

УДК 624.042.7

## ПЕРВИЧНАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ КОЛЕБАНИЙ СООРУЖЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПРОВЕДЕНИЕМ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ

П.А. Тяпкина<sup>1,2</sup>, А.В. Яваров<sup>1,2</sup>, А.В. Федосеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

<sup>2</sup> ООО «Институт Гипроникель», г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Аннотация.** Здания и сооружения, находящиеся в зоне влияния буровзрывных работ, подвержены особому виду кинематического воздействия – сейсмическому эффекту взрывов. С точки зрения классификации воздействий оно занимает промежуточное положение между землетрясениями и импульсной нагрузкой. В настоящей работе при проведении прямого динамического расчета, реализованного во многих конечно-элементных комплексах, предлагается использовать сейсмограммы реальных событий. При этом инструментальные записи колебаний следует подвергать особой процедуре обработки, поскольку применение стандартных модулей программ SCAD Office и ЛИРА 10 не позволяет получить корректные сейсмограммы из инструментальных акселерограмм. В статье представлена апробация подхода по обработке инструментальных записей колебаний, вызванных воздействием буровзрывных работ, в разработанном авторами программном комплексе SeismoBlast. Описано проведение следующих процедур обработки сигналов: построение амплитудно-частотной характеристики, фильтрация с учетом рабочего диапазона записывающего оборудования, исключение трендов, построение велосиagramмы и сейсмограммы.

**Ключевые слова:** буровзрывные работы, кинематическое воздействие, инструментальная акселерограмма, обработка сейсмических сигналов, полосовая фильтрация, амплитудно-частотный спектр, построение сейсмограммы, прямой динамический расчет.

**Ссылка для цитирования:** Тяпкина П.А., Яваров А.В., Федосеев А.В. Первичная обработка инструментальных записей колебаний сооружений, вызванных проведением буровзрывных работ // Инженерные исследования. 2024. №2(17). С. 3-12. EDN: BVEOKJ

## PRIMARY PROCESSING OF INSTRUMENT RECORDS OF VIBRATIONS IN STRUCTURES CAUSED BY DRILLING AND BLASTING OPERATIONS

P.A. Tyapkina<sup>1,2</sup>, A.V. Yavarov<sup>1,2</sup>, A.V. Fedoseev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

<sup>2</sup> LLC Gipronickel Institute, St.Petersburg (Russian Federation)

**Abstract.** Buildings and structures located in areas exposed to impact of drill-and-blast operations are subject to a specific kinematic phenomenon - seismic effect of explosions. In terms of impact classification, it occupies a position between earthquakes and impulse loads. In the present work, it is proposed to use seismograms of real events when carrying out direct dynamic calculation, realized in many finite element complexes. In doing so, however, instrument vibration records are being put through a special processing, since standard modules of SCAD Office and LIRA 10 do not produce correct seismograms from instrumental accelerograms. The paper presents an attempt to process instrument vibration records associated with drilling and blasting in a software complex SeismoBlast developed by the authors. The following signal processing procedures are described: construction of an amplitude-frequency characteristic, filtration taking into account a working range of recording equipment, elimination of trends, as well as construction of a velocigram and a seismogram.

**Keywords:** drilling and blasting operations, kinematic impact, instrumental acceleration signal, seismic signal processing, bandpass filtering, response spectrum, seismogram, direct integration method.

**For citation:** Tyapkina P.A., Yavarov A.V., Fedoseev A.V. Primary processing of instrument records of vibrations in structures caused by drilling and blasting operations // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.2(17). Pp. 3-12. EDN: BVEOKJ

## ВВЕДЕНИЕ

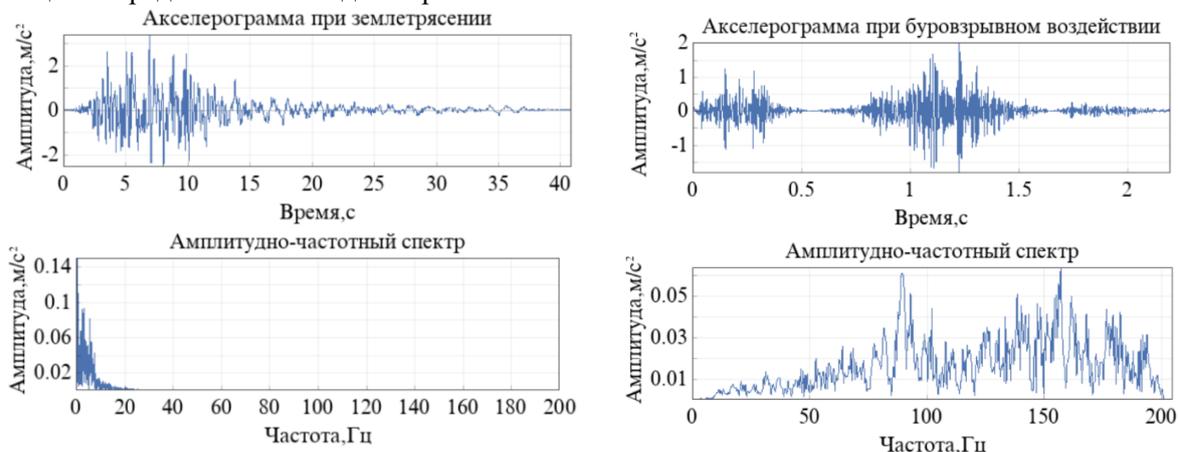
Близость расположения горных предприятий разных типов и вспомогательных производств к рудникам, на которых ведутся буровзрывные работы, приводит к попаданию в опасную зону взрывных работ важных промышленных и гражданских объектов. Быстро протекающее изменение состояния взрывчатого вещества при инициировании заряда сопровождается стремительным выделением энергии. Значительная ее часть расходуется на разрушение массива пород, меньшая доля переходит на некотором расстоянии от очага в упругие волны. По сравнению с сейсмическим (кинематическим) действием взрывов воздушная ударная волна в большинстве случаев незначительно влияет на напряжения в конструкциях сооружений.

В мировой практике взрывных работ основной характеристикой оценки сейсмического воздействия взрывной волны, способной вызвать повреждение инженерных сооружений, является скорость колебаний массива грунта в их основании. Данный параметр служит критерием сейсмической безопасности для различных охраняемых объектов (зданий, сооружений, массивов горных пород, откосов, оборудования и пр.), поскольку скорость колебаний лучше, чем перемещения или ускорения, коррелирует с данными наблюдений за образованием дефектов в конструкциях [1]. Указанный подход не учитывает характерный для конкретной местности и параметров массовых взрывов амплитудно-частотный состав сейсмического воздействия, прочностные и жесткостные характеристики зданий и сооружений, а также характер и расположение дефектов строительных конструкций.

Следовательно, для более точной оценки влияния техногенного сейсмического воздействия на охраняемые объекты для каждого отдельного случая требуется специальное обоснование. Сейсмомониторинг, в рамках которого производится оценка безопасности охраняемых объектов, состоит из нескольких этапов: запись сейсмических эффектов массовых взрывов в основаниях сооружений; обработка записей; проведение прямого динамического расчета охраняемого здания с использованием полученных сигналов; оценка несущей способности конструкций [2].

Расчет на действие сейсмических сил регламентируется нормативными документами (СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах», НП-031-01 «Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций») и основан на применении линейно-спектральной теории [3]. Расчетные спектры ускорений, сформированные при статистической обработке ряда спектров реакций различных землетрясений, отражают резонансный характер реакции системы на возмущение.

Согласно указанной выше нормативной документации, объекты повышенного уровня ответственности и сложной конфигурации конструктивных решений следует подвергать расчетам с использованием инструментальных записей землетрясений или синтезированных акселерограмм. В контексте оценки влияния взрывных работ на здания и сооружения дополнительным основанием для применения прямого динамического расчета служит малая продолжительность кинематического воздействия, вызванного действием массового взрыва, в сравнении с длительностью землетрясения (рис. 1). В качестве примера использована запись землетрясения в Кобе (Япония, 1995 г.) из базы данных программного комплекса (далее – ПК) SeismoSignal. Спектры построены в ПК SeismoBlast, разрабатываемом авторами публикации и предназначенном для обработки записей сейсмических колебаний.



**Рис. 1.** Сравнение длительностей и амплитудно-частотных составов землетрясения в Кобе и буровзрывного воздействия, записанного в горной выработке (ПК SeismoBlast)

**Fig. 1.** Comparison of duration and response spectrum of the Kobe earthquake and drill-and-blast impact recorded in mining excavation (SeismoBlast)

Резонансный режим работы конструкций при непродолжительном кинематическом воздействии может быть не достигнут, поскольку взрывное воздействие является промежуточным по длительности между землетрясением и импульсным воздействием. Кроме того, амплитудно-частотный состав землетрясения и кинематического воздействия массовых взрывов значительно отличается: буровзрывное воздействие является высокочастотным относительно землетрясения (рис. 1).

Следовательно, инструментальные записи колебаний, вызванных массовыми взрывами, наиболее полно отражают воздействие взрывных работ на здания и сооружения [4]. Для проведения расчета сооружений на действие кинематического воздействия и получения достоверной информации о сейсмостойкости объекта можно применить одну из следующих методик [5]:

- А) Использование пакета записей воздействий;
- Б) Замена реального воздействия синтезированным сигналом.

Моделирование сейсмического воздействия по любой из представленных выше методик включает в себя формирование набора акселерограмм или сейсмограмм воздействий, характерных для локации здания и представительных в контексте частотного состава [6]. При этом в связи со свойствами измерительной аппаратуры в большинстве записанных сигналов содержится шум в низкочастотной области спектра, а также смещение и поворот нулевой линии акселерограмм. Для получения достоверной картины перемещений элементов сооружения используемые записи должны быть откорректированы.

В отечественной нормативной документации и литературе, касающейся сейсмических воздействий, обработки сигналов, сейсмомониторинга и сейсмологии, не содержится рекомендаций по обработке инструментальных записей, предназначенных для использования в расчетах зданий и сооружений.

Поскольку для моделирования кинематического воздействия в программных расчетных комплексах используются, как правило, сейсмограммы, получаемые двойным интегрированием из инструментальных акселерограмм, даже небольшие ошибки, образующиеся в связи со свойствами измерительного оборудования, могут значительно исказить картину перемещений.

В предыдущей публикации авторов [7] была обоснована неприменимость программных комплексов (далее – ПК) SCAD Office и ЛИРА 10 для обработки инструментальных акселерограмм и получения сейсмограмм кинематических воздействий буровзрывных работ.

Таким образом, целью данного исследования является разработка и апробация комплексного подхода по обработке инструментальных записей колебаний, вызванных воздействием буровзрывных работ.

Задачи исследования включают:

1. Формулирование порядка обработки записи сейсмического сигнала для подготовки его к использованию в динамическом расчете;
2. Разработку и верификацию алгоритмов:
  - 2.1. построения амплитудно-частотного спектра сигнала;
  - 2.2. полосовой фильтрации сигнала;
  - 2.3. выделения и удаления тренда сигнала;
  - 2.4. интегрирования сигнала;
3. Получение сейсмограммы, пригодной для динамического расчета, из инструментальной акселерограммы кинематического воздействия буровзрывных работ.

### ПОРЯДОК ОБРАБОТКИ ЗАПИСЕЙ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В качестве корректной сейсмограммы будем считать сигнал, описанный в работах выдающихся ученых: М.А. Садовского и С.В. Медведева, исследовавших физику горных взрывов и их влияние на сооружения. Колебательный процесс, которому подвергается основание сооружения вдали от зон разрушения и трещинообразования при массовых взрывах, происходит относительно положение равновесия, как показано на рис. 2 [8, 9].

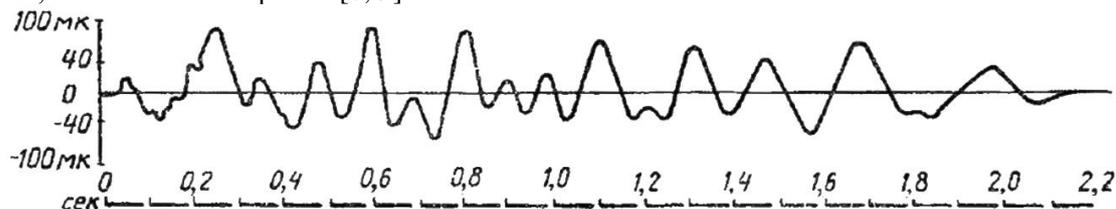


Рис. 2. Сейсмограмма горизонтальных колебаний при кинематическом действии взрыва в дальней зоне действия взрывных работ

Fig. 2. Seismogram of horizontal oscillations at kinematic action of explosion at long-range blast impact zone

Первым этапом корректировки акселерограммы является фильтрация, которую необходимо проводить по двум причинам: ограничение спектра записанного сигнала в соответствии с рабочим диапазоном оборудования и исключение шумов, заключенных в высокочастотной области спектра.

Поскольку воздействия, вызываемые буровзрывными работами и землетрясениями, отличаются как по длительности, так и по амплитудно-частотному составу (рис. 1), принятые в сейсмологической практике параметры обработки записей требуют соответствующей адаптации. В отличие от относительно низкочастотного сейсмического воздействия землетрясения, рассматриваемый диапазон частот которого, как правило, ограничивают сверху величиной в 33 Гц [10, 11], кинематическое воздействие от взрывных работ в большинстве случаев является высокочастотным [12, 13]. Практический интерес представляет определение верхней частоты фильтрации, ограничивающей количество случайных сейсмических шумов, но не исключающей «полезную» составляющую сигнала: при расчете зданий и сооружений требуется учитывать высокочастотную область спектра, поскольку указанные колебания обладают энергией, влияющей на развитие усилий в конструкциях и циклической усталости [14-16].

Следующим этапом обработки записей, характеризующих колебания в дальней зоне действия взрывных работ, является выполнение следующих условий (1):

$$\begin{aligned} z(0) = 0, \quad \dot{z}(0) = 0, \quad \ddot{z}(0) = 0, \\ z(T) = 0, \quad \dot{z}(T) = 0, \quad \ddot{z}(T) = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В формулах выше  $z(t)$  – перемещение,  $\dot{z}(t)$  – скорость,  $\ddot{z}(t)$  – ускорение,  $T$  – длительность кинематического воздействия. В общем случае перемещения в конце действия нагрузки  $z(t)$  могут быть не равны нулю. Проведение буровзрывных работ может инициировать смещения горных пород, слагающих борта и уступы карьера, что вызовет перемещения значительной окружающей территории. При этом скорости и ускорения в момент окончания воздействия должны быть равны 0. В целом, заключение о жестких смещениях, не характерных для рассматриваемых записей, следует делать только после проведения комплексной обработки сигналов.

Заключительным этапом преобразования инструментальной записи в пригодную для расчета сейсмограмму является исключение тренда. В обработке сигналов под трендом обычно понимают нарушающую стационарность процесса негармоническую компоненту, представленную линейной, квадратичной или кубической функцией. При записи колебаний в связи с техническими особенностями используемой аппаратуры происходит искажение сигналов, в особенности в низкочастотной области, которое может привести к накоплению значительной ошибки при определении перемещений рассчитываемого объекта. На рис. 3 представлены необработанная инструментальная акселерограмма, а также велосиграмма и сейсмограмма, полученные при интегрировании. Как видно, отсутствие обработки исходного сигнала приводит к получению нехарактерных остаточных перемещений.

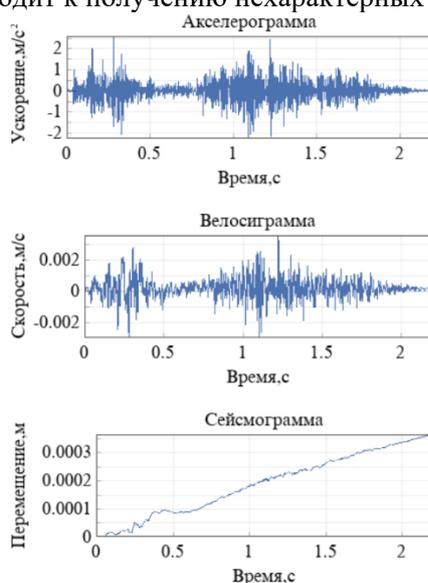


Рис. 3. Инструментальная акселерограмма и полученные интегрированием велосиграмма и сейсмограмма при отсутствии обработки (ПК SeismoBlast)

Fig. 3. Acceleration record, velocity and displacement graphs obtained by integration in the absence of processing (SeismoBlast)

### АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛОВ

В ПК SeismoBlast, разработанном на языке Python, вычисление амплитудно-частотного спектра проводится с помощью быстрого преобразования Фурье [17]. Для проведения верификации данного алгоритма рассматривается линейная комбинация гармонических сигналов (2):

$$X = 1 \cdot \sin(2 \cdot 2\pi \cdot t) + 0,2 \cdot \cos(10 \cdot 2\pi \cdot t) + 0,7 \cdot \sin(15 \cdot 2\pi \cdot t) \quad (2)$$

Результаты, изображенные на рис. 4, демонстрируют, что приведенные на спектре амплитуды и частоты гармоник сигнала соответствуют характеристикам, заданным аналитически.

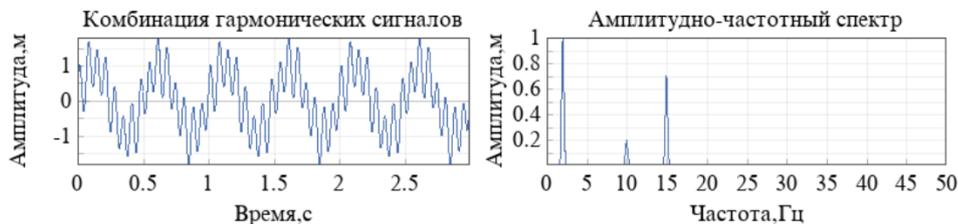


Рис. 4. Комбинация гармонических сигналов и амплитудно-частотный спектр (ПК SeismoBlast)  
Fig. 4. Combination of harmonic signals and response spectrum (SeismoBlast)

На рис. 5 с целью верификации представлено сравнение амплитудно-частотных характеристик записанного при землетрясении в Кобе (Япония, 1995 год) сейсмического сигнала, включенного в стандартные библиотеки воздействий. Полученные графики имеют высокую степень совпадения, что указывает на корректность разработанного алгоритма.

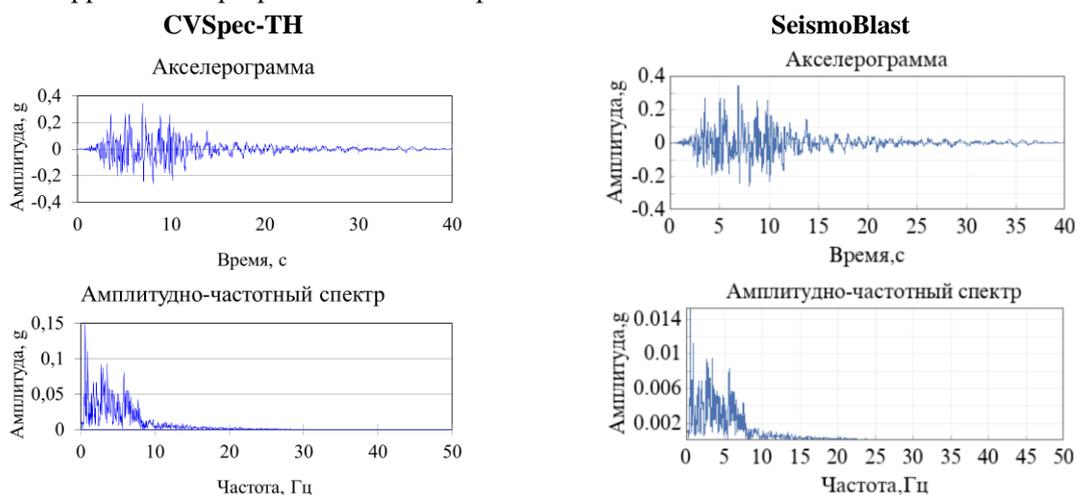


Рис. 5. Амплитудно-частотные спектры сейсмического сигнала при землетрясении в Кобе в ПК CVSpec-TH и SeismoBlast  
Fig. 5. Response spectrums of the seismic signal from the Kobe earthquake in CVSpec-TH and SeismoBlast

### АЛГОРИТМ ФИЛЬТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В практике обработки сигналов фильтрация проводится перемножением спектров исходного сигнала и фильтра в частотной области, поскольку расчет по данному методу затрачивает меньше времени, чем свёртка исходного сигнала с импульсной характеристикой фильтра во временной области.

В ПК SeismoBlast для первичной обработки сигналов реализован трапециевидный полосовой фильтр, общий вид частотной и импульсной характеристик которого приводится на рис. 6.

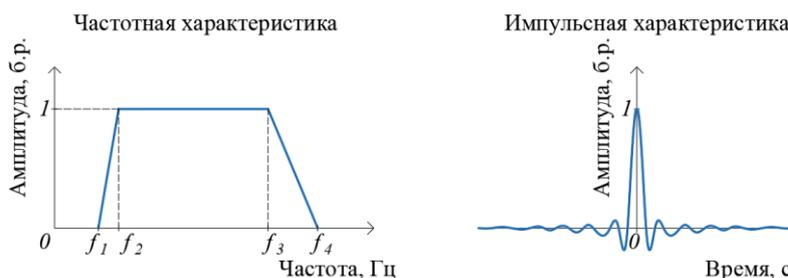
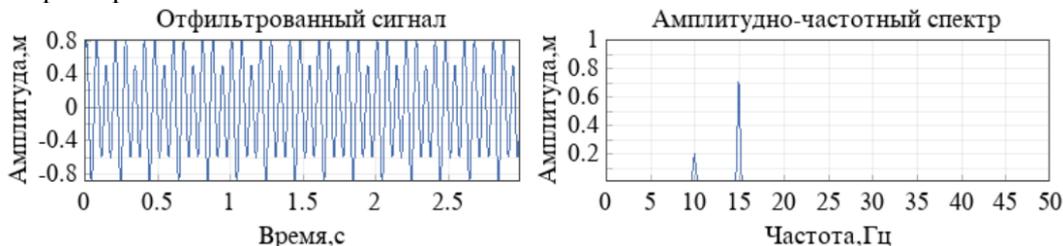


Рис. 6. Общий вид частотной и импульсной характеристик трапециевидного полосового фильтра  
Fig. 6. General view of frequency and impulse characteristics of the trapezoidal bandpass filter

Для проведения верификации была выполнена фильтрация заданного формулой (2) сигнала, с исходным спектром на рис. 4. Частоты пропускания были назначены следующим образом:  $f_1 = 6 \text{ Гц}$ ,  $f_2 = 8 \text{ Гц}$ ,  $f_3 = 18 \text{ Гц}$ ,  $f_4 = 20 \text{ Гц}$ . Спектр отфильтрованного сигнала на рис. 7 подтверждает, что первая составляющая комбинации сигналов (2) действительно была исключена из рассматриваемого сигнала в результате фильтрации, поскольку ее частота в 2 Гц не входила в сформированную полосу пропускания фильтра.

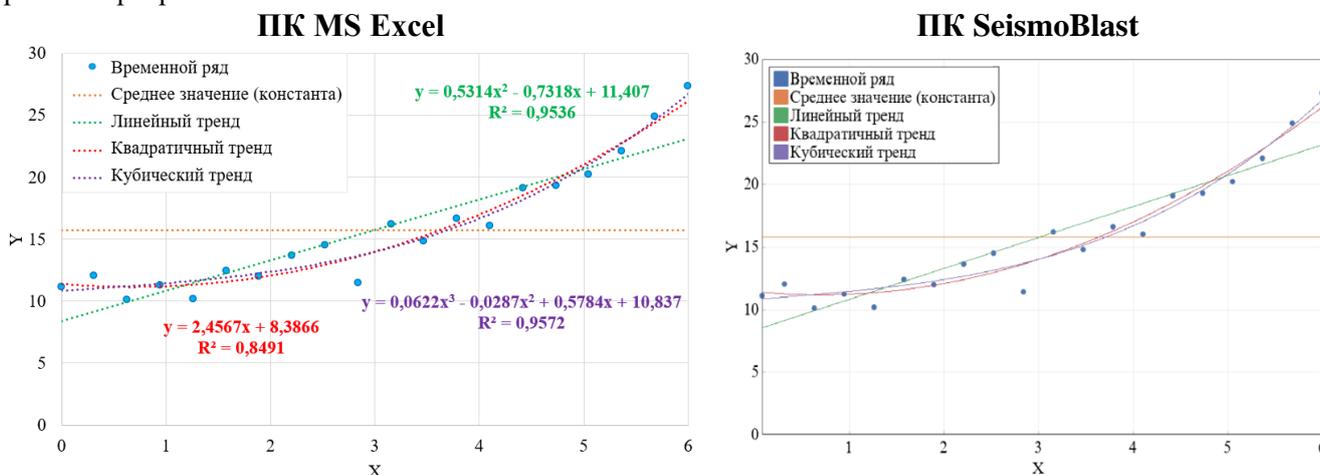


**Рис. 7.** Комбинация гармонических сигналов и амплитудно-частотный спектр (ПК SeismoBlast)  
**Fig. 7.** Combination of harmonic signals and response spectrum (SeismoBlast)

### АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ И УДАЛЕНИЯ ТРЕНДА ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗАПИСЕЙ

В ПК SeismoBlast реализовано вычисление линий тренда методом наименьших квадратов. В работу программы внедрено вычисление трендов, описываемых степенными функциями 0-го, 1-го, 2-го и 3-го порядков, поскольку указанные линии тренда чаще подвергаются выделению и удалению в практике обработки сигналов.

Для проведения верификации в качестве точного решения принимается результат вычисления трендов в ПК MS Excel. Результаты, полученные в ПК MS Excel и SeismoBlast и приведенные на рис. 8, имеют высокую степень совпадения. Коэффициенты полиномов, описывающих линейный, квадратичный и кубический тренды, вычисленные в ПК SeismoBlast, совпадают с соответствующими коэффициентами в уравнениях трендов, полученных в ПК MS Excel, что подтверждает правильность работы программы.



**Рис. 8.** Графики трендов временного ряда в ПК MS Excel и SeismoBlast  
**Fig. 8.** Time series trend graphs in MS Excel and SeismoBlast

### АЛГОРИТМ ИНТЕГРИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ

В ПК SeismoBlast для первичной обработки сигналов реализовано интегрирование дискретных сигналов методом трапеций. Для проведения верификации было выполнено интегрирование акселерограммы (рис. 9 (А)), заданной гармонической функцией (3):

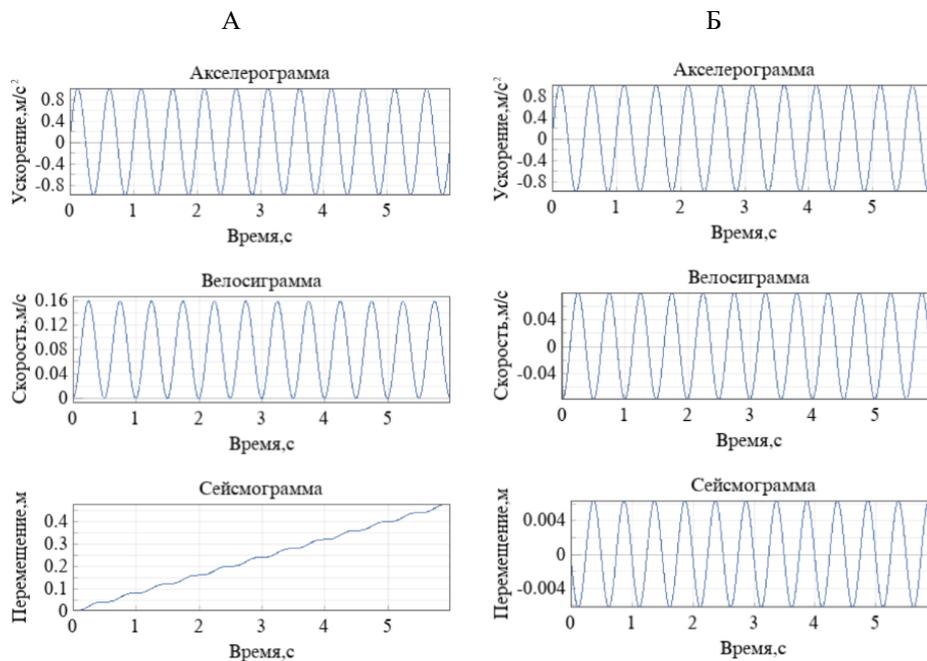
$$A(t) = 1 \cdot \sin(2 \cdot 2\pi \cdot t). \quad (3)$$

Возникновение тренда в виде константы в велосиграмме при интегрировании акселерограммы и тренда в виде константы в сейсмограмме при интегрировании велосиграммы подтверждает корректность работы алгоритма (рис. 9 (Б)).

Амплитуды сигналов, полученные при интегрировании в ПК SeismoBlast, совпадают с величинами, вычисленными аналитически в формулах (4, 5):

$$V(t) = \int A(t)dt = -0.0796 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi \cdot t), \quad (4)$$

$$U(t) = \int V(t)dt = -0.0063 \cdot \sin(2 \cdot 2\pi \cdot t). \quad (5)$$



Без исключения тренда.

Исключение тренда:

Акселерограмма – нет;

Велосиграмма – константа;

Сейсмограммa – константа.

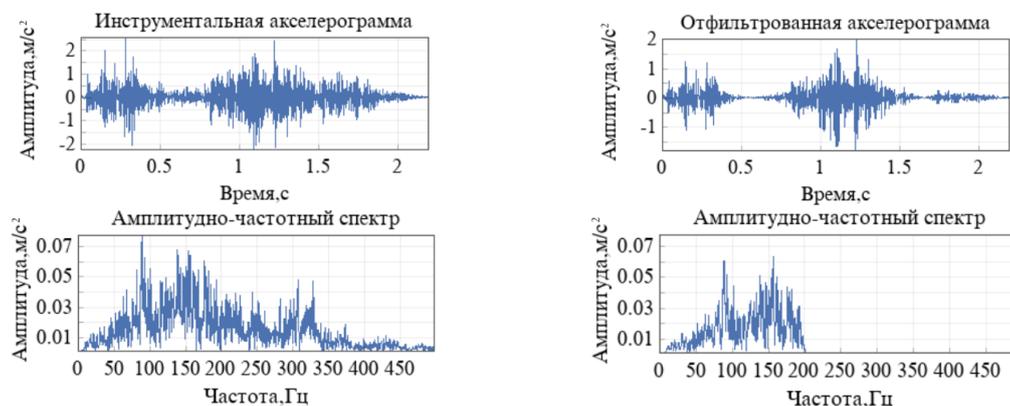
**Рис. 9.** Интегрирование гармонического сигнала (ПК SeismoBlast)

**Fig. 9.** Integration of a harmonic signal (SeismoBlast)

### ПОЛУЧЕНИЕ СЕЙСМОГРАММЫ ДЛЯ ПРЯМОГО ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ИЗ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ АКСЕЛЕРОГРАММЫ

Для примера обработки инструментальной акселерограммы и получения сейсмограммы в статье используется запись кинематического воздействия буровзрывных работ, полученная с помощью цифрового акселерометра ZET 7152-N. Рабочий диапазон оборудования 3 – 200 Гц, шаг дискретизации 1 мс. Установка прибора была выполнена на скальный массив основания вентиляторной в соответствии с ГОСТ Р 52892-2007 «Вибрация и удар. Вибрация зданий...».

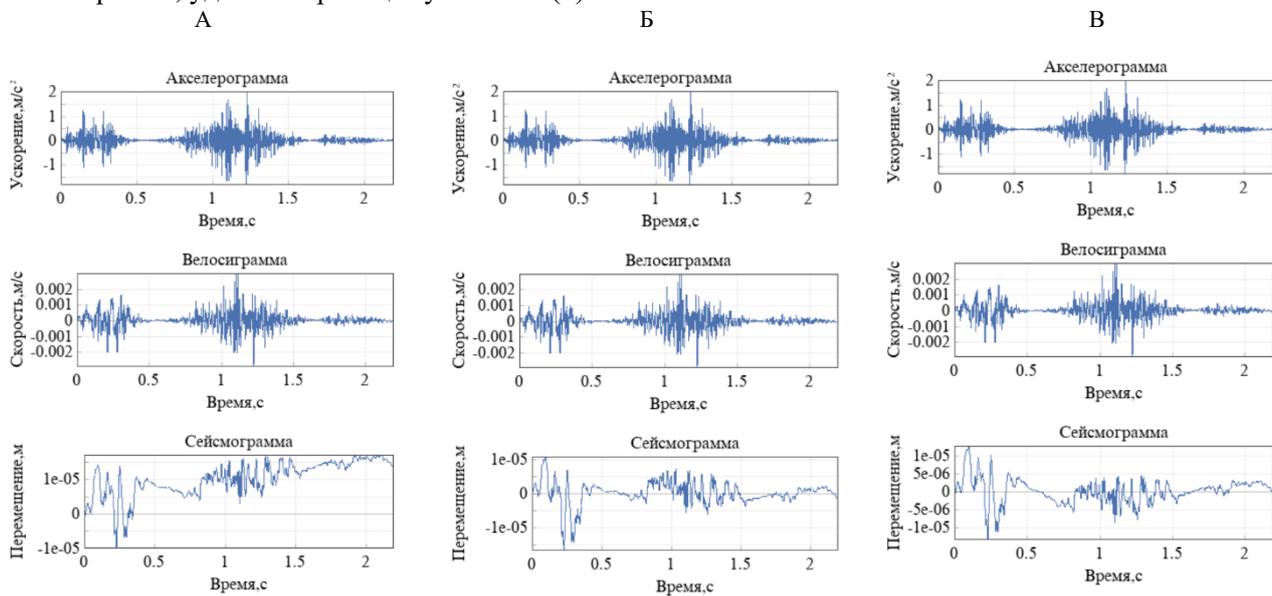
Инструментальная акселерограмма и исходный диапазон записанного воздействия приведены на рис. 10. Фильтрация сигнала выполнена полосовым фильтром с учетом рабочего диапазона прибора, результат представлен на рис. 10.



**Рис. 10.** Инструментальная и отфильтрованная акселерограммы и их спектры (ПК SeismoBlast)

**Fig. 10.** Recorded and filtered accelerograms and response spectrums (SeismoBlast)

Для получения сейсмограммы «В», корректно описывающей техногенное событие, методом подбора были назначены характеристики трендов, исключаемых из акселерограммы, велосигаммы и сейсмограммы (рис. 11). При удалении квадратичного тренда из велосигаммы была получена сейсмограмма, удовлетворяющая условиям (1).



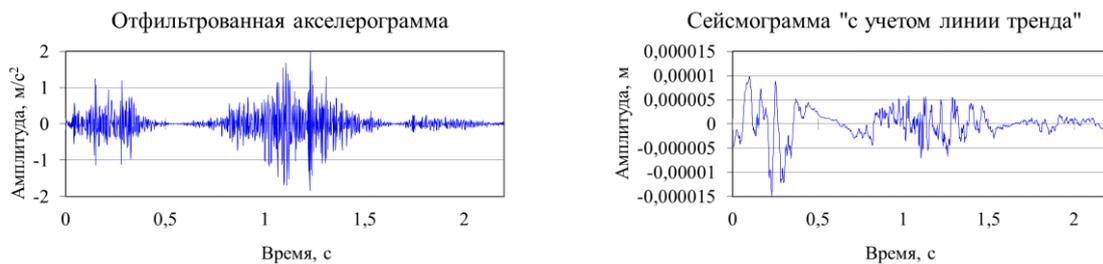
Без исключения тренда.

Исключение тренда:  
 Акселерограмма – кубический;  
 Велосигамма – кубический;  
 Сейсмограмма – кубический.

Исключение тренда:  
 Акселерограмма – нет;  
 Велосигамма – квадратичный;  
 Сейсмограмма – нет.

**Рис. 11.** Интегрирование отфильтрованной акселерограммы при исключении трендов (ПК SeismoBlast)  
**Fig. 11.** Integration of the filtered detrended recorded accelerogram (SeismoBlast)

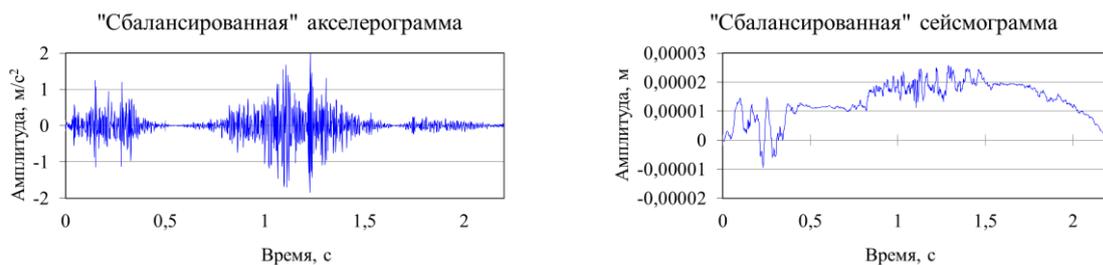
Удаление трендов отфильтрованной акселерограммы было проведено также в ПК SCAD Office и ЛИРА 10. При выделении и удалении трендов в ПК ЛИРА 10 наиболее корректный результат был получен при исключении кубического тренда из сейсмограммы (рис. 12).



**Рис. 12.** Отфильтрованная акселерограмма и сейсмограмма, полученная после исключения из нее кубического тренда (ПК ЛИРА 10)

**Fig. 12.** Filtered accelerogram and seismogram obtained after excluding the cubic trend from it (LIRA 10)

Опытным путем было установлено, что единственная доступная в ПК SCAD Office функция «балансировка», соответствует удалению линейного тренда из акселерограммы (рис. 13).



**Рис. 13.** Акселерограмма и сейсмограмма в ПК SCAD Office после «балансировки»  
**Fig. 13.** Accelerogram and seismogram processed in SCAD Office

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из сравнения рис. 2 и рис. 13, полученная в ПК SCAD Office сейсмограмма не отображает действительную картину колебательного процесса. Результат, полученный в ПК ЛИРА 10 (рис. 12), качественно схож с сейсмограммами «Б» и «В» на рис. 11. Амплитуда полученной в ПК ЛИРА 10 сейсмограммы в начале и конце сигнала отлична от нуля, что в действительности не наблюдается в дальней зоне влияния буровзрывных работ. Указанный тип ошибки может привести к некорректным результатам при прямом динамическом расчете зданий.

На основании амплитудно-частотной характеристики инструментальной записи буровзрывного воздействия, приведенной на рис. 10, подтверждается, что кинематическое воздействие массовых взрывов обладает значительной энергией в высокочастотной области спектра. Применение полосовой фильтрации ослабило шумовую компоненту сигнала, которая могла приводить к накоплению ошибок при интегрировании.

При исключении квадратичного тренда из велосигramмы получена сейсмограмма, подходящая для проведения прямого динамического расчета: сейсмограмма «В» на рис.11 описывает колебание, сосредоточенное около нулевой линии. В то же время указанная сейсмограмма «В» не соответствует в полной мере записи колебаний на рис.2.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования была установлена последовательность обработки сигналов колебаний, включающая построение амплитудно-частотной характеристики, фильтрацию с учетом рабочего диапазона измерительного оборудования, интегрирование сигналов и исключение тренда из акселерограмм, велосигramм и сейсмограмм.

Внедрение процедуры исключения тренда из велосигramмы и масштабирования амплитуды перед началом и после окончания воздействия позволило увеличить количество опций при обработке сигналов и получить сейсмограмму, пригодную для проведения прямого динамического расчета зданий и сооружений. Вместе с тем выбор удаляемого тренда или трендов зависит от примененного типа фильтра и метода численного интегрирования, следовательно для каждого набора записей требуется определение отдельных процедур обработки. Данный вывод, с одной стороны, является нормой в области сейсморазведки, а с другой – не учтен в применяемых при решении задач сейсмостойкого строительства модулях программ ПК SCAD Office и ЛИРА 10.

Также представленная в статье проблематика может быть дополнена задачей о получении синтетического сигнала на основании реальных записей. Данное направление имеет большое прикладное значение, поскольку позволит моделировать увеличение массы зарядов в условиях расположения рядом с рудником тех или иных сооружений инфраструктуры.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W., Dowding C.H. Structural response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. Report of Investigations No. 8507 - Pittsburgh: US Department of the Interior. Bureau of Mines, 1980. 74 p.
2. Худайназаров Ш.О. Динамический расчет высотного сооружения с учетом нелинейных вязкоупругих свойств материала при различных кинематических воздействиях // Инженерные исследования. 2022. №5 (10). С. 12-17. EDN: GLDLMF
3. Тарасов В.А., Барановский М.Ю., Павлушкина Ю.Е., Мелещенко Л.С., Шакиров Р.М., Имескенов Т.Л., Загидуллина Э.Г. Сравнение результатов сейсмического расчета по СНиП II-7-81\* 1995 года и по СП 14.13330.2014 // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 1 (28). С. 52–73.
4. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. 4-е изд., перераб. М.: Издательство СКАД СОФТ, 2011. 736 с.
5. Уздин А.М., Саидович Т.А., Аль-Насер-Мохаммад Самих Амин. Основы теории сейсмостойкости и сейсмостойкого строительства зданий и сооружений. СПб: Изд. ВНИИГ, 1993. 89 с.
6. Бабский А.Е., Лалин В.В., Олейников И.И., Тарасов В.А. Сейсмостойкость виброизолированных фундаментов турбоагрегатов в зависимости от частотного состава сейсмического воздействия // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 1. С. 30–41. EDN: RSXRRN.
7. Тяпкина П.А., Яваров А.В., Федосеев А.В. Получение сейсмограмм кинематических воздействий буровзрывных работ в комплексах SCAD Office и ЛИРА 10 // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 1-4 апреля 2024 года. Том Часть 2. СПб: СПбПУ, 2024. С. 498-501.
8. Медведев С.В. Сейсмика горных взрывов. М: Недра, 1964. 188 с.
9. Садовский М.А. Геофизика и физика взрыва. Избранные труды. М: Наука, 1999. 440 с.

10. Рутман Ю.Л., Островская Н.В. Динамика сооружений: сейсмостойкость, сейсмозащита, ветровые нагрузки. СПб: Изд-во СПбГАСУ, 2019. 253 с.
11. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на сооружения. СПб: Изд-во Политехнического университета, 2009. 593 с.
12. Тяпкина П.А., Яваров А.В., Федосеев А.В. Анализ влияния сейсмического действия буровзрывных работ на технологическое оборудование на основании амплитудно-частотных спектров // Неделя науки ИСИ: Сборник материалов Всероссийской конференции, Санкт-Петербург, 3-9 апреля 2023 года. Том Часть 2. СПб: СПбПУ, 2023. С. 423-427. EDN: EALJRG
13. Zhang S., Gao W., Yan L., Liu J., Liu L. The characteristics of blasting vibration frequency bands in jointed rock mass slope // Environmental Earth Sciences. 2020. Vol. 79. No. 23. Pp. 1–17.
14. Soize C. Information Theory for Generation of Accelerograms Associated with Shock Response Spectra. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2010. No.25(5). DOI:10.1111/j.1467-8667.2009.00643
15. Sołtys A., Twardosz M., Winzer J. Control and documentation studies of the impact of blasting on buildings in the surroundings of open pit mines // Journal of Sustainable Mining. 2017. No.16(4). DOI:10.1016/j.jsm.2017.12.004.
16. Lythgoe K., Loasby A., Hidayat D., Wei S. Seismic event detection in urban Singapore using a nodal array and frequency domain array detector: Earthquakes, blasts and thunderquakes // Geophysical Journal International. 2021. No.226(3). Pp. 1542–1557. DOI:10.1093/gji/ggab135.
17. Вандер П.Д., Пальти И., Гринчик И. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб: ПИТЕР. 2022. 576 с.

## ОБ АВТОРАХ

**Полина Александровна Тяпкина** – студентка магистерской программы «Строительная механика, расчет конструкций и оснований». Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Инженер 3 категории. ООО «Институт Гипроникель». 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д.11. E-mail: polina.tyapkina@gmail.com

**Александр Валерьевич Яваров** – кандидат технических наук, доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. Ведущий научный сотрудник. ООО «Институт Гипроникель». 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д.11. E-mail: yavarov\_av@spbstu.ru

**Антон Владимирович Федосеев** – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник. ООО «Институт Гипроникель». 195220, Россия, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д.11. E-mail: FedoseevAV@normik.ru

## ABOUT THE AUTHORS

**Polina A. Tyapkina** – Student of Master Program «Structural Mechanics, Calculation of Structures and Foundations». Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. Engineer (3rd category). LLC Gipronickel Institute. 195220, Russia, Saint-Petersburg, Grazhdansky Prospect, 11. E-mail: polina.tyapkina@gmail.com

**Alexandr V. Yavarov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of department «Higher School of Industrial, Civil and Road Engineering». Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. Leading Researcher. LLC Gipronickel Institute. 195220, Russia, Saint-Petersburg, Grazhdansky Prospect, 11. E-mail: yavarov\_av@spbstu.ru

**Anton V. Fedoseev** – Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher. LLC Gipronickel Institute. 195220, Russia, Saint-Petersburg, Grazhdansky Prospect, 11. E-mail: FedoseevAV@normik.ru