

УДК 550.34

Дистанционный контроль технического состояния поездов метро с использованием средств сейсмологии

© 2024 г. И.В. Коковкин, В.С. Селезнев

СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия

Поступила в редакцию 13.06.2024 г.

Аннотация. В исследовании поднимается вопрос обеспечения безопасности пассажиров метрополитена, связанный с возможными поломками, обусловленными техническим состоянием поездов метро. Акцентируется внимание на неотложной потребности в разработке такой системы мониторинга, которая позволила бы в режиме реального времени следить за динамическими параметрами каждого подвижного состава и их отклонениями от нормы. Такая потребность обусловлена ежегодным приростом числа пассажиров, использующих подземный транспорт, ввиду увеличения транспортной загруженности крупных городов. Приводится пример создания системы дистанционного контроля, основанной на анализе микросейсмических колебаний, вызываемых движением вагонов. Авторы демонстрируют, как сейсморегистратор, установленный в соседнем к станции метро доме, может использоваться для мониторинга изменений в амплитудно-частотном спектре вибросейсмической записи. С его помощью были определены моменты прибытия и отъезда поездов, а также установлено, что наблюдения лучше проводить именно за отъездами, ввиду их наибольшей выраженности по амплитуде сигнала. Предполагается, что зарегистрированный сигнал от поезда метро должен укладываться в определённый диапазон частот, который устанавливается по его средним значениям, и отклонение спектра наблюдаемого сигнала от данной нормы будет указывать на то, что с поездом произошли некие изменения. В заключение, акцентируется внимание на необходимости разработки программного обеспечения, оснащённого статистической базой данных, содержащей показания за прошлые месяцы и годы. Оно позволит сравнивать актуальные показатели с прошлыми и оперативно реагировать на значительные отклонения, повышая тем самым безопасность пассажиров. Зарегистрированные несоответствия по частотному диапазону могут свидетельствовать о неисправностях, что делает предложенную систему мониторинга важным инструментом для поддержания надёжности городского метрополитена.

Ключевые слова: мониторинг поездов метро, дистанционный контроль, сейсмологический мониторинг.

Для цитирования: Коковкин И.В., Селезнев В.С. Дистанционный контроль технического состояния поездов метро с использованием средств сейсмологии // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 3. – С. 27–39. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.02>. – EDN: RNUGXG

Введение

Ежегодный прирост транспортных средств приводит к всё большей загруженности городских дорог, каждый год это число увеличивается примерно на 3%. Причина тому – не только рост числа легковых автомобилей [Инфографика, 2024]. Количество автомобильных заторов возрастает также из-за частых дорожных работ. Для предотвращения временных потерь на простои в пробках, всё больше людей предпочитают метро, о чём свидетельствует и статистика: если

взять пассажиропоток Новосибирского метрополитена, который и будет рассматриваться в данной работе, то за 2020 г. было перевезено 58.1 млн человек, в 2021 г. это число возросло до 75.3 млн человек, в 2022 г. – до 77.3 млн человек, а в 2023 г. – 84.5 млн [Факты и цифры, 2024]. Таким образом, число пассажиров метро на данный момент превышает допандемийные значения, когда в год перевозилось более 80 млн человек. Вследствие этого современное метро является одним из важнейших средств общественного транспорта в крупных городах, обеспечивая перевозку

огромного числа людей. По этой причине поддержание безопасности и надёжности метрополитена является первостепенной задачей для его эффективной работы. Ради обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте необходимо иметь надёжное и безотказное функционирование подвижного состава, чтобы не повторять трагедий, связанных с техническими неисправностями, как та, что произошла в 2014 г. в московском метро на Арбатско-Покровской линии, в которой погибло 20 человек [Ратников, 2023]. В связи с этим существует необходимость разработки эффективных методов мониторинга поездов с целью обеспечения безопасности пассажиров и предотвращения возможных аварий. Одним из способов увеличения надёжности подземного транспорта и снижения затрат на его ремонтные работы является своевременное выявление дефектов в узлах и агрегатов состава путём диагностики.

В данной работе рассматривается возможность создания системы дистанционного контроля поездов, позволяющей в режиме, близком к реальному времени, отслеживать динамические параметры каждого подвижного состава и их отклонения от нормы. Эта система, основанная на анализе микросейсмических колебаний, вызываемых движением вагонов, может повысить безопасность и обеспечить высокую эффективность работы метрополитена. Данные колебания вызываются ударами колёсных дисков о технологические стыки и неровности рельс, при этом, чем больше скорость состава, тем больший шум и вибрации он вызывает.

С помощью такого способа контроля предполагается:

- высокоточное определение времени прибытия и отъезда каждого поезда, а также его загруженность;
- обнаружение дефектов и повреждений подвижного состава, рельсов и прочей инфраструктуры тоннелей метро;
- прогнозирование износа и последующего ремонта вагонов, либо элементов метрополитена;
- оптимизация технического обслуживания;
- улучшение эффективности и производительности.

В целом создание подобной системы контроля состояния поездов метро является актуальным и важным шагом для обеспечения безопасности, эффективности и надёжности работы метрополитена, который позволит оперативно выявлять проблемы, планировать ремонтные работы и повышать качество обслуживания пассажиров. В настоящий момент, помимо диа-

гностики поезда непосредственно в депо, существуют методы для выявления неисправностей на линии, в основном те, при которых оборудование устанавливается на специализированных составах, таких как поезд-лаборатория «Синергия» [Глаголев, 2024], позволяющий контролировать исправное состояние путей, устройств в тоннелях и оперативно устранять возможные неисправности. В таком поезде размещены инфракрасные датчики, лазерно-оптические измерители, тепловизоры, видеорегистраторы высокого разрешения, системы пространственного сканирования и многие другие современные приборы. Они способны выявлять малейшие недочёты в параметрах рельсового полотна. Однако с помощью данных приборов возможно диагностировать лишь неисправность путей, а не самих составов, а сам поезд-лаборатория движется только тогда, когда не мешает другим поездам.

В этом исследовании не будет учитываться негативное воздействие вибрации от метро на близстоящие здания и людей, находящихся в них, потому как это обширный материал для отдельной работы. Существует множество статей, в которых проводились подобные исследования [Ilona et al., 2013; Kawecki et al., 2012; Pachla et al., 2017; Xia et al., 2009]. Отметим лишь, что при низкой глубине залегания метро, такой, как в Новосибирске (порядка 8–10 м), данные вибрации теоретически могут приводить к повреждению конструкций близстоящих зданий, создавая резонансные явления путём совпадения с частотой собственных колебаний дома, как показано в исследовании, где собственная частота здания совпала с частотой работы промышленного компрессора [Коковкин, Селезнев, 2022]. Помимо нарушения конструкций зданий, метро может оказывать влияние и на состояние людей, находящихся в нём, вызывая нарушение органов слуха, когда уровень шума в помещениях выше допустимого, хотя кажется терпимым. При долгом постоянном пребывании в таком помещении слух притупляется, т.к. на органы слуха действует фактор утомления. При высоких уровнях шума нарушения слуха появляются через один-два года, при средних – через 10–12 лет [Чем опасен шум, 2024]. Хотя на данный момент существуют технологии возведения метро с резиновыми вибрационными пластинами [Павлова, 2024], которые существенно гасят вибрации от проходящего поезда, старые станции метро ещё продолжают вызывать нежелательные вибрации, которые также могут оказывать влияние и на высокоточное оборудование, характеризующееся

повышенной чувствительностью к динамическим воздействиям.

Методы и вычисления

В данной работе будет использоваться инженерно-сейсмический метод дистанционного контроля для определения возможности слежения за изменением технического состояния поездов метро. Рассматриваемый метод заключается в регистрации и анализе сейсмических колебаний от их источника, находящегося на некотором расстоянии от пункта наблюдения [Селезнев и др., 2012], путём мониторинга изменений, происходящих в амплитудно-частотном спектре вибросейсмической записи. Следует отметить, что на практике сигнал от метро является суммой различных вибраций, который сложно однозначно интерпретировать. В качестве регистрирующей аппаратуры использовались многоканальный автономный сейсмический регистратор «Байкал-7» и трёхкомпонентный велосиметр GD-4.5, основные технические характеристики которых приведены в табл. 1 и 2. Применяя операцию деконволюции, можно регистрировать сигнал, начиная от 1 Гц, с частотой дискретизации 500 Гц. Данный комплект был установлен на третьем этаже семиэтажного кирпичного жилого

дома, расположенного на площади Калинина Новосибирска, в непосредственной близости от станции метро «Заельцовская». Расстояние от датчика до платформы – порядка 140 м (рис. 1), с его помощью измерялись микросейсмические шумы, которым подвергается данный жилой дом.

Станция метро «Заельцовская» была открыта в 1992 г., глубина её заложения составляет 10 м, длина платформы – 102 м, ширина – 10 м, тем самым она рассчитана на состав из пяти вагонов. В настоящий момент в новосибирском метро используются составы из четырёх вагонов, но в качестве эксперимента на Ленинской линии с августа по декабрь 2022 г. в часы пик запускали пяти-вагонные составы. «Заельцовская» является второй по загруженности станцией новосибирского метро после «Площади Маркса».

Поскольку метро является довольно сильным источником шума и вибраций в жилой застройке, вибрация от движущегося вагонного состава будет передаваться в здание через грунт в виде упругих волн, которые и будет улавливать наш сейсморегистратор. Для того чтобы графически отобразить колебания от поездов метро, построим спектрограмму сейсмической записи, а в качестве примера возьмём запись с 1 по 16 ноября 2022 года (рис. 2).

Таблица 1. Характеристики сейсмоприёмников GD-4.5

Модель	Собственная частота (Гц)	Чувствительность в открытой цепи (В/м/с)	Гармоническое искажение	Диапазон частот (± 3 дБ)
GD-4.5	4.5 ± 0.5	$28.8 \pm 5\%$	$\leq 0.30\%$	5–1000 Гц

Таблица 2. Характеристики регистратора «Байкал-7»

Количество каналов	4
Разрядность АЦП	24 бит
Частота дискретизации	50, 100, 125, 200, 250, 400, 500, 800 Гц
Коэффициент усиления	1, 2, 4, 8, 12, 24
Максимальное входное напряжение	± 5 В
Потребляемая мощность	< 30 мВт (режим ожидания), < 85 мВт (режим записи)
Тип энергонезависимой памяти	microSD
Объем энергонезависимой памяти	8 Гб (опция: до 64 Гб)
Формат записи	miniSEED, baikal, RAW
Температурный диапазон	от -30 до $+50^\circ\text{C}$
Стабильность внутреннего генератора	$\pm 3 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент преобразования при $G=1$, $K=0$	0.5 мкВ/дискрет

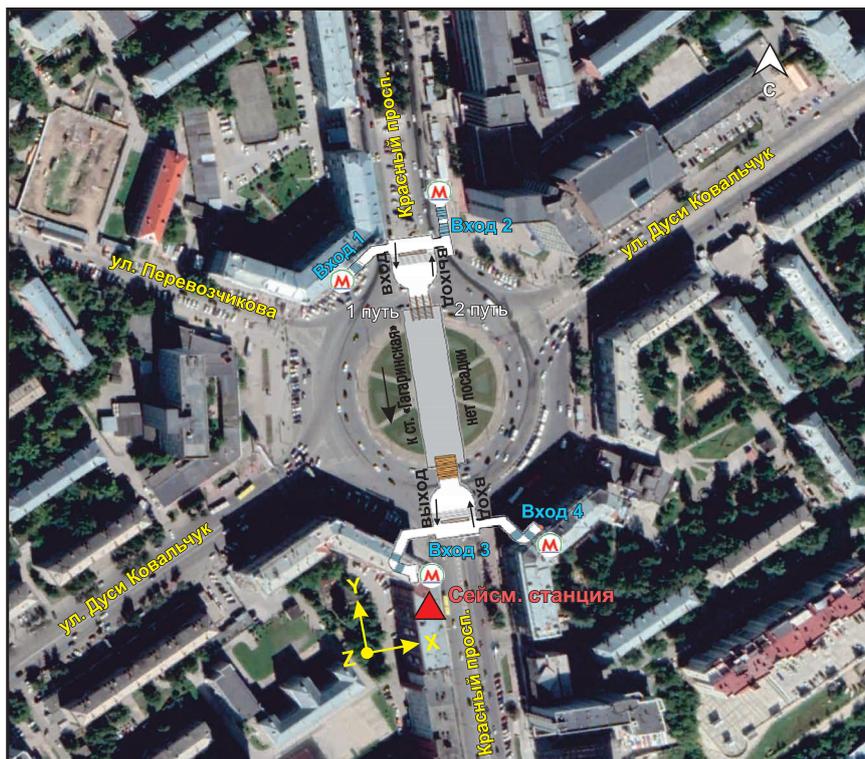


Рис. 1. Схема расположения пункта наблюдения

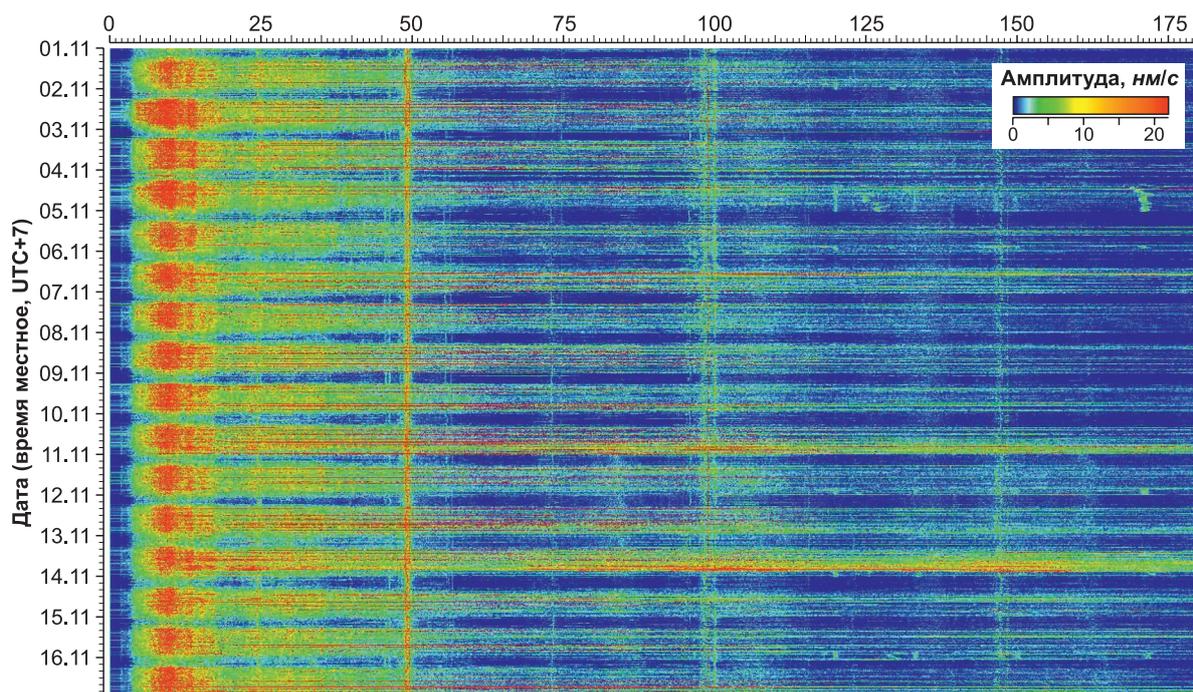


Рис. 2. Фрагмент спектрограммы записи 01.11–16.11.2022 г., Z-компонента

На данной записи виден шумовой фон вблизи станции метро, преимущественно передаваемый, как мы предполагаем, подвижными составами, во всём исследуемом диапазоне частот, однако преобладающая амплитуда сигнала наблюдается на частотах до 100 Гц .

Рассмотрим период, включающий одни сутки из рассматриваемого диапазона, более подробно (рис. 3).

Метро работает ежедневно с 6:00 до 0:00, соответственно на рис. 3 можно наблюдать именно работу метро за день, укладывающуюся в данные

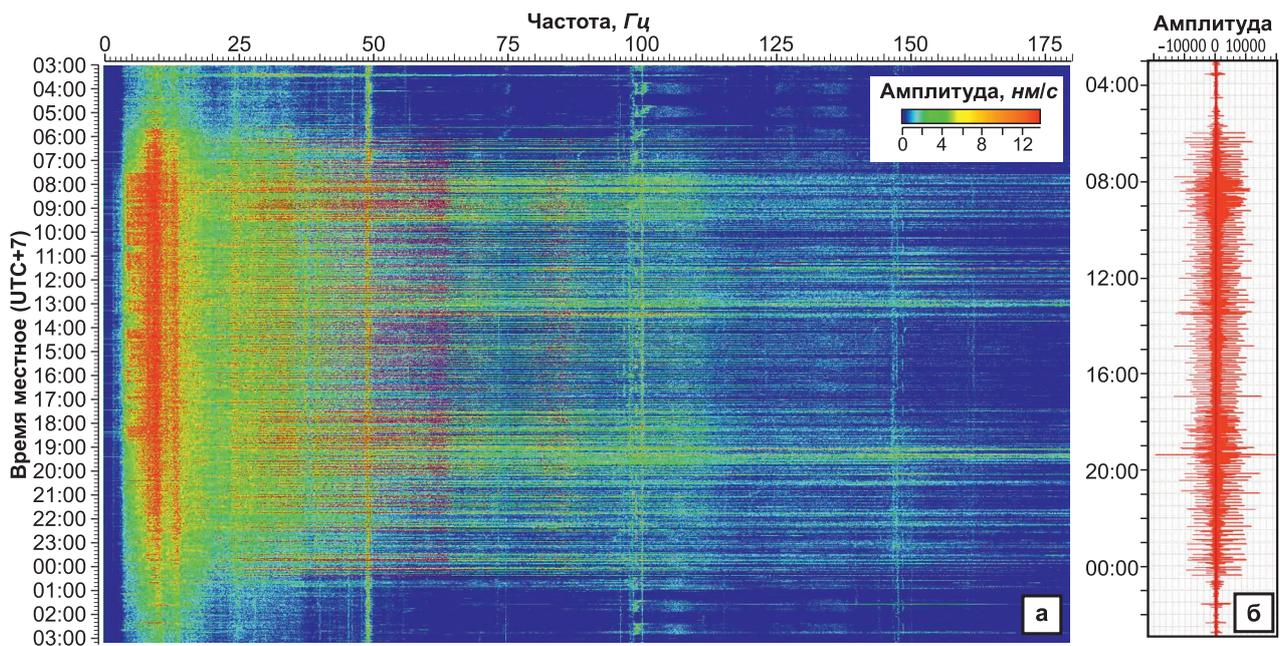


Рис. 3. Спектрограмма записи за 02.11.2022 г., Z-компонента: а – спектрограмма; б – сейсмическая трасса данного сигнала

временные рамки. Нужно отметить, что частоты до 20 Гц, имеющие очень высокую амплитуду сигнала, никак не связаны с работой метро и представляют из себя посторонние шумы. На рис. 3а представлена спектрограмма записи, а на рис. 3б приведена сейсмотрасса за тот же временной промежуток. На рис. 3а и 3б горизонтальные полосы отображают рейсы составов метро на станции за сутки. Таким образом, на спектрограмме отчетливо видно утолщение полос в часы пик, что свидетельствует об увеличении интенсивности курсирования поездов, а именно утром с 7:30 до 9:30, в обеденное время с 12:30 до 13:30 и в вечернее – с 17:00 до 20:00.

Накопленные сейсмические записи обрабатывались с помощью программного обеспечения «SpectrumSeism», разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН [Селезнев и др., 2021], которое позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектрограммы. Это даёт возможность определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, а также выделить из всей записи источники колебаний определённой частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (1)$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится гра-

фик, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда.

Далее изучим более детально наблюдаемые сигналы от поездов, а именно рассмотренные выше синхронные горизонтальные полосы (рис. 4).

Проанализируем участок записи, охватывающий небольшой период, который включает в себя время утреннего часа пик, характеризующийся высокой интенсивностью движения составов и постепенным последующим снижением их динамики. На данном фрагменте можно наблюдать присутствие двух типов горизонтальных линий: с большой амплитудой сигнала (красные) и меньшей (зелёные). Для того чтобы разобраться, в чём заключается разница между ними, необходимо произвести натурные наблюдения на самой станции метро. С этой задачей специалистами Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН была произведена фотофиксация времени прибытия и отъезда поезда на платформе исследуемой станции (рис. 5).

На рис. 5а можно наблюдать сейсмотрассу длительностью около двух минут, на которой присутствуют два пика, соответствующие наибольшим амплитудам сигнала. Первый пик отмечается в интервале времени [08:48:46 – 08:48:58], второй пик – в интервале [08:49:48 – 08:50:00] (UTC+7), где видно, что амплитуда второго сигнала в полтора раза больше первого. Данные пики совпадают со временем прибытия и соответственно отъезда поезда метро, что было

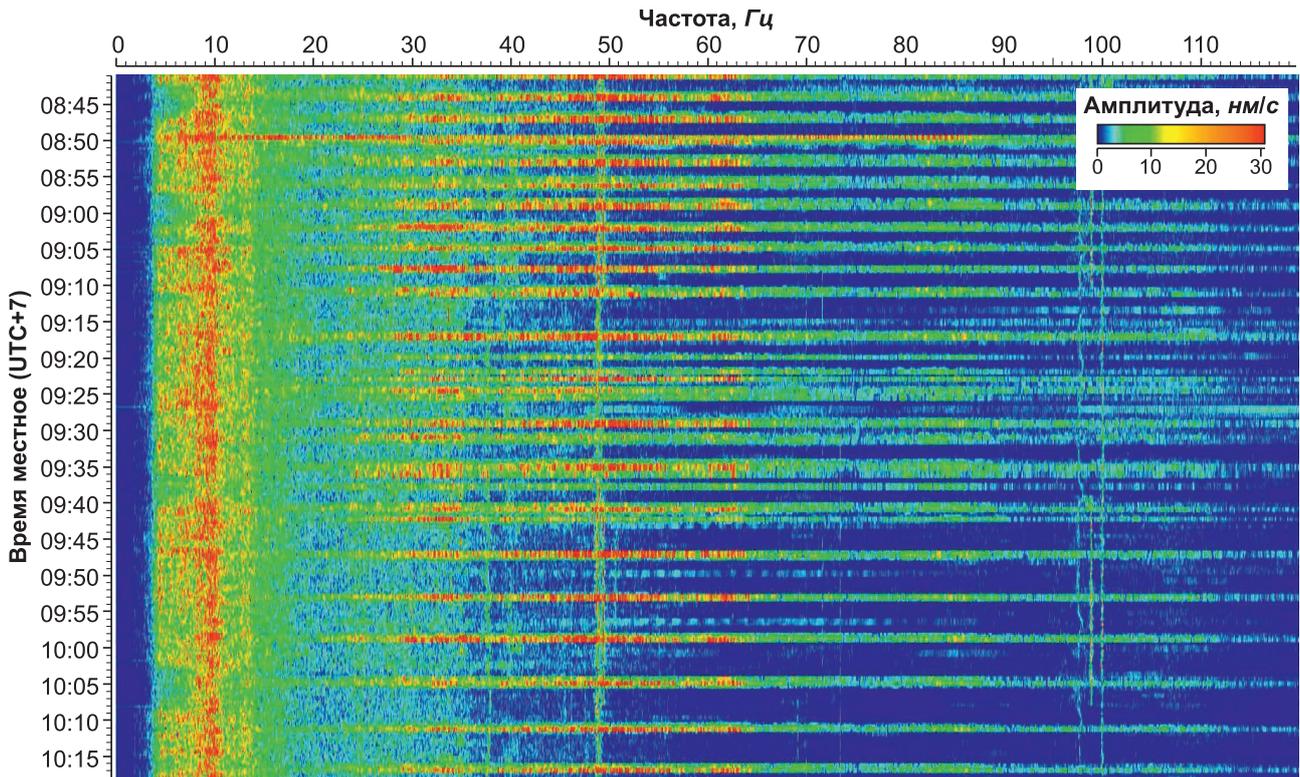


Рис. 4. Фрагмент спектрограммы записи за 02.11.2022 г., Z-компонента

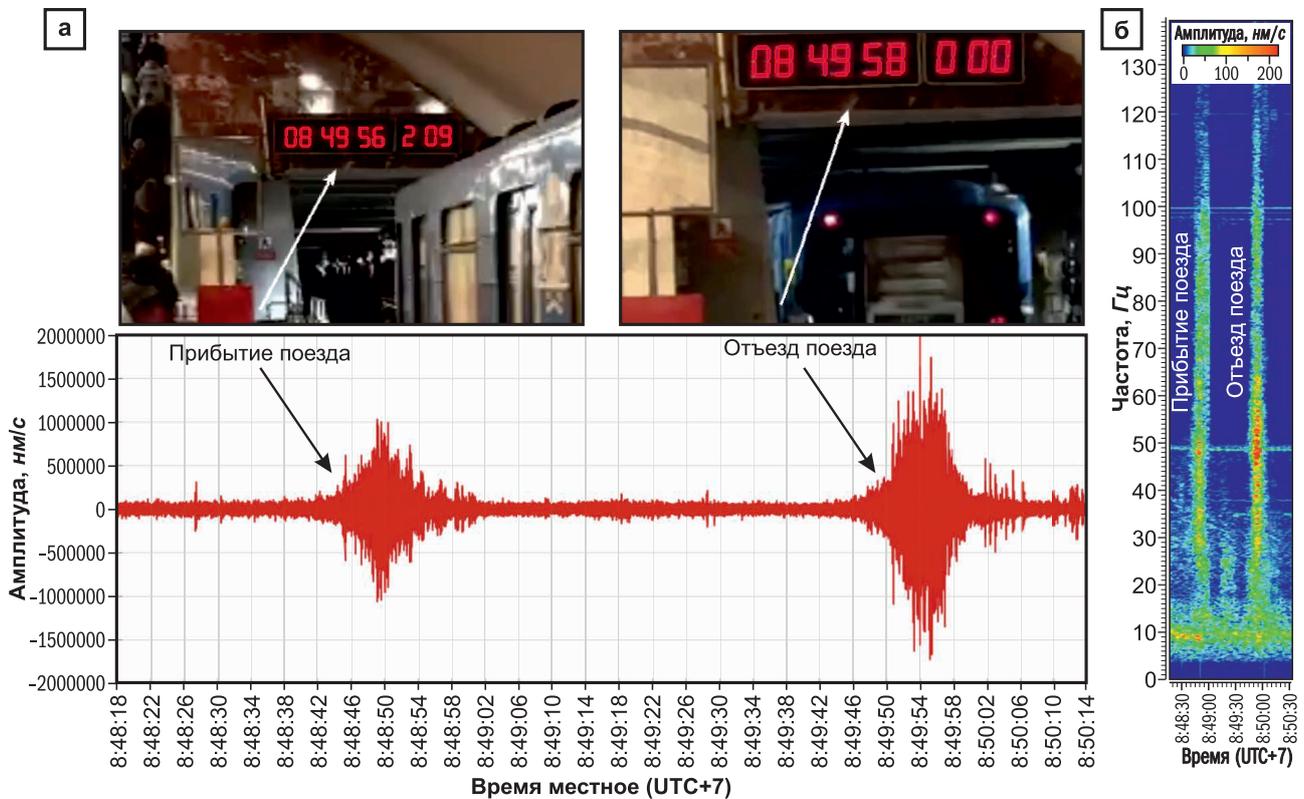


Рис. 5. Графическое отображение прибытия и отъезда поезда метро:

- а – сеймотрасса с фотофиксацией прибытия и отъезда поезда со станции метро, Z-компонента;
- б – спектрограмма прибытия и отъезда данного поезда, Z-компонента

зафиксировано с помощью фотокамеры непосредственно на платформе. Таким образом, в результате данного наблюдения, как и предполагалось, подтвердился тот факт, что горизонтальные линии, которые мы отмечали ранее, на записи (рис. 4, 5б), соответствуют приездам и отъездам поездов. В свою очередь, прибытия поездов менее интенсивны по уровню сигнала, чем отъезды. Следовательно, наблюдения лучше проводить именно за отъездами ввиду их наибольшей выраженности по амплитуде сигнала.

Рассмотрим спектрограммы сигнала от трёх прибытий и отъездов поезда метро для всех трёх компонент записи (рис. 6). На данном рисунке наблюдаются увеличенные амплитуды сигнала для отъездов поездных составов по компоненте X на частотах 21, 50, 62 и 83 Гц, по ком-

поненте Z – 33, 50, 62 и 83 Гц. По компоненте Y (рис. 6б) частоты немного отличаются, наибольшая амплитуда наблюдается на частотах 20 и 33 Гц, а также в диапазоне частот от 43 до 58 Гц. Чтобы сравнить уровни интенсивности сигнала, построим графики изменения амплитуды для наиболее выраженных частот, отмеченных на рис. 6 чёрной полосой – 21, 33, 62 и 83 Гц (рис. 7).

Из данных графиков видно, что сравнения частот можно проводить на всех компонентах, но наиболее информативными, с точки зрения интенсивности сигнала, являются X- и Z-компоненты.

Перейдём к выбору алгоритма обнаружения неисправности состава по спектру записи. Для начала сравним несколько отъездов между собой (рис. 8).

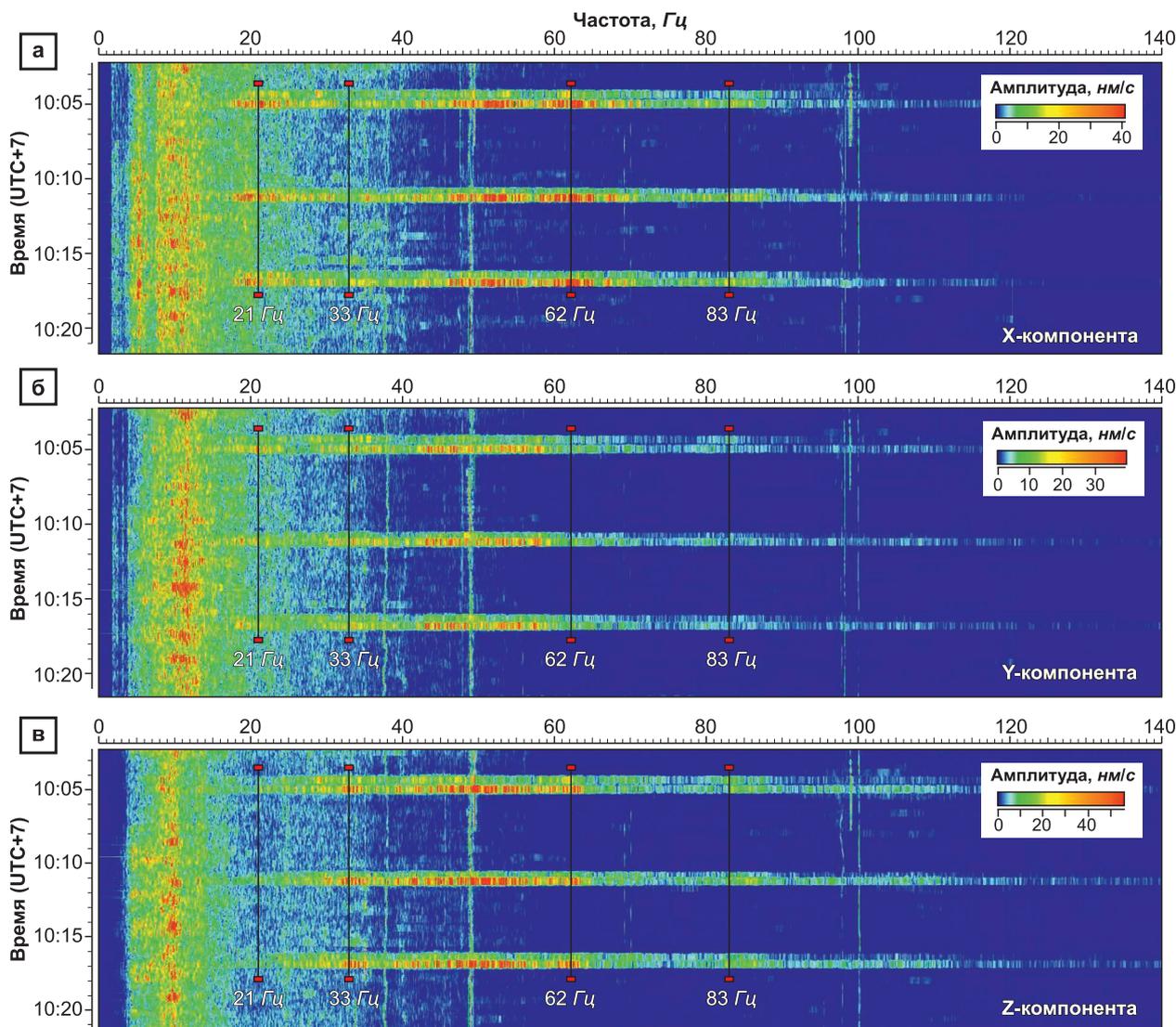


Рис. 6. Спектрограммы сейсмической записи с 10:00 до 10:22, 02.11.2022 г.: а – X-компонента; б – Y-компонента; в – Z-компонента

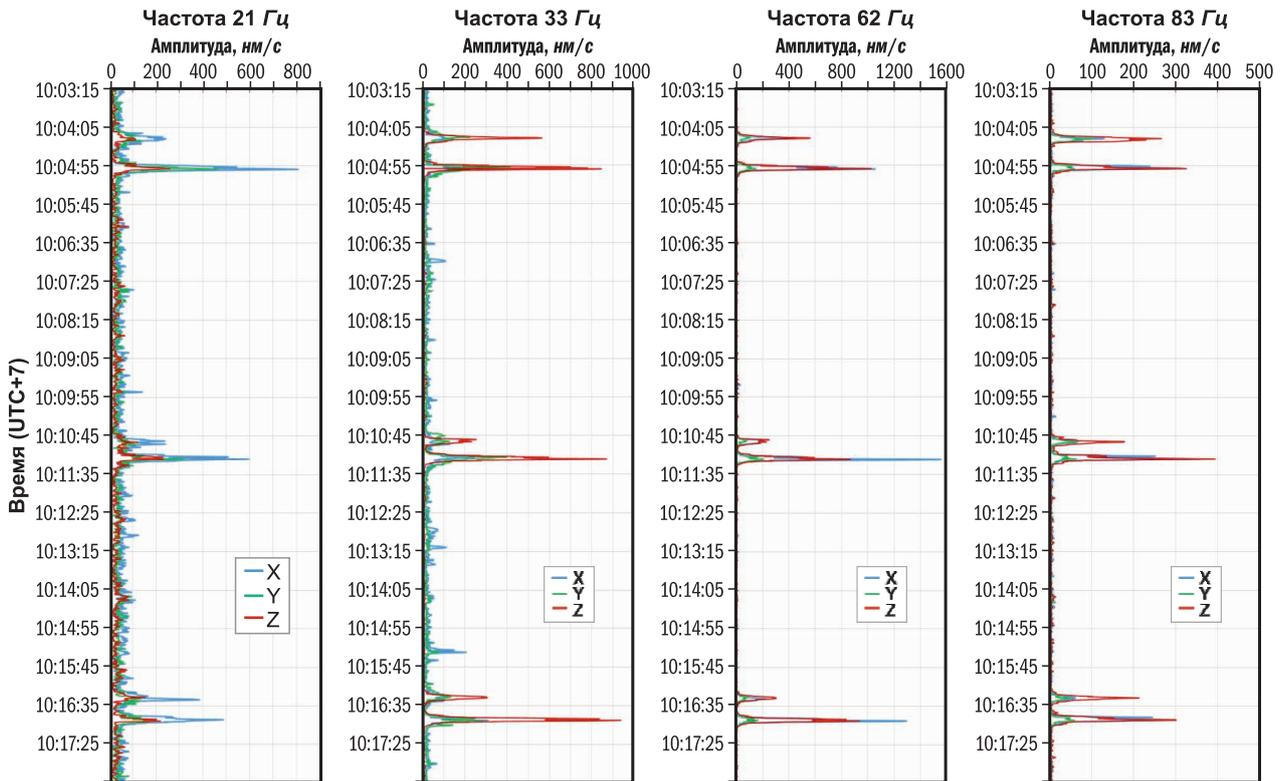


Рис. 7. Амплитудно-временные графики с 10:03 до 10:18, 02.11.2022 г. для частот 21, 33, 62 и 83 Гц, по X-, Y-, Z-компонентам

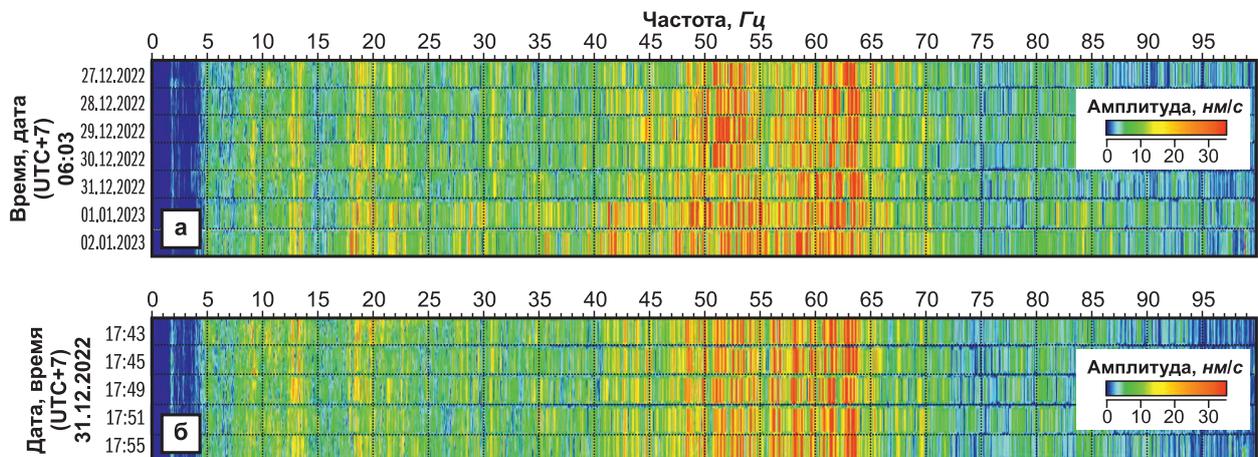


Рис. 8. Спектрограммы отъездов поездов метро, X-компонента:
а – спектрограммы отъездов поезда, идущего в 06:03 с 27.12.2022 г. по 02.01.2023 г.;
б – спектрограммы отъездов поездов, идущих 31.12.2022 г. с 17:43 до 17:55

На рис. 8а приведены шумовые спектры записей от поездов метро, в окне до 100 Гц, отъезжающих в одно и то же время, а именно в 06:03 (UTC+7), за семь дней, с 27.12.2022 г. по 02.01.2023 года. Видно, что, хотя записи немного отличаются между собой, в определённый диапазон амплитуд они укладываются.

Также для сравнения возьмём пять спектров записей поездов, отъезжающих подряд в один и тот же день, с 17:43 до 17:55 (UTC+7) за 31.12.2022 г. (рис. 8б); при практически одинаковых условиях их спектры записи очень похожи. Отсюда можно сделать вывод, что зарегистрированный сигнал от поезда метро должен

укладываться в определённый диапазон частот, который мы устанавливаем по его средним значениям, и при отклонении спектра наблюдаемого сигнала от данной нормы можно будет говорить о том, что с поездом произошли некие изменения. Т.е. помимо уже наблюдаемых пиков (наивысших амплитуд), будут видны максимумы на нетипичных частотах для данной спектральной характеристики сигнала, иными словами, красная полоса будет наблюдаться на совершенно других частотах.

Проведём сравнение подобно тому, что представлено на рис. 8б, для других дней: 04.10.2022 г., 01.11.2022 г., 03.11.2022 г., 07.11.2022 года (рис. 9).

Построив графики усреднённых амплитудных спектров для данных записей, мы можем наблюдать, что везде присутствуют, в основном, одни и те же частоты. За образец можно взять рис. 9а, поскольку в указанное время (21:13, 21:21 и 21:30) метро практически пустое, основной пассажиропоток завершён — поэтому на графике присутствует только распределение частот, связанное с движением поезда, почти без посто-

ронных шумов. Остальные графики немного зашумлены, это может говорить о том, что в этих поездах произошли некие изменения, т.е. здесь на сигнал уже влияет количество пассажиров, создавая дополнительные вибрации и нагрузки. Уточним, что чёткое совпадение записей не требуется, т.к. мы отслеживаем разные составы с разными характеристиками и числом пассажиров внутри, поэтому, основываясь на примерном пассажиропотоке для конкретного времени, необходимо подбирать соответствующий график и рассматривать отклонения от него. В перспективе необходимо разработать программное обеспечение, оснащённое базой данных, содержащей статистические показания за прошлые месяцы и годы, которое также должно учитывать увеличение пассажиропотока метро. Это позволит сравнивать актуальные показатели со статистическими и в случае их значительных отклонений сразу же активировать оповещение.

Сравним ещё несколько графиков, а именно — данные, полученные утром и вечером в выходной и будний день (рис. 10).

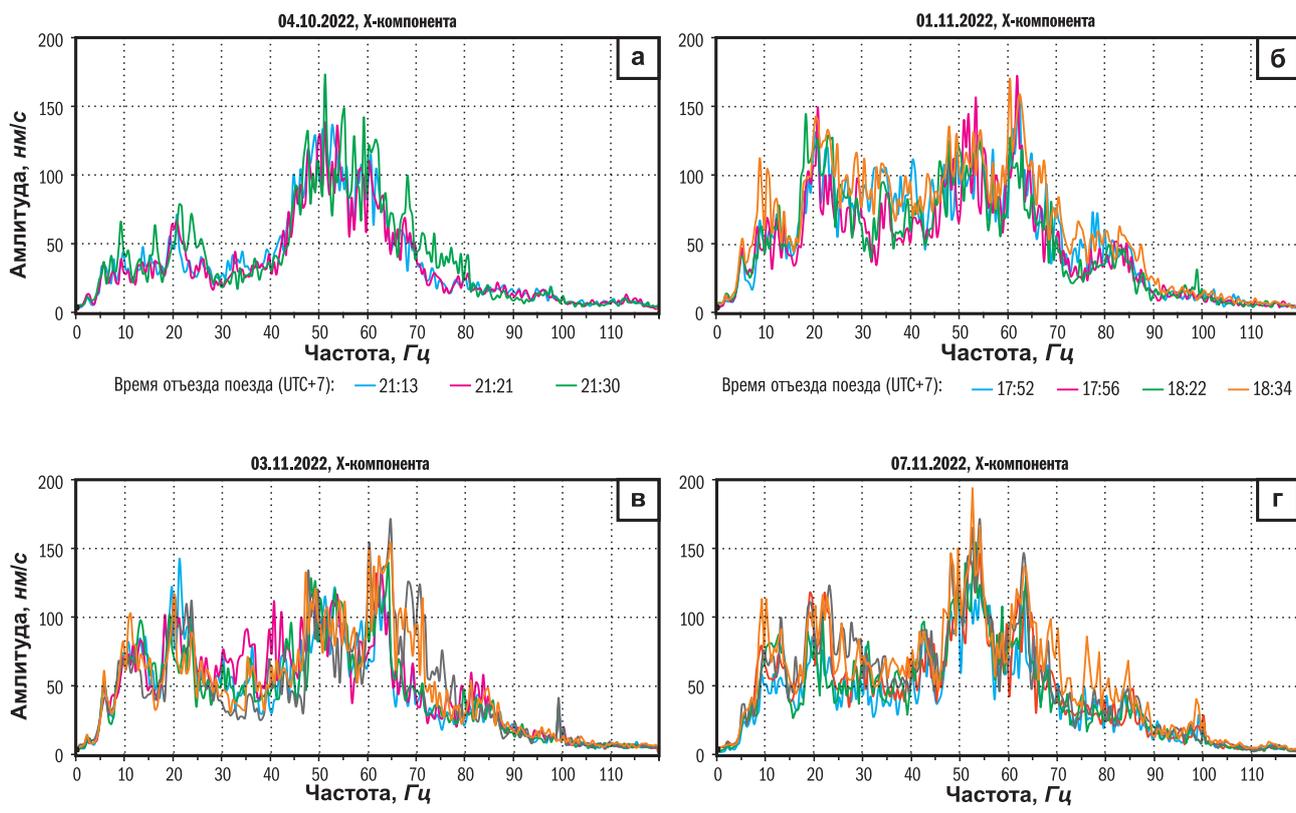


Рис. 9. Графики амплитуд усреднённых спектров отъездов поездов метро, X-компонента:

а — 04.10.2022 г., время отъездов: 21:13, 21:21 и 21:30;

б — 01.11.2022 г., время отъездов: 17:52, 17:56, 18:22 и 18:34;

в — 03.11.2022 г., время отъездов: 19:31, 19:37, 19:39 и 19:57;

г — 07.11.2022 г., время отъездов: 07:04, 07:16, 07:23, 07:29 и 07:35

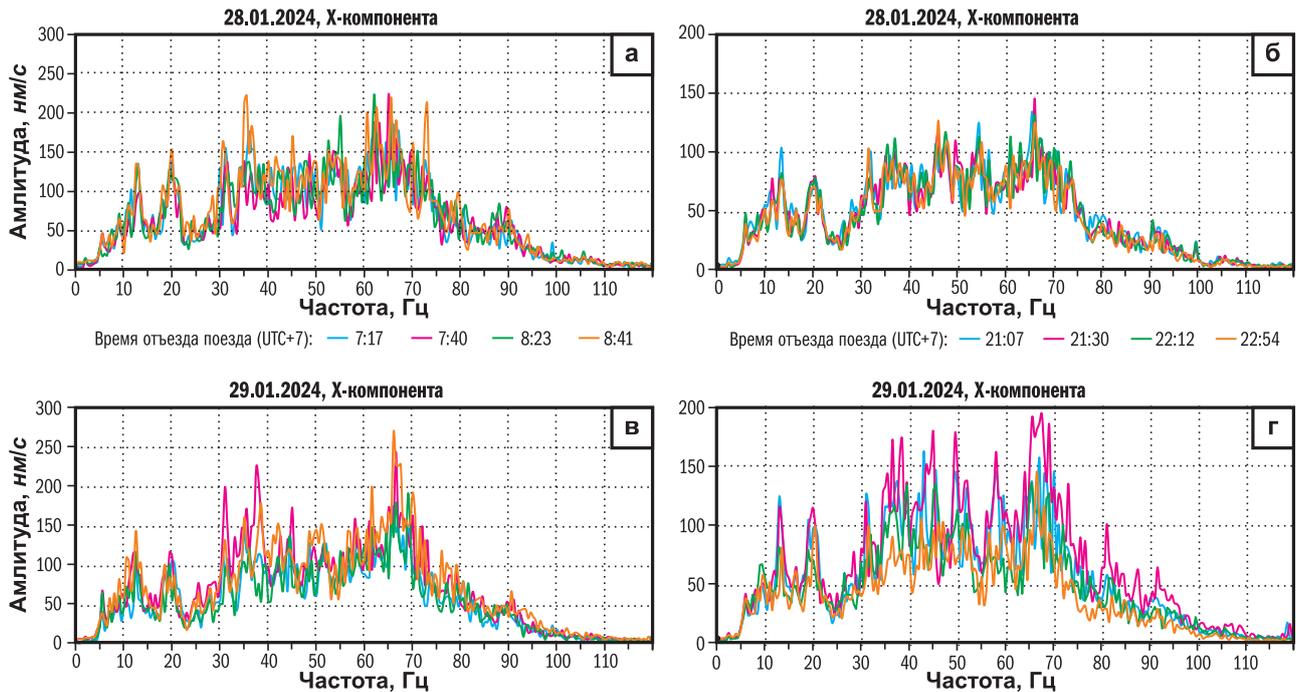


Рис. 10. Графики амплитуд усреднённых спектров отъездов поездов метро, X-компонента:
 а – 28.01.2024 г, воскресенье, раннее утро;
 б – 28.01.2024 г, воскресенье, вечер; в – 29.01.2024 г, понедельник, раннее утро;
 г – 29.01.2024 г, понедельник, вечер

На рис. 10 представлены данные за воскресенье и понедельник, 28 и 29 января 2024 г. соответственно, где были выбраны четыре поезда утром и вечером, отправляющиеся примерно в одно время. Проведя их сравнение, заметим, что графики схожи, но есть различия по амплитуде и отдельным пикам. Несмотря на утренние часы в выходной день, по амплитуде сигнала видно, что метро остаётся востребованным (рис. 10а), но в будний день сигнал более зашумлённый (рис. 10в, г).

Неисправность самого вагонного состава должна отображаться как изменение частот на спектре. Из графиков видно, что присутствуют некоторые отклонения по частотному диапазону, но существенных изменений, говорящих о неисправности, таких как резкое скачкообразное изменение частоты не наблюдается.

Выводы

Данное исследование показало, что использование сейсмологических данных для дистанционного контроля технического состояния поездов метро является подходящим методом. Оно позволяет контролировать прибытия и отправления поездов, а также выявлять потенциальные изменения в амплитудно-частотном диапазоне

записи сигнала, что может указать на возможные проблемы в техническом состоянии вагонов. Соответственно, данный метод при его дальнейшем развитии и совершенствовании может быть использован как средство для предотвращения аварий и обеспечения безопасности пассажиров.

Таким образом, использование метода дистанционного мониторинга технического состояния поездов метро обеспечит эффективный контроль их функционирования, позволяя своевременно выявлять и устранять неисправности. Это поспособствует повышению безопасности и комфорта пассажиров за счёт оперативного реагирования на критические изменения, наблюдаемые в амплитудно-частотном диапазоне сигнала. Техническая неисправность состава, в худшем случае, может привести к человеческим жертвам. Помимо прочего, из-за различных дефектов, жители, находящиеся в домах в непосредственной близости к метрополитену, будут испытывать увеличенные вибрации и шумы, вызывающие дискомфорт. Создав соответствующее программное обеспечение, которое будет отслеживать изменения в частотном диапазоне сигнала, можно получить достаточно оперативный способ мониторинга.

Кроме того, одно из главных преимуществ данной системы мониторинга заключается в том,

что, благодаря своей высокой мобильности, она не требует установки непосредственно на объекте наблюдения. Комплекс можно разместить на доступном расстоянии от источника, что позволит после фильтрации помех анализировать полезный сигнал.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-00682-24) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфраструктурной комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Глаголев М.* Поезд-лаборатория Синергия-2 // ТехФото [сайт]. — URL: <https://agtf.ru/archives/3496> (дата обращения 10.02.2024).
- Инфографика* // Аналитическое агентство «АВТОСТАТ» [сайт]. — URL: <https://www.autostat.ru/infographics/> (дата обращения 10.02.2024).
- Коковкин И.В., Селезнев В.С.* О резонансном эффекте в здании от работы промышленной установки // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2022. — Т. 2, № 2. — С. 180–187. — DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-180-187. — EDN: USBJSE
- Павлова О.* Транспортное сердце Сибири: с чего начинался и как развивался транспорт в Новосибирске // Сиб.фм [сайт]. — URL: <https://sib.fm/last/news/2023/09/20/transportnoe-serdtse-sibiri-s-chegonachinalsya-i-kak-razvivalsya-transport-v-novosibirsk> (дата обращения 10.02.2024).
- Ратников А.* Причиной аварии в метро могла стать неисправность состава // РБК [сайт]. — URL: <https://www.rbc.ru/society/15/07/2014/57041f559a794760d3d3ffbf> (дата обращения 10.08.2023).
- Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А.* Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления / Изобретения (патенты). — 2012. — № 26 (II ч.). — С. 364–365. — Пат. 2461847 RU. МПК G01V1/28, G01M7/02. — EDN: NSYIKF
- Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.* SpectrumSeism / Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021666241 от 11.10.2021. — EDN: JKKTEX
- Факты и цифры* // Новосибирский метрополитен [сайт]. — URL: <https://www.nsk-metro.ru/about/> (дата обращения 10.02.2024).
- Чем опасен шум* // Мастерская Слуха [сайт]. — URL: <https://msluh.ru/you-must-tell/chem-opasen-shum/> (дата обращения 10.02.2024).
- Ilona C., Smith M.G., Wayne K.P.* Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: An experimental study // *Bmj Open*. — 2013. — V. 3, N 5. — P. e002655. — DOI: 10.1136/bmjopen-2013-002655
- Kawecki J., Koziol K., Stypula K.* The Design of Rail Tracks including the Influence of Vibration on People in Buildings // *Proceedings of the The Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*. (Croatia, 4-7 September 2012). — Dubrovnik, Croatia, 2012. — V. 176. — P. 1–9. — DOI: 10.4203/csr.99.176
- Pachla F., Pawlik B.R., Stypula K., Tatara T.* Vibration induced by railway traffic-zones of influence on buildings and humans // *Proceedings of the 27th International Conference on Vibroengineering*. (Poland, 26-28 September 2017). — Poland, 2017. — V. 13. — P. 188–192. — DOI: 10.21595/vp.2017.19112
- Xia H., Chen J., Wei P., Xia C., Roeck G.D., Degrande G.* Experimental investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. — 2009. — V. 8, N 1. — P. 137–148. — DOI: 10.1007/s11803-009-8101-0

Сведения об авторах

Коковкин Иван Васильевич, мл. науч. сотр. Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Новосибирск, Россия. E-mail: titanoks1@ya.ru

Селезнев Виктор Сергеевич, доктор геол.-мин. наук, гл. науч. сотр. СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Новосибирск, Россия. E-mail: sel@gs.nsc.ru

Remote control of the technical condition of metro trains using seismological tools

© 2024 I.V. Kokovkin, V.S. Seleznev

SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia

Received June 13, 2024

Abstract As urban road congestion increases and people shift to using the subway, the safety of underground transportation becomes a priority. Therefore, it is necessary to establish a monitoring system for subway trains to detect malfunctions that occur during operation. The article proposes an engineering seismology method for remote monitoring of the technical condition of metro trains based on the analysis of microseismic vibrations. This method allows remote control of the dynamic parameters of each train and their deviations from the norm. The authors demonstrate how a seismic recorder placed in a building adjacent to a metro station can be used to monitor changes in the amplitude-frequency spectrum of vibroseismic recordings. It is used to determine the arrival and departure times of trains, and it is shown that observations are best made for departures due to their more pronounced signal amplitude. The recorded signal of a metro train should fall within a certain frequency range, which is determined based on its average values, and any deviation of the observed signal spectrum from this norm indicates changes in the train's condition. The proposed approach not only helps improve passenger safety, but also reduces the risk of emergencies associated with technical malfunctions of rolling stock. In the future, it is possible to develop software equipped with a database of statistical data, which will allow even more efficient control of metro operations and prompt response to any deviations, thus ensuring a high level of safety and comfort for passengers.

Keywords Metro train monitoring, remote control, seismological monitoring.

For citation Kokovkin, I.V., & Seleznev, V.S. (2024). [Remote control of the technical condition of metro trains using seismological tools]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(3), 27-39. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.3.02>. EDN: RNUGXG

References

- Analiticheskoe agentstvo "AVTOSTAT"* [Analytic agency "AUTOSTAT"]. (2024). Infographics. (In Russ.). Retrieved from <https://www.autostat.ru/infographics/>
- Glagolev, M. (2024). *Laboratory train Synergy-2*. (In Russ.). Retrieved from <https://agtf.ru/archives/3496>
- Hearing Workshop. (2024). *Chem opasen shum* [What are the dangers of noise]. (In Russ.). Retrieved from <https://msluh.ru/you-must-tell/chem-opasen-shum/>
- Ilona, C., Smith, M.G., Waye, K.P. (2013). Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: An experimental study. *Bmj Open*, 3(5), e002655. DOI: 10.1136/bmjopen-2013-002655
- Kawecki, J., Koziol, K., Stypula, K. (2012). The Design of rail tracks including the influence of vibration on people in buildings. In *Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology*, Vol. 176 (pp. 1-9), Sep. 2012. DOI: 10.4203/ccp.99.176
- Kokovkin, I.V., Seleznev, V.S. (2022). [On the resonance effect in the building from an industrial installation]. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia], 2(2), 180-187. (In Russ.). DOI: 10.33764/2618-981X-2022-2-2-180-187. EDN: USBJSE
- Novosibirsk Metro. (2024). *Fakty i tsifry* [Facts and figures]. (In Russ.). Retrieved from <https://www.nsk-metro.ru/about/>
- Pachla, F., Pawlik, B.R., Stypula, K., Tatara, T. (2017). Vibration induced by railway traffic-zones of influence on buildings and humans. In *Vibroengineering PROCEDIA*, Vol. 13 (pp. 188-192), Sep. 2017. DOI: 10.21595/vp.2017.19112
- Pavlova, P. (2024). *Transportnoe serdtse Sibiri: s chego nachinalsia i kak razvivalsia transport v Novosibirske* [Transportation heart of Siberia: where transportation in Novosibirsk began and how it developed]. (In Russ.). Retrieved from <https://sib.fm/last/news/2023/09/20/transportnoe-serdtse-sibiri-s-chego-nachinalsia-i-kak-razvivalsiya-transport-v-novosibirske>
- Ratnikov, A. (2023). *Prichinoi avarii v metro mogla stat' neispravnost' sostava* [The metro accident may have been caused by a malfunctioning train]. (In Russ.). Retrieved from <https://www.rbc.ru/society/15/07/2014/57041f559a794760d3d3ffbf>

Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Bryksin, A.A. (2012). [A method for continuous monitoring of physical state of buildings and/or structures and apparatus for realising said method]. Patent RF, No 2461847. (In Russ.). EDN: NSYIKF

Seleznev, V.S., Liseikin, A.V., Sevostyanov, D.B., Bryksin, A.A. (2021). SpectrumSeism. Certificate of state registration of the computer program No. 2021666241. (In Russ.). EDN: JKKTEX

Xia, H., Chen, J., Wei, P., Xia, C., Roeck, G.D., Degrande, G. (2009). Experimental investigation of railway train-induced vibrations of surrounding ground and a nearby multi-story building. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8(1), 137-148. DOI: 10.1007/s11803-009-8101-0

Information about author

Kokovkin Ivan Vasilievich, Junior Researcher of the Seismological Branch of the Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences (SEB GS RAS), Novosibirsk, Russia. E-mail: titanoks1@yandex.ru

Seleznev Viktor Sergeevich, Dr., Chief Researcher of the SEB GS RAS, Novosibirsk, Russia. E-mail: sel@gs.nsc.ru