



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ ШУМОВ НА НАКОПИТЕЛЬНОМ КОЛЬЦЕ ЦКП “СКИФ”

П.А. Дергач^{1,2}, Г.Н. Баранов^{1,3,4}, К.Ю. Карюкина^{1,3,4}, А.Н. Дробчик¹, А.В. Яблоков^{1,2}

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

²*Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия,*

³*Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН, 630090, Новосибирск, ул. Лаврентьева, 11, Россия,*

⁴*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*

Сибирский кольцевой источник фотонов (СКИФ) – новый источник синхротронного излучения поколения 4+, находящийся на стадии строительства в наукограде Кольцово, Россия. Стабильность пучка современных источников СИ, характеризующихся малым эмиттансом, чувствительна даже к незначительному уровню вибраций грунта. В работе произведена оценка вариации уровня сейсмических шумов от внешних источников, регистрируемых на площадке строительства ЦКП “СКИФ”. Произведена оценка коэффициента передачи вибраций от внешних источников сейсмического шума с грунта на фундамент кольца накопителя. В частотном диапазоне 1–20 Гц коэффициенты передачи для вертикальной и горизонтальной компонент записи составили 0.38 и 0.725 соответственно. В частотном диапазоне 20–100 Гц – 0.12 и 0.06 соответственно. Анализ экспериментальных данных показал эффективность подавления высокоамплитудных внешних шумов в частотном диапазоне 2–100 Гц при передаче колебаний с грунта на фундамент кольца накопителя “СКИФ”. Коэффициенты передачи фундамента хорошо совпадают с расчетной моделью.

Источник синхротронного излучения, эмиттанс, фундамент, сейсмометрия, сейсмические шумы, геофон

SITE-VIBRATION ASSESSMENT FOR THE SKIF SYNCHROTRON

P.A. Dergach^{1,2}, G.N. Baranov^{1,3,4}, K.Yu. Karyukina^{1,3,4}, A.N. Drobchik¹, A.V. Yablokov^{1,2}

¹*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Koptug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,*

²*Novosibirsk State University, Pirogova Str., 1, Novosibirsk, 630090, Russia,*

³*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Lavrentiev Ave., 11, Novosibirsk, 630090, Russia,*

⁴*Synchrotron Radiation Facility SKIF, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Nikolskiy Ave., 1,
Koltsovo, Novosibirsk Region, 630559, Russia
e-mail: DergachPA@ipgg.sbras.ru*

The Siberian ring source of photons (SKIF) is a new fourth-generation synchrotron light source currently under construction in Koltsovo city, Russia. The beam stability of modern synchrotron sources, characterized by low emittance, is sensitive to insignificant levels of ground vibrations. We assessed the seismic noise variation from external sources recorded at the construction site of the SKIF. For the frequency range 1–20 Hz, the transmission coefficients for the vertical and horizontal recording components were 0.38 and 0.725, respectively. In the frequency range 20–100 Hz – 0.12 and 0.06, respectively. Analysis of experimental data shows the effectiveness of suppressing high-amplitude external noise in the

frequency range of 2-100 Hz when transmitting vibrations from the ground to the SKIF storage ring basement. The coefficients determined for the basement match well with the design model.

Synchrotron light source, emittance, slab, seismometry, seismic noise, geophone

ВВЕДЕНИЕ

СКИФ представляет собой ускорительный комплекс, который состоит из линейного ускорителя, предускорительного бустерного кольца и основного кольца накопителя. Накопитель электронов, предназначенный для удержания пучка электронов и генерации синхротронного излучения, рассчитан на релятивистскую энергию пучка 3 ГэВ и имеет периметр 476 м [Baranov et al., 2021].

Современные источники синхротронного излучения, такие как СКИФ, характеризуются крайне малым эмиттансом (фазовым объемом пучка электронов), требуют низкого уровня вибраций, передающихся с грунта, а также высокой степени механической стабильности конструкции подставок, на которых жестко закреплены группы магнитов [Bialowons, Ehrlichmann, 2005; Huang, Kay, 2006; Simos et al., 2019]. Возникающие вследствие сейсмических вибраций, механические колебания приводят к смещению магнитов кольца накопителя и, следовательно, к изменению магнитных полей на пути пучка электронов. Это приводит к смещению орбиты пучка электронов и к смещению фотонного пучка на станциях СИ, снижая один из ключевых параметров для пользователей – яркость фотонного пучка (поток фотонов, нормированный на фазовый объем источника).

ЦКП “СКИФ” расположен в наукограде Кольцово на площадке, вблизи которой находятся несколько источников техногенных шумов: железная (на расстоянии 1650 м) и автомобильная дороги (на расстоянии 625 м), завод промышленного производства. Здание накопителя представляет собой двухэтажное здание кольцевой формы с наружным диаметром 238.3 м. Фундаментом для него является монолитная железобетонная плита высотой 1.5 м, которая расположена на подушке из насыпного уплотненного грунта толщиной 1.5 м. Для увеличения жесткости грунтового основания и увеличения собственной частоты колебаний фундамента под стабилизированным грунтом заложена песчаная прослойка на вертикально армированном слое мощностью 9 м. Согласно расчетам, были подобраны оптимальные параметры подстилающего слоя, таким образом, чтобы он забирал на себя часть энергии колебаний грунта и коэффициент передачи был меньше 1. Через фундамент вибрации поступают на механические подставки под магниты, где смещение может усиливаться за счет структурных резонансов и приводить к значительным механическим вибрациям магнитов. На этапе проектирования подставок под магниты следует учесть частоты, возбуждаемые в спектре колебаний грунта, чтобы избежать резонансов с собственными частотами подставок. Собственные частоты подставок обычно сдвигаются как можно выше: в область частот, где спектральная плотность мощности движения грунта (PSD) естественно низкая [Ravindranath et al., 2010].

Для источника синхротронного излучения можно указать типичную характеристику, согласно которой перемещение электронного пучка не должно превышать 10% размера пучка электронов и угловой расходимости в поперечных плоскостях [Balmer et al., 2000]. В частности, для СКИФ потребуется субмикронная стабильность пучка в местах установки вставных устройств генерации излучения. Они располагаются в стандартных прямолинейных промежутках кольца накопителя. Диапазон частот, в котором должна быть гарантирована стабильность лежит в интервале от 2 до 100 Гц.

Данное исследование направлено на экспериментальную оценку коэффициента передачи вибраций от внешних источников шумов с грунта на фундамент накопительного кольца.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Измерения вибраций от внешних источников сейсмического шума на площадке строительства ЦКП “СКИФ” производились в период с 08.09.2023 по 11.09.2023, в результате чего было получено 68 часов непрерывных записей с 22 пунктов регистрации, расположенных на бетонном фундаменте кольца накопителя и на грунте в непосредственной близости от него (рис. 1).

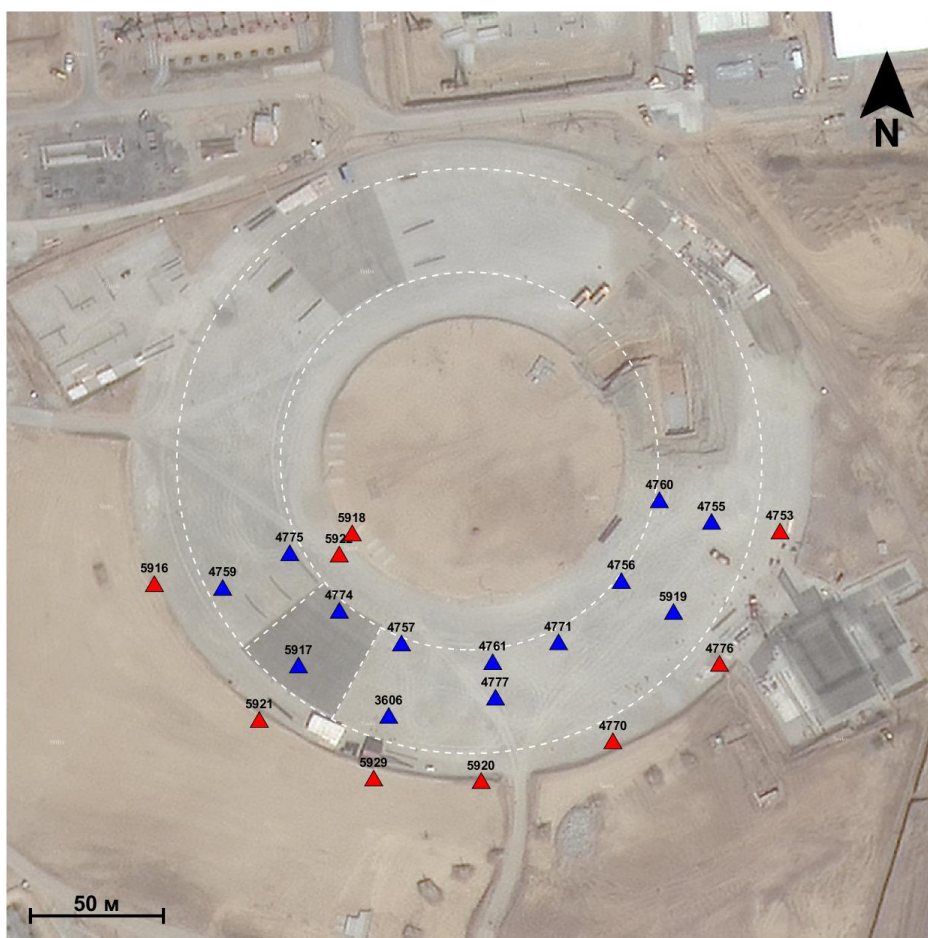


Рис. 1. Спутниковый снимок с местами установки сейсмических датчиков

На рисунке 1 синими треугольниками обозначены сейсмические датчики (геофоны), установленные на бетонных секциях фундамента кольца накопителя, красными – на грунте. Кроме того, белым пунктиром обозначены границы бетонного фундамента кольца накопителя и одной из 16 запланированных секций. Спутниковый снимок, используемый в качестве подложки, был сделан до заливки секций бетоном. На момент проведения измерений было залито 7 секций, на каждой из которых установили по два геофона (за исключением одной). Отсутствие строгой системности установки датчиков связано тем, что на момент исследований на кольцо проводились активные строительные работы, и геофоны устанавливались там, где это было возможно.

Для непрерывной регистрации сейсмических сигналов использовалась бескабельная телеметрическая система SCOUT с потоковой передачей данных по Wi-Fi, состоящая из автономных

трехкомпонентных модулей регистрации и низкочастотных геофонов с повышенной чувствительностью GS-ONE LF (5 Гц, 100.4 В/м/с). Параметры регистрации были выбраны таким образом, чтобы обеспечивать регистрацию слабых шумоподобных сигналов вплоть до частоты 400 Гц: дискретизация – 1 кГц, коэффициент усиления регистратора – 36 дБ.

Жесткое крепление геофонов к бетонному фундаменту кольца накопителя обеспечивалось использованием анкерных болтов. Горизонтальная компонента (X) у всех датчиков была направлена в сторону центра кольца накопителя.

На рисунке 2 показан процесс установки датчиков на фундамент кольца.



Рис. 2. Процесс установки сейсмических датчиков

На рисунке 2 показаны: (а) – внешний вид фундамента кольца накопителя ЦКП “СКИФ”, (б) – крепление геофона к фундаменту при помощи анкера, (в) и (г) – геофоны, установленные на фундаменте и грунте, соответственно.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Обработка всех сейсмических записей производилась в авторском программном обеспечении, написанном на языках Python и MATLAB. Этап предварительной обработки всех записей включал в себя:

1. Расширение частотного диапазона записей геофонов в область низких частот с 5 до 1 Гц с использованием метода низкочастотной деконволюции [Дергач и др., 2018];
2. Полосовую частотную фильтрацию (выделение целевого частотного диапазона);
3. Численное интегрирование записи (перевод сигнала из единиц скорости в смещение).

Для оценки вариации уровня сейсмических шумов во времени, производился расчет среднеквадратического отклонения сигнала (СКО) в скользящем окне длительностью 60 с. Частотный диапазон анализируемых колебаний выбирался по результатам рекогносцировочных работ, во время которых была произведена классификация основных источников шума на площадке строительства [Еманов и др., 2022; Баранов и др., 2023].

Таблица 1

Классификация источников колебаний на площадке ЦКП “СКИФ”

Источник колебаний	Периодичность, раз в день	Частотный диапазон, Гц	Длительность, с	СКО, мм
Землетрясения	0.3	5–20	15–20	500
Пром. взрывы	1.6	5–20	15–25	500
Ж/д транспорт	100	3–8	200	100–300
Автотранспорт	2500	5–20	10–30	60–200
Пром. шумы	–	20–100	–	–

Как видно из таблицы, частотный диапазон анализируемых колебаний можно условно разделить на две области: низкочастотная (3–20 Гц) и высокочастотная (20–100 Гц). Основным источником шумов в низкочастотной области является железная дорога, расположенная в 1.5 км от площадки ЦКП “СКИФ”. В высокочастотной области основной вклад вносят монохроматические сейсмические колебания от близлежащих промышленных предприятий.

Проанализируем сигналы и их спектрограммы для случайно выбранного часового фрагмента непрерывных записей, произведенных 11.09.2023 в 04:00 (UTC+7) на расположенных в непосредственной близости друг от друга точках регистрации 5916 и 4759 (рис. 3).

На спектрограммах четко прослеживаются сигналы от проходящих железнодорожных поездов (2–8 Гц), а также гармонические помехи от промышленных объектов (около 26, 35 и 70 Гц). Данные наблюдения хорошо согласуются с вышеприведенной классификацией, поэтому дальнейший анализ сигналов будет производиться в двух частотных диапазонах: 1–20 и 20–100 Гц.

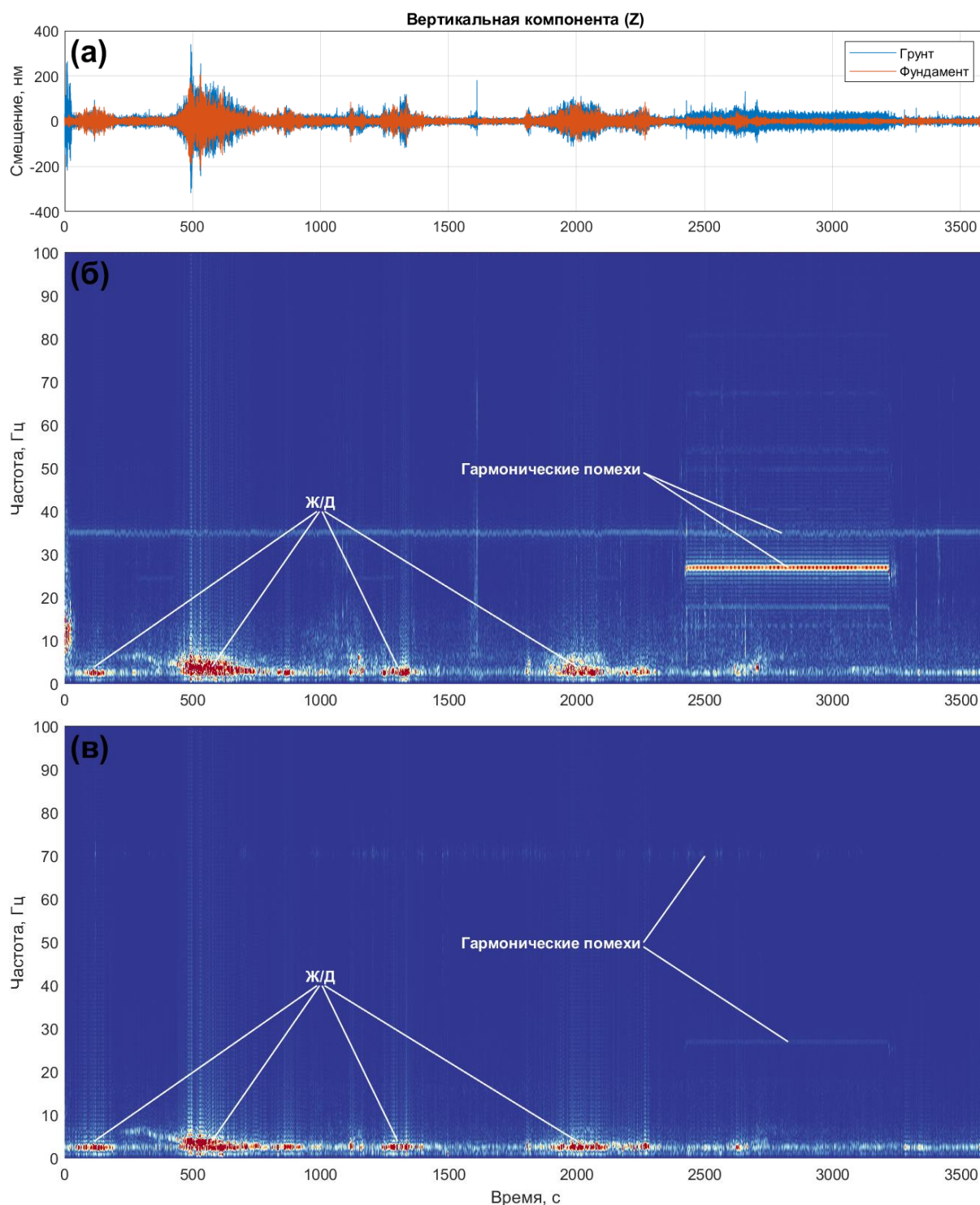


Рис. 3. Сопоставление сигналов (а) и спектрограмм для часового фрагмента непрерывной записи геофонов, установленных на грунте (б) и на фундаменте кольца накопителя (в)

На рисунке 4 приведены графики зависимости СКО от времени для суточного интервала вертикальной компоненты набора записей геофонов, установленных на грунте и фундаменте, а также коэффициента передачи вибраций, рассчитанные для частотного диапазона 1–20 Гц.

Для записей датчиков, установленных на грунте и на фундаменте кольца накопителя на графиках СКО отчетливо прослеживается начало и конец рабочего дня (отмечены вертикальными красными пунктирными линиями), характеризующееся повышенным фоном техногенных сейсмических шумов. Так как во время проведения измерений на площадке велись активные строительные-монтажные работы,

анализ колебаний от удаленных источников сейсмических сигналов осложняется высокоамплитудными сигналами от локальных источников, расположенных в пределах периметра изучаемой площади. В связи с этим, для оценки коэффициента передачи вибраций с грунта на кольцо накопителя, имеет смысл работать с усредненными графиками СКО. На рисунке 4, а они обозначены жирными красной и зеленой линиями для грунта и фундамента соответственно. Более тонкими линиями обозначены графики СКО для отдельных станций. Приведенный на рис. 4, б график вариации коэффициента передачи вибраций от времени рассчитывался с использованием усредненных по набору станций графиков СКО. Изрезанность графика, по всей видимости, связана с тем, что усреднение не позволило полностью устранить влияние локальных источников техногенного шума. В связи с этим можно рассчитать приближенную оценку коэффициента передачи, взяв среднее значение по всей кривой (на рис. 4, б указано справа от панели).

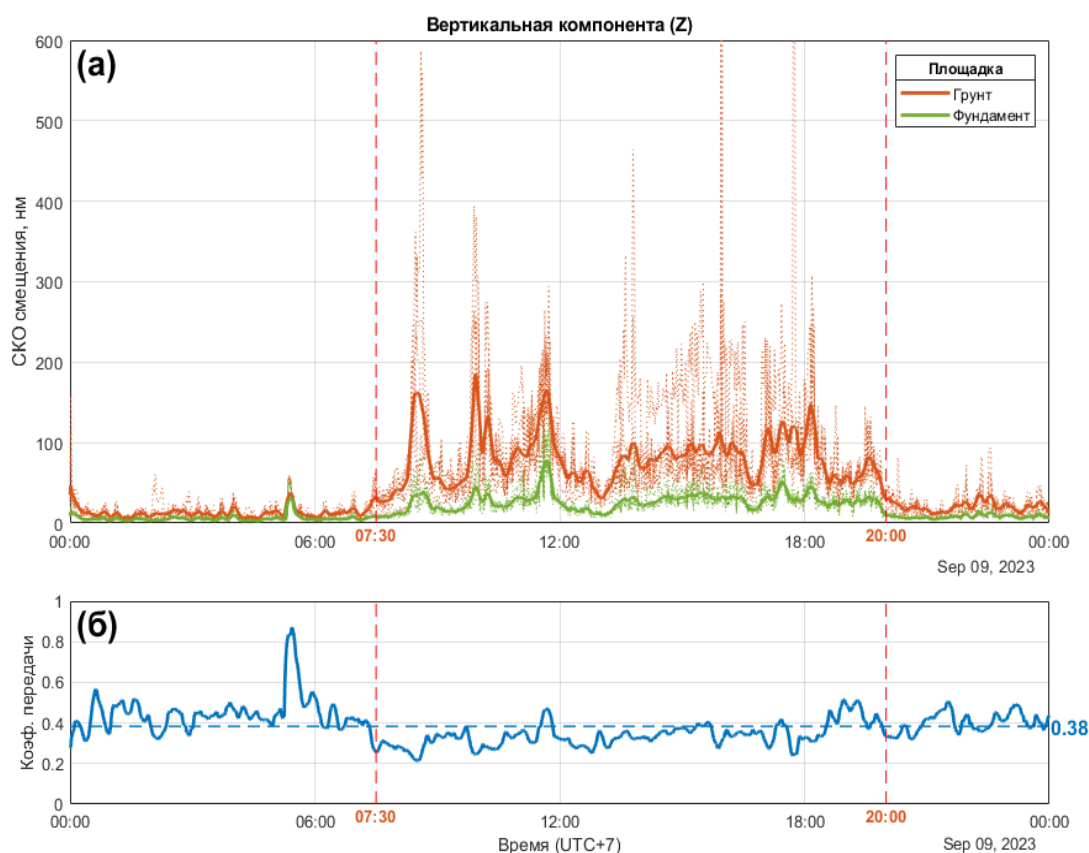


Рис. 4. Графики зависимости СКО записей геофонов, установленных на грунте и фундаменте (а), а также коэффициента передачи вибраций (б). Частотный диапазон для расчетов: 1–20 Гц.

На рисунке 5 приведены аналогичные графики, но рассчитанные для другого частотного диапазона: 20–100 Гц.

Сопоставляя результат с предыдущими графиками, можно сделать следующие заключения: амплитуды сигналов в более высокочастотном диапазоне приблизительно в пять раз ниже, а график коэффициента передачи вибраций значительно более гладкий. Его усреднение дает более точное значение коэффициента передачи.

Аналогичные расчеты были проведены для всех компонент записей геофонов. Результаты приведены в табл. 2.

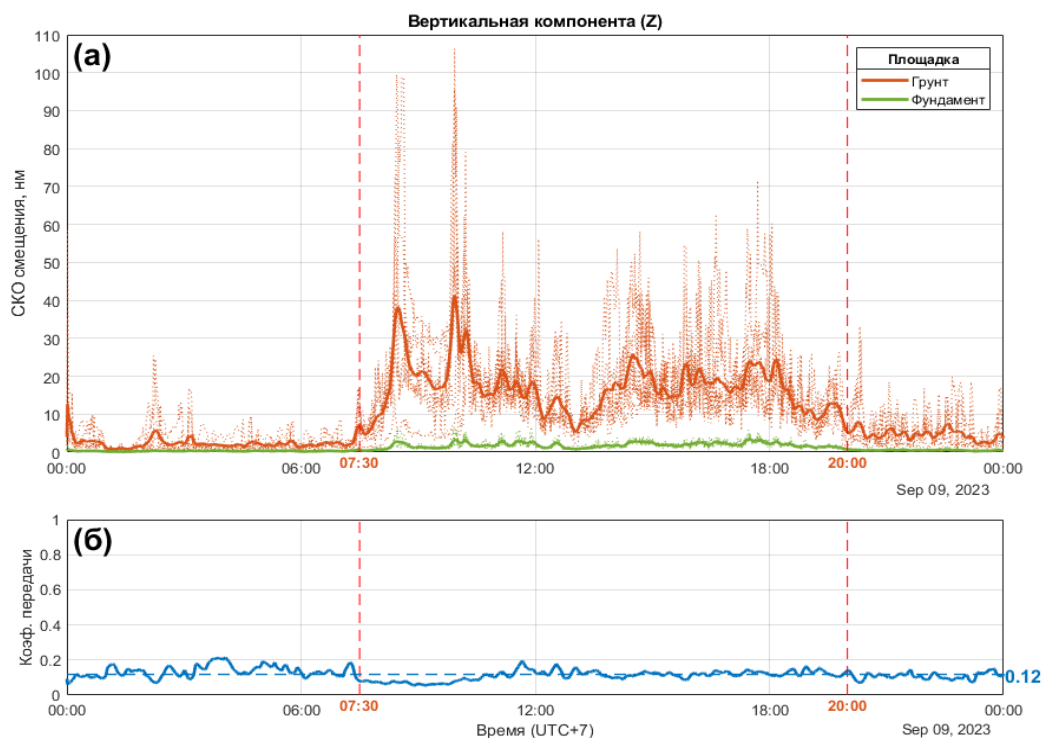


Рис. 5. Графики зависимости СКО записей геофонов, установленных на грунте и фундаменте (а), а также коэффициента передачи вибраций (б). Частотный диапазон для расчетов: 20–100 Гц

Таблица 2

Оценки коэффициента передачи вибраций с грунта на фундамент кольца накопителя ЦКП “СКИФ” для различных компонент записи и частотных диапазонов

Частотный диапазон, Гц	Компонента записи	Коэффициент передачи
1–20	Z	0.38
	X	0.75
	Y	0.70
20–100	Z	0.12
	X	0.06
	Y	0.06

Из таблицы видно, что коэффициенты передачи вибраций с грунта на кольцо накопителя между вертикальными и горизонтальной компонентами в различных частотных диапазонах противоположны. В низкочастотном диапазоне регистрируется микросейсмический фон преимущественно поверхностных волн, для которого характерны более высокие значения амплитуд на горизонтальных компонентах записей [Aki, Richards, 2002; Bormann, Wielandt, 2013]. В этом случае коэффициент передачи вибраций на

вертикальной компоненте в несколько раз ниже. В высокочастотном диапазоне ситуация противоположная – коэффициент передачи для вертикальной компоненты в несколько раз выше. В целом можно сделать вывод, что снижение амплитуд колебаний от внешних источников сейсмических шумов, происходит эффективнее в частотном диапазоне от 20 до 100 Гц.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В работе произведена оценка вариации уровня сейсмических шумов от внешних источников, регистрируемых на площадке строительства ЦКП “СКИФ”. Сопоставлялись усредненные среднеквадратические отклонения сигналов, рассчитанные в скользящем окне длительностью 60 с для всех компонент записей геофонов, установленных на бетонном кольце накопителя и на грунте вблизи кольца. Расчеты СКО производились в двух частотных диапазонах: 1–20 и 20–100 Гц, соответствующих частотным диапазонам сигналов различных источников внешних шумов. На графиках СКО отчетливо прослеживается начало (07:30 UTC+7) и конец (20:00 UTC+7) рабочего дня, характеризующееся повышенным фоном техногенных сейсмических шумов.

На основе усредненных графиков СКО произведена оценка коэффициента передачи вибраций от внешних источников сейсмического шума с грунта на фундамент кольца накопителя. В частотном диапазоне 1–20 Гц, коэффициенты передачи для вертикальной и горизонтальной компонент записи составили 0.38 и 0.725 соответственно. В частотном диапазоне 20–100 Гц – 0.12 и 0.06 соответственно. Полученные значения не превышают расчетных.

Более точную оценку коэффициента передачи вибраций с грунта на бетонный фундамент кольца накопителя следует проводить по экспериментальным данным, записанным после этапа строительства. Локальные шумы, возникающие в результате строительно-монтажных работ в периметре площадки исследований, значительно осложняют анализ результатов и снижают точность расчетов.

Анализ спектрограмм сейсмических колебаний на фундаменте накопителя показал, что собственные частоты подставок под магниты (гирдеров) должны быть выше 70 Гц, чтобы избежать резонансов с частотами, на которых работают близлежащие промышленные предприятия.

Площадка ЦКП “СКИФ” расположена в близости от источников техногенных вибраций. Анализ экспериментальных данных показал эффективность подавления высокоамплитудных внешних шумов в частотном диапазоне 2–100 Гц при передаче колебаний с грунта на фундамент кольца накопителя “СКИФ”. Однако невозможно гарантировать, что измеренные амплитуды останутся стабильными. В связи с этим авторы рекомендуют повторить исследования после завершения основного этапа строительно-монтажных работ и, в перспективе, установить на территории ЦКП “СКИФ” стационарную систему сейсмического мониторинга.

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

ЛИТЕРАТУРА

Баранов Г.Н., Дергач П.А., Карюкина К.Ю., Павлюченко В.А., Левичев Е.Б. Анализ стабильности орбиты пучка источника СИ ЦКП «СКИФ» // Журнал технической физики. – 2023. – № 93 (11). – С. 1653–1662, doi: 10.61011/JTF.2023.11.56498.153-23.

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.

Еманов А.А., Еманов А.Ф., Левичев Е.Б., Соловьев В.М., Чуркин И.Н., Корабельников Д.Г., Синяткин 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., Сержников Н.А., Гладышев Е.А., Арапов В.В., Шевкунова Е.В., Антонов И.А., Ершов П.А. Изучение сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКП" СКИФ" // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2022. – № 49 (3). – С. 5–38, doi: 10.21455/VIS2022.3-1.

Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. Second edition. – University Science Books, 2002.

Balmer J.A., Holder D.J., Owen H.L. Measurement of ground vibrations and calculation of their effect on the DIAMOND light source // Proceeding of EPAC. – Vienna, Austria, 2000. – P. 2328–2330.

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.

Bialowons W., Ehrlichmann H. Ground vibration measurements at the proposed ALBA site in Barcelona. – 2005. – DESY-TESLA-2005-10, EUROTEV-REPORT-2005-007. – 15 p.

Bormann P., Wielandt E. Seismic signals and noise // New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2). – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2013. – P. 1–62.

Huang H., Kay J. Vibration measurement at diamond and the storage ring // Proceeding of EPAC. – Edinburg, Scotland, 2006. – P. 3338–3340.

Ravindranath V., Sharma S., Doom L., Channing C., Lincoln F., Jain A., Joshi P. Stability of NSLS-II girder-magnet assembly // Diamond Light Source Proceedings. – 2010. – Vol. 1 (MEDSI-6). – P. e47, doi: 10.1017/S2044820110000675.

Simos N., Amick H., Soueid A., Fallier M. NSLS-II ground vibration stability studies and design implementation // Synchrotron Radiation News. – 2019. – Vol. 32 (5). – P. 4–12, doi: 10.1080/08940886.2019.1654826.

REFERENCES

Aki K., Richards P.G. Quantitative seismology. Second edition. – University Science Books, 2002.

Balmer J.A., Holder D.J., Owen H.L. Measurement of ground vibrations and calculation of their effect on the DIAMOND light source // Proceeding of EPAC. – Vienna, Austria, 2000. – P. 2328–2330.

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.

Baranov G.N., Dergach P.A., Karyukina K.Yu., Pavlyuchenko V.A., Levichev E.B. Analysis of the stability of the beam orbit of the synchrotron radiation source of the SKIF Center for Collective Use // Journal of Technical Physics. – 2023. – Vol. 93 (11). – P. 1653–1662.

Bormann P., Wielandt E. Seismic signals and noise // New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP2). – Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2013. – P. 1–62.

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.

Emanov A.A., Emanov A.F., Levichev E.B., Solovyev V.M., Churkin I.N., Korabelshchikov D.T., Sinyatkin S.V., Yankaitis V.V., Piminov P.A., Bakh A.A., Baranov G.N., Fateev A.V., Karyukina K.Yu., Polyansky P.O., Durachenko A.V., Serezhnikov N.A., Gladyshev E.A., Arapov V.V., Shevkunova E.V., Antonov I.A., Ershov R.A. A study of seismic impacts on the construction site of the SRF SKIF // Seismic Instruments. – 2022. – Vol. 58 (6). – P. 635–662, doi: 10.3103/S0747923922060044.

Huang H., Kay J. Vibration measurement at diamond and the storage ring // Proceeding of EPAC. – Edinburg, Scotland, 2006. – P. 3338–3340.

Ravindranath V., Sharma S., Doom L., Channing C., Lincoln F., Jain A., Joshi P. Stability of NSLS-II girder–magnet assembly // Diamond Light Source Proceedings. – 2010. – Vol. 1 (MEDSI-6). – P. e47, doi: 10.1017/S2044820110000675.

Simos N., Amick H., Soueid A., Fallier M. NSLS-II ground vibration stability studies and design implementation // Synchrotron Radiation News. – 2019. – Vol. 32 (5). – P. 4–12, doi: 10.1080/08940886.2019.1654826.

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.

ЯБЛОКОВ Александр Викторович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических проблем сейсмики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН, старший научный сотрудник Новосибирского государственного университета. Основные научные интересы: сейсморазведка, верхняя часть разреза, подавление поверхностных волн, спектральный анализ, прямая и обратная задача сейсмики, методы машинного обучения, численное моделирование.

Статья поступила 13 декабря 2023,
принята к печати 13 декабря 2023