрактального анализа сигнала на примере сейсмического шума. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*, 1: 9–14.
11. Сычев В.Н., Имашев С.А. **2017**. Оценка параметра Херста сейсмического сигнала. *Геосистемы переходных зон*, 1(2): 50–61. [doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061)

12. Барышников Н.В., Абзалилов И.А., Турунтаев С.Б. **2023**. Применение синтетических волновых форм для создания модели глубокого машинного обучения с целью выделения первых вступлений на сейсмических записях. *Динамические процессы в геосферах*, 15(3): 38–53. [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_3\\_38](http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_38); EDN: MKVKVI
13. Давыдов А.Б., Шемаров А.И. **2011**. Детектор для обнаружения момента вступления сейсмической волны. *Доклады БГУИР*, 55(1): 23–30.
14. Имашев С.А., Аладьев А.В. **2024**. Обнаружение сейсмических событий на основе искусственной нейронной сети SeisDetNet. Ч. 1. Архитектура нейронной сети. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(64): 59–69. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-59-70>
15. Имашев С.А., Аладьев А.В. **2025**. Обнаружение сейсмических событий на основе искусственной нейронной сети SeisDetNet. Ч. 2. Апробация модели. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 1(65): 28–37. [doi:10.31431/1816-5524-2025-1-65-28-3728](https://doi.org/10.31431/1816-5524-2025-1-65-28-3728); EDN: ULKINP
16. Корн Г.А., Корн Т.М. **1973**. *Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы*. М.: Наука, с. 700–720.
17. Уайт Дж.Э. **1986**. *Возбуждение и распространение сейсмических волн*: пер. с англ. М.: Недра, 257 с.
18. Непейна К.С., Казначеев П.А., Александров П.Н. **2019**. Сейсмический мониторинг современных геодинамических процессов с использованием градиентной установки. *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*, 4(44): 84–92. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92>
19. Казначеев П.А., Матюков В.Е., Александров П.Н., Непейна К.С. **2019**. Разработка трехкомпонентной градиентной установки для регистрации сейсмоакустического поля в геодинамически активных регионах. *Сейсмические приборы*, 55(1): 46–58. <https://doi.org/10.21455/si2019.1-3>

## References

1. Eiby G.A. **1980**. *Eartquakes*. London: Heinemann, 209 p.
2. Morozov A.N., Vaganova N.V. **2022**. *Guidelines for processing local and regional earthquakes of the Western Eurasian Arctic*. Arkhangel'sk: FITSKIA UrO RAN, 95 p. (In Russ.).
3. Khritova M.A., Gilyova N.A. **2013**. Automated processing of regional earthquakes in Cisbaikalia and Transbaikalia. *Seismic Instruments*, 49(1): 53–63. <https://doi.org/10.3103/s0747923913010052>
4. Shulakov D.Yu. **2014**. Development of the seismological monitoring system in the city of Berezniki. In: *Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Materials of the Ninth International*

- Seismological Workshop, September 8–12, 2014*. Obninsk: GS RAS, p. 358–361. (In Russ.).
5. Freiberger W.F. **1963**. An approximate method in signal detection. *Quarterly of Applied Mathematics*, 20: 373–378.
  6. Kaveh M.S., Mansouri R., Keshavarz A. **2019**. Automatic P-wave picking using undecimated wavelet transform. *Journal of Seismology*, 23: 1031–1046. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09852-z>
  7. Jiang W., Ding W., Zhu X., Hou F. **2022**. A recognition algorithm of seismic signals based on wavelet analysis. *Marine Science and Engineering*. <https://doi.org/10.3390/jmse10081093>
  8. Rybin A.K., Nigmatullin R.R., Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Aleksandrov P.N. Analytical description of the seismic signals based on the nonorthogonal amplitude-frequency analysis of the smoothed signals. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 1(41): 15–24. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-1-41-15-24>
  9. Lyubushin A.A. Synchronization trends and rhythms of multifractal parameters of the field of low-frequency microseisms. *Izv. Physics of the Solid Earth*, 45(5): 381–394. <https://doi.org/10.1134/s1069351309050024>
  10. Dolgoplov B.K., Sychev V.N., Imashev S.A. **2017**. [Methodology of multifractal signal analysis using seismic noise as an example]. [*Science, new technologies and innovations of Kyrgyzstan*], 1: 9–14. (In Russ.).
  11. Sychev V.N., Imashev S.A. **2017**. Estimation of Hurst exponent of seismic signal. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 1(2): 50–61. (In Russ.). [doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061](https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.2.050-061)
  12. Baryshnikov N.A., Abzalilov I.A., Turuntaev S.B. **2023**. Application of synthetic waveforms for creating a deep learning model for identifying first arrivals in seismic records. *Dynamic Processes in Geospheres*, 15(3): 38–53. (In Russ.). [http://doi.org/10.26006/29490995\\_2023\\_15\\_3\\_38](http://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_3_38)
  13. Davydov A.B., Shemarov A.I. **2011**. [Detector to detecting the moment of seismic wave entry]. *Doklady BGUIR*, 55(1): 23–30. (In Russ.).
  14. Imashev S.A., Aladev A.V. **2024**. SeisDetNet: Artificial neural network for seismic event detection. Part 1: Architecture. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(64): 59–69. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-4-64-59-70>
  15. Imashev S.A., Aladev A.V. **2025**. SeisDetNet: artificial neural network for seismic event detection. Part 2: Model assessment. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Earth Sciences Bulletin of KRAESC*, 1(65): 28–37. (In Russ.).
  16. Korn G.A., Korn T.M. **1968**. *Mathematical handbook for scientists and engineers: Definitions, theorems, and formulas for reference and review*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1130 p.
  17. White J.E. **1983**. *Underground sound. Application of seismic waves*. Amsterdam; Oxford; New York, 257 p. (Methods in geochemistry and geophysics; 18).
  18. Nepeina K.S., Kaznacheev P.A., Aleksandrov P.N. **2019**. Seismic monitoring of modern geodynamic processes using a gradient system. *Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle = Bull. of KRAESC. Earth Sciences*, 4(44): 84–92. (In Russ.). <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2019-4-44-84-92>
  19. Kaznacheev P.A., Matiukov V.E., Aleksandrov P.N., Nepeina K.S. Development of three-axis gradient system for seismoacoustic data acquisition in geodynamically active regions. *Seismic instruments*, 55: 535–543. <https://doi.org/10.3103/s0747923919050062>

## Об авторах

**Александров Павел Николаевич** (<https://orcid.org/0009-0008-6895-5811>), доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Центр геоэлектромагнитных исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ЦГЭМИ ИФЗ РАН), Москва, Россия, [alexandr@igemi.troitsk.ru](mailto:alexandr@igemi.troitsk.ru)

**Стасенко Лия Вячеславовна** (<https://orcid.org/0009-0000-2458-5152>), инженер ЛПАР, Научная станция Российской академии наук (НС РАН) в г. Бишкек, Киргизия.

## About the Authors

**Aleksandrov, Pavel N.** (<https://orcid.org/0009-0008-6895-5811>), Doctor of Physics and Mathematics, Principal Researcher, Geoelectromagnetic Research Centre of the Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Troitsk, Russia, [alexandr@igemi.troitsk.ru](mailto:alexandr@igemi.troitsk.ru)

**Stasenko, Liya V.** (<https://orcid.org/0009-0000-2458-5152>), Engineer, Research Station of the Russian Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyz Republic

Поступила 23.05.2025

Принята к публикации 25.06.2025

Received 23 May 2025

Accepted 25 June 2025