

П. О. Полянский¹, А. Ф. Еманов¹, А. А. Еманов^{1,2}, А. А. Бах¹, В. М. Соловьев¹, А. Ю. Рыбушкин

Оценка интенсивности и спектральных характеристик сейсмических воздействий на площадку ЦКП «СКИФ»

¹Алтае-Саянский филиал Федерального Исследовательского Центра “Единая Геофизическая служба” РАН, Российская Федерация, г. Новосибирск

²Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Российская Федерация, г. Новосибирск

*e-mail: polyansky@gs.nsc.ru

Аннотация. Сетью широкополосных сейсмических станций на площадке строительства ЦКП «СКИФ» выполнена регистрация сейсмических колебаний от разных типов источников: природных и техногенных землетрясений, промышленных взрывов, помех от промышленного оборудования и движущегося автомобильного и железнодорожного транспорта. Определен частотный состав зарегистрированных сигналов, длительность и интенсивность сейсмических воздействий на площадку строительства. По текущим спектрам микросейсм и с использованием скоростного разреза определены частоты резонансных колебаний верхней части среды. Полученная информация актуальна для создания системы сейсмологического мониторинга ЦКП «СКИФ».

Ключевые слова: ЦКП «СКИФ», сейсмические воздействия, микросейсмические колебания, система мониторинга

P. O. Polianskii¹, A. F. Emanov¹, A. A. Emanov^{1,2}, A. A. Bakh¹, V. M. Soloviev¹, A. Yu. Ribushkin¹

Assessment of intensity and spectral characteristics of seismic impacts on the construction site of the «SKIF» center

¹Altay-Sayan branch of Federal Research Center “United Geophysical Survey” RAS, Russian Federation, Novosibirsk

²Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch RAS, Russian Federation, Novosibirsk

*e-mail: polyansky@gs.nsc.ru

Abstract. A network of broadband seismic stations at the construction site of the SKIF center has recorded seismic vibrations from different types of sources: natural and man-made earthquakes, industrial explosions, noise from industrial equipment and moving vehicles. The frequency composition of the signals, duration and intensity of seismic impacts on the construction site were determined. The frequencies of resonant oscillations of the upper part of the medium were determined from microseismic vibrations and using a velocity section. The information obtained is necessary to create a seismological monitoring system at the SKIF Center.

Keywords: «SKIF» center, seismic impacts, microseismic vibrations, seismic monitoring system

Введение

«Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ») – это современный источник синхротронного излучения четвертого поколения с энергией 3 ГэВ и диаметром ускорительного кольца 476 м [1], строящийся в наукограде Кольцово (Новосибирская область). Цель исследования состоит в определении параметров сейсмических сигналов от разных источников (природные и техногенные землетрясения, промышленные взрывы, движение автомобильного и железнодорожного транспорта, работа промышленного оборудования предприятий) и оценке интенсивности их воздействий на площадку строительства. Сейсмические воздействия на грунт способны существенно изменить параметры пучка частиц в ускорителе [2]. Важны не только энергия события, но и его длительность и частотный состав. Эксперимент на ускорителе ограничен во времени и появляется возможность из результата измерения с пониженной из-за сейсмических колебаний точностью. Таким образом, одной из важнейших задач при создании установки является разработка системы мониторинга сейсмических событий. Для детальных наблюдений в районе строительства ЦКП «СКИФ» установлена локальная сеть из 7 цифровых широкополосных сейсмологических станций (рис.1 а), [3].

Методы и алгоритмы обработки зарегистрированных данных

1. Алгоритм вычисления текущих спектров мощности (PSD - Power spectral density) [4, 5]. Полученные преобразованием Фурье спектрограммы приводятся к единицам мощности скорости $((\text{м/сек})^2/\text{Гц})$ путем деления на амплитудно-частотную характеристику прибора относительно скорости. Для всех PSD-спектрограмм единицы мощности указываются в дБ относительно $1 (\text{м/сек})^2/\text{Гц}$.

2. Интенсивность воздействия (I) сейсмических событий на площадку ЦКП «СКИФ» измеряется в баллах по шкале ШСИ-17 и вычисляется с использованием формулы (1):

$$I = 1.325 \cdot (\lg(PGA) + \lg(PGV)) + 2.83 \pm 0.26, \quad (1)$$

Здесь и далее: PGA – пиковое ускорение смещения грунта, измеряемое в см/с^2 , PGV – пиковая скорость смещения грунта, измеряемая в см/с , [6].

3. Частотно-волновой анализ записей сейсмической группы методом группирования [7] для определения азимута и значений медленности приходящих волн от сейсмических событий.

Сейсмичность Новосибирской области и Кузбасса

Региональной сетью АСФ ФИЦ ЕГС РАН регистрировались природные землетрясения в платформенных очаговых зонах около г. Камень-на-Оби [8, 9], а наиболее сильным событием из зарегистрированных в период работы локальной сети стало Барлакульское землетрясение (04.11.2021, $M_L=4.9$) с эпицентром в пределах Западно-Сибирской плиты, удаленным от площадки на 290 км [10]. Следствием увеличивающихся объемов добычи полезных ископаемых стали

землетрясения техногенной природы со значениями магнитуд, зачастую превышающими 4. Подобные землетрясения формируются вблизи горных выработок в Кузнецком угольном бассейне и на юге Новосибирской области, в зоне угольных разрезов предприятия «Сибирский антрацит». Основное количество промышленных взрывов характеризуются магнитудами 2-3, но возможны и взрывы с магнитудами до 4 [11]. На рис. 1-б представлен результат частотно-волнового (F-K) анализа записи промышленного взрыва с магнитудой 3.2, произошедшего 26.11.2021 г. в 09:57 UTC.

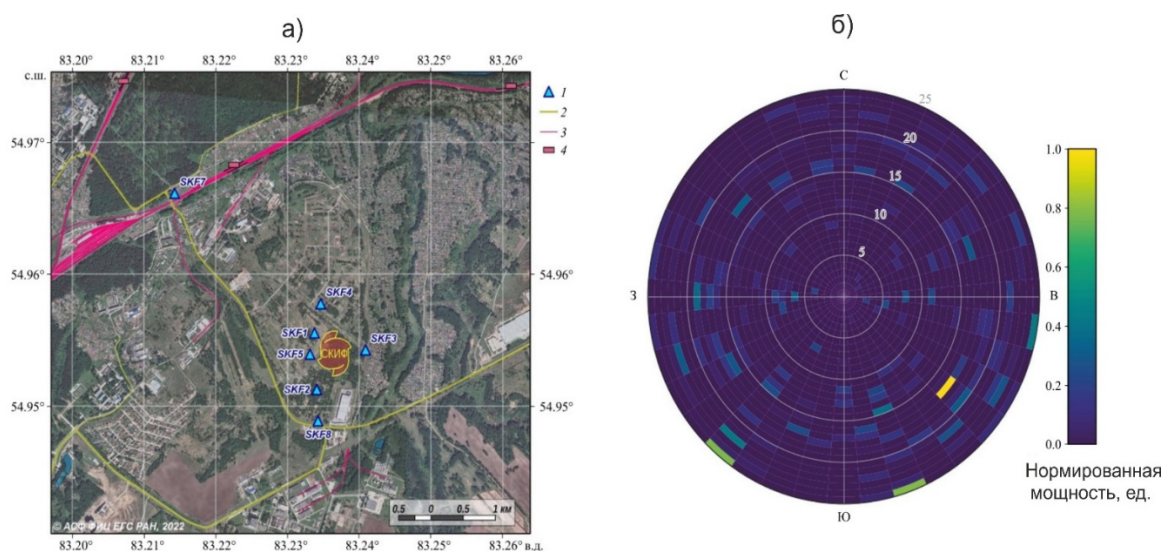


Рис.1. Сейсмологические исследования в районе ЦКП «СКИФ». а) Схема наблюдений: 1 – сейсмологические станции; 2 – автомобильные дороги; 3 – железные дороги; 4 – железнодорожные станции. б) Результат F-K анализа записи промышленного взрыва ($M_L=3.2$).

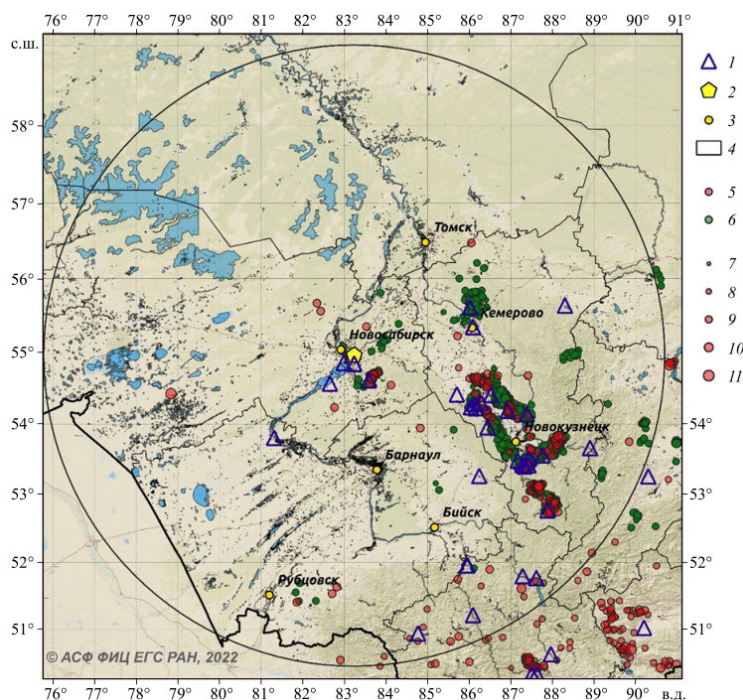


Рис. 2. Карта Эпицентров событий, зарегистрированных период наблюдений с 01.11.2021 по 11.01.2022 гг. Условные обозначения: 1 - региональные сейсмические станции; 2 - площадка строительства ЦКП «СКИФ»; 3 - города; 4 – территория в радиусе 500 км от объектов ЦКП «СКИФ»; 5 – землетрясения; 6 - взрывы; 7-11 – магнитуды событий (M_L): 7 - $M_L < 1.0$; 8 - $1.0 < M_L < 2.0$; 9 - $2.0 < M_L < 3.0$; 10 - $3.0 < M_L < 4.0$; 11 - $3.0 < M_L < 4.0$.

Спектральные характеристики сигналов разных типов сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКП «СКИФ»

Для определения частотного состава и природы сигналов и помех использовался анализ текущих спектров мощности, получаемых с использованием приведенного выше алгоритма. Еще раз отметим, что цветовая шкала единиц мощности скорости дана в дБ. Примеры текущих спектров основных типов сигналов, регистрируемых на площадке ЦКП «СКИФ» представлены на рис. 3.

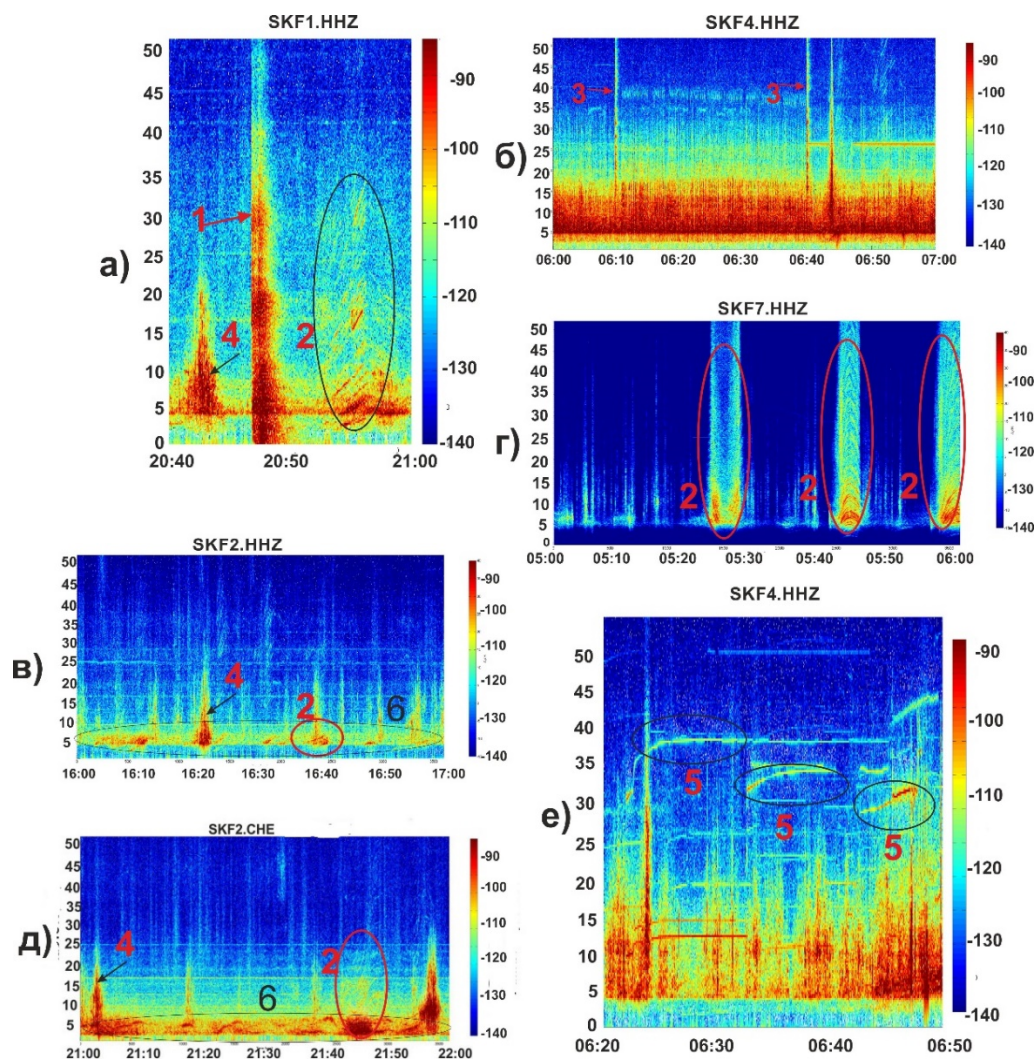


Рис. 3. Текущие спектры мощности записей сети временных сейсмических станций в районе площадки ЦКП «СКИФ». По шкале абсцисс – время UTC, ординат – частота, Гц. Цветовая шкала дана в дБ относительно $1 \text{ (м/сек)}^2/\text{Гц}$. а)- г), е) – спектры вертикальной составляющей волнового поля; д) – спектр горизонтальной компоненты «запад-восток». Цифрами показаны спектры регистрируемых сигналов: 1 – природного Барлакульского землетрясения; 2 – движущихся грузовых поездов; 3 – промышленных взрывов; 4 – движущихся автомобилей; 5 – промышленных помех с изменяющейся во времени частотой; 6 – предположительно, резонансных колебаний верхней части разреза.

Барлакульское землетрясение произошло в Здвинском районе Новосибирской области на расстоянии 290 км к западу от площадки строительства ЦКП «СКИФ». Перед землетрясением мимо площадки проехал автомобиль (спектр сигнала обозначен стрелкой 4 на рис. 3-а), после землетрясения до станций дошли колебания, вызванные проходящим поездом (овал 2 на рис. 3-а). В статье [12] детально изучались частотные характеристики колебаний, вызванных движением железнодорожных составов. На построенных спектрах есть возможность сравнить сейсмические воздействия от местного землетрясения, от автомобиля и

поезда. Воздействие от землетрясения существенно превосходит по энергии колебания от автомобиля и поезда; кроме того, колебания от землетрясения охватывают весь рассматриваемый диапазон частот. Взрывы, отмеченные стрелками 3 (рис. 3-б), в спектрах выделяются уверенно, с охватом частот от 3 Гц по всему диапазону в сторону высоких частот. От землетрясений спектры взрывов отличаются отсутствием низкочастотных составляющих (менее 3 Гц). Таким образом, распознавание взрывов и землетрясений по текущим спектрам не вызывает затруднений.

На рис. 3-е зафиксированы спектры помех с постоянной или изменяющейся во времени частотой (овалы 5). Такие помехи, регистрируемые в основном в дневное время суток, связаны с работой промышленного оборудования.

Определение частот резонансных колебаний верхней части среды

В рамках настоящей работы выполнена оценка резонансных частот разреза по данным регистрации сейсмологических станций. На площадке строительства в период регистрации сигналов выполнялись строительные работы, ввиду чего выполнить накопление сигналов за длительный интервал времени было проблематично. Поэтому были выбраны сутки 01.01.2022 г., когда строительные работы не велись, но удаленные источники вибраций – автомобили и поезда – присутствовали и подпитывали энергией колебания в верхнем слое. По трехкомпонентным записям сейсмических станций SKF2, SKF3 и SKF4 рассчитаны спектры (рис. 4) с усреднением по времени за сутки регистрации. Анализ построенных спектров показывает, что в точках расположения станций формируются стабильные колебания с определёнными частотами для вертикальной и горизонтальной компонент, прослеживаемые и на текущих спектрах (эти колебания выделены овалами 6 на рис. 3-в и рис. 3-д). Зафиксированные значения частот приведены в табл. 1.

Таблица 1

Частоты резонансов грунта на площадке строительства ЦКП «СКИФ», Гц

Станция	Направление колебаний		
	Z	E	N
SKF2	4.70	2.56	2.56
SKF3	6.35	3.36	3.23
SKF4	5.00	2.93	2.62

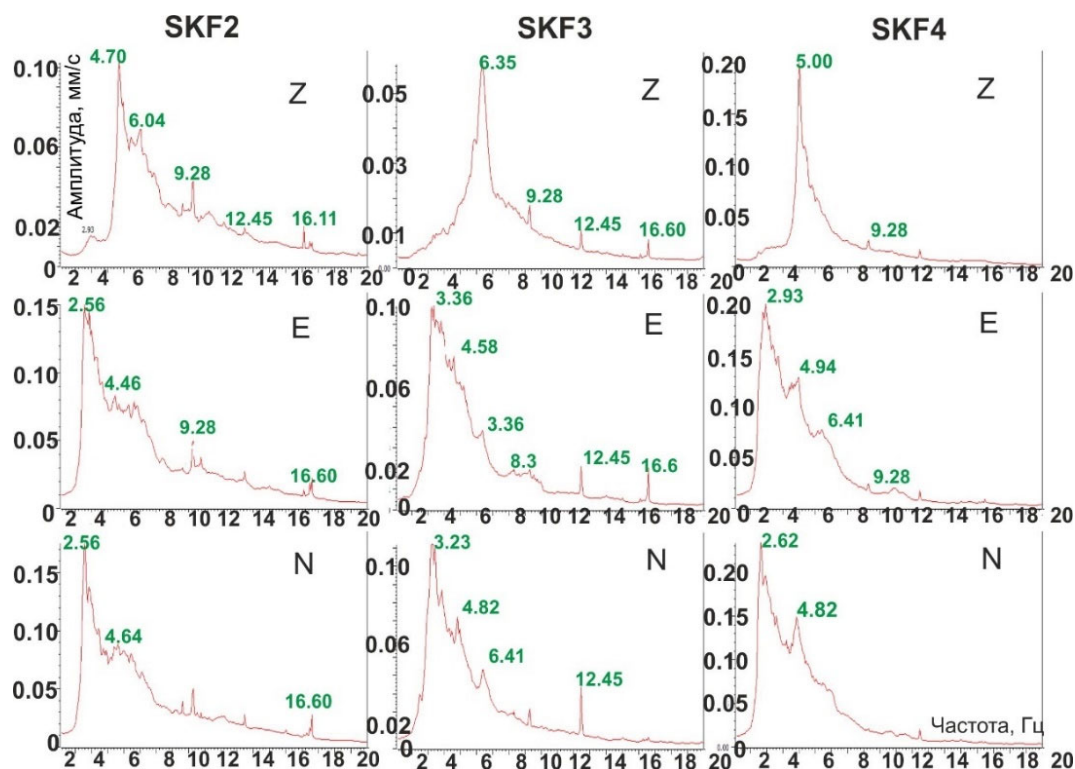


Рис. 4. Осредненные за сутки амплитудные спектры трехкомпонентных записей микросейсм, зарегистрированных сейсмическими станциями SKF2, SKF3, SKF4. Зеленым шрифтом отмечены значения частот локальных максимумов спектра.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в точках размещения сейсмостанций формируются стоячие волны с разными частотами в грунтовой толще. Вероятнее всего, имеет место формирование стоячих волн в рыхлой толще между скальным основанием и дневной поверхностью. Согласно [13], частота первой моды собственных колебаний слоя с одной свободной поверхностью определяется формулой (2):

$$f = Vp/4h, \quad (2)$$

где f – частота колебаний; Vp – скорость продольных волн; h – мощность слоя.

Аналогичное соотношение можно записать и для скоростей поперечных волн.

Безусловно, задачу определения резонансных свойств верхней части разреза правильнее решать по измерениям микросейсм с опорной точкой традиционным подходом [14] или методом стоячих волн [15]. Для верификации полученного результата использована информация о скоростном строении верхней части верхней части среды. Сейсмический разрез, построенный способом t_0 , представлен на рис. 5.

Результаты расчетов с использованием формулы (2) и сейсмического разреза свидетельствуют, что в рыхлой толще мощностью 70-80 м, залегающей над

скальными породами, формируются стоячие волны, сигналы которых прослежены на спектрах (рис. 3-в, рис.3-д и рис. 4).

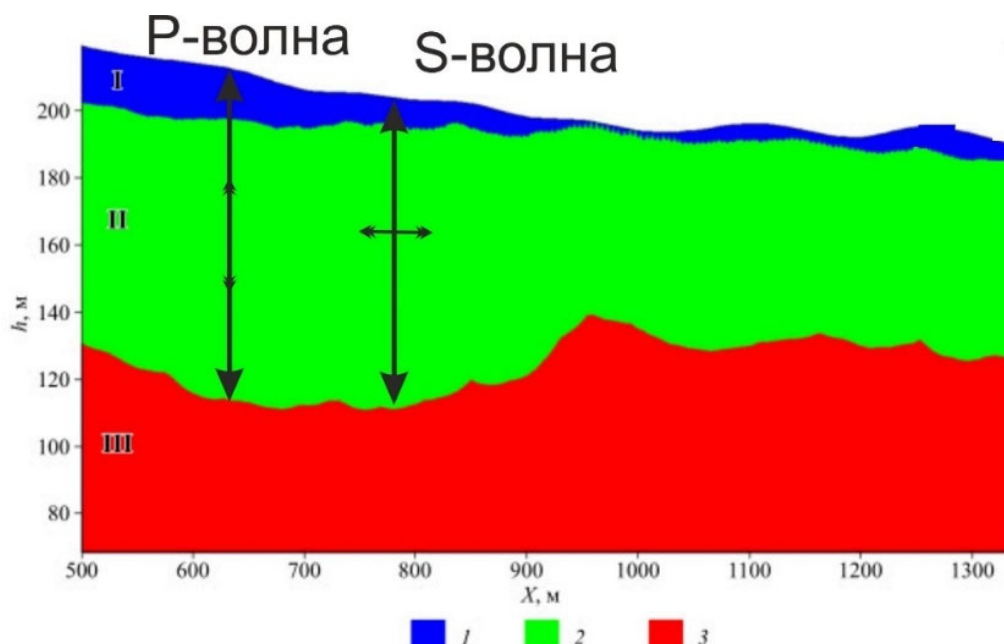


Рис. 5. Сейсмический разрез по профилю в районе исследования. 1 - слой со скоростью продольных волн ~ 400 м/с; 2 – слой со скоростью Р-волн ~ 1600 м/с; 3 – слой со скоростью Р-волн ~ 4300 м/с (скальные породы); среднее по разрезу значение $V_P/V_S \sim 1.8$.

Результаты и выводы

- Наиболее значительное воздействие на площадку строительства ЦКП «СКИФ» оказало Барлакульское землетрясение с $M_L = 4.9$ ($PGD = 9$ мкм, $PGV = 0.0143$ см/сек, $PGA = 0.3148$ см/сек²). Сейсмические воздействия от промышленных взрывов уступают воздействию сильных землетрясений. Интенсивность воздействий взрывов и землетрясений на площадку не превысили 1 балла по шкале ШСИ-17.

- Спектр сейсмических колебаний, вызванных движением железнодорожного транспорта, имеет характерный вид набора кратных гармоник, в диапазоне частот 4-50 Гц. Заметное воздействие на площадку (до $PGD = 3$ мкм, $PGV = 0.0063$ см/сек, $PGA = 0.2530$ см/сек²) и интенсивностью до 1 балла оказывают преимущественно грузовые поезда.

- Шумы промышленного оборудования предприятий выражены двумя видами колебаний – с постоянной и с плавно изменяющейся частотой во времени.

- Зафиксированные на амплитудных спектрах максимумы на частотах ~ 5 Гц (вертикальный канал) и 2-3 Гц (горизонтальные каналы) связаны с резонансными колебаниями в толще пород между скальным основанием и дневной поверхностью.

Источник финансирования

Исследование выполнено в рамках государственного задания ФИЦ ЕГС РАН по проекту № 075-00682-24 и с использованием данных, полученных на УНУ «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Баранов Г.Н., Богомятков А.В., Левичев Е.Б., Сняткин С.В. Оптимизация магнитной структуры источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ в Новосибирске // Сибирский физический журнал. 2020. Т. 15, № 1. С. 5–23. <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2020-15-1-5-23>.
2. Гуров С.М., Волков В.М., Золотарев К.В., Левичев А.Е. Инжекционная система для сибирского кольцевого источника фотонов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2020. № 7. С. 3–7. <https://doi.org/10.31857/S1028096020060072>.
3. Еманов А.А., Еманов А.Ф., Левичев Е.Б., Соловьев В.М., Чуркин И.Н., Корабельщиков Д.Г., Сняткин С.В., Янкайтис В.В., Пиминов П.А., Бах А.А., Баранов Г.Н., Фатеев А.В., Карюкина К.Ю., Полянский П.О., Дураченко А.В., Сережников Н.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Шевкунова Е.В., Антонов И.А., Ершов Р.А. Изучение сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКП «СКИФ» // Вопросы инженерной сейсмологии. 2022. Т. 49. №3. С. 5-38.
4. Oppenheim A.V., Schafer R.W., Buck J.R. *Discrete-Time Signal Processing*. Second edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999.
5. McNamara D.E., Buland R.P. Ambient noise levels in the continental United States // Bulletin of the Seismological Society of America. 2004. Vol.94. №4. pp.1517-1527.
6. ГОСТ Р 57546-2017. Землетрясения. Шкала сейсмической интенсивности. М.: Стандартинформ, 2017. 27 с.
7. Винник Л.П. Структура микросейсм и некоторые вопросы методики группирования в сейсмологии. М.: Наука, 1968. 104 с.
8. Жалковский Н.Д., Цибульчик Г.М., Шебалин Н.В. Землетрясение в г. Камень-на-Оби 15 февраля 1965 г. // Докл. АН СССР. Сер. Математическая физика. 1965. Т. 165, №2. С. 37-43.
9. Бугаев Е.Г., Еманов А.Ф., Ворона У.Ю., Еманов А.А., Лескова Е.В. Изучение микросейсмичности района г. Камень-на-Оби Алтайского края и оценка сейсмической опасности // Геофизические методы исследования земной коры: Материалы Всерос. конф., посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева, г. Новосибирск, 8-13 декабря 2014 г. Новосибирск, 2014. С. 112-117.
10. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Виноградов Ю.А., Чечельницкий Ю.А., Шевкунова Е.В., Фатеев А.В., Полянский П.О., Кобелева Е.А., Бах А.А., Сережников Н.А. Оценка уровня и спектральных характеристик сейсмических воздействий в районах расположения объектов гидроэнергетики в Сибири // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23, № 1.
11. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Куприш О.В., Подкорытова В.Г. Колыванское землетрясение 09.01.2019 с $M_L=4.3$ и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т.46, № 4. С. 29-45.
12. Fuchs F., Bokelmann G. Equidistant spectral lines in train vibrations // Seismological Research letters. 2018. Vol. 89, № 1. P.56-66.
13. Хайкин С.Э. Физические основы механики. Учебное пособие. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1971. 752 с.
14. Штейнберг В.В. Методы оценки сейсмических воздействий // Вопросы инженерной сейсмологии. Вып. 34. М.: наука, 1993. С. 5-94.

15. Еманов А.Ф., Красников А.А., Бах А.А., Черных Е.Н., Еманов А.А., Семин А.Ю., Черепанов А.В. Резонансные свойства верхней части разреза // Физическая мезомеханика. 2008. Т. 11, № 1. С. 26-36.

*© П. О. Полянский, А. Ф. Еманов, А. А. Еманов,
А. А. Бах, В. М. Соловьев, А. Ю. Рыбушкин, 2024*