



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СВОЙСТВ ГИРДЕРОВ, ВХОДЯЩИХ В СОСТАВ БУСТЕРНОГО СИНХРОТРОНА “СКИФ”

П.А. Дергач<sup>1,2</sup>, Г.Н. Баранов<sup>1,3,4</sup>, К.Ю. Карюкина<sup>1,3,4</sup>, А.Н. Дробчик<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

<sup>2</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,

<sup>3</sup>Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Лаврентьева, 11, Россия,

<sup>4</sup>Источник синхротронного излучения «СКИФ», Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН,  
630559, Новосибирская область, Кольцово, Никольский проспект, 1, Россия,  
e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

Все магнитные элементы, которые формируют замкнутую орбиту и фокусируют пучок заряженных частиц в ускорителе, установлены на специальных точных и стабильных подставках – гирдерах. Как и любая механическая система, гирдер обладает резонансными частотами, на которых происходит усиление приходящих на него колебаний. Для обеспечения стабильности пучка заряженных частиц важно понимать как передаются механические колебания от пола к магнитному элементу, поскольку даже незначительные возмущения могут приводить к ухудшению параметров пучка заряженных частиц. В статье приведены результаты экспериментальных сейсмометрических измерений подставок под магнитные элементы бустерного синхротрона Центра коллективного пользования «СКИФ». Проведено определение их резонансных частот.

*Сейсмометрия, синхротрон, резонансные колебания, гирдер, резонансная частота, геофон*

## GIRDER RESONANT PROPERTIES ANALYSIS FOR THE “SKIF” SYNCHROTRON

P.A. Dergach<sup>1,2</sup>, G.N. Baranov<sup>1,3,4</sup>, K.Yu. Karyukina<sup>1,3,4</sup>, A.N. Drobchik<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>3</sup>Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Ave., 11, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>4</sup>Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Nikol'skiy Ave., 1,  
Kol'tsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia  
e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru

All magnetic elements that form a closed orbit and focus the beam of charged particles in the accelerator are installed on special precise and stable supports – girders. Like any mechanical system, the girder has its natural frequencies, at which the vibrations coming to it are amplified. To ensure the stability of the charged particle beam, it is important to understand how mechanical vibrations are transmitted from the floor to the magnetic element, since even small perturbations can lead to a worsening in the parameters of the charged particle beam. The article presents the results of experimental seismometric measurements of the girders for magnetic elements of the booster Siberian Circular Photon Source “SKIF”. Their natural frequencies are determined.

*Engineering seismology, synchrotron, resonant frequencies, girder, natural frequency, geophone*

## ВВЕДЕНИЕ

Синхротронное излучение (СИ) – мощный инструмент исследований в различных областях науки: медицине, биологии, материаловедении, нанотехнологиях и т. д. Для генерации СИ используют специализированные источники синхротронного излучения, одним из которых и является строящийся Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») [Baranov et al., 2021], характеризующийся ультрамалым эмиттансом, высоким током электронного пучка, наличием специальных устройств генерации СИ и, соответственно, высокой яркостью СИ [Bilderback et al., 2005].

Магнитные элементы бустерного синхротрона (бустера) ЦКП «СКИФ», предназначенного для ускорения пучка электронов из линейного ускорителя с энергией 200 МэВ [Andrianov et al., 2022] до проектной энергии основного кольца 3 ГэВ, будут установлены на специальные гирдеры, представляющие собой точные и стабильные конструкции для установки элементов ускорителя (рис. 1).

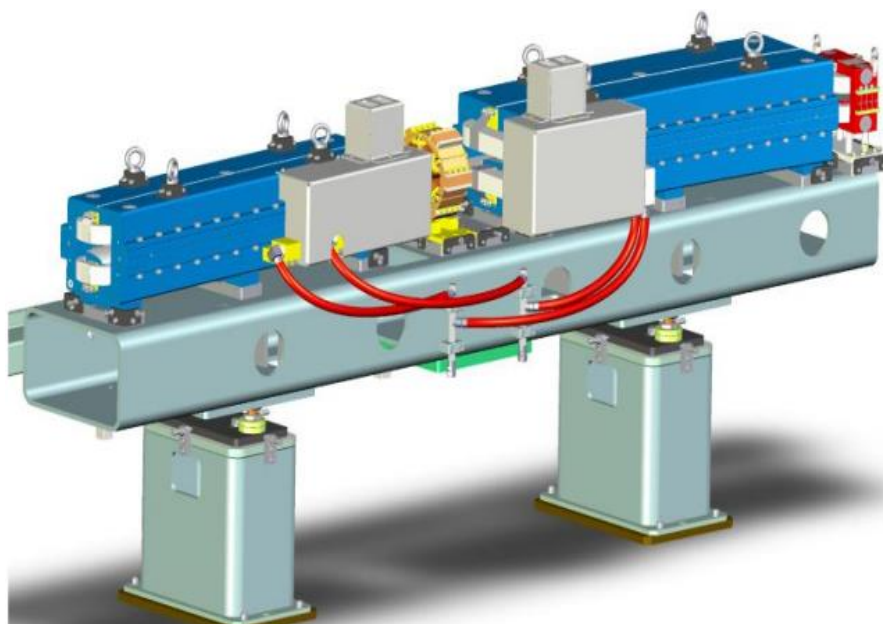


Рис. 1. Магниты бустерного синхротрона на общем гирдере

Гирдеры и их опоры изготавливаются из прямоугольной стальной трубы сечением 500 x 300 мм<sup>2</sup> с толщиной стенки 16 мм. На гирдере длиной около 3.5 м размещаются магниты и вакуумная камера с датчиками положения пучка. Точность выставки магнитов на гирдере лучше  $\pm 150$  мкм [Технологическая инфраструктура..., 2022].

Для определения того, как механические вибрации будут передаваться с пола на гирдер, а в дальнейшем и на магнитные элементы бустера, приводя к отклонению орбиты пучка электронов, были проведены экспериментальные сейсмометрические измерения. Цель – определение резонансных частот гирдера и оценка коэффициента передачи внешних вибраций на магниты синхротрона.

## МЕТОДЫ

Экспериментальные сейсмометрические измерения производились с использованием бескабельной телеметрической сейсморегирующей системы SCOUT, состоящей из набора автономных цифровых сейсмических регистраторов, укомплектованных трехканальными геофонами

с повышенной чувствительностью GS-ONE LF (100.4 В/м/с), а также системы синхронизации отметки момента воздействия. Все записи производились с частотой дискретизации 1 кГц, что обеспечивает регистрацию сейсмических колебаний в частотном диапазоне от 5 до 500 Гц. При необходимости, частотный диапазон записей может быть расширен в область низких частот с использованием цифровой частотной коррекции [Дергач и др., 2018; Дергач, 2020].

Процесс обработки записей микросейсм включал в себя пересчет записей из целочисленного кода регистратора в единицы скорости (м/с), нарезку непрерывных записей на интервалы длительностью 10 с, а также последующий расчет и накопление амплитудных спектров. Далее полученные амплитудные спектры суммировались, что позволяло уверенно выделять регулярные пики, соответствующие резонансным частотам, аналогично методике, описанной в статьях [Колесников и др., 2019; Kolesnikov et al., 2019].

При записи колебаний от импульсного источника, воздействия производились в трех направлениях, совпадающих с ориентацией компонент геофона (горизонтальные X, Y и вертикальная Z). Для повышения соотношения сигнал/шум, производилось накопление одиночных воздействий.

Обработка записей импульсных воздействий также включала в себя пересчет записей из целочисленного кода регистратора в единицы скорости (м/с), однако, в отличие от обработки шумоподобных записей, спектры рассчитывались для единичных воздействий, либо их суммы, состоящей из единичных накоплений.

Для того чтобы оценить коэффициент усиления резонансных колебаний, геофоны устанавливались как непосредственно на сам гирдер, так и на пол под ним.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для изучения резонансных свойств гирдеров было проведено две серии экспериментов: длительная запись фона внешних сейсмических шумов и записи импульсных колебаний, возбуждаемых ударами резиновой киянкой по гирдеру. На рисунке 2 приведено фото расположения регистрирующей аппаратуры во время проведения эксперимента по непрерывной записи сейсмических шумов.



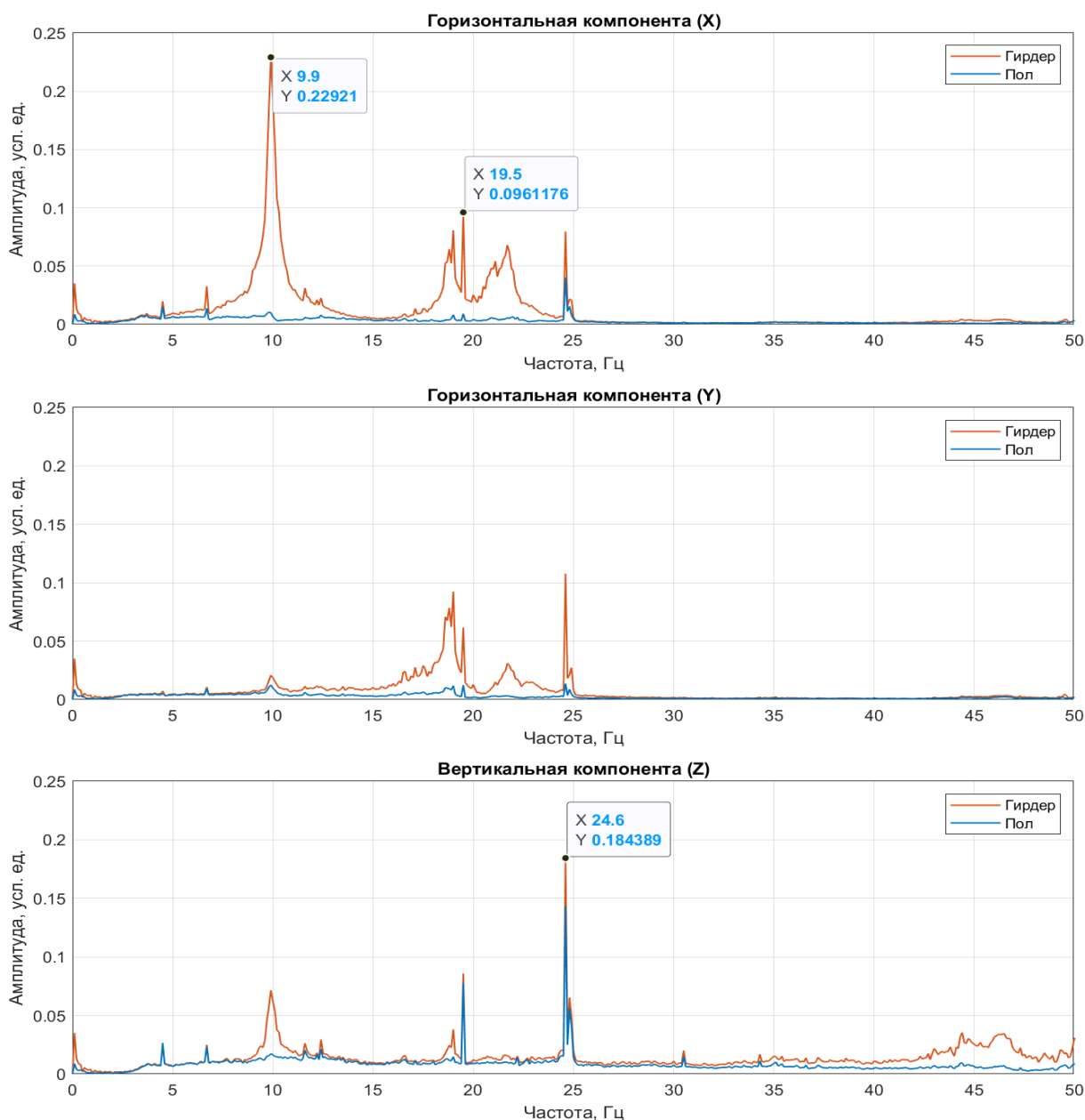
**Рис. 2.** Фото установки девяти комплектов регистрирующей аппаратуры во время проведения эксперимента по непрерывной записи сейсмических шумов

В эксперименте по записи фона сейсмических шумов использовалось 9 комплектов регистрирующей аппаратуры (сейсмический регистратор и трехкомпонентный геофон), а в случае записи импульсных воздействий – 15 комплектов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 3 приведено сравнение накопленных амплитудных спектров, рассчитанных по записям сейсмических шумов длительностью 69 часов, для датчиков, установленных на гирдере (синяя линия) и на полу (красная линия).

Ориентация компонент записи: горизонтальная (X) – поперек оси гирдера, горизонтальная (Y) – вдоль оси гирдера, вертикальная (Z).



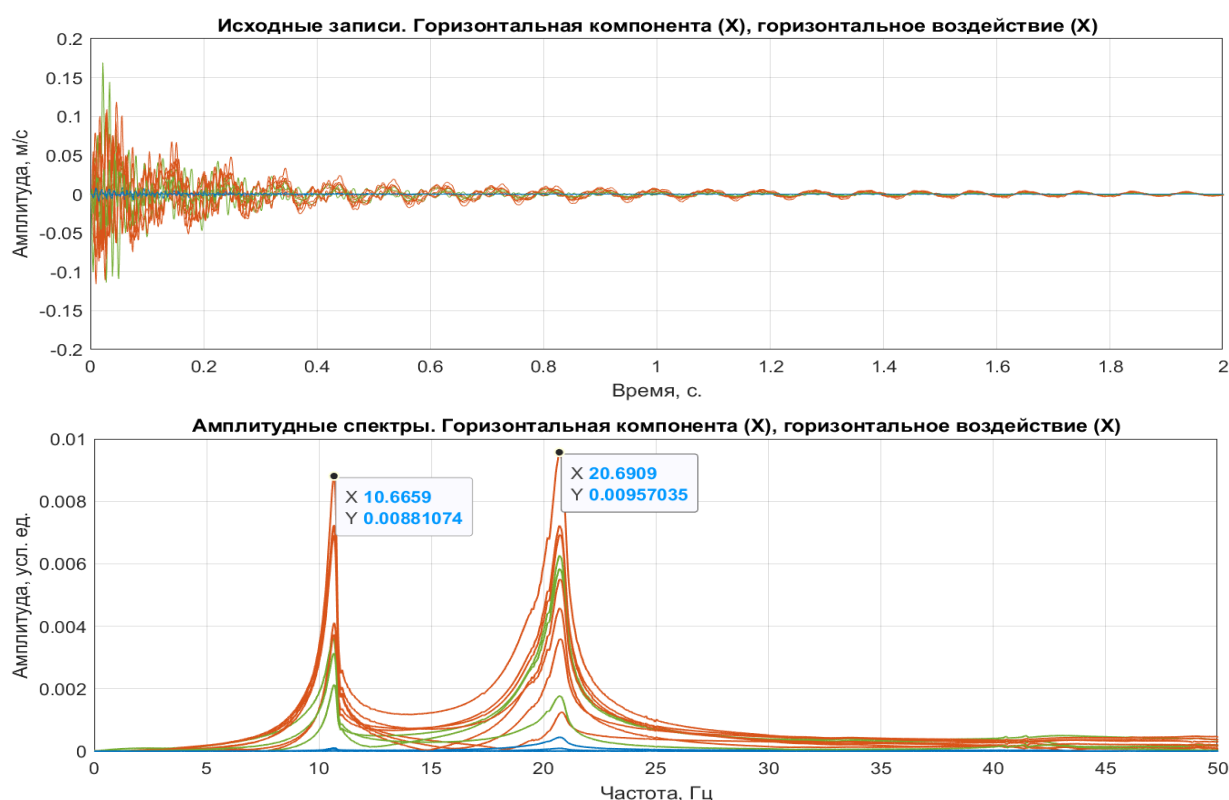
**Рис. 3.** Сравнение накопленных амплитудных спектров, рассчитанных по записям сейсмических шумов длительностью 69 часов, для трехкомпонентного датчика, установленного на гирдере

На всех компонентах четко прослеживается пик, имеющий частоту 24.6 Гц и максимальную амплитуду на спектре вертикальной Z-компоненты как на полу, так и на гирдере. Данная частота характерна для гармонических колебаний от внешнего промышленного источника (например, трансформатора источников питания) и не имеет отношения к резонансным частотам гирдера.

О природе происхождения пика на частоте 19.5 Гц однозначные выводы сделать проблематично, так как такое значение частоты достаточно сильно отличается от значений, характерных для промышленных источников гармонических шумов.

Наибольший интерес представляет пик, имеющий частоту 9.9 Гц, крайне слабо выраженный на спектрах датчика, установленного на полу непосредственно под опорой гирдера. Наибольшую амплитуду он имеет на горизонтальной компоненте (X), ориентированной поперек оси гирдера. Меньшую, но все же ярко выраженную амплитуду, – на спектре записи вертикальной компоненты. Необходимо отметить, что схожая ситуация наблюдается на остальных датчиках, установленных на гирдере. Такое распределение спектральных амплитуд характерно для резонансного характера рассматриваемых частотных пиков.

Чтобы подтвердить эти выводы, авторами были проанализированы спектры записей импульсных колебаний, возбуждаемых при помощи резиновой киянки. На рисунке 4 приведено сопоставление горизонтальной компоненты (X) исходных записей всех датчиков (сверху), а также их спектров (снизу). Горизонтальное воздействие (X).

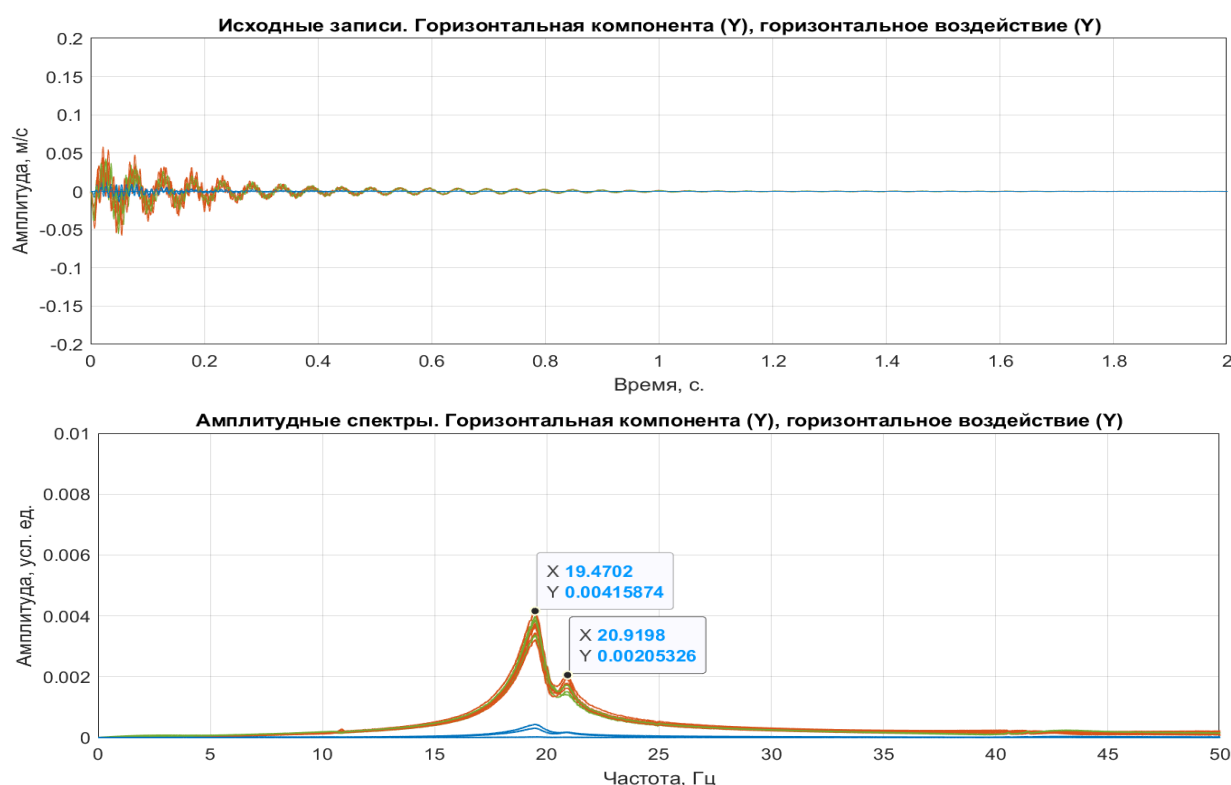


**Рис. 4.** Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Горизонтальная компонента (X), горизонтальное воздействие (X). Красные линии – датчики, установленные в верхней части гирдера, зеленые – в средней части, синие – на полу

На спектре явным образом можно выделить два пика с частотами 10.67 и 20.69 Гц. Значения частот предполагаемых резонансных колебаний отличаются от значений, выделенных по результатам

анализа накопленных спектров сейсмического шума. Это можно объяснить следующим образом: эксперименты с импульсным источником колебаний производились после монтажа дополнительных элементов (секступольная линза, элементы системы охлаждения, вакуумная камера), что увеличило массу всей конструкции и, соответственно, изменило ее резонансные свойства.

На рисунках 5 и 6 приведены исходные записи импульсных воздействий, ориентированных горизонтально (Y) и вертикально (Z), а также их амплитудные спектры. Ориентация компонент записей совпадает с направлениями воздействий.

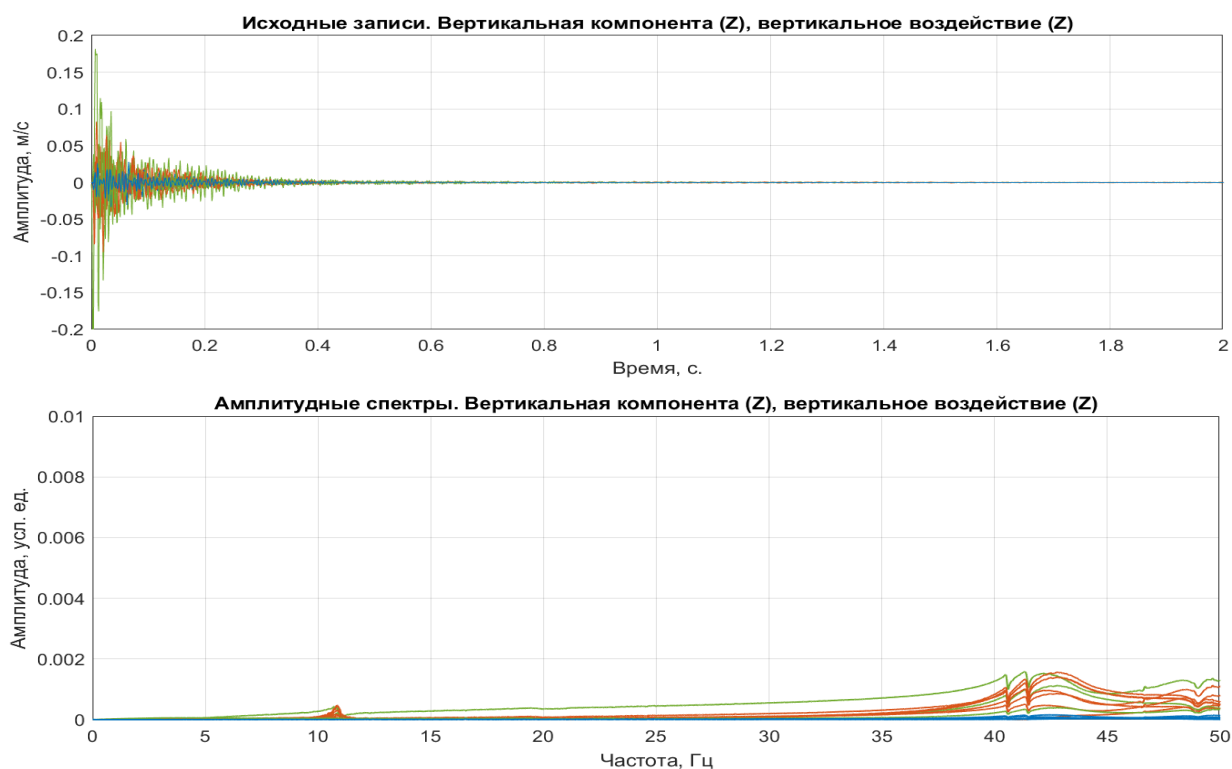


**Рис. 5.** Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Горизонтальная компонента (Y), горизонтальное воздействие (Y)

Как видно из спектра, при импульсном воздействии, направленном с торца гирдера, также, по-видимому, возникают резонансы, однако меньшей амплитуды, и на других частотах (19.47 и 20.91 Гц).

При вертикальном воздействии, в полосе частот ниже 50 Гц, сколько-либо значимых резонансов не возникает. Как, впрочем, и на более высоких частотах (вплоть до частоты Найквиста). В отличие от записей сейсмических шумов, при анализе спектров от импульсных воздействий не удалось выявить каких-либо резонансов на частотах, близких к значению 25 Гц.

В силу того, что импульсные воздействия производились непосредственно по гирдеру, оценка коэффициента передачи вибрационных воздействий с пола на гирдер в этом случае не представляется возможной. В частности, амплитуда сигналов вблизи места удара будет выше, чем на удалении от него. В то же время, по записям фона внешних сейсмических шумов, оценить коэффициент передачи можно путем вычисления соотношения амплитуд пиков на накопленных спектрах записей, произведенных на гирдере и на полу возле его основания. Коэффициенты передачи для колебаний с частотами 9.9 и 19.5 Гц составили 20 и 10 раз соответственно.



**Рис. 6.** Записи импульсного воздействия (сверху) и их амплитудные спектры (снизу). Вертикальная компонента (Z), вертикальное воздействие (Z)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных работ была произведена оценка резонансных частот подставок под магнитные элементы (гирдеров) бустерного синхротрона ЦКП «СКИФ». Как в накопленных амплитудных спектрах непрерывных записей сейсмических шумов, так и в спектрах импульсных воздействий, на горизонтальной компоненте, ориентированной поперек оси гирдера, были выделены резонансы на частотах близких к значениям 10 и 20 Гц. Частоты пиков незначительно изменялись при монтаже дополнительных элементов, увеличивающих вес и резонансные свойства конструкции.

Авторы рекомендуют обратить внимание на данные резонансы и проследить, чтобы никакие промышленные установки в ближайшем окружении бустерного синхротрона не работали на этих частотах, так как амплитуда может повыситься до критических значений и негативно повлиять на орбиту пучка электронов бустера.

Более детально изучить резонансные свойства позволит установка большего количества датчиков вдоль линии и непрерывная запись фона сейсмического шума. Это позволит построить распределение амплитуд резонансных колебаний вдоль гирдера.

Дальнейшее направление исследований – проведение аналогичных измерений для гирдеров накопительного кольца ЦКП «СКИФ» и сравнение с результатами численного моделирования.

Исследование проведено при финансовой поддержке Российского Научного Фонда и Новосибирской области, грант № 22-27-20146.



## ЛИТЕРАТУРА

**Дергач П.А., Тубанов Ц.А., Юшин В.И., Дучков А.А.** Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. – 2018. – № 54 (3). – С. 22–34, doi: 10.21455/si2018.3-2.

**Дергач П.А.** Модуль низкочастотной деконволюции записей геофонов. Свидетельство № 2020667269, заявка № 2020666036 от 09.12.2020, зарегистрировано 22.12.2020, RU.

**Колесников Ю.И., Федин К.В., Лакиморе Н.** Экспериментальное обоснование применения акустических шумов для диагностирования надземных трубопроводов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 49–58, doi: 10.15372/FTPPI20190206.

**Технологическая** инфраструктура сибирского кольцевого источника фотонов «СКИФ»: Сб. статей. В 3-х томах / Под общей редакцией К.И. Шефер, составитель Е.Б. Левичев. Том 2. – Новосибирск: Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН, 2022. – 51 с.

**Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17 (2). – Article T02009, doi: 10.1088/1748-0221/17/02/T02009.

**Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E.** Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24 (12). – Article 120704, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.

**Bilderback D.H., Elleaume P., Weckert E.** Review of third and next generation synchrotron light sources // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – Vol. 38 (9). – P. S773–S797, doi: 10.1088/0953-4075/38/9/022.

**Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L.** Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2019. – Vol. 125. – Article 105739, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105739.

## REFERENCES

**Andrianov A., Arsentyeva M., Barnyakov A., Chekmenev D., Levichev A., Meshkov O., Nikiforov D., Pavlov O., Pivovarov I., Samoylov S., Volkov V.** Development of 200 MeV linac for the SKIF light source injector // Journal of Instrumentation. – 2022. – Vol. 17 (2). – Article T02009, doi: 10.1088/1748-0221/17/02/T02009.

**Baranov G., Bogomyagkov A., Morozov I., Sinyatkin S., Levichev E.** Lattice optimization of a fourth-generation synchrotron radiation light source in Novosibirsk // Physical Review Accelerators and Beams. – 2021. – Vol. 24 (12). – Article 120704, doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.24.120704.

**Bilderback D.H., Elleaume P., Weckert E.** Review of third and next generation synchrotron light sources // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – Vol. 38 (9). – P. S773–S797, doi: 10.1088/0953-4075/38/9/022.

**Dergach P.A., Tubanov T.A., Yushin V.I., Duchkov A.A.** Features of software implementation of low-frequency deconvolution algorithms // Seismic Instruments. – 2019. – Vol. 55 (3). – P. 345–352, doi: 10.3103/S0747923919030046.

**Dergach P.A.** Low-frequency deconvolution software. Patent № 2020667269, registration form № 2020666036 09.12.2020, registered 22.12.2020, RU.



**Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomayezwe L.** Direct determination of resonant properties of near-surface sediments using microtremor. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Article 105739, doi: 10.1016/j.soildyn.2019.105739.

**Kolesnikov Y.I., Fedin K.V., Ngomaizve L.** Experimental Substantiation of Using Acoustic Noise in Above-Ground Pipeline Diagnostics // *Journal of Mining Science*. – 2019. – Vol. 55 (2). – P. 219–228.

**Technological** infrastructure of Siberian Circular Photon Source "SKIF": Collection of articles. In 3 volumes / Edited by K.I. Shefer, completed by E.B. Levichev. Vol 2. – Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, 2022. – 51 p.

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*ДЕРГАЧ Петр Александрович* – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: сейсмический мониторинг, локальная сейсмология, сейсмометрия, инженерная сейсморазведка.

*БАРАНОВ Григорий Николаевич* – научный сотрудник ускорительных лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и старший научный сотрудник Источника синхротронного излучения «СКИФ». Основные научные интересы: ускорители заряженных частиц, источники синхротронного излучения, динамика пучков заряженных частиц.

*КАРЮКИНА Ксения Юрьевна* – научный сотрудник ускорительных лабораторий Института ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН и Источника синхротронного излучения «СКИФ». Основные научные интересы: ускорители заряженных частиц, источники синхротронного излучения, динамика пучков заряженных частиц.

*ДРОБЧИК Аркадий Николаевич* – научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: разработка и создание геофизической аппаратуры.