

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ФИЛИАЛ (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН)

УДК 550.34

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ ЕГС РАН,
д-р техн. наук

_____ Ю.А. Виноградов
" ____ " _____ 2023 г.

ОТЧЕТ

о результатах исследований

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ФИЛИАЛА

ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

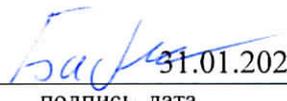
за 2022 год

Ответственный исполнитель,
Директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН,
канд. геол.-мин. наук

 А.В. Лисейкин

Новосибирск 2023

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель научного направления ФИЦ ЕГС РАН, д-р геол.-мин. наук	 31.01.2022 подпись, дата	В.С. Селезнев (введение, разделы 1-3, заключение)
Директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, канд. геол.-мин. наук	 31.01.2022 подпись, дата	А.В. Лисейкин (реферат, введение, разделы 1.2, 1.4, 2.2, 3.2, заключение)
Зам. директора СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	С.М. Бабушкин (разделы 1.5, 3.3)
Ст. науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	А.А. Брыксин (нормоконтроль, разделы 1.6, 2.1)
Науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	П.В. Громыко (разделы 1.1, 1.3, 3.1)
Науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	Д.В. Кречетов (раздел 3.2)
Науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	П.В. Пономарев (раздел 3.5)
Мл. науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	И.В. Коковкин (разделы 3.1, 3.5)
Мл. науч. сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	Е.Э. Косякина (раздел 3.1)
Вед. инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН д-р. геол.-мин. наук	 31.01.2022 подпись, дата	Н.Н. Неведрова (раздел 3.5)
Вед. программист СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	В.П. Гаврилов (раздел 3.5)
Вед. инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	 31.01.2022 подпись, дата	А.А. Болдарев (раздел 3.5)

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 193 с., 171 рис., 29 табл., 44 источн., 1 прил.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ, СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ, МАЛОАМПЛИТУДНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Объект исследования – поля малоамплитудных геофизических сигналов от таких источников как крупные промышленные установки, колеблющиеся на собственных частотах техногенные сооружения, электромагнитные поля в недрах Земли. Цель работы – развитие и внедрение технологий, позволяющих исследовать опасные процессы, возникающие при техногенном воздействии на геологическую среду, устойчивость техногенных сооружений в связи с сейсмическим риском. В развитие методики оценки устойчивости зданий и сооружений по мониторингу их собственных колебаний методом стоячих волн определены базовые характеристики колебаний пяти различных по конструкции, материалам и размерам объектов в городах Тюмень, Новосибирск и Норильск; результаты определения частот собственных колебаний во времени за годовой период мониторинга двух зданий свидетельствуют о существенной и неоднозначной их зависимости от сезонных и суточных изменений температуры и требуют разработки способов их учета. По результатам анализа колебаний, зарегистрированных на агрегатных блоках машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС, выделены сигналы, по изменению характеристик которых контролируется устойчивость работы гидроагрегатов: не только известные ранее «оборотная» и «лопастная» частоты, но и «жгутовая» частота около 0.65 Гц. Разработана концепция системы мониторинга канатно-кресельных дорог в шахтах по непрерывной регистрации микросейсмических колебаний в ряде точек сооружения и определении по ним частот собственных колебаний тросового вала в режиме близком к реальному времени, а также амплитуд и частот работы двигателей, необходимых для контроля за техническим состоянием этих объектов инфраструктуры. По данным мониторинга на одной из станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона в 4.4 км от плотины Саяно-Шушенской ГЭС разработана методика определения частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам для оценки их устойчивости и для предупреждения рисков разрушения плотин, промышленных сооружений, объектов инфраструктуры и гражданских зданий с высокой степенью достоверности и экономически выгодная по сравнению с известными решениями. В рамках реализации электроразведочного мониторинга сейсмоактивной Чуйско-Курайской зоны на юге Алтая выполнены ежегодные мониторинговые измерения методом ЗС; проводится анализ полученных электроразведочных данных совместно с

многолетними данными предыдущих измерений, что в конечном итоге, позволит обосновать историю и кинематику формирования впадин и провести совместный анализ рядов мониторинговых электроразведочных наблюдений с развитием афтершокового процесса в Чуйско-Курайской зоне. С целью дальнейшего совершенствования электроразведочных методов для решения практических инженерно-геологических задач на угольных месторождениях и возросшей техногенной сейсмичностью под Новосибирском проведены электроразведочные работы в Горловском прогибе Колывань-Томской складчатой зоны Алтае-Саянской складчатой области: изучены геоэлектрические характеристики в основных блоковых структурах прогиба с установлением характера глубинного распределения геоэлектрических неоднородностей.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
1. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕМЕНТА УНУ ФИЦ ЕГС РАН – КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ	12
1.1 ГЭС	12
1.2 Здания и сооружения	17
1.3 Мониторинг собственных колебаний зданий	21
1.4 Изучение строения недр по сейсмическим данным	22
1.5 Изучение строения недр по электроразведочным данным и мониторинг вариаций электромагнитных полей	26
1.6 Мобильный аппаратно-программный комплекс регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных	35
2 ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ЧАСТЬ УНУ	40
2.1 Аппаратный комплекс ЦОД	40
2.2 Программно-алгоритмическая часть	42
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2022 г	47
3.1 Развитие экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических и электромагнитных сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах	47
3.1.1 Обследование сооружений методом стоячих волн	47
3.1.2 Мониторинг собственных частот сооружений	76
3.1.3 Анализ вибрации от гидроагрегатов СШ ГЭС	96
3.1.4 Опытные-методические работы по созданию системы мониторинга технического состояния канатно-кресельных дорог	109
3.2 Проведение мониторинга технического состояния крупных плотин ГЭС, основанного на анализе изменений параметров собственных колебаний	124
3.2.1 Мониторинг частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС	124
3.3 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области	143

3.3.1 Электромагнитный мониторинг. Измерения методом ЗС в режимных точках Чуйской впадины Горного Алтая	143
3.3.2 Учет анизотропных свойств геологической среды.....	152
3.3.3 Получены геоэлектрические характеристики разреза методами ВЭЗ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения.....	158
3.3.4 Проведены измерения методом зондирования становлением поля (ЗС), в расширенном частотно-временном диапазоне, западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир»). Детально изучен геоэлектрический разрез зоны землетрясения 2003 года	166
3.3.5 Изучение геоэлектрических характеристик разреза по выделенному направлению (электроразведочные профиля) в основных блоковых структурах Горловского прогиба с установлением характера глубинного распределения геоэлектрических неоднородностей.....	171
3.3.6 Объем полевых работ, выполненных в 2022 г.	182
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	184
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	188
ПРИЛОЖЕНИЕ А Публикации сотрудников ФИЦ ЕГС РАН в 2022 году.....	191

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете применяются следующие сокращения и обозначения.

ФИЦ ЕГС РАН и его филиалы:

- ФИЦ ЕГС РАН – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Обнинск
- АСФ ФИЦ ЕГС РАН – Алтае-Саянский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск
- СЕФ ФИЦ ЕГС РАН – Сейсмологический филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск
- СО ФИЦ ЕГС РАН – Сибирское отделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», г. Новосибирск

Другие сокращения:

- АССК – автоматизированная система сейсмометрического контроля
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- ВГП – вентилятор главного проветривания
- ВЭЗ – вертикальное электрическое зондирование
- ГА – гидроагрегат
- ГЭС – гидроэлектростанция
- ЗС – зондирование становлением поля
- ЗСБ – зондирование становлением поля в ближней зоне

ИВМиМГ СО РАН	– Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
ККД	– канатно-кресельная дорога
НИР	– научно-исследовательская работа
отм.	– отметка
ПК	– персональный компьютер; пикет
ПО	– программное обеспечение
скв.	– скважина
СО РАН	– Сибирское отделение Российской академии наук
ст.	– станция
СШ ГЭС	– Саяно-Шушенская гидроэлектростанция
т.	– точка
УНУ	– уникальная научная установка
УЭС	– удельное электрическое сопротивление
ф.н.	– физическое наблюдение
ф.т.	– физическая точка
ЦОД	– центр обработки данных
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭТ	– электротомография

ВВЕДЕНИЕ

Отчет содержит информацию о выполнении Государственного задания № 075-01471-22-00/09 на проведение Сейсмологическим филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» исследовательских работ в 2022 году.

Исследовательские работы выполнены при помощи элемента УНУ ФИЦ ЕГС РАН – Комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Элемент УНУ ФИЦ ЕГС РАН – Комплекс мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов (КОМЭСК МС)

КОМЭСК МС предназначен для изучения длительных по времени сейсмических и электромагнитных малоамплитудных сигналов, источником которых выступают различные крупные промышленные установки, колеблющиеся на собственных частотах здания и сооружения; промышленные шумы городов, а также сейсмические и электромагнитные поля в недрах Земли. Состоит из аппаратной и программно-алгоритмической частей.

Аппаратная часть КОМЭСК МС включает в себя центр обработки и хранения данных (ЦОД) и две подсистемы мониторинга: сейсмическую и электромагнитную, каждая из которых предназначена как для стационарной, так и передвижной регистрации длительно-идуших малоамплитудных сигналов.

Программно-алгоритмическая часть комплекса предназначена для обработки и интерпретации данных мониторинга и представлена в большей части оригинальными разработками сотрудников филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также сотрудников организации-партнера ИНГГ СО РАН. Кроме этого, для решения ряда задач используется и лицензированное ПО – в частности, пакет RadexPro, разработанный в компании ООО «Деко-геофизика».

Основные объекты исследований КОМЭСК МС:

1. Оборудование (гидроагрегаты) ГЭС;
2. Здания и сооружения;
3. Промышленные шумы от крупных городов;
4. Строение недр Земли по сейсмическим данным;
5. Строение недр Земли по электроразведочным данным;
6. Временные вариации электромагнитных полей.

Исследования включают в себя: интерпретацию экспериментальных данных сейсмических колебаний, полученных в плотине и машинном зале гидроэлектростанций при различных режимах работы оборудования, на основе создаваемых алгоритмов разделения общего поля микросейсмических колебаний по источникам и анализе связей между работой гидроагрегатов и параметрами сейсмических воздействий от них на конструкции ГЭС; интерпретацию экспериментальных данных метода стоячих волн, полученных на зданиях и сооружениях; обработку и анализ данных мониторинга длительно идущих малоамплитудных сейсмических сигналов, источником которых являются шумы крупных городов; обработку и интерпретацию данных, полученных при речных сейсмо- и электроразведочных исследованиях; интерпретацию вариаций электромагнитных полей.

Протяженность отчетного периода с 1 января по 31 декабря 2022 года.

Исследования выполнялись в рамках Программы фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021-2030 годы) и Приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в РФ: «Безопасность и противодействие терроризму», «Рациональное природопользование» и Критических технологий РФ: 19 «Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения», 21 «Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».

Исследования СЕФ ФИЦ ЕГС РАН выполнялись по темам НИР: № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору» (руководитель д.г.-

м.н. В.С. Селезнев), № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений» (руководитель д.т.н. А.Ф. Еманов), № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» (руководитель д.т.н., чл.-корр. РАН А.А. Маловичко) и № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных» (руководитель к.т.н. П.Г. Бутырин).

Отчет состоит из введения, трех разделов, заключения и приложений.

В **первом** разделе приводится информация о регистрирующей части КОМЭСК МС. Дано описание используемой регистрирующей аппаратуры, особенностей организации стационарных и передвижных систем мониторинга сейсмических и электромагнитных малоамплитудных сигналов.

Второй раздел содержит информацию об обрабатывающей части КОМЭСК МС – структуре и работе центра обработки данных (ЦОД) КОМЭСК МС. Приведено описание используемых при исследованиях программ и алгоритмов.

Третий раздел отчета посвящен результатам исследований, выполненных СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г.

В **приложении 1** к отчету приводится список публикаций сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 году и сведения о показателях, характеризующих качество работы.

Цели работы – снижение ущерба от катастроф, возникающих на грани между техногенной деятельностью человека и природной средой, на основе разработки сейсмологических методов контроля и предупреждения аварийных ситуаций, возникающих при масштабной добыче полезных ископаемых, создании крупнейших водохранилищ и при работе крупных и опасных производственных предприятий (ГЭС, АЭС и т.п.).

Содержание работ:

Развитие экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических и электромагнитных сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах.

Проведение мониторинга технического состояния крупных плотин ГЭС, основанного на анализе изменений параметров собственных колебаний.

Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области.

1. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕМЕНТА УНУ ФИЦ ЕГС РАН – КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ

1.1 ГЭС

Регистрация сейсмических колебаний на гидроэлектростанциях проводится в непрерывном режиме в ряде точек наблюдения, образуя сейсмическую сеть и включает регистрацию колебаний при различных режимах работы оборудования (например, гидроагрегатов ГЭС). Пример реализованной схемы наблюдений в теле плотины и машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС приведены на рисунках 1.1-1.2. Регистрация сейсмических колебаний проводилась в пунктах наблюдения, расположенных на различных уровнях плотины и машинного зала вдоль оси каждого из исследуемых гидроагрегатов. Устанавливалось, в среднем, 14-16 точек наблюдения: 5 точек регистрации располагались в теле плотины на разных высотных уровнях вдоль водовода испытуемого гидроагрегата; 1 точка располагалась на уровне 521 м в сеймопавильоне в 39-й секции; 7 точек устанавливалось на соответствующем агрегатном блоке в машинном зале; 1-3 точки устанавливались на чердачном помещении здания машинного зала. Кроме этого, для анализа использовались данные с локальной сейсмологической сети, схема расположения станций которой приведена на рисунке 1.3. За время проведения измерений тестовых запусков исследуемых гидроагрегатов, на Саяно-Шушенской ГЭС функционировали и другие гидроагрегаты.

Каждый пункт наблюдения в теле плотины и машинном зале ГЭС состоял из трехкомпонентных сейсмоприемников и автономных сейсмических регистраторов Байкал-АСН. Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников, следующие: X или N – направлены по течению реки, Y или E – поперек, Z – вертикально.

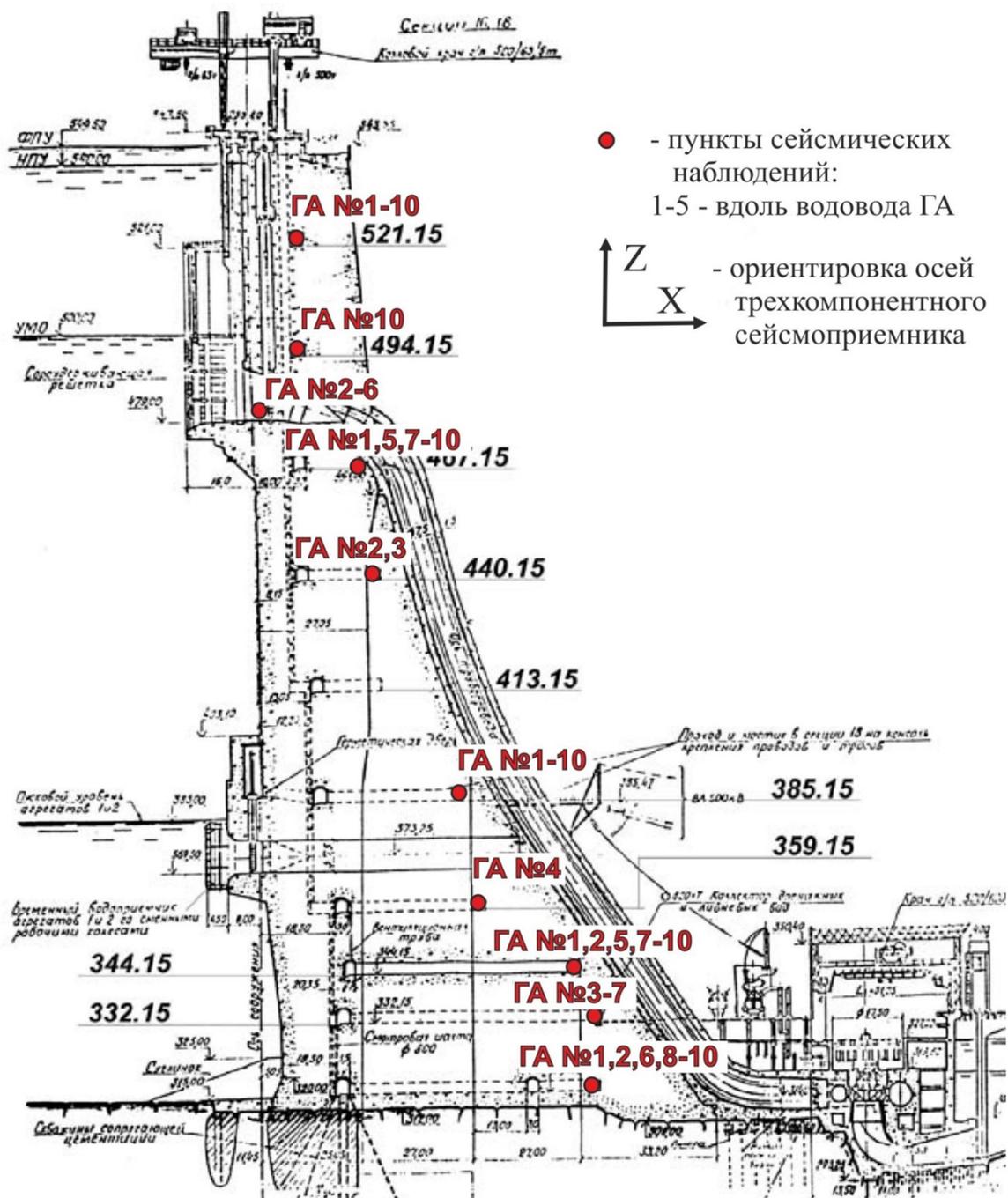


Рисунок 1.1 – Схема сейсмических наблюдений в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС вдоль оси каждого из гидроагрегатов

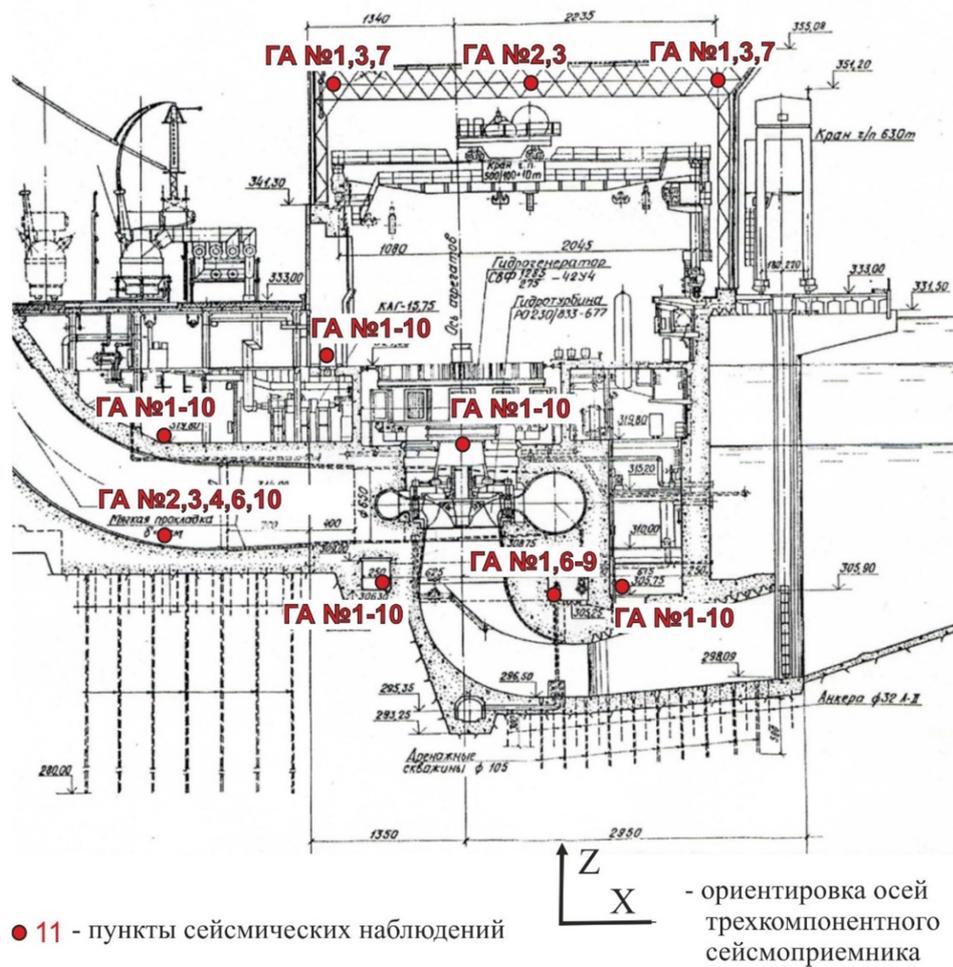


Рисунок 1.2 – Схема сейсмических наблюдений в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС возле каждого из гидроагрегатов



Рисунок 1.3 – Схема сейсмических наблюдений на станциях сейсмологической сети «Черемушки», «Джой» и «Джойская Сосновка»

Для проведения геофизических исследований была задействована следующая аппаратура: автономные трехканальные сейсмические регистраторы Байкал-АСН, датчики-акселерометры А1738, CMG-5Т и датчики-велосиметры GS-20DX, GS-ONE.

Регистраторы устанавливались в точках измерений в непосредственной близости от сейсмических датчиков, производили запись в непрерывном или старт-стопном режимах (по таймеру или критериям) и были синхронизованы по времени с помощью сигнала GPS, что гарантировало одновременность записи колебаний в разных точках наблюдения. Общий вид комплекта аппаратуры и использованных сейсмических датчиков приведен на рисунке 1.4, краткие технические характеристики приведены в таблицах 1.1-1.3.

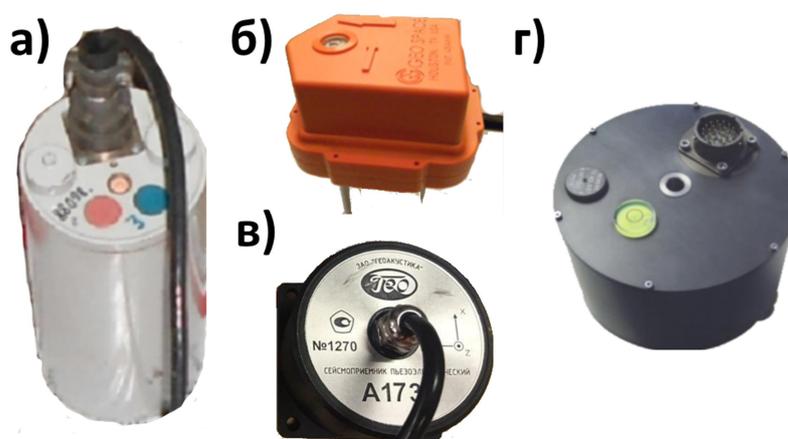


Рисунок 1.4 – Регистрирующая аппаратура: а) сейсмический регистратор Байкал-АСН; б) акселерометр А1738; в) велосиметр GS-20DX; г) акселерометр CMG-5Т

Таблица 1.1 – Краткие технические характеристики цифрового автономного регистратора Байкал-АСН

	Техническая характеристика регистратора	Байкал-АСН
1	Количество каналов	3
2	Разрядность АЦП	24
3	Тип входов	дифференциальный
4	Входное сопротивление, кОм	24
5	Максимальная частота дискретизации, Гц	2000
6	Рабочая полоса частот (-3 дБ), Гц	0-370
7	Шумы (0.15-40 Гц), мкВ	<0.5
8	Напряжение питания, В	10-28
9	Тип энергонезависимой памяти	microSD
10	Потребляемая мощность, Вт	<0.6
11	Стабильность внутреннего генератора	$\pm 2 \cdot 10^{-7}$
12	Диапазон рабочих температур, °С	-30 - +60

Таблица 1.2 - Краткие технические характеристики датчиков-акселерометров

	Техническая характеристика сейсмодатчика	A1738	CMG-5Т
1	Тип сейсмоприемника	Пьезоэлектрический	Пьезоэлектрический

2	Число осей измерений	3	3
3	Рабочая полоса частот, Гц	0.1 - 400	0 - 200
4	Неравномерность амплитудно-частотной характеристики, дБ - в диапазоне 0.1 - 0.4 Гц - в диапазоне 0.4 - 300 Гц - в диапазоне 300 - 400 Гц	не более -3 не более ± 1 не более -3	3
5	Допускаемая относительная погрешность коэффициента преобразования, % - в диапазоне 0.1 - 1 Гц - в диапазоне 1 - 100 Гц - в диапазоне 100 - 400 Гц	± 10 ± 4 ± 10	± 10
6	Максимальное измеряемое гармоническое ускорение (эффективное значение), мсек-2	5	19.6
7	Интегральный шум в диапазоне частот от 0.2 до 400 Гц, не более, мсек-2	210-5	-
8	Максимальный уровень выходного сигнала, В	± 5	± 20
9	Тип питания	двухполярное	двухполярное
10	Напряжение питания, В	$\pm (12 \pm 2)$	$\pm (12 \pm 2)$

Таблица 1.3 - Краткие технические характеристики датчиков-велосиметров.

	Техническая характеристика сейсмодатчика	GS-20DX	GS-One
1	Тип сейсмоприемника	индукционный	индукционный
	Коэффициент преобразования, В/м/с ²	19.8 \pm 10%	78.7 \pm 3.5%
	Сопротивление, катушка шунт,	283 \pm 5% 1k	1800 \pm 3.5% 20k
	Собственная частота	10 \pm 10%	10 \pm 3.5%
	Гармонические искажения (0.018 м/с)	< 0.2 / 12Гц	< 0.1 / 12Гц
	Напряжение теплового шума (10 - 250Гц)	80.8	80.8

Необходимо пояснить, почему при регистрации сейсмических колебаний были использованы датчики различных типов. Изначально предполагалось, что регистрация будет проводиться комплектом аппаратуры, находящимся в распоряжении персонала Саяно-Шушенской ГЭС и включающем регистраторы Байкал-АСН и датчики-акселерометры А1738. Однако, как показал опыт проведения исследований по регистрации, датчики-акселерометры типа А1738 оказались полностью непригодными для исследований в условиях шумовой обстановки машинного зала ГЭС. Большинство сейсмических записей, полученных на агрегатном блоке машинного зала с этими типами датчиков, оказались бракованными. Поэтому дополнительно проводились эксперименты с другими типами датчиков, с целью получить кондиционные записи. Ввиду этого для регистрации сигнала в машинном зале использовались велосиметры GS-20DX и GS-One, с применением к ним процедуры деконволюции сейсмической записи, позволяющую выровнять амплитудно-фазовую частотную характеристику датчика [1].

1.2 Здания и сооружения

Для регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов на зданиях и сооружениях, в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН используются регистраторы «Байкал-АСН» в комплекте с сейсмическими датчиками различного типа.

Регистраторы «Байкал-АСН» (рисунок 1.5) разработаны в ФИЦ ЕГС РАН (Сибирское отделение) и по функциональным возможностям аналогичны известной американской системе REFTEK-125. Каждый регистратор представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 3-канальный 24-х разрядный аналого-цифровой преобразователь, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник (внешняя антенна) и сменные гальванические элементы питания (возможно подключение внешнего аккумулятора).

Регистраторы устанавливаются в местах проведения измерений, к ним подключаются трехканальные датчики колебаний (велосиметры или акселерометры). Запись производят в непрерывном или старт-стопном режимах (по таймеру или критериям). Задание программы работы регистратора и считывание записанной информации происходит по порту USB (на компьютере устанавливается специализированное программное обеспечение), стартовая и финишная синхронизации по GPS производятся с использованием внешней («Байкал-АСН») антенны. Регистраторы имеют встроенные функции самодиагностики, устроенные таким образом, чтобы исключить получение некондиционных или бракованных записей (если прибор не проходит тесты самодиагностики, то он не включается на запись и выдает ошибку на световом индикаторе). Краткие технические характеристики приведены в таблице 1.4.



Рисунок 1.5 – Автономные трехканальные регистраторы «Байкал-АСН»

Таблица 1.4 – Основные характеристики регистраторов «Байкал-АСН»

Параметр	Ед	Значение
1	2	3
Количество каналов		4 (3)
Разрядность данных	бит	24
Тип входов		Дифференциальный
Входной импеданс		24Ком 4700пФ
Частота дискретизации FD	Гц	50,100,200,500, 1000, 2000
Полоса частот(-3дб)	Гц	0 - 370
Коэффициент усиления G		1,2,4,8,16,32,64
Максимальное входное напряжение (дифф.) при G=1	В	± 12.3
Коэффициент преобразования При G=1 При G=16	нВ/дискр.	1485.0 ± 2.0% 92.6 ± 2.5%
Шум приведённый ко входу при: G=1; FD=100 G=1; FD=1000 G=16; FD=100	мкВ	< 2.0 < 7.2 < 0.4
Число эффективных разрядов при G=1; FD = 100 G=1; FD=1000 G=16; FD=100	бит	>21.5 >20.5 >20.0
Тип энергонезависимой памяти		SD, micro-SD
Объём энергонезависимой памяти.	Гб	2 (опц. до 32)
Стабильность внутреннего генератора (-20 - +60 °C)	с	±2*10-7
Точность привязки времени Внешний GPS Встроенный GPS	мкс	± 2 ± 1
Питание регистратора внешнее внутреннее	В	10 – 28 Постоянного тока 3 (2*1.5В эл. питания размер D)
Потребляемая мощность Режим «ожидание» Режим «запись»	Вт	< 0.6 < 1.2
Питание для внешних активных датчиков		+5В (100 мА) -5В (100 мА)
Интерфейс с ПК для установки режима и считывания данных		USB 2.0 FULL SPEED
Диапазон рабочих температур.	°C	-30 ÷ +60
Масса регистратора	кг	1.0 (2.5)

Регистраторы «Байкал-АСН» в силу своей автономности и компактности применяются при организации систем наблюдения на зданиях и сооружениях практически любой конфигурации. На рисунках 1.6-1.9 показаны примеры установки сейсмических регистраторов и схемы сейсмических наблюдений, реализованные на практике.

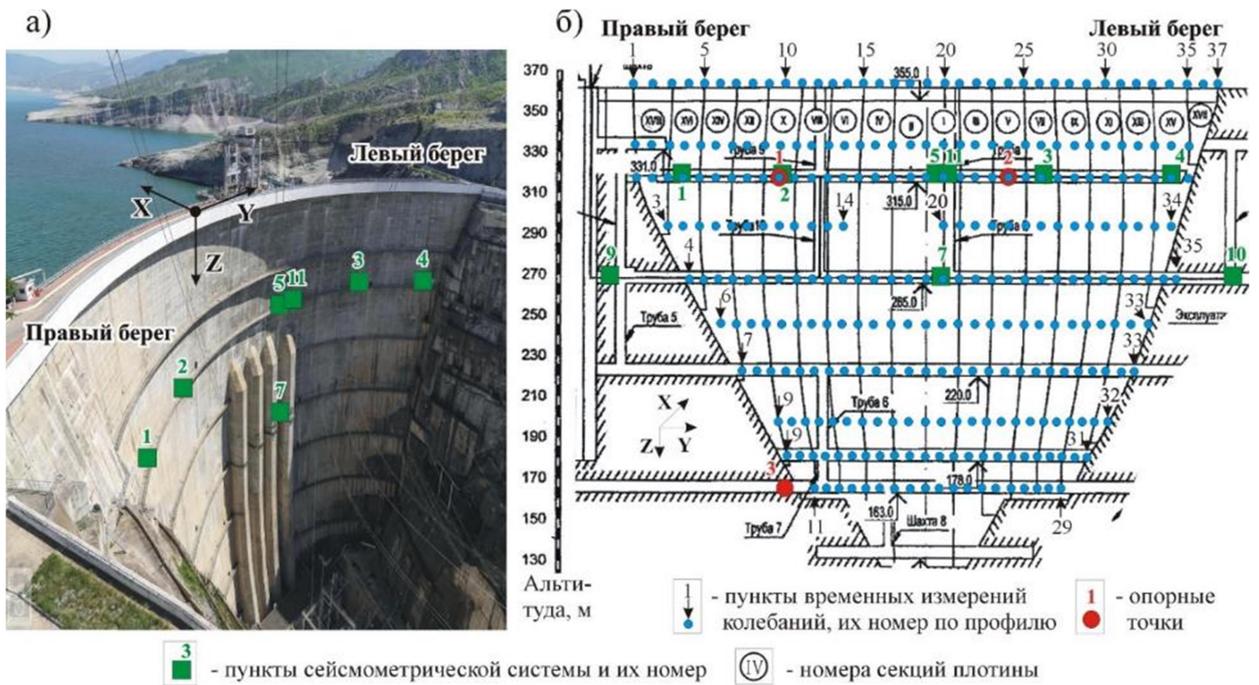


Рисунок 1.6 – Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС с пунктами постоянной сейсмометрической системы (а) и схема временно реализованных сейсмических наблюдений с регистраторами «Байкал-АСН» (б)



Рисунок 1.7 – Примеры установки регистраторов «Байкал-АСН» с датчиками-велосиметрами GD-10 в плотине Чиркейской ГЭС

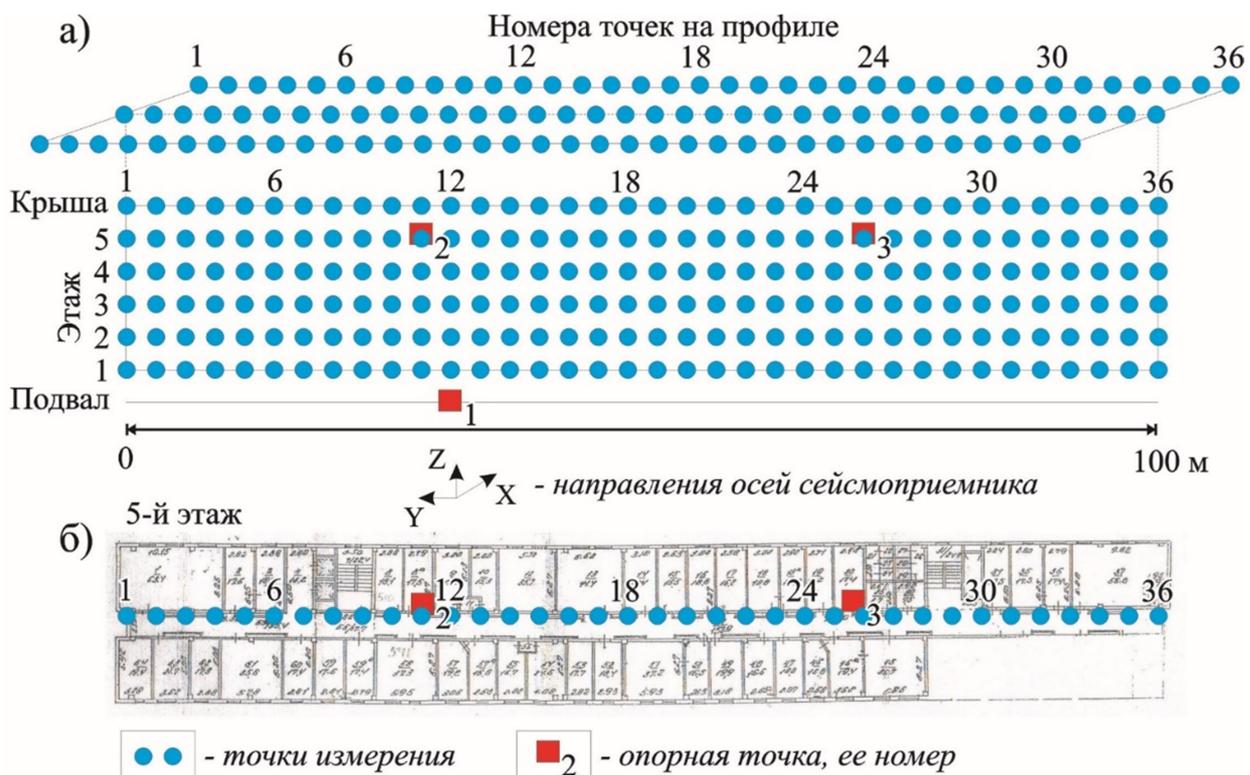


Рисунок 1.8 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний жилого здания. (а) – общая; (б) – по профилю на 5-м этаже

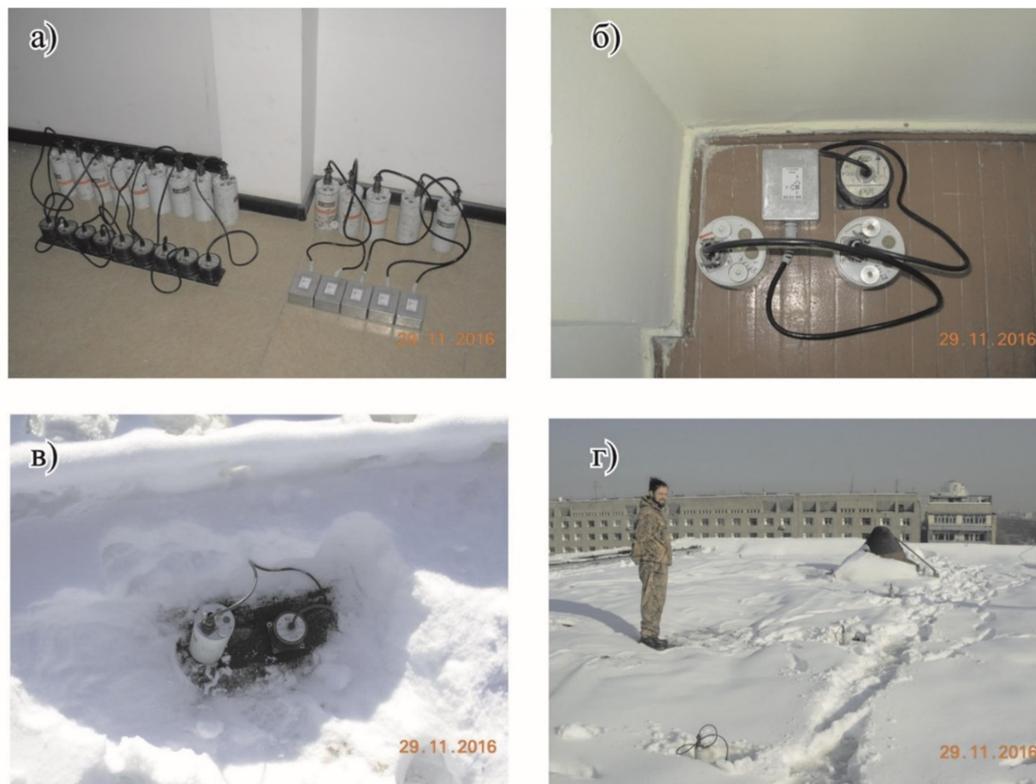


Рисунок 1.9 – Фотографии процесса проведения измерений на здании при помощи регистраторов «Байкал-АСН», датчиков-акселерометров А1638 и велосиметров GD-10: (а) – тест на идентичность; (б) – установка аппаратуры в опорной точке № 3; (в, г) – проведение измерений на крыше здания

1.3 Мониторинг собственных колебаний зданий

С целью определения влияния температурных изменений на собственных колебаний зданий, расположенных в Новосибирской области с 2021 г. силами СЕФ ФИЦ ЕГС РАН было установлено десять стационарных сейсмических станций (рисунок 1.10, таблица 1.5).

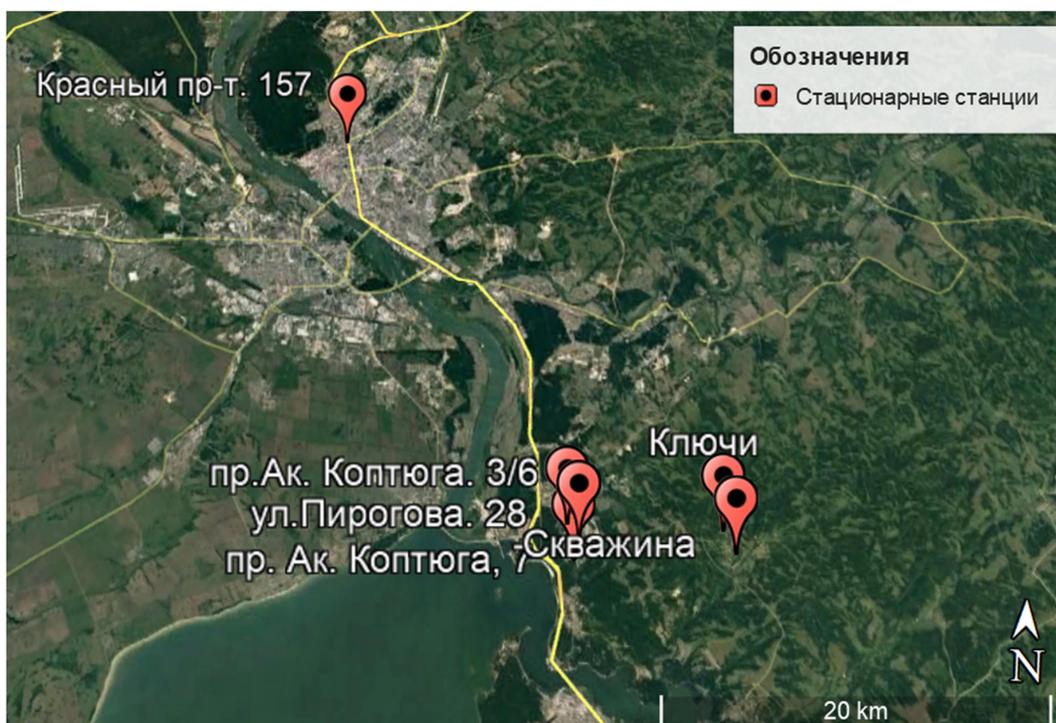


Рисунок 1.10 – Расположение стационарных сейсмостанций, установленных в зданиях Новосибирской области

Таблица 1.5 – Сведения о стационарных сейсмических станциях СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 г.

№	Адрес расположения пункта наблюдения	Тип оборудования	№ регистратора /Региональный код	Координаты		Дата открытия
				Широта N	Долгота E	
1	Ключи Скважина	GD-4.5, «Байкал-8»	KLCH-DE	54.8396	83.2372	01.2021
2	Ул. Пирогова д.28	GD-4.5, «Байкал-8»	UNVR-DH	54.8514	83.0980	01.2021
3	Пр-т ак. Коптюга д.7	GD-4.5, «Байкал-8»	SVSH-DE	54.8436	83.1027	04.2021
4	Пр-т ак. Коптюга д.3/6	GD-4.5, «Байкал-8»	ETLN-DH	54.8443	83.1067	06.2021
5	Красный пр-т 157	GD-10, «Байкал-7»	240	55.0586	82.9116	09.2021
6	П. Каинская Заимка. ул Серебряное Озеро д.7	GD-10, «Байкал-7»	232	54.8763	83.1405	09.2021
7	Ключи КПП	GD-10, «Байкал-7»	120	54.8505	83.2288	10.2021
8	Ключи Свайный дом	GD-10, «Байкал-7»	60	54.8510	83.2275	10.2021
9	Ключи Жилой дом	GD-10, «Байкал-7»	67	54.8500	83.2269	10.2021
10	Ул. Пирогова д.26	GD-10, «Байкал-7»	120	54.8504	83.09766	09.2021

Сейсмическое оборудование станции состоит из регистратора сейсмически сигналов и велосиметра. Для электроснабжения оборудования использовано подключение USB-порта с питанием от электрической сети, в качестве резервного питания (в случае отключения электричества в сети) используются элементы питания, установленные в регистратор. Станции с типом регистратора «Байкал-8», оборудованы микрокомпьютером для хранения, сбора и передачи сейсмических данных, а также предоставления возможности удаленного контроля оборудования сейсмостанции. Сбор данных со станций с типом регистратора «Байкал-7» производится в ручном режиме, при считывании USB-флэш накопителя. Полученные данные поступают в центр сбора и хранения данных.

Обработка данных производится в ручном режиме с использованием программного обеспечения «SpectrumSeism», разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН.

Места установки сейсмостанций выбраны с учетом различными условий, таких как тип фундамента, высотность сооружений, удаленность от городского трафика и т.п.

1.4 Изучение строения недр по сейсмическим данным

Для регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов, при изучении строения недр Земли, в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН используются автономные трех- и четырехканальные регистраторы семейства «Байкал» с сейсмоприемниками различного типа.

Регистраторы «Байкал-АСН» разработаны в ФИЦ ЕГС РАН (Сибирское отделение), «Байкал-7» разработаны и произведены совместно с ООО НППГА «Луч», и по функциональным возможностям аналогичны известной американской системе REFTEK-125 (рисунок 1.11). По основным функциональным возможностям и характеристикам регистраторы аналогичны. Приборы «Байкал-7» отличаются более современной элементной базой. Каждый регистратор представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя трехканальный (для регистраторов «Байкал-АСН») или 4-канальный (регистраторы «Байкал-7») 24-х разрядный аналого-цифровой преобразователь, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник (внешняя антенна) и сменные гальванические элементы питания (возможно подключение внешнего аккумулятора).

Регистраторы устанавливаются в местах проведения измерений, к ним подключается сейсмическая коса с сейсмоприемниками (при однокомпонентной разнесенной в пространстве регистрации), или трехканальные сейсмоприемники (при точечной многокомпонентной регистрации). Запись производят в непрерывном или старт-

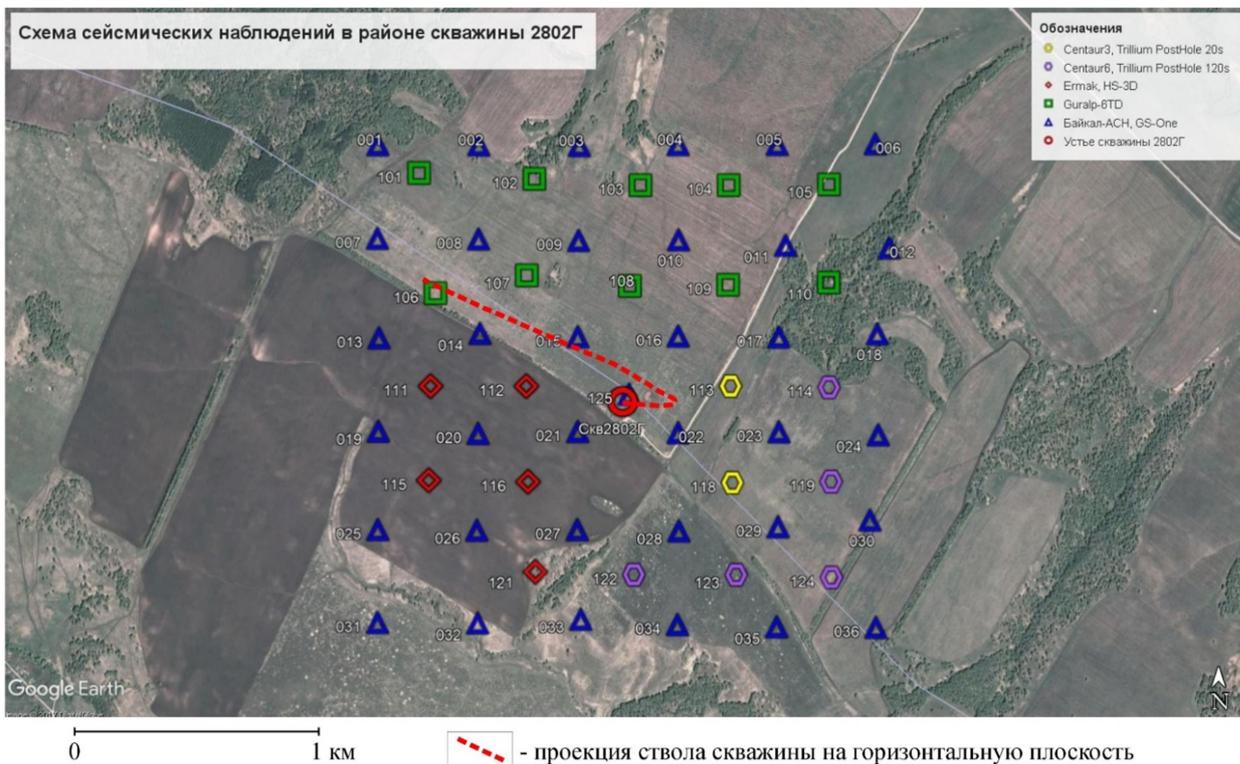
стопном режиме (по таймеру или критериям). Задание программы работы регистратора и считывание записанной информации происходит по порту USB (на компьютере устанавливается специализированное программное обеспечение), стартовая и финишная синхронизации по GPS производятся с использованием внешней («Байкал-АСН») или внутренней («Байкал-7») антенны. Регистраторы имеют встроенные функции самодиагностики, устроенные таким образом, чтобы исключить получение некондиционных или бракованных записей (т.е. если прибор не проходит тесты самодиагностики, то он не включается на запись и выдает ошибку на световом индикаторе).

Регистраторы «Байкал-АСН» и «Байкал-7» в силу своей автономности и компактности применяются при организации сейсмических систем наблюдения практически любой конфигурации. На рисунках 1.12 - 1.13 показаны примеры установки сейсмических регистраторов и схемы сейсмических наблюдений, реализованные на практике при проведении сейсморазведочных исследований.



Рисунок 1.11 – Автономные трехканальные регистраторы «Байкал-7»

а)



б)



Рисунок 1.12 – Реализованная схема наблюдений (а) и пример установки регистратора «Байкал-АСН» с трехкомпонентным сейсмоприемником GS-One при выполнении сейсмических исследований на Бавлинском месторождении (Респ. Татарстан, 2017 г)

а)



б)

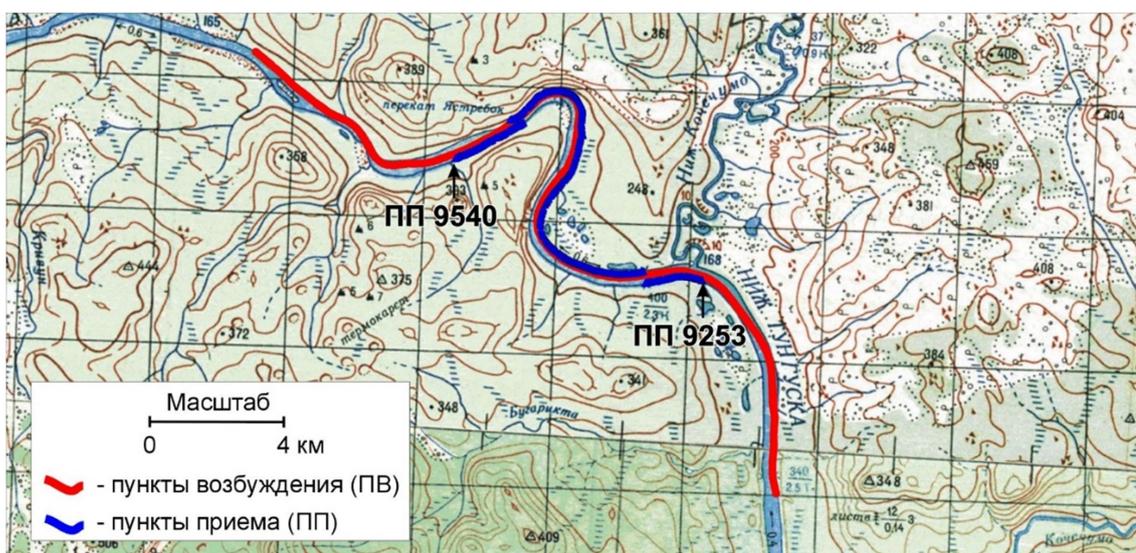


Рисунок 1.13 – Установка сейсмической аппаратуры «Байкал-АСН» с сейсмическими косами и сейсмоприемниками GS-20DX для проведения теста на идентичность (а) и схема опытных работ (б) при речных сейсморазведочных исследованиях (р. Нижняя Тунгуска, 2012 г)

1.5 Изучение строения недр по электроразведочным данным и мониторинг вариаций электромагнитных полей

Для проведения электромагнитных исследований используется электроразведочный комплекс «Байкал МЭРС-Т» в комплекте с коммутатором тока ГТИ-200.

Для определения и уточнения геоэлектрических характеристик верхней части разреза (до глубины ~ 150 м), необходимых для привязки интерпретационной модели метода ЗС, выполняются работы методом электротомографии с использованием аппаратуры «Скала 48».

Измеритель «Байкал МЭРС-Т»

В количестве 5 автономных приборов.

Измеритель разрабатывался и применяется для многокомпонентной регистрации переходного процесса от излучающего контура (Q) произвольной формы (квадрат, прямоугольник) и от линии АВ. Регистрация в точке (пикет) проводится одновременно на четыре независимых входа: высокочастотный вход (q1), низкочастотный вход (q2) и две ортогональные приемные линии (MN1, MN2).

В регистраторах «Байкал МЭРС-Т» предусмотрено два режима работы:

- многокомпонентная регистрация в автономном режиме;
- многокомпонентная регистрация в телеметрическом режиме.

Многоканальная телеметрическая система, предназначена для организации, как профильной, так и площадной систем регистрации высокой плотности (электромагнитная антенна).

Система МЭРС-Т имеет модульную структуру, состоящую из отдельных регистраторов. Каждый регистратор является 4-канальным прибором для сбора данных, при этом три низкочастотных канала (до 4 кГц) созданы на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 31 бита, и один высокочастотный канал (до 100 кГц) - на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бита. В состав регистратора входит GPS модуль, который привязывает измеряемые данные к всемирному времени (UTC) не хуже 1 мкс, съемная флеш-карта SD с файловой системой FAT32. Регистратор имеет два интерфейса: Ethernet и RS-232. По Ethernet производится управления приборами, задание параметров работы, запуск регистрации (остановка), контроль состояния прибора, скачивание данных с флеш-карты, работа в режиме телеметрии. По RS-232 производится управление приборами, задание параметров работы, запуск регистрации (остановка), контроль состояния приборов. Полевые модули располагаются непосредственно у приемных петель (ПП). Предусмотрено четыре независимых входа для регистрации сигналов от разных секций

приемной петли (отличающихся, например, количеством витков) и приемных линий МН. Линии связи (ЛС1 – ЛС4). Полевой измеритель состоит из устройства управления, АЦП, усилителя, встроенного источника питания. Прибор герметичен, защищен от воздействия факторов окружающей среды.

Основные технические характеристики приведены в таблице 1.6. Внешний вид модуля регистратора приведен на рисунке 1.14, рабочее окно оператора с графическим отображением процесса регистрации сигнала на рисунке 1.15.

Таблица 1.6 – Характеристики измерителя «Байкал МЭРС-Т»

1. Тип и марка регистрирующей станции (измерителя)		Многоканальная телеметрическая станция «Байкал МЭРС-Т»
Число каналов в каждом модуле	шт.	4
Число модулей	шт.	5
Разрядность данных	бит	24 (ВЧ канал), 31 (НЧ канал)
Частота дискретизации	кГц	ВЧ канал 100, 50, 25, 12.5 НЧ канал 4, 2, 1, 0.5, 0.2
Коэффициент усиления		1,8,16,32,64
Тип входов		дифференциальный
Шум, приведённый ко входу	мкВ	< 0.2
Динамический диапазон	дБ	110 (ВЧ 100 кГц) 135 (НЧ 4 кГц)
Стабильность внутреннего генератора (-30 - +60 °С)	с	2*10 ⁻⁷
Точность привязки времени Встроенный GPS	мкс	± 1
Объём энергонезависимой памяти.	Гб.	До 32 (флэш-карта)
Времена регистрации	с	0.00001÷64
Синхронизация работы приёмников-регистраторов		GPS-контроллеры
Точность синхронизации	мкс	1
Интерфейсы		Ethernet RS-232
файловая система		FAT-32
Потребляемая мощность	Вт	< 2.5
Диапазон рабочих температур	°С	-30 ÷ +60
Масса	кг	2.0
Пылевлагоустойчивость		IP 67

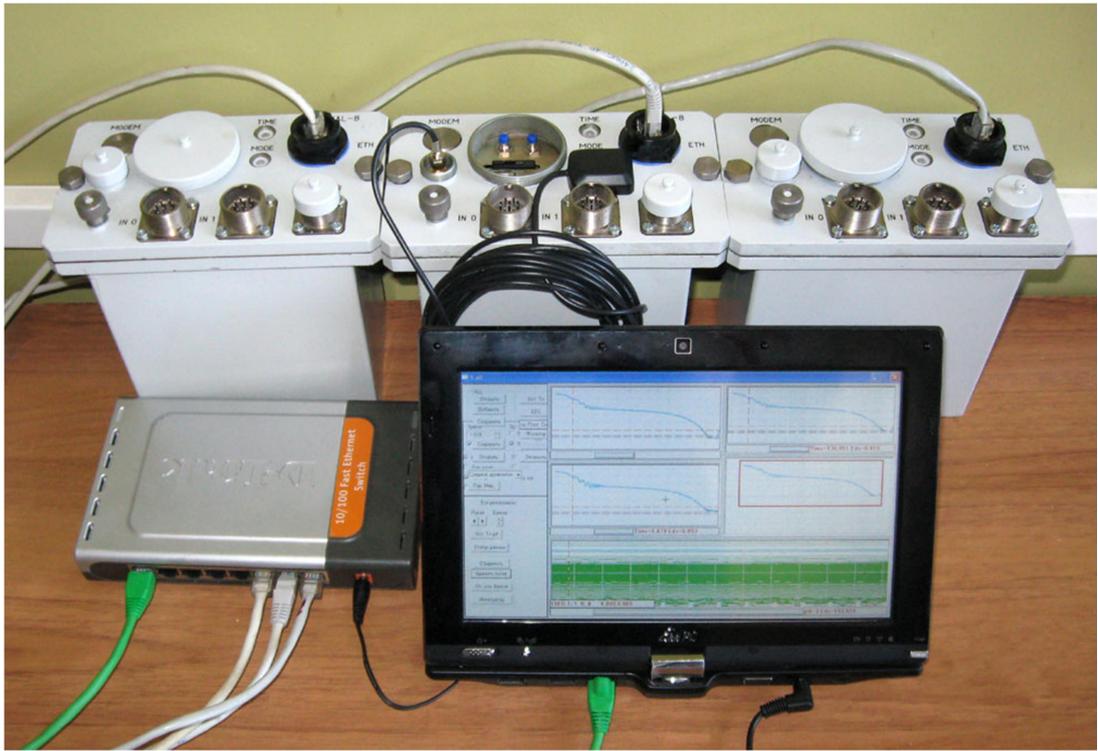


Рисунок 1.14 – Измерительные модули «Байкал МЭРС-Т»

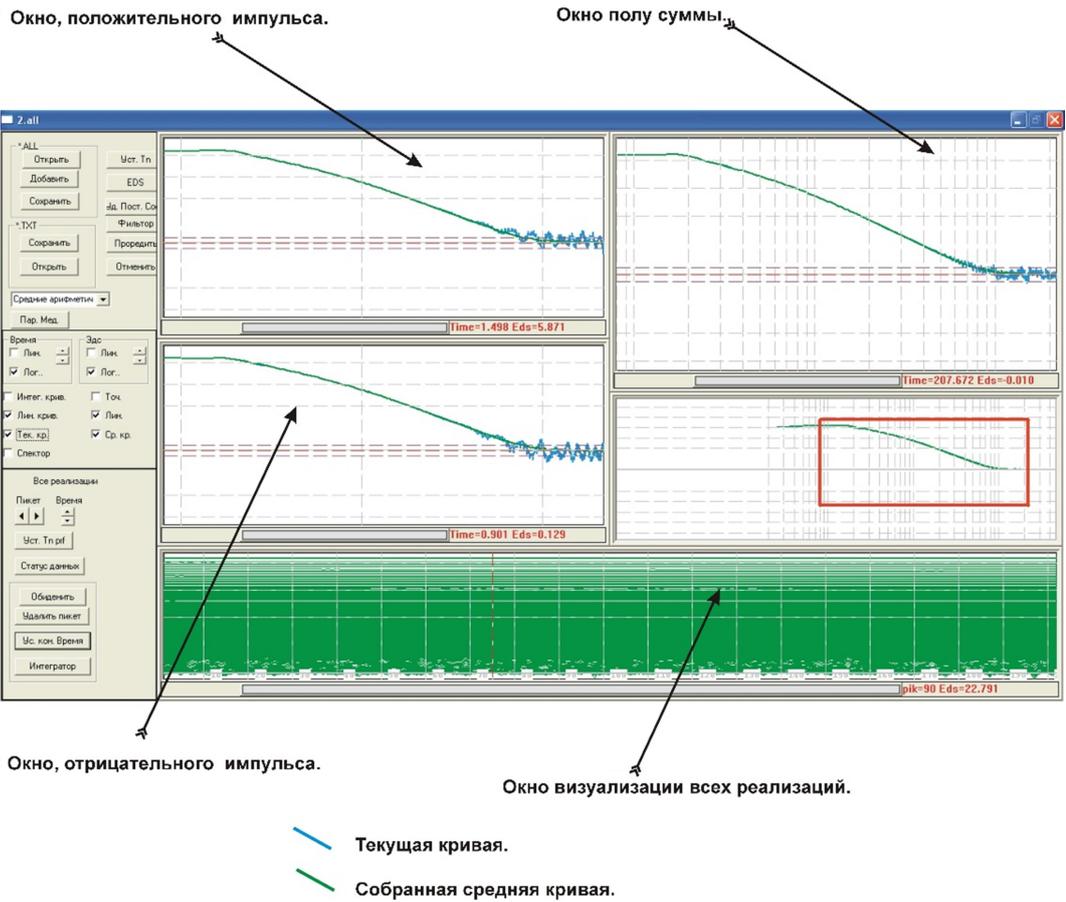


Рисунок 1.15 – Рабочее окно оператора, измеритель «Байкал МЭРС-Т»

Генератор токовых импульсов (ГТИ 200)

Для возбуждения импульсного тока, в генераторном контуре (Q) использовался коммутатор тока, собранный на IGBT транзисторах.

Источниками напряжения на входе генератора являются:

- аккумуляторная батарея, необходимой емкости, с напряжениями от 12В до 600 В;
- генератор переменного тока, мощностью до 100 кВт.

В генераторе токовых импульсов реализована цифровая запись формы токовых импульсов.

Основные технические характеристики приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Характеристики коммутатора тока на IGBT транзисторах с амплитудой тока до 200 А

Параметр	Значение
Входное рабочее напряжение: по переменному току по постоянному току	до 380 В 12 – 600 В
Максимальный рабочий ток	200 А
Максимальная мощность	До 100 кВт
Падение напряжения на коммутаторе не больше	6 В
Точность измерения рабочего напряжения	1%
Точность измерения рабочего тока	0.5% (0,1 А)
Форма тока в генераторном контуре	П – образный импульс
Нестабильность формы рабочего выходного тока при питании переменным 3 фазным напряжением	15 %
Длительность рабочего импульса тока (прямого или инверсного)	0.005 – 16 секунд
Суммарная длительность рабочего импульса тока и паузы	0.01 – 32 секунды
Полный цикл двух разнополярных рабочих импульсов и двух пауз	0.02 – 64 секунды
Длительность фронта выключения на активную нагрузку не больше	200 нс.
Точность привязки времени (встроенный GPS)	0.5мкс
Цифровая регистрация формы токовых импульсов	Частота дискретизации 20 кГц
Независимое напряжение питание устройства управления	12 вольт (аккумулятор)
Условная глубинность исследований: с локальной ПГ- конструкцией с закреплённым источником	до 1500 метров до 4000 метров
Формат записи параметров	внутренний
Внешний интерфейс	СОМ порт РС

Внешний вид генератора токовых импульсов (ГТИ 200), формы цифровых записей последовательности прямоугольных импульсов и характеристики фронта выключения отображены в виде графической информации в окне оператора (рисунки 1.16-1.18).



Рисунок 1.16 – Генератор токовых импульсов с амплитудой тока до 200 А

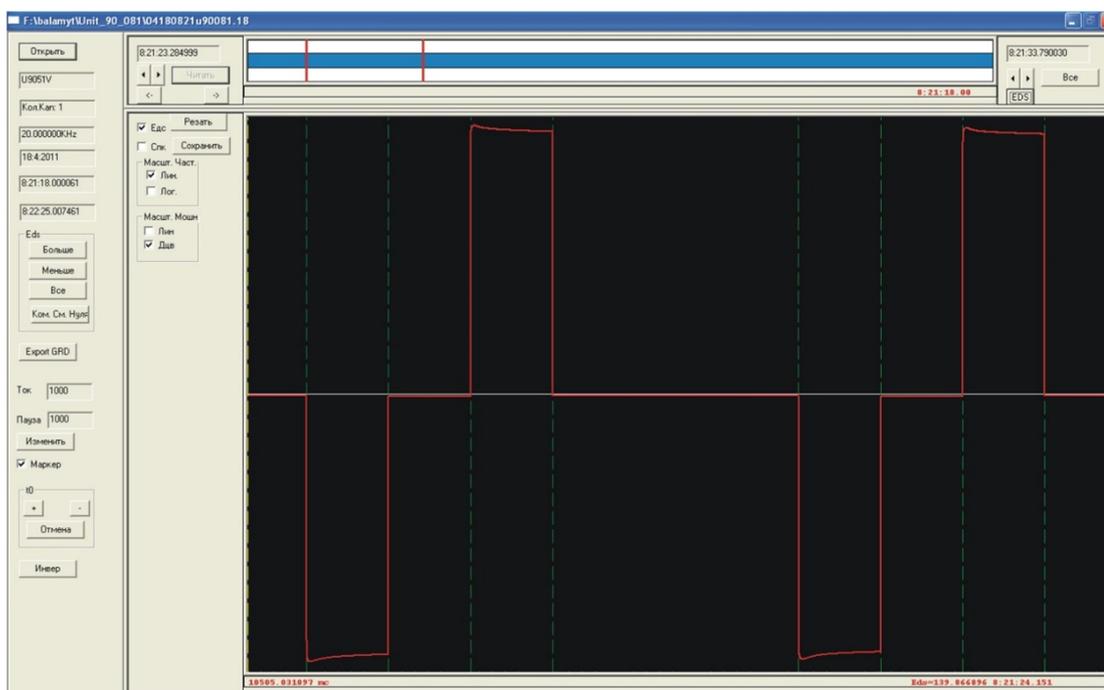


Рисунок 1.17 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись формы токовых импульсов

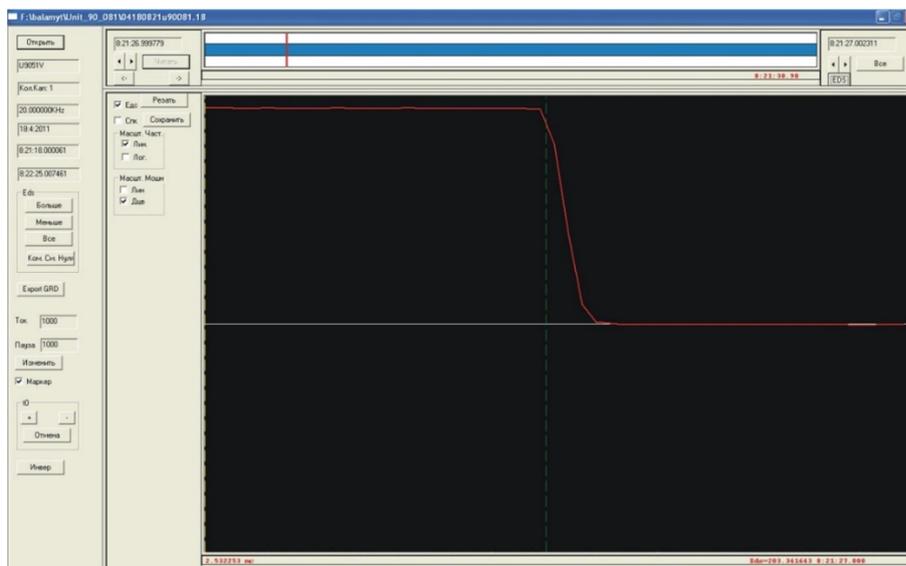


Рисунок 1.18 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись фронта выключения токового импульса

Многовитковая приемная рамка

Датчиком регистрации переходного процесса служила многовитковая рамка, разработанная, изготовленная и прошедшая лабораторные и полевые тестирования.

Переносной датчик ЭМ-поля выполнен в виде круга на жестком каркасе площадью 1.28 м², число витков -96, индуктивность 0,71 мГн. Коэффициенты усиления: $K_f = 1, 10, 100$. Выход дифференциальный. Эквивалент квадратной одновитковой рамки со стороной равной от $\min 11.085$ м до $\max 156.767$ м.

Внешний вид приведен на рисунке 1.19. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.8.



Рисунок 1.19 – Регистратор «Байкал МЭРС-Т» и приемная многовитковая рамка

Таблица 1.8 – Характеристики многовитковой приемной рамки

Параметр	Значение
Диаметр	1.277 м
Площадь (S)	1.28 м ²
Число витков (n)	96
Индуктивность (L)	0.71 мГн
Коэффициент усиления (K ус)	1; 10; 100; 2; 20; 200.

Электроразведочная станция «Скала-48»

Среди ряда современных российских разработок, реализующих метод электротомографии, можно выделить аппаратуру «Скала-48» (рисунок 1.20). Аппаратура разработана в лаборатории электромагнитных полей Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН (ИНГГ СО РАН) и к настоящему моменту целый ряд комплектов «Скала-48» успешно применяется при решении различного рода научных и инженерных задач. Ниже приведены технические характеристики аппаратуры.



Рисунок 1.20 – Аппаратура «Скала-48», внешний вид и пример полевых работ

Аппаратурное исполнение

Прибор смонтирован в компактном (43 x 28 x 33 см) ударопрочном плавающем корпусе. Вес аппаратуры 12 кг. В дополнение к внутреннему аккумулятору (12 В, 7 А·ч) через разъёмы на лицевой панели к прибору можно подключить внешнее питание (12 В). Управление осуществляется при помощи плёночной клавиатуры. Прибор снабжен монохромным жидкокристаллическим пятидюймовым графическим дисплеем с разрешением 240 на 128 точек с синей подсветкой.

Основа аппаратуры - микроконтроллер Philips NXP LPC2378 с ядром ARM7 и программируемая логическая матрица (ПЛМ) Xilinx Spartan-3E (рисунок 1.21). Аппаратура включает матричный релейный коммутатор (4 линии, 48 контактов), осуществляющий коммутацию как приемных, так и питающих линий. Такая

конфигурация рассчитана на работу с двумя электроразведочными кабелями, по 24 электрода каждый. Для их подключения на лицевой панели прибора предусмотрены два разъёма. Дополнительно на панель выведены клеммы питающей и приёмной линий, предназначенные для работы с традиционной четырехэлектродной установкой и выносными электродами.

Источник тока изолирован от всей схемы и имеет мощность до 200 Вт. Максимальный выходной ток источника 1.5 А, максимальное напряжение 750 В. Входные цепи защищены от перенапряжения до 1000 В, а выходные - от короткого замыкания.

Измерительный канал выполнен с применением изолирующего усилителя постоянного тока, аналогичный канал используется и для измерения рабочего тока. В аппаратуре применяется прецизионный 24х-разрядный сигма-дельта АЦП AD7799.

Диапазон регистрируемых напряжений в измерительной линии лежит в пределах от 0.05 мВ до 200 В. Погрешность измерения полезного сигнала не хуже 2.5 % и зависит от величины питающего тока. Диапазон усиления входного усилителя изменяется автоматически.

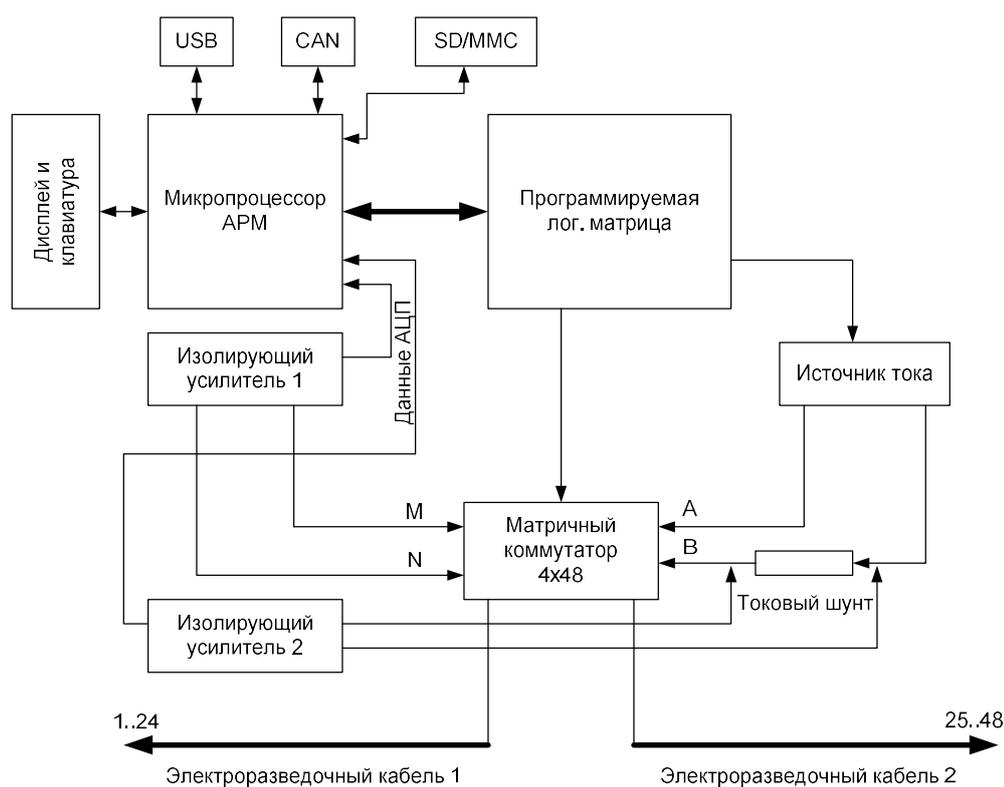


Рисунок 1.21 – Структурная схема аппаратуры «Скала-48»

Результаты измерения сохраняются на встроенной флэш-карте формата SD/MMC объёмом до 4 Гб с файловой системой FAT32. Данные содержат полную информацию о токе, напряжении, относительном стандартном отклонении и используемой рабочей

конфигурации. В аппаратуре реализована возможность выбора числа накоплений и времени интегрирования при измерениях.

Параметры аппаратуры

Общие

Количество электродов – 48

Внешнее питание – 12 В

Внутренний аккумулятор – 12 В, 7 Ач

Сенсорный экран – 12", 240 x 128

Внутренняя память до – 2 Гб

Связь с ПК – USB 2.0

Степень защиты корпуса с закрытой крышкой – IP 67

Степень защиты корпуса с открытой крышкой – IP 54

Рабочая температура – от -20 до +40 °С

Габариты 420 x 340 x 230 мм

Вес 11 кг

Измеритель

Число измерительных каналов – 1

Входное сопротивление – 10 МОм

Ширина полосы пропускания – 20 Гц

Диапазон измеряемых напряжений – от ± 0.1 мВ до ± 250 В

Ослабление помех промышленной частоты 50, 60 ГЦ – 65 дБ

Точность измерения напряжения – 1 %

Разрядность АЦП – 24 бита

Защита от перенапряжения до – 1 кВ

Внутренний генератор

Рабочие частоты – 3.33, 0.86, 0.78, 0.74, 0.69, 0.66, 0.60 Гц

Выходной ток – 1 ÷ 2000 мА

Мощность максимальная – 200 Вт

Точность измерения тока – 1 %

Максимальное напряжение – 500 В

Защита от короткого замыкания – есть

Технические средства

Для выполнения исследований используются следующие измерительная техника, транспортные средства и оборудование, представленные в таблице 1.9.

Таблица 1.9 – Аппаратура и оборудование

№ п/п	Наименование	Кол-во
1.	Многоканальная электроразведочная станция, телеметрическая «Байкал МЭРС-Т» (5 модулей, по 4 канала в каждом модуле)	1
2.	Электроразведочная станция «Скала – 48»	1
3.	Коммутатор тока ЗСБ с амплитудой силы тока в импульсе до 200 А	1
4.	Датчик ЭМ-поля	5
5.	Генератор переменного тока, мощностью до 4.5 кВт.	2
6.	Генератор переменного тока, мощностью до 1.5 кВт.	2
7.	Персональные компьютеры «Ноутбук»	5
8.	Цифровые осциллографы	2
9.	Спутниковые приемники GPS	5
10.	ProMark 3	4
11.	Garmin 76	10
12.	Система для обработки геодезических данных GPS Pathfinder Office V2-80	1
13.	Радиостанции УКВ марки GM-300	15
14.	Программный комплекс «Эра».	1
15.	Программный комплекс EMS.	1
16.	Провод ГППП (3 Ом/км)	6 км
17.	Аккумуляторные батареи (в необходимом количестве)	Комплект
18.	Рабочий инструмент	Комплект
19.	Измерительные приборы	Комплект

1.6 Мобильный аппаратно-программный комплекс регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных

В течение 2022 г Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН продолжил эксплуатацию Мобильного аппаратно-программного комплекса регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных (далее – Комплекс).

Решена задача создания сейсмической станции, которая имеет возможность передавать данные в режиме онлайн из любой точки, где возможно подключение к сети интернет, с использованием широкого спектра сейсмических датчиков (велосиметров, акселерометров) как отечественного, так и зарубежного производства; быстрого переноса Комплекса из одного места в другое без дополнительных настроек и защиты потери данных от нестабильности соединения с сетью.

Благодаря унификации протоколов передачи данных и устройства серверной части Комплекса стала возможной быстрая интеграция вновь вводимых в строй сейсмостанций в УНУ ФИЦ ЕГС РАН.

Принципиальная схема Комплекса приведена на рисунке 1.22.

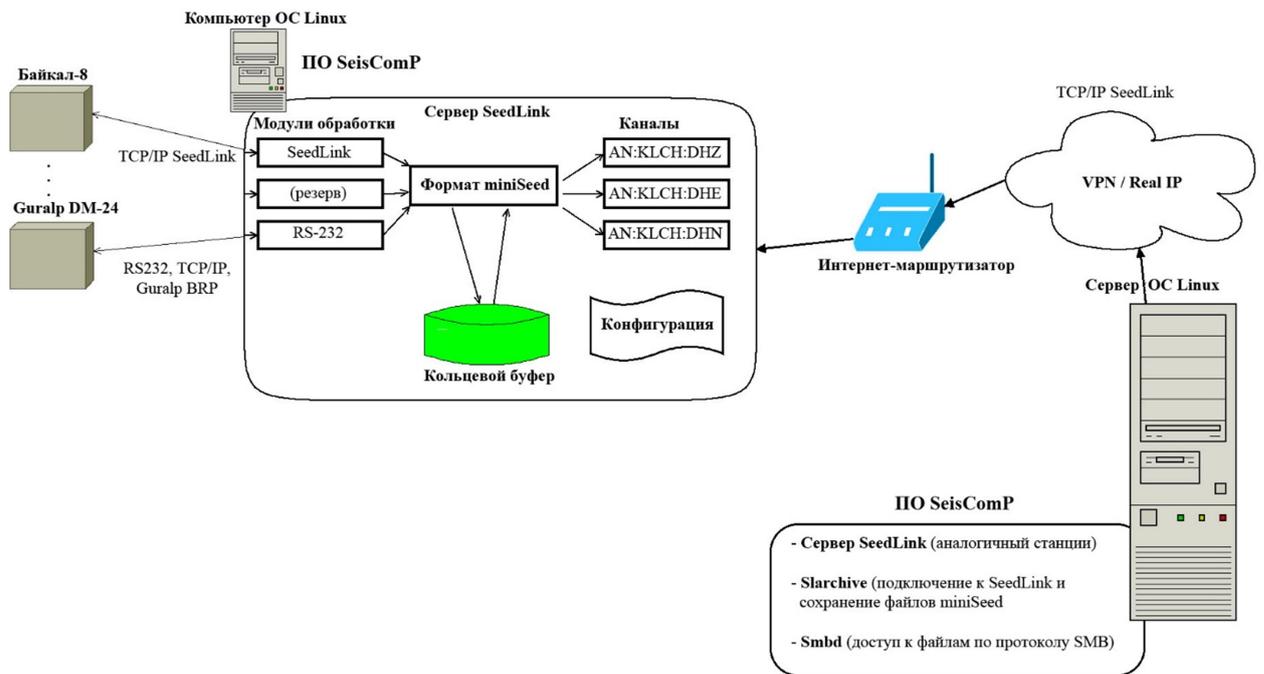


Рисунок 1.22 – Архитектура разработанного Комплекса

Аппаратная часть Комплекса, устанавливаемая непосредственно в точке регистрации состоит из следующих компонент:

- сейсмического датчика (используется GD-4.5);
- регистратора Байкал-8;
- микрокомпьютера Raspberry Pi;
- роутера для организации локальной сети и доступа в интернет.

Использование универсального роутера позволяет получить доступ к сети передачи данных через любое возможное подключение – DSL, Ethernet или модем доступного оператора связи без нарушения внутренней организации локальной сети (регистратор и микрокомпьютер), что обеспечивает мобильность Комплекса. Следует дополнительно отметить, что с одним роутером могут одновременно работать несколько регистраторов и микрокомпьютеров, при необходимости.

Микрокомпьютер Raspberry Pi (рисунок 1.23) работает под управлением ОС Seismobian, разработанной на базе стандартного дистрибутива Linux (RaspiOS). В операционную систему включены средства, позволяющие:

- организовать туннель (VPN) между микрокомпьютером и центром сбора данных;
- проводить сбор данных с регистратора;
- обеспечивать временное (циклическое) хранение собранных данных во внутренней памяти;
- по запросу основного сервера VPN передавать накопленные данные в центр сбора данных.



Рисунок 1.23 – Микрокомпьютер Raspberry Pi

В нормальном режиме (при условии непрерывной связи с основным сервером) сейсмические данные передаются с задержкой в 1-2 с, что позволяет считать Комплекс работающим в режиме реального времени. При возникновении проблем с каналом передачи данных, информация буферизируется и после восстановления соединения вновь передается в основное хранилище данных.

Основной сервер VPN, так же выполняющий роль центра сбора данных, установлен в серверном помещении СЕФ ФИЦ ЕГС РАН (совместно с АСФ ФИЦ ЕГС РАН) и построен на базе системного блока под управлением ОС Linux. Сервер обеспечивает непрерывный опрос микрокомпьютеров, доступных в туннелях VPN по протоколу seedlink, и формирует файловую структуру данных, полученных с сейсмостанций, в формате miniseed.

Доступ к серверу и запрос данных возможны как с помощью ПО Seisgram2K (для получения волновых форм в режиме реального времени), так и стандартными средствами протокола SMB для изучения архивных данных (рисунок 1.24).

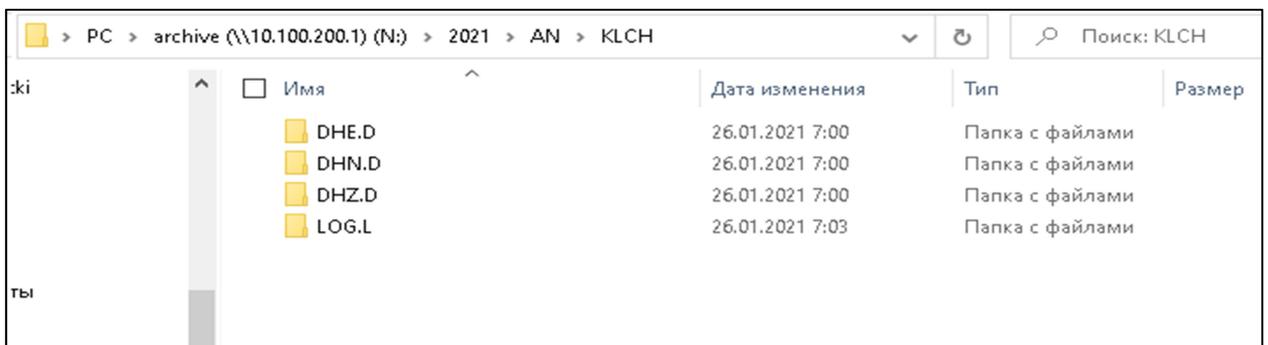


Рисунок 1.24 – Доступ к архиву данных (ОС Windows 10, OpenVPN)

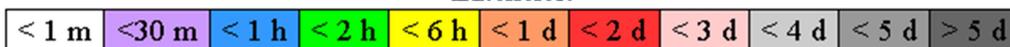
На сервере организован специальный web-сервис, который позволяет отслеживать поступление данных (задержки буферизации и актуальность информации) в режиме реального времени (рисунок 1.25):

"СЕФ ФИЦ ЕГС РАН"

Real-time stations

Station	Latencies		
	Data	Feed	Diff.
AN BSTK	2.8 s	1.0 s	1.8 s
AN ETLN	0.7 s	0.1 s	0.6 s
AN IMVG	1.2 s	0.3 s	0.8 s
AN KLCH	1.3 s	0.5 s	0.8 s
AN KZBS	1.2 s	0.3 s	0.9 s
AN MKSБ	0.9 s	0.3 s	0.6 s
AN RSPD	0.8 s	0.0 s	0.8 s
AN SFGS	1.2 s	0.3 s	0.8 s
AN SVSH	0.8 s	0.1 s	0.7 s
AN UNVR	0.9 s	0.1 s	0.8 s

Latencies:

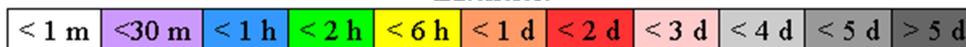


"СЕФ ФИЦ ЕГС РАН" - Station KZBS

Kuzbass, Russia

Station/ Channel	Data		Feed		Diff.
	Last Sample	Latency	Last Received	Latency	
KZBS 00.LOG	2021-09-08 02:1	58.0 s	2021-09-08 02:16:38.34	57.7 s	0.3 s
KZBS 0A.DHE	2021-09-08 02:17:34.59	1.4 s	2021-09-08 02:17:35.42	0.6 s	0.8 s
KZBS 0A.DHN	2021-09-08 02:17:34.70	1.3 s	2021-09-08 02:17:35.50	0.5 s	0.8 s
KZBS 0A.DHZ	2021-09-08 02:17:34.41	1.6 s	2021-09-08 02:17:35.41	0.6 s	1.0 s
KZBS 0B.DEE	2021-09-08 02:17:34.57	1.4 s	2021-09-08 02:17:35.42	0.6 s	0.9 s
KZBS 0B.DEN	2021-09-08 02:17:34.41	1.6 s	2021-09-08 02:17:35.41	0.6 s	1.0 s
KZBS 0B.DEZ	2021-09-08 02:17:34.52	1.5 s	2021-09-08 02:17:35.41	0.6 s	0.9 s

Latencies:



How to [interpret](#) these numbers?

Рисунок 1.25 – Монитор слежения доступности Комплекса

Внешний вид Комплекса на объекте приведен на рисунке 1.26.



Рисунок 1.26 – Комплекс в сборе

Непрерывная регистрация сейсмических сигналов ведется с 19.11.2020, данные в формате miniseed сохраняются в центре обработки данных СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Доступ к данным открывается по запросу. Возможна настройка автоматического сохранения архивов на серверах ЦО ФИЦ ЕГС РАН.

2 ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ЧАСТЬ УНУ

2.1 Аппаратный комплекс ЦОД

Аппаратный комплекс центра обработки данных (ЦОД) с интегрированной программно-алгоритмической системой УНУ построен в виде масштабируемого сегмента локальной вычислительной сети (ЛВС) и состоит из следующих узлов и компонент.

Ядро аппаратной части представлено управляемым маршрутизатором, к которому непосредственно подключены сервер системы хранения данных (СХД), коммутатор и рабочие станции (на базе ПК), на которых осуществляется предварительная обработка записей с сейсмических и электромагнитных регистраторов, поступающих в ЦОД УНУ для дальнейшего анализа. Такая конфигурация обеспечивает скорость обмена данными в сегменте ЛВС в 1 Гбит/с и гарантирует надежность хранения информации в силу использования дисковых массивов по стандартам RAID1 и RAID5.

Персональные компьютеры специалистов по работе с УНУ подключаются к ядру комплекса через коммутатор ЛВС, обеспечивающий скорость обмена данными в 1 Гбит/с (рисунок 2.1).

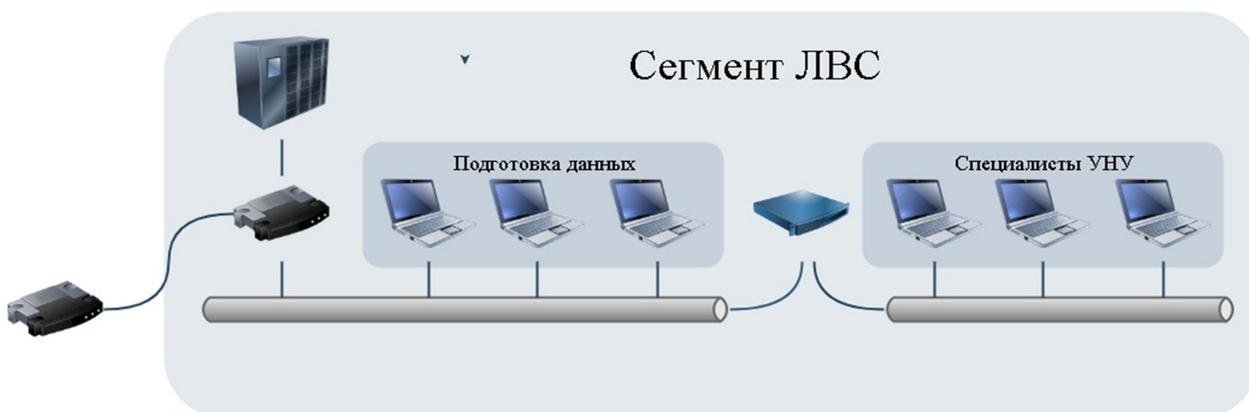


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема построения сегмента ЛВС

Программно-алгоритмическая система УНУ представлена серверной частью (реляционная база данных, развернутая на сервере СХД) и клиентской, функционирующей на рабочих станциях ядра комплекса и персональных компьютеров специалистов (рисунок 2.2), что позволяет эффективно проводить обработку больших объемов данных.

Реализованное разделение прав доступа ко всем видам хранящейся на сервере информации позволяет обеспечить максимально продуктивную работу всех пользователей с одновременным повышением уровня безопасности собранных данных.

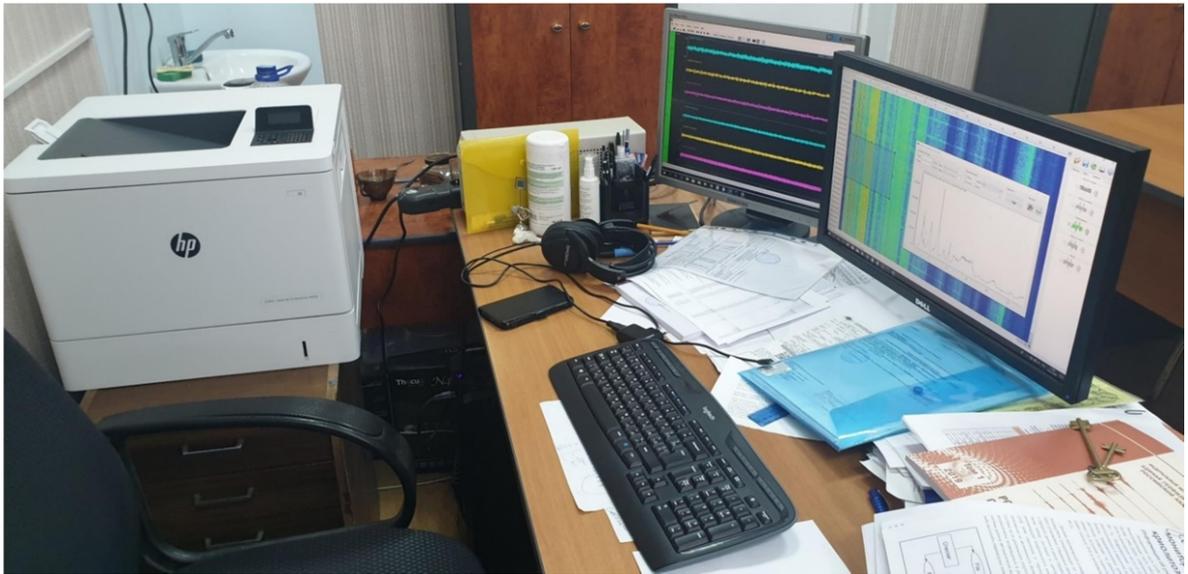


Рисунок 2.2 – Рабочее место специалиста УНУ, анализ и обработка данных

Единый подход в построении архитектуры сегмента ЛВС позволяет эффективно использовать его как в стационарном виде (в серверном помещении СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, в кооперации с АСФ ФИЦ ЕГС РАН, рисунок 2.3), так и быстро разворачивать в передвижном варианте, например, на речных судах.



Рисунок 2.3 – Ядро аппаратной части ЦОД в серверной СО ФИЦ ЕГС РАН

В мобильном (передвижном) варианте ЦОД УНУ может быть развернут, без учёта дополнительных рабочих станций специалистов, практически в любом помещении (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Узлы ядра аппаратной части ЦОД в передвижном варианте УНУ

Используемое программное обеспечение, применяемое для работы УНУ, в большей части является оригинальными разработками сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Для решения ряда задач используется лицензированное ПО – в частности, пакет RadexPro, компании ООО «Деко-геофизика».

2.2 Программно-алгоритмическая часть

Программы для обработки и интерпретации сейсмических сигналов

Программа «SpectrumSeism»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

Назначение: проведение анализа спектров сейсмических записей и их изменений с течением времени.

Форматы файлов: Vibr2, Байкал-10, Роса-А, MiniSeed.

Функции: расчет спектрограмм, спектров, усредненных спектров, графиков изменения амплитуд на заданных частотах, деконволюция сейсмических записей, одинарное и двойное интегрирование/дифференцирование сейсмограмм.

Последняя версия программы и дата: 0.6.4 (16.04.2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.5.

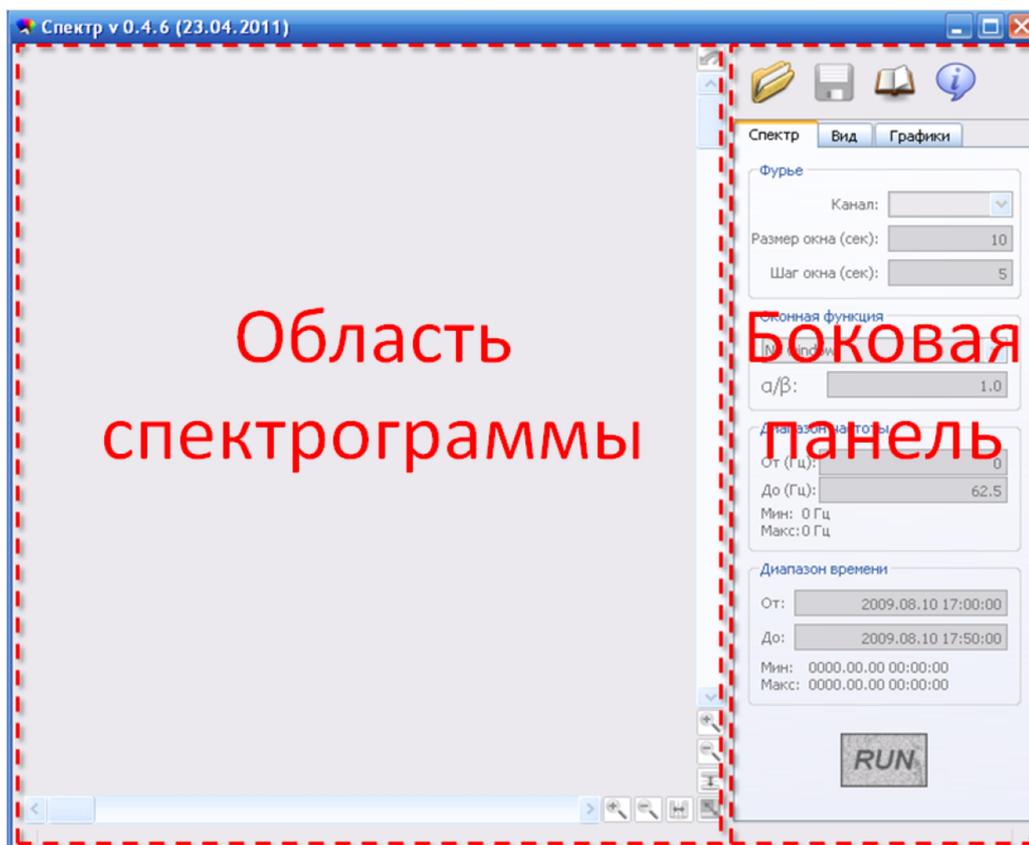


Рисунок 2.5 – Главное окно программы «Spectrum»

Программа «GeoFilters»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, АСФ ФИЦ ЕГС РАН

Назначение: фильтрация сейсмических записей с сохранением в файл

Форматы входных файлов: Vibr2, Байкал-10, Роса-А, MiniSeed

Форматы выходных файлов: Vibr2, Байкал-10, Роса-А, MiniSeed, txt (результат пикировки)

Функции (фильтры): фильтрация с помощью свертки с произвольной амплитудно-фазовочастотной характеристикой; дифференцирование/интегрирование сейсмограмм; умножение на константу; удаление кратковременных высокоамплитудных помех; сглаживание скользящим средним; вычитание постоянной составляющей записи; деконволюция записи; удаление заданных спектральных составляющих из записи; пикировка по STA/LTA алгоритму.

Последняя версия программы и дата: 0.4 (25.01.2016)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.6.

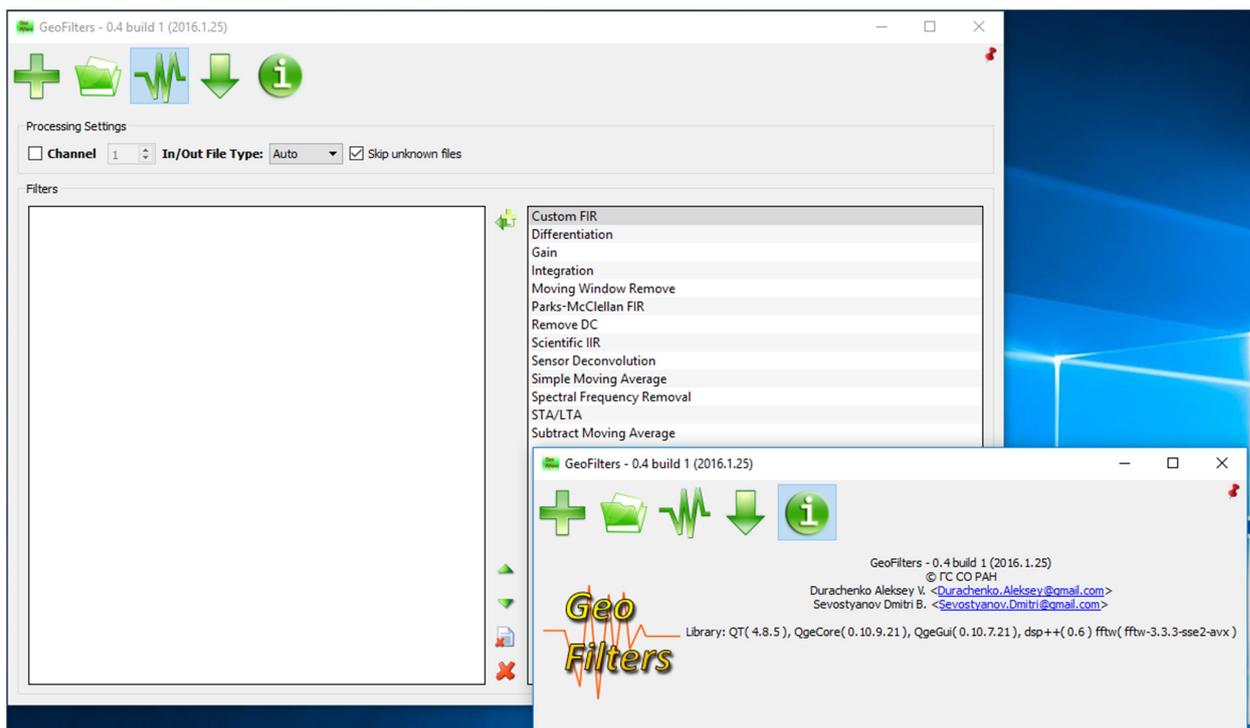


Рисунок 2.6 – Главное окно программы «GeoFilters»

Программа «SSlicer»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

Назначение: монтаж сейсморазведочных сейсмограмм из непрерывных записей регистраторов «Байкал»

Форматы входных файлов: Байкал-10

Форматы выходных файлов: SEG Y

Функции: нарезка и монтаж сейсморазведочных сейсмограмм из непрерывных записей регистраторов «Байкал» с использованием заданных таблично времен сейсмических воздействий и конфигурации системы наблюдения; сохранение результата в виде стандартной сейсморазведочной сейсмограммы в формате SEG Y.

Последняя версия программы и дата: 1.0.1 (03.07.2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.7.

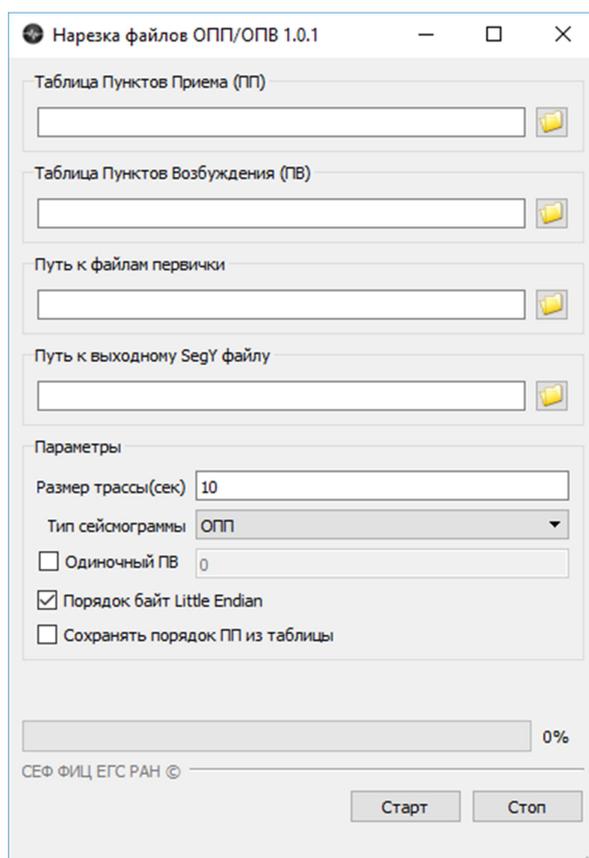


Рисунок 2.7 – Главное окно программы «SSlicer»

Программа «RadExPro»

Для решения задач, связанных с изучением недр Земли, используется лицензированное ПО – «RadExPro».

Разработчик: ООО «Деко–геофизика СК»

Назначение: обработка 3D/2D данных сейсморазведки, интерактивный контроль качества сейсмограмм.

Форматы входных файлов: SEG-D, SEG-Y, пользовательский формат

Функции: Полный набор стандартных алгоритмов обработки данных вплоть до предварительного суммарного разреза (brute stack): корреляция со свип-сигналом, редакция трасс, частотная и FK фильтрация, преобразования Радона, FX и FXY деконволюции, частотно-временное шумоподавление, регулировки усиления, деконволюции, интерактивный скоростной анализ, статические и кинематические поправки, регуляризация, миграции до и после суммирования и др. Удобные средства управления данными: обработка ведется в рамках проектов, возможность посмотреть историю любого набора данных, и др.

Последняя версия программы и дата: 2018.1 (май 2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.8.

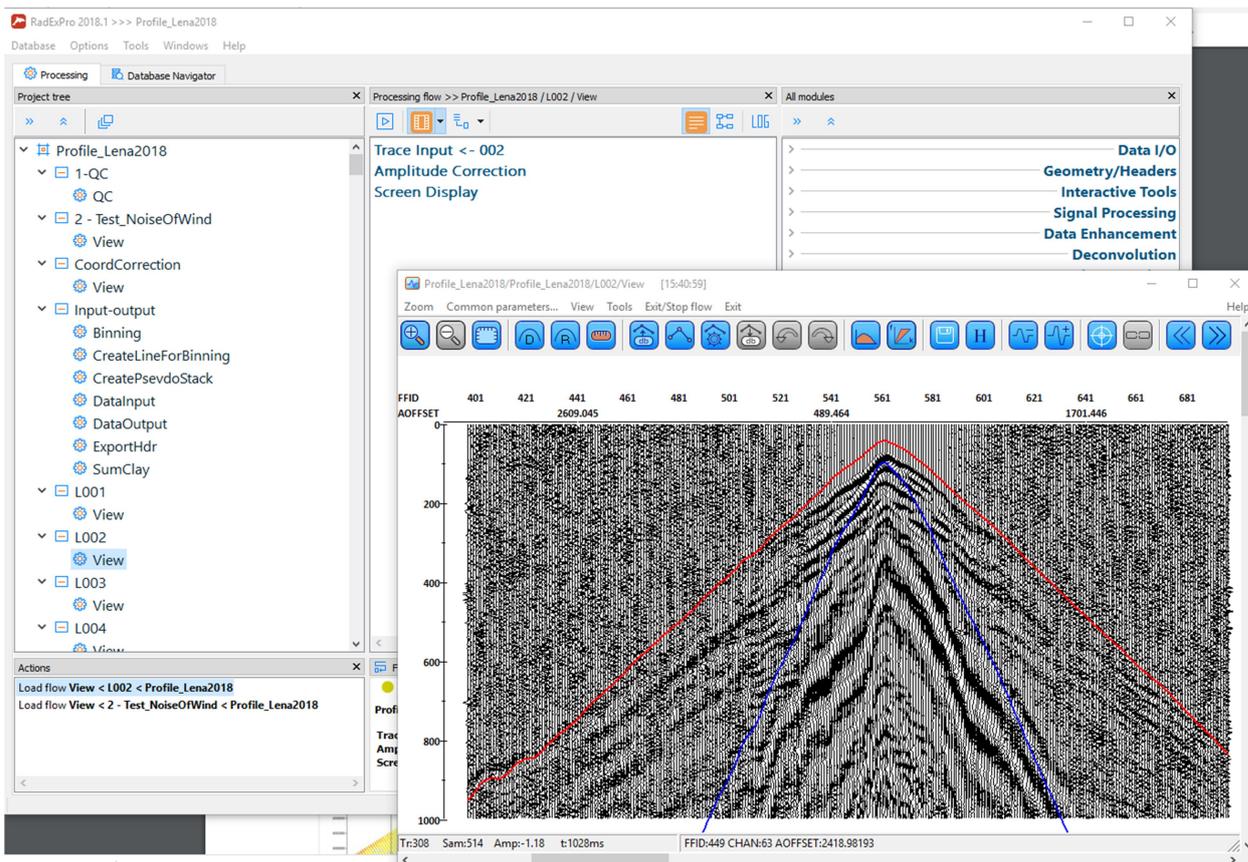


Рисунок 2.8 – Главное окно программы «RadexPro»

Программы для обработки и интерпретации электромагнитных сигналов

Сведения о программно-алгоритмических средствах, используемых при обработке и интерпретации данных электромагнитных сигналов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – программно-алгоритмические средства для обработки и интерпретации данных электромагнитных сигналов

№ п/п	Наименование	Кол-во
1.	Программный комплекс «Эра». (Программно-алгоритмический комплекс интерпретации электромагнитных зондирований в индукционной электроразведке. Новосибирск: ИНГГ СО РАН.)	1
2.	Программный комплекс EMS. (Автоматизированная интерпретация электромагнитных зондирований. Новосибирск: ИНГГ СО РАН)	1
3.	Программный комплекс ZONDTEM1D. (Программа одномерной интерпретации данных метода переходных процессов с любыми установками. ООО «ГЕОДЕВАЙС», Санкт-Петербург)	1

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2022 Г

3.1 Развитие экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических и электромагнитных сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах

3.1.1 Обследование сооружений методом стоячих волн

Исследование посвящено усовершенствованию технологии обследования и контроля состояния конструкций объектов строительства геофизическими методами и дальнейшим созданием автоматизированной системы мониторинга технического состояния объектов строительства по стоячим волнам с возможностью оповещения при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Основной задачей исследования являлось определение динамических характеристик собственных колебаний зданий. В качестве объектов исследований обследованы 5 зданий и сооружения различного типа:

– Объект №1: Здание историко-культурного наследия «Женская гимназия», расположенное по адресу: Тюменская область, г. Тюмень, ул. Володарского, д.6 (рисунок 3.1б);

– Объект №2: «Жилое здание 8-ми этажное», расположенное по адресу: Тюменская область, г. Тюмень, ул. Бабарынка, д. 16Б (рисунок 3.1в);

– Объект №3: Двухуровневая парковка, расположенная по адресу: Тюменская область, г. Тюмень, ул. Республики, 129 ст. 3 (рисунок 3.1а);

– Объект №4: Дворец культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель», расположенный по адресу г. Норильск, Ленинский проспект, 9 (рисунок 3.1г);

– Объект №5: Десятиэтажный жилой дом, расположенный по адресу: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 28 (рисунок 3.1д).

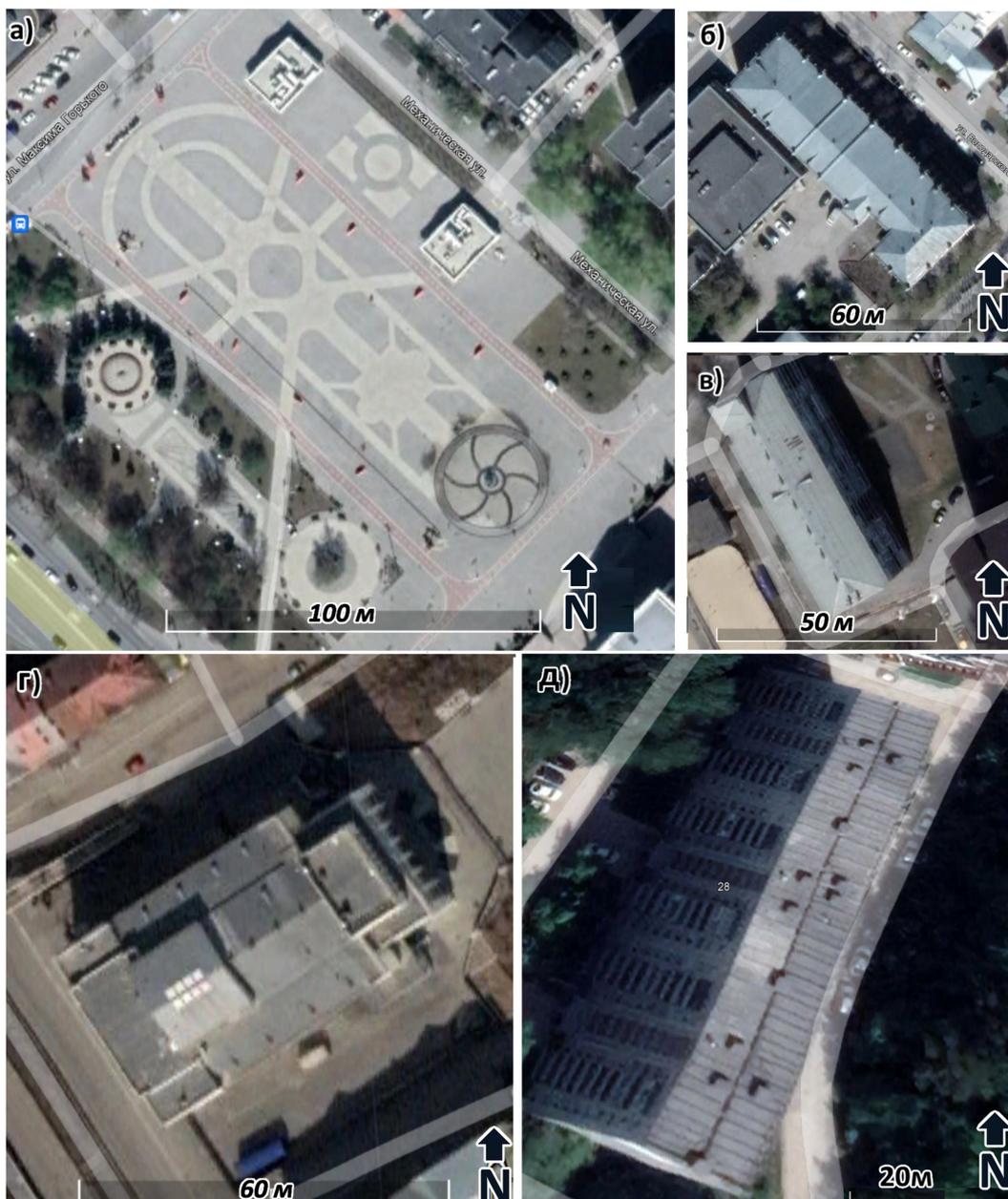


Рисунок 3.1 – Схема расположения исследуемых зданий: г. Тюмень, ул. Республики 129 ст. 3 (а); г. Тюмень, ул. Володарского, д.6 (б); г. Тюмень, ул. Бабарынка, д. 16Б (в); г. Норильск, Ленинский проспект, д.9 (г); г. Новосибирск, ул. Пирогова, д.28 (д)

Используемые методы и оборудование

Для обследования технического состояния сооружений использовался метод стоячих волн [2], который позволяет по данным поля микросейсмических колебаний, зарегистрированных в инженерном сооружении, выделить поле стоячих волн. Метод основан на свойстве когерентности во времени колебаний в стоячих волнах, т.е. для любой пары точек наблюдения в исследуемом объекте, связь между линейными системами, описывающими зарегистрированные колебания стоячих волн, не зависит от времени. Используя данное свойство и алгоритм на основе фильтра Винера, можно преобразовать записанный сигнал сети наблюдения, состоящей из стационарной

(опорной) точки и точек, меняющих свое положение, в запись стоячих волн. Регистрация колебаний здания или сооружения под воздействием микросейсм ведется одновременно в опорной и группе перемещаемых точек. Такими наблюдениями исследуемый объект можно детально покрыть даже с небольшим количеством малоканальной аппаратурой. Далее, согласно методике [2,3], осуществляется преобразование разновременных наблюдений в разных точках здания или сооружения в одновременную запись стоячих волн на всей схеме наблюдений. Это позволяет выделить из зарегистрированного сигнала резонансные частоты обследуемого объекта и определить основные динамические параметры колебаний здания или сооружения (собственные частоты и формы колебаний). Полученная таким образом картина распределения собственных колебаний по выбранным сечениям, позволяет определить аномалии собственных форм, тем самым выделить возможные дефекты конструкции.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовались комплекты 3-канальных автономных регистраторов «Байкал-7», оснащенных велосиметрами GD-4.5 (разработанных и произведенных в ФИЦ ЕГС РАН). Регистратор «Байкал-7» представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 3-х канальный 24-х разрядный аналого-цифровой преобразователь, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник (внешняя антенна) для синхронизации по времени. Основные технические характеристики использованной сейсморегирующей аппаратуры приведены в таблицах 3.1-3.2.

Перед проведением измерений, проводилось тестирование аппаратуры на идентичность. Для этого все приборы были помещены в одну точку и проведена одновременная регистрация микросейсмических колебаний в течение 10 минут (рисунок 3.2). Данная процедура необходима как для проверки работоспособности измерительных каналов, так и для введения поправочных коэффициентов к характеристикам датчиков, если таковые обнаружатся. Результаты теста показали, что различия в амплитудах сигналов, записанных разными регистраторами, составили, в среднем, 5% (но не более 10%), что лежит в пределах погрешностей приборов. Соответствующие поправки были вычислены и учтены в обработке. Следует отметить, что для выравнивания амплитудно-частотных характеристик к показаниям применялась функция деконволюции [1].

Таблица 3.1 – Характеристики регистратора «Байкал-7»

Количество каналов	4
Разрядность АЦП	24 бит
Частота дискретизации	50, 100, 125, 200, 250, 400, 500, 800, 1000, 2000 Гц
Коэффициент усиления	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64
Максимальное входное напряжение	±5 В
Потребляемая мощность	< 1 Вт (режим ожидания), < 2 Вт (режим записи)
Тип энергонезависимой памяти	microSD
Объем энергонезависимой памяти	8 Гб (опция: до 64Гб)
Формат записи	Miniseed, baikal, RAW
Температурный диапазон	-30 .. +50 °С
Стабильность внутреннего генератора	± 3*10 ⁻⁷
Коэффициент преобразования при G=1, K=0.	0.5 мкВ/дискр

Таблица 3.2 – Характеристики сейсмоприемников GD-10

Model	Explain	F(Hz)	Bt	G (V/m/s)	D	Frequency (±3dB)
GD-10J	Vertical and horizontal dual (bi-directional vibration speed sensor)	10+/-5%	0.36+/- 5%	50 +/- 3%	0.60%	10-1200Hz
				40-42		
			0.6 +/-5%	20 +/-5%		
GD-4.5	Longitudinal wave	4.5 +/- 0.5		28.8+/- 5%	0.30%	5-1000Hz
GD-4		4+/-0.5	0.6 +/- 5%	28.8+/- 5%	0.30%	4-1000Hz
GD-10D		10+/-5%		20 +/- 5%	0.20%	10-1200Hz
GD-28		28 +/-5%		30+/- 5%	0.20%	28-1800Hz
GD-100		100+/-5%		39 +/- 5%	0.20%	
GDH-4.5	Wave	4.5+/- 0.5		28.8+/- 5%	0.30%	5-1000Hz
GDH-10L		10+/-5%		57-60	0.60%	10-1200Hz
GDH-10D		10+/-5%		20 +/-5%	0.20%	10-1200Hz
EGD-4.5	Speedometer Q9	4.5 +/-0.5		32+/- 5%	0.20%	4.5-1200Hz
EGD-10	Plug output	10+/-5%		32+/- 5%	0.20%	10-1200Hz
3-component borehole	Electric variable length	28 +/-5%			0.20%	



Рисунок 3.2 – Фотографии процесса проведения измерений, пример проведения теста на идентичность комплектов аппаратуры «Байкал-7» и велосиметров GD-4.5

На последующем этапе были установлены опорные точки и точки наблюдений, произведены измерения. Измерения велись одновременно 7-ю регистраторами для каждого из объектов исследования. Основные параметры регистрации для метода стоячих волн, в соответствии с опытом на аналогичных объектах, были приняты следующими:

- Частотный диапазон записи – 0.5-250 Гц (частота дискретизации – 500 Гц, параметры фильтров – частота среза 250 Гц);
- Продолжительность одного сеанса регистрации колебаний – 600 секунд;
- Компонента X датчиков всех точек направлялась поперек здания, компонента Y – вдоль здания, Z – вертикально.

По завершении работы производилось считывание данных с регистраторов, проверка качества, архивирование, также дальнейшая углубленная обработка и интерпретация материала. При характеристике колебаний здания на той или иной собственной частоте внимание уделялось следующему:

- Особенности распределения амплитуд скоростей вдоль выбранных сечений или поверхностей (анализировались поверхность крыши здания и вертикального сечения, проходящего по центральной, длинной оси здания);
- Максимальные значения амплитуд скоростей, наблюдаемые во время проведения работ (следует отметить, что максимальный уровень колебаний может изменяться в зависимости от времени регистрации и, таким образом, является относительной характеристикой).

Объект №1 – «Женская гимназия»

Объект представляет собой жилое 8-ми этажное здание, шириной 12 м и длиной около 55 м (рисунок 3.3). Измерения проводились 15 августа 2022 г.



Рисунок 3.3 – Схема расположения исследуемого здания (а); внешний вид здания (б); вид с чердачного помещения сооружения (в)

Для определения динамических характеристик здания была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунке 3.4.

- По крыше здания было отработано 3 профиля по 12 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 55 м. Расстояние между профилями 5.5 м при ширине здания 11.7 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле 5 м.

- По каждому этажу сооружения отработано по 1-му профилю по 6 точек регистрации, расстояние между точками наблюдения на профиле 10 м.

- Использовались 2 опорных точки, установленные в чердачном помещении сооружения.

Общее число точек измерения составило 86.

На рисунке 3.5 представлено спектрально-пространственное изображение поля стоячих волн по профилю на верхнем этаже здания, по трем компонентам. В таблице 3.3 приведены частоты выделенных собственных колебаний. Всего выделено 6 собственных частот для X-компоненты и 2 для Y-компоненты, в вертикальном направлении стоячие волны не формируются.

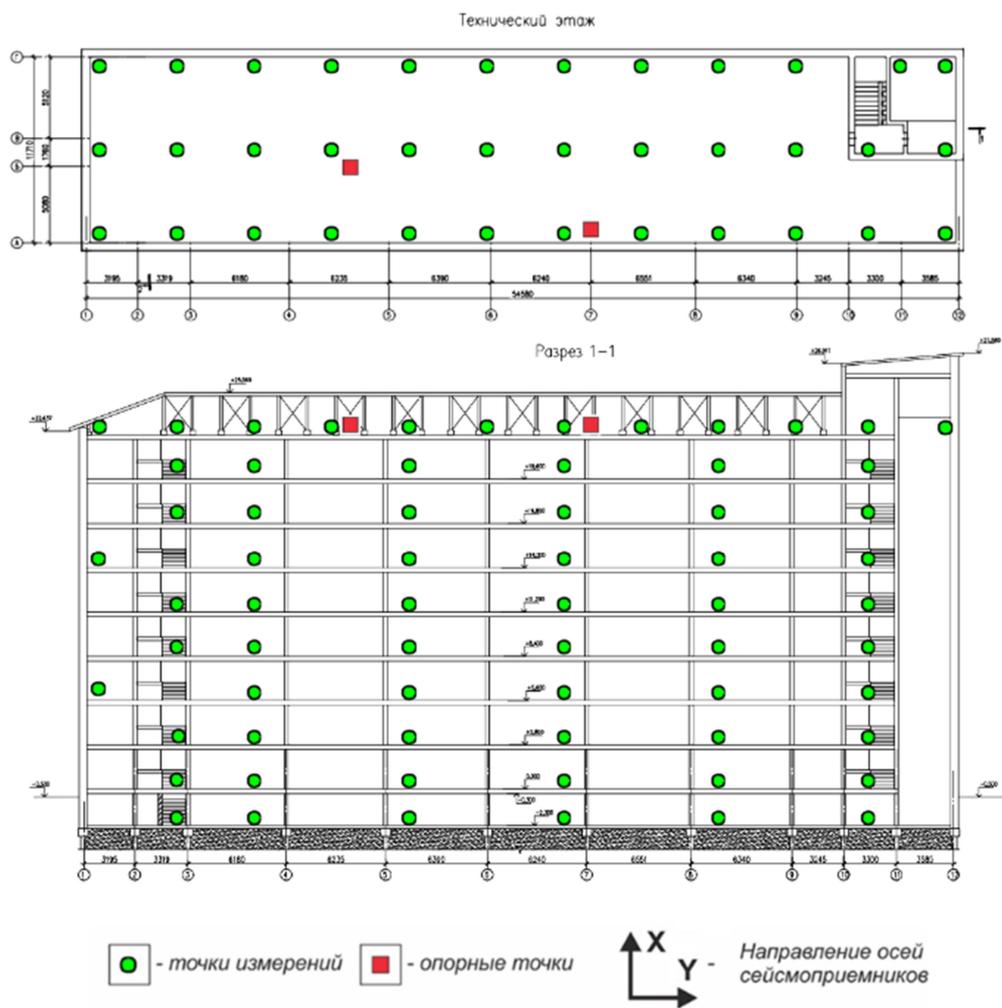


Рисунок 3.4 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний здания

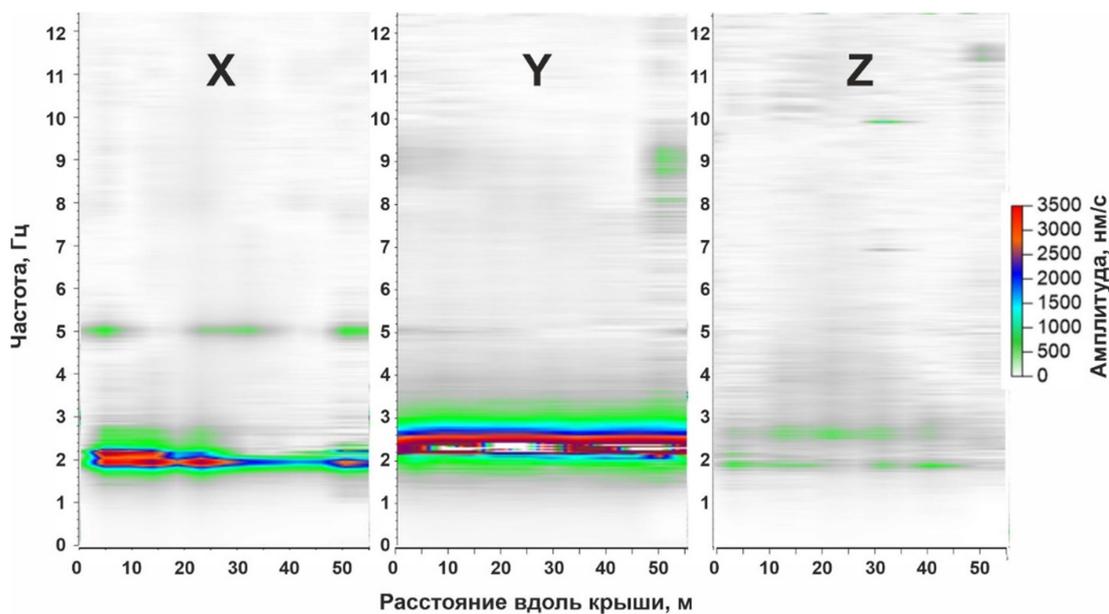


Рисунок 3.5 – Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля на 10-м этаже здания

Таблица 3.3 – Сведения о частотах колебаний, зарегистрированных в чердачном помещении на 10 этаже здания

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	1.83	1	2.23
2	2.04		
3	4.79		
4	7.63		

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на частотах собственных форм. Результаты в виде цветных карт амплитуд скоростей приведены на рисунках 3.6-3.7.

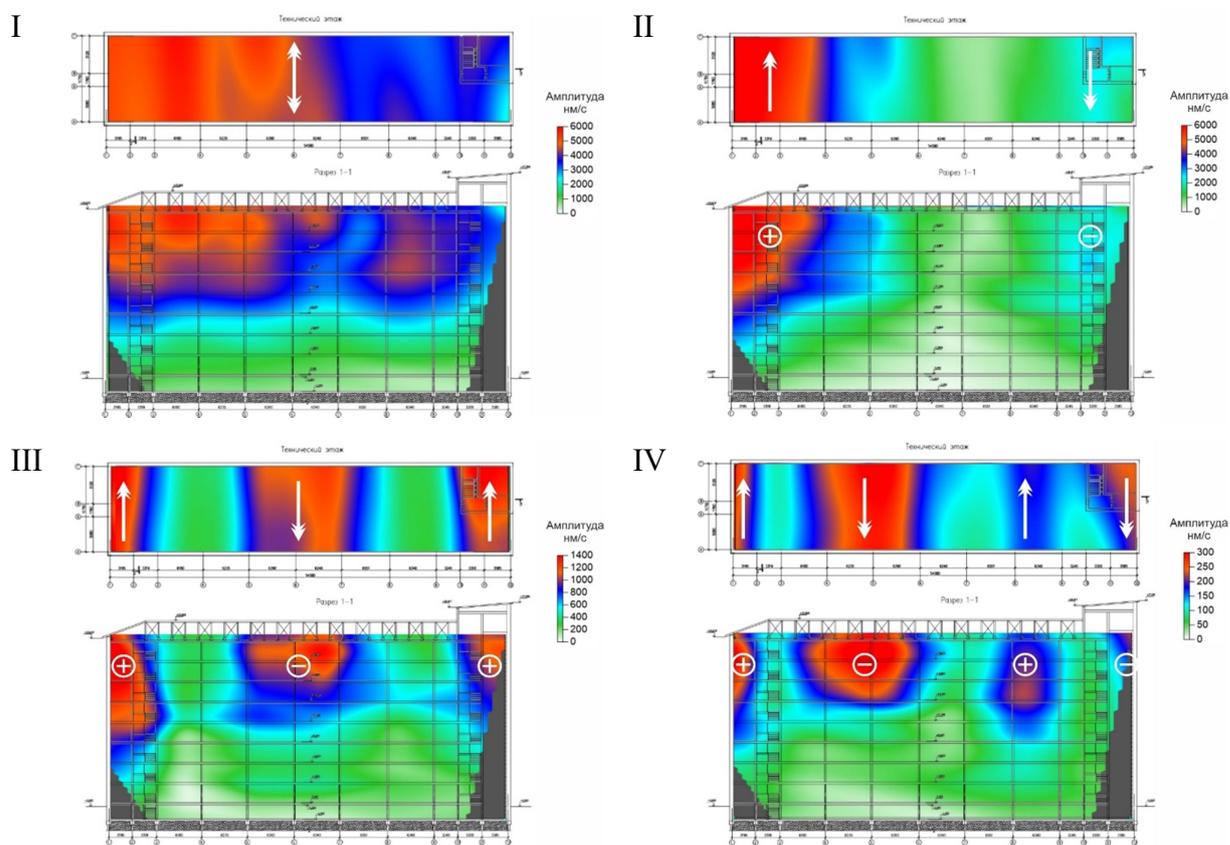


Рисунок 3.6 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 1, 2, 3 и 4-й формы

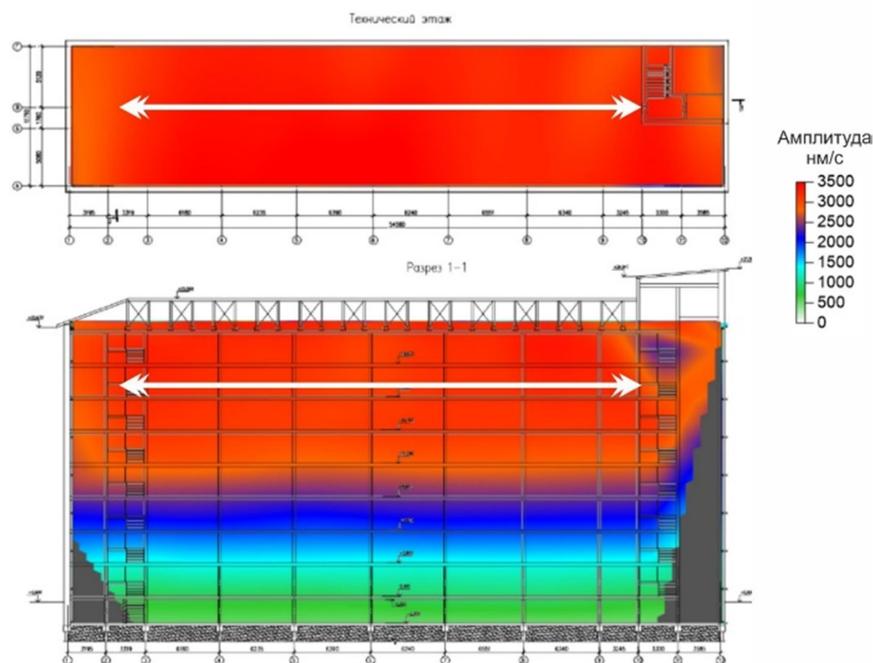


Рисунок 3.7 – Продольные колебания здания на собственной частоте 1-й формы

В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяются 4 собственных частоты, отвечающих по порядку с 1-й по 4-ю формам колебаний конструкции (Гц): 1.83; 2.04; 4.79; 7.63 (рисунок 3.5, таблица 3.3), при этом наиболее значимые из них первые три. Максимальные амплитуды скоростей за время проведения работ составили 6000 нм/с для форм с 1-й по 2-ю и до 1400 нм/с для 3 формы. Обращает внимание, что амплитуды в распределении колебаний в поперечном направлении здания значительно (в 2-3 раза) выше в левой части сооружения, по сравнению с правой (согласно плану на рисунке 3.6). Это свидетельствует о несимметричности жесткости здания и может указывать на наличие дефектов в строительной конструкции левой части здания.

В направлении Y (вдоль здания) в колебаниях здания выделяется 1 собственная частота: 2.23 Гц (рисунок 3.5, таблица 3.3). Судя по пространственному распределению амплитуд колебаний (рисунок 3.7), выделенная частота отвечает 1-й форме колебания здания в продольном направлении. Аномалий в распределении амплитуд и фаз колебаний в продольном направлении здания, которые бы указывали на наличие дефектов в строительной конструкции (или швов), не обнаружено.

Объект №2 – 8-ми этажное жилое здание

Объект представляет собой жилое 2-х этажное здание, шириной 25.4 м и длиной около 76.8 м (рисунок 3.8). Измерения проводились 16 августа 2022 г.



Рисунок 3.8 – Внешний вид исследуемого здания

Для определения динамических характеристик здания, для каждого из этажей, включая подвал и чердачное помещение, была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунке 3.9.

– В чердачном помещении здания было отработано 6 профилей в среднем по 15 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 70 м. Расстояние между профилями 5 м при ширине здания 21 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле 5 м. Итоговое значение – 70 точек.

– По каждому этажу было отработано 6 профилей в среднем по 15 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 70 м. Расстояние между профилями 5 м при ширине здания 21 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле 5 м. Итоговое значение установленных точек наблюдения для подвала – 72 точек, 1 этажа – 78 точек, 2 этаж – 76 точек.

– Использовались 2 опорных точки, установленные в чердачном помещении и на 2-м этаже сооружения.

Общее число точек измерения составило 298.

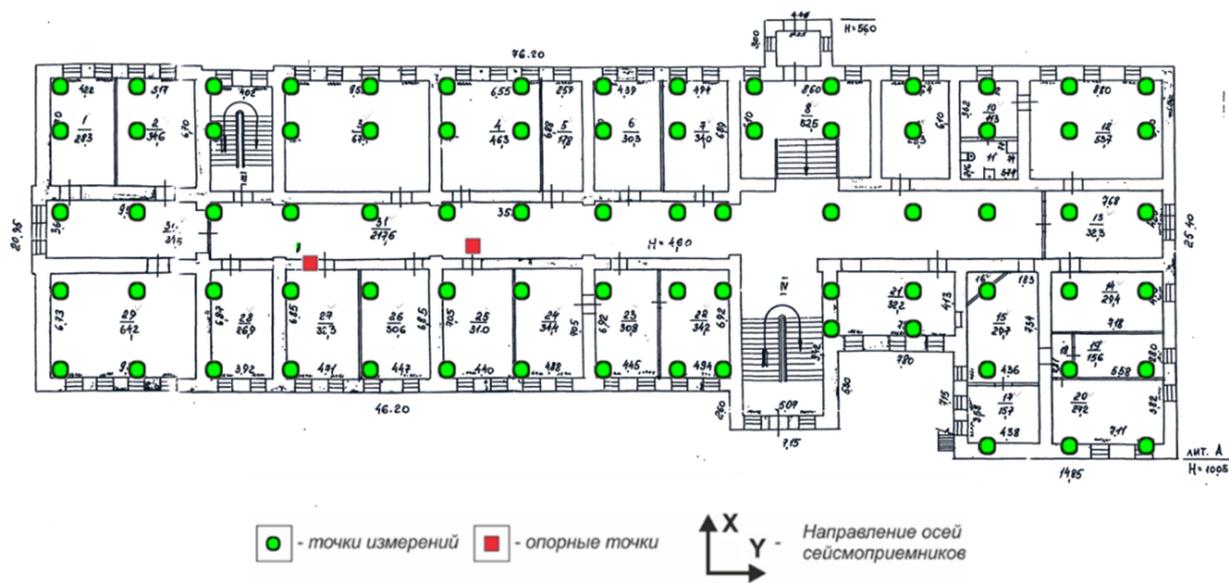


Рисунок 3.9 – Принципиальная схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний здания

На рисунке 3.10 представлено спектрально-пространственное изображение поля стоячих волн по профилю на верхнем этаже здания, по трем компонентам. В таблице 3.4 приведены частоты выделенных собственных колебаний. Всего выделено 6 собственных частот для X-компоненты и 2 для Y-компоненты, в вертикальном направлении стоячие волны не формируются.

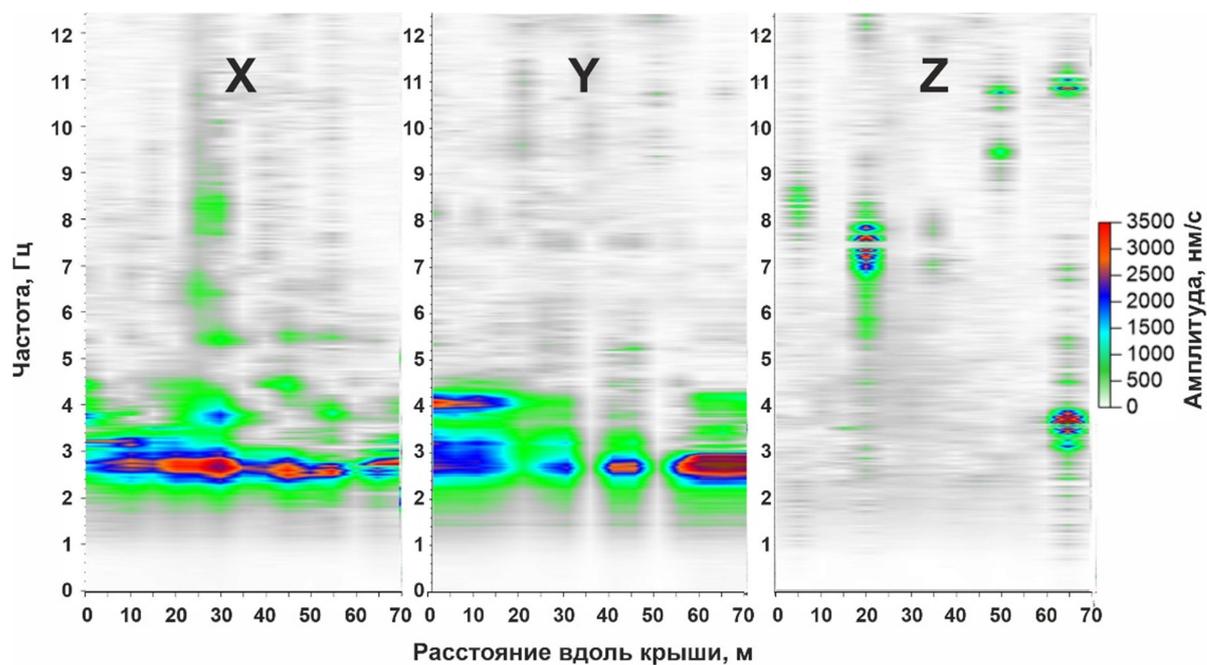


Рисунок 3.10 – Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля на 3-м этаже здания

Таблица 3.4 – Сведения о частотах колебаний, зарегистрированных в чердачном помещении на 3-м этаже здания

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	2.66	1	2.78
2	3.23	2	4.09
3	3.76		
4	4.49		

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на частотах собственных форм. Результаты в виде цветных карт амплитуд скоростей приведены на рисунках 3.11-3.12.

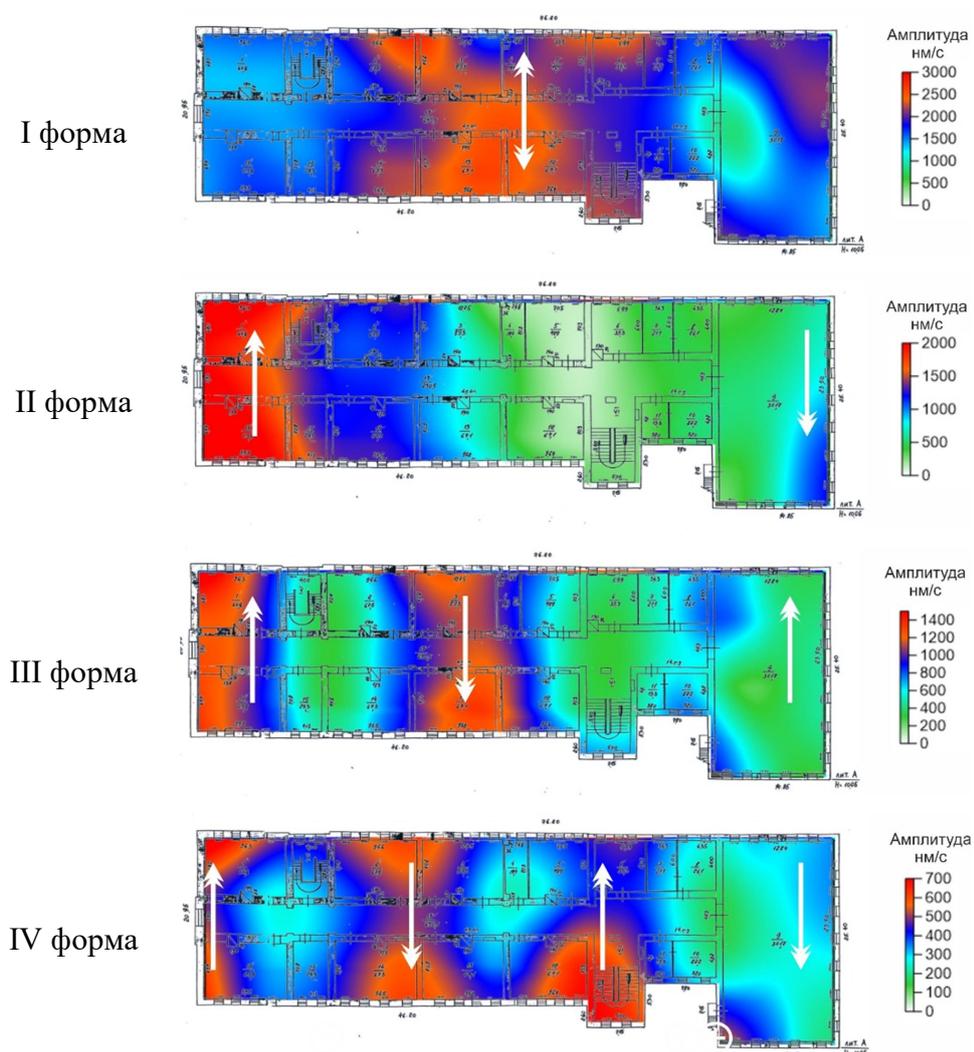


Рисунок 3.11 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 1, 2, 3-й и 4-й формы, зарегистрированные на чердачном этаже здания

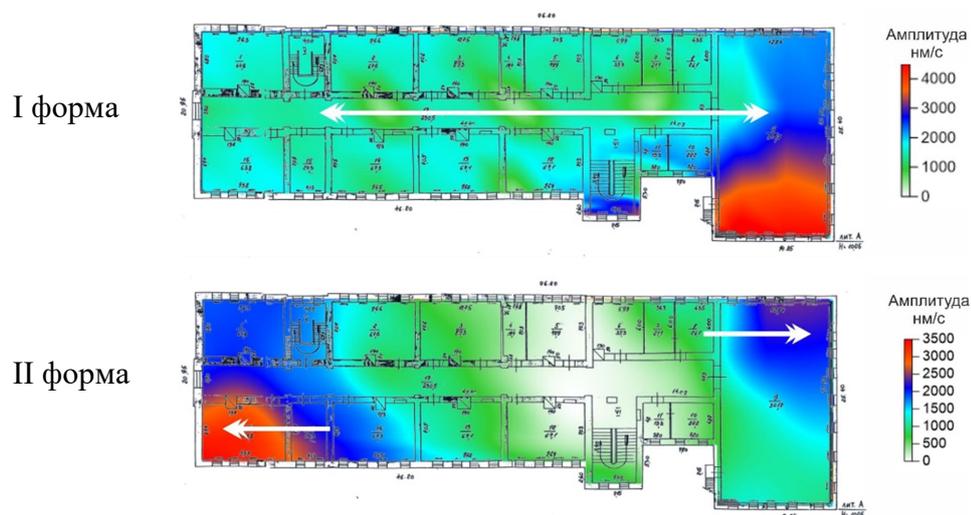


Рисунок 3.12 – Продольные колебания здания на собственной частоте 1-й и 2-й формы, зарегистрированные на чердачном этаже здания

– В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяются 4 собственных частоты, отвечающих по порядку с 1-й по 4-ю формам колебаний конструкции (Гц): 2.66; 3.23; 3.76; 4.49. (рисунок 3.10, таблица 3.4), при этом наиболее значимые из них первые три. На выделенных частотах колебания здания распределены относительно равномерно. Максимальные амплитуды скоростей за время проведения работ составили ~2000 - 3000 нм/с для форм с 1-й по 2-ю и до 1400 нм/с для 3-й и 700 нм/с для 4-й форм. Следует отметить, что максимумы амплитуд в распределении колебаний смещены в левую часть сооружения (согласно плану на рисунке 3.11) в поперечном направлении здания. Подобное смещение может быть связано как с особенностью геометрии сооружения (разная жесткость конструкции в различных точках наблюдения), так и может указывать на наличие дефектов в строительной конструкции. Для понимания этого необходимо провести дополнительное обследование.

– В направлении Y (вдоль здания) в колебаниях здания выделяются 2 собственных частоты: 2.78 Гц и 4.09 Гц (рисунок 3.10, таблица 3.4). Судя по пространственному распределению амплитуд колебаний (рисунок 3.18), 1-я выделенная частота отвечает 1-й форме колебания здания в продольном направлении. На частоте 2-й формы (4.09 Гц, рисунок 3.12) отмечаются противофазные (растягивающие) колебания, увеличивающиеся по амплитуде по диагонали к краям здания. Такая особенность свойственна зданиям, в средней части которых расположен или деформационный шов, или дефекты в конструкции. Других аномалий в распределении амплитуд и фаз колебаний в продольном направлении здания, которые бы указывали на наличие дефектов в строительной конструкции, не обнаружено.

Далее строились карты основных мод поперечных (рисунок 3.13) и продольных колебаний (рисунок 3.14) по этажам, для поиска скрытых дефектов. Из рисунков хорошо видно, что у центра здания присутствуют аномальные зоны, которые могут указывать как на существование, так и на формирование дефекта. Причем данные максимумы колебаний смещаются от подвала к крыше в правую сторону сооружения.

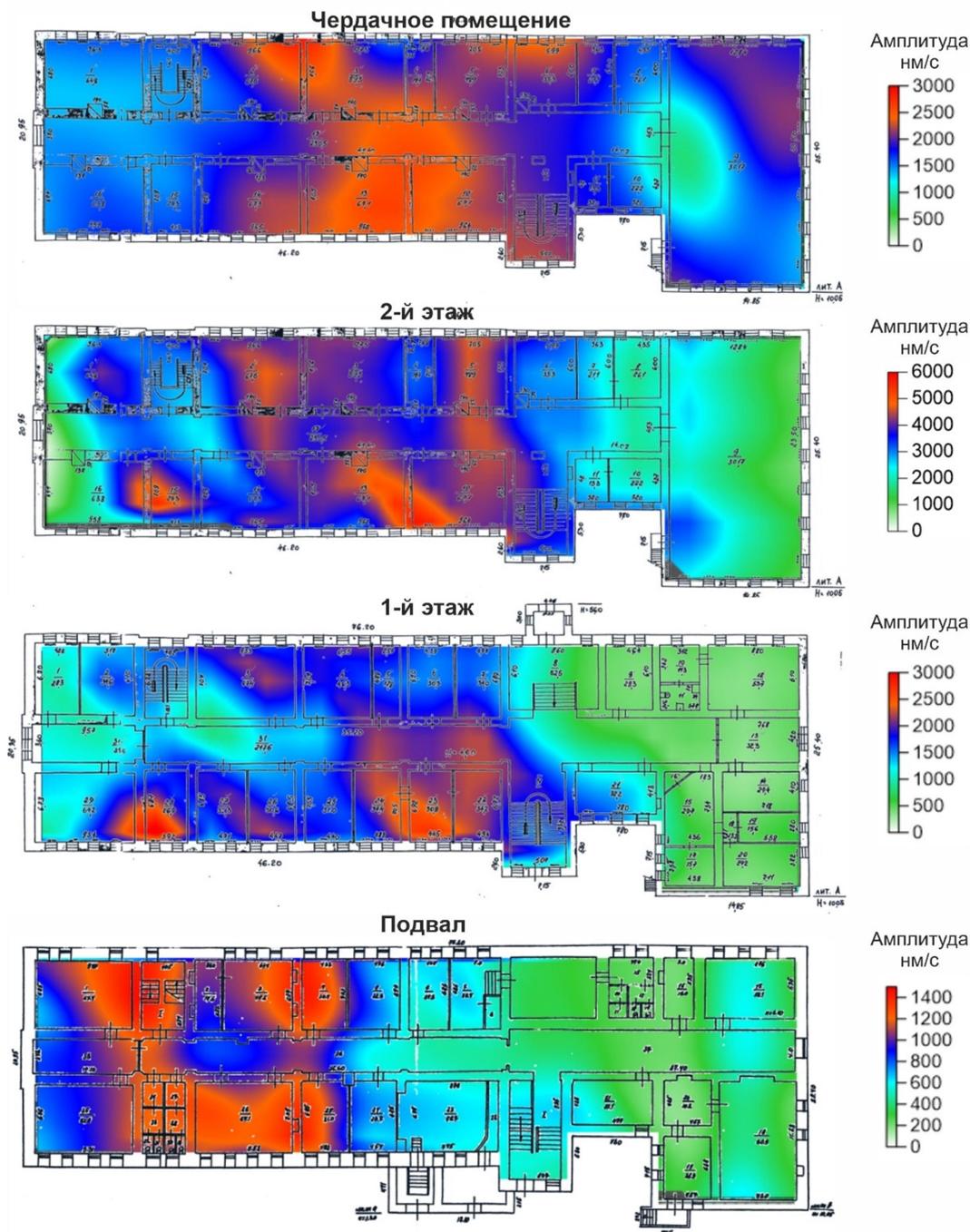


Рисунок 3.13 – Распределение поперечных колебаний здания на собственной частоте 1-й формы на всех этажах сооружения

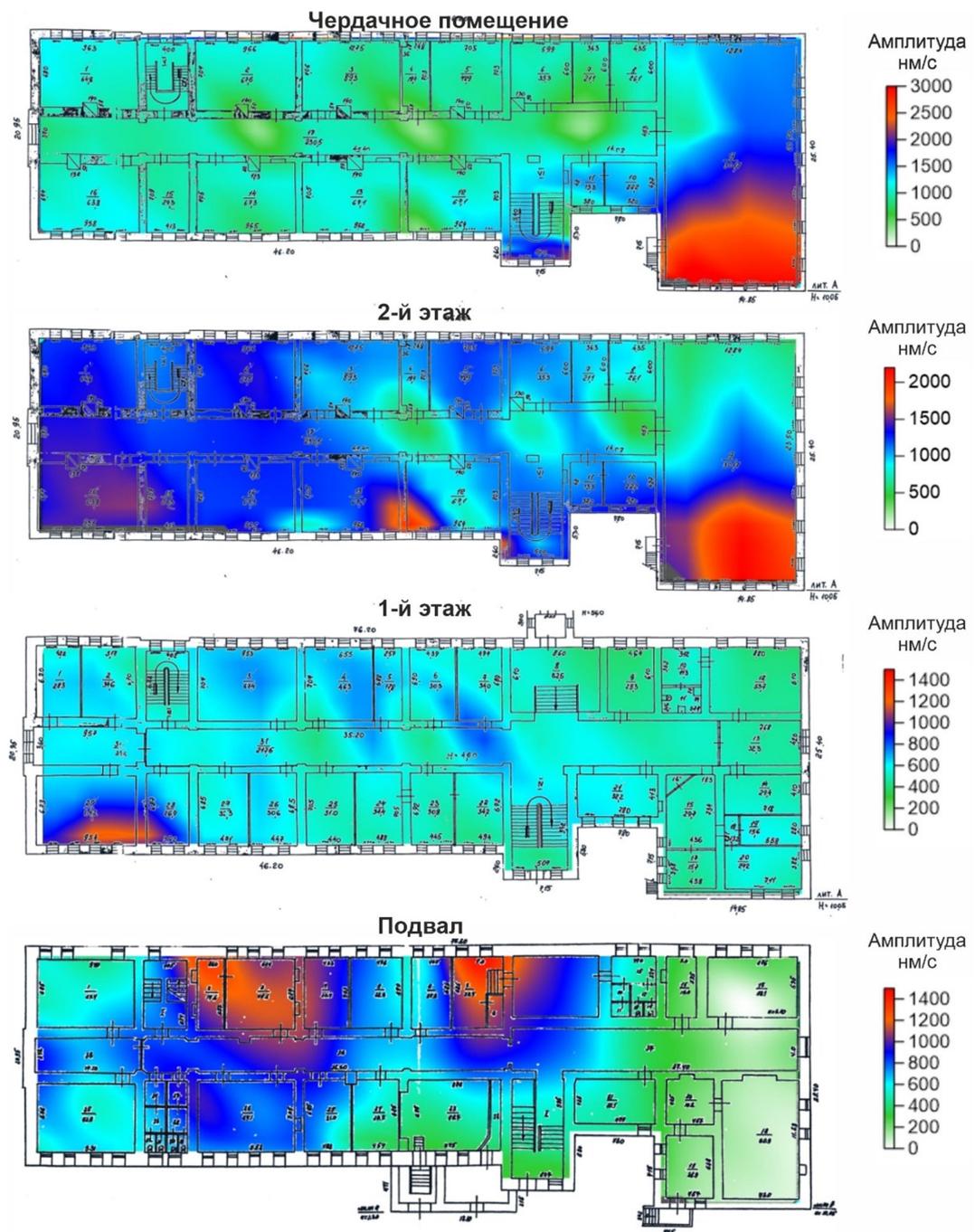


Рисунок 3.14 – Распределение продольных колебаний здания на собственной частоте 1-й формы на всех этажах сооружения

Объект №3 – Двухуровневая парковка

Объект представляет собой парковочное 2-х этажное сооружение, шириной 63.8 м и длиной около 89.7 м (рисунок 3.15). Измерения проводились 16 августа 2022 г.



Рисунок 3.15 – Внешний вид исследуемого объекта

Для определения динамических характеристик здания, для каждого из этажей, была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунке 3.16.

– На поверхности было отработано 10 профилей в среднем по 7 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 90 м. Расстояние между профилями 10 м при ширине здания 89.7 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле 10 м. Итоговое значение 70 точек.

– По каждому этажу было отработано 9 профилей в среднем по 7 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 80 м. Расстояние между профилями 10 м при ширине здания 89.7 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле 10 м. Итоговое значение 60 точек. Итоговое значение установленных точек наблюдения для поверхности – 70 точек, 1 этажа – 60 точек, 2 этаж – 60 точек.

– Опорная точка, установленная на 1-м этаже сооружения.

Общее число точек измерения составило 201.

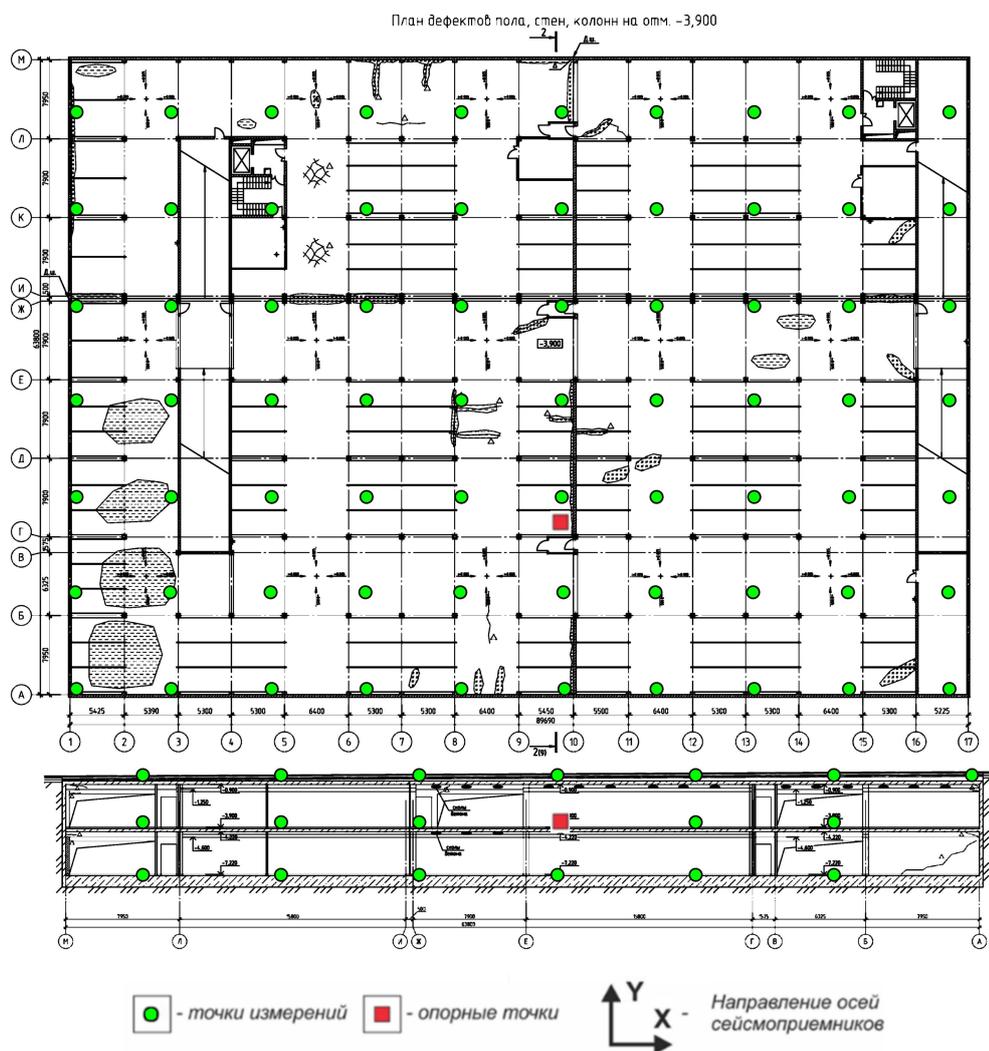


Рисунок 3.16 – Принципиальная схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний здания

В таблице 3.5 приведены резонансные частоты выделенных колебаний. Всего выделено 2 частоты для X-компоненты и Y-компоненты, в вертикальном направлении резонансное усиление практически отсутствует. Причем данные колебания получилось выделить только на поверхности подземной парковки (на площади 400-летия)

Таблица 3.5 – Сведения о резонансных частотах колебаний, зарегистрированных на поверхности сооружения

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер	Частота, Гц	Номер	Частота, Гц
1	3.06	1	3.73

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на резонансных частотах. Результаты в виде цветных карт амплитуд скоростей приведены на рисунках 3.17-3.18.

– В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяется 1 резонансная частота – 3.07 Гц. По результатам полученных карт амплитудных

распределений поперечных колебаний, установлены повышенные колебания в зонах локации осей А-И/1-5 (рисунок 3.17).

– В направлении Y (вдоль здания) в колебаниях объекта также выделяется 1 резонансная частота – 3.73 Гц. По результатам полученных карт амплитудных распределений продольных колебаний, установлены повышенные колебания в зонах локации осей А-И/1-5 и вдоль шва А-М/10 (рисунок 3.18). Данное распределение может свидетельствовать о существующих или формирующихся деформациях в данных областях.

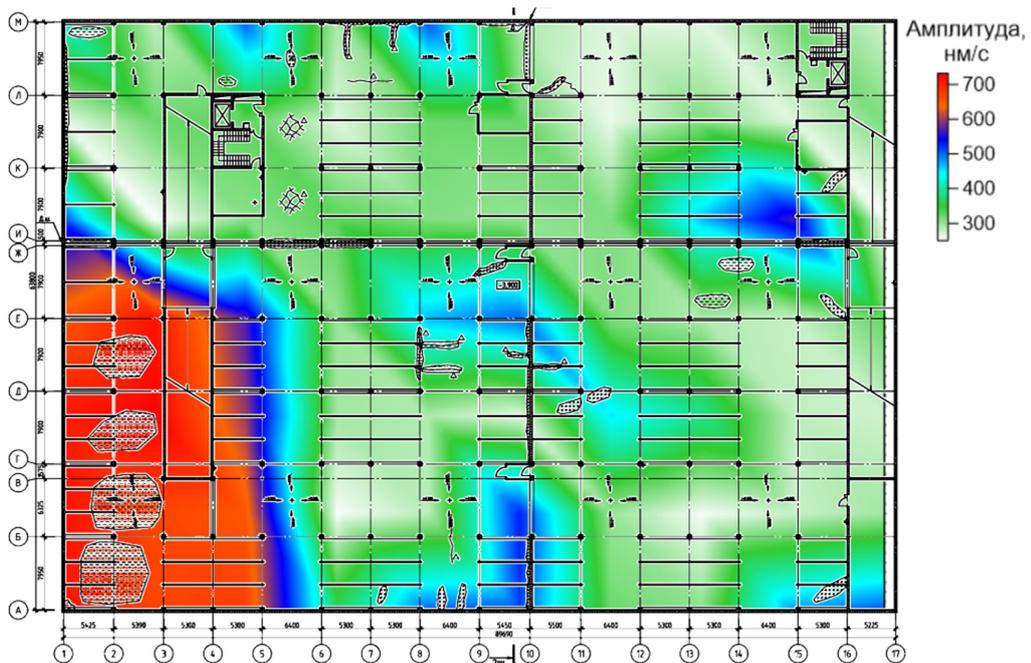


Рисунок 3.17 – Поперечные колебания здания на резонансной частоте

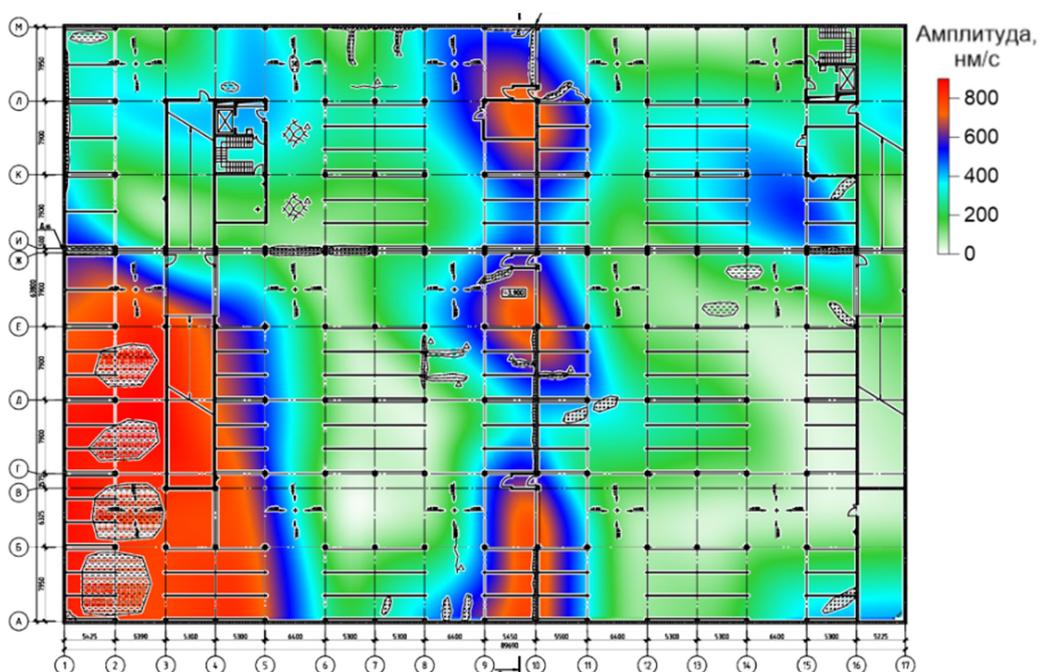


Рисунок 3.18 – Продольные колебания здания на резонансной частоте

Объект №4 – Дворец культуры «Норильский никель»

Объект представляет собой четырехэтажное здание, шириной 48 м и длиной около 70 м, установленное на свайный фундамент (рисунок 3.19). Измерения проводились с 28 июля 2022 г.



Рисунок 3.19 – Внешний вид исследуемого здания

Для определения динамических характеристик здания была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунках 3.20-3.21. Измерения на первом и четвертом этажах здания проводились 30 июня 2021 г. и 23 августа 2021 г, соответственно.

– На первом этаже здания было отработано 12 профилей, общее число точек измерения составило 148. Длина профиля составляла около 68 м. Расстояние между профилями 4 м при ширине здания 48 м. Использовалась одна опорная точка на первом этаже сооружения вблизи д-13 (рисунок 3.20).

– На четвертом этаже здания было отработано 10 профилей, общее число точек измерения составило 108. Длина профиля составляла около 68 м. Расстояние между профилями 4 м при ширине здания 48 м. Использовалась одна опорная точка на четвертом этаже вблизи д-4 (рисунок 3.21).



Рисунок 3.20 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний на первом этаже здания

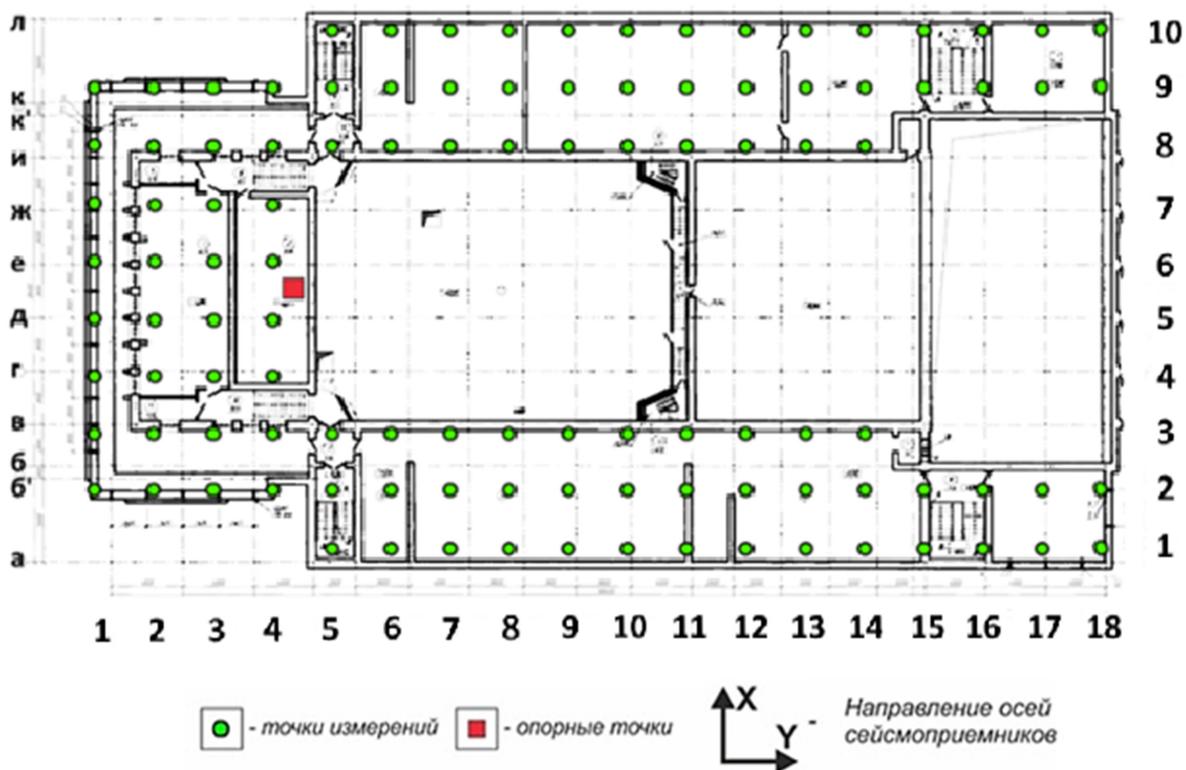


Рисунок 3.21 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний на четвертом этаже здания

На рисунке 3.22 представлена карта амплитудно-частотного распределения изгибных мод колебаний на четвертом этаже здания по трем компонентам. В таблице 3.6 приведены частоты выделенных собственных колебаний. Всего выделено пять собственных частот: три для X-компоненты и две для Y-компоненты, в вертикальном направлении Z стоячие волны не формируются.

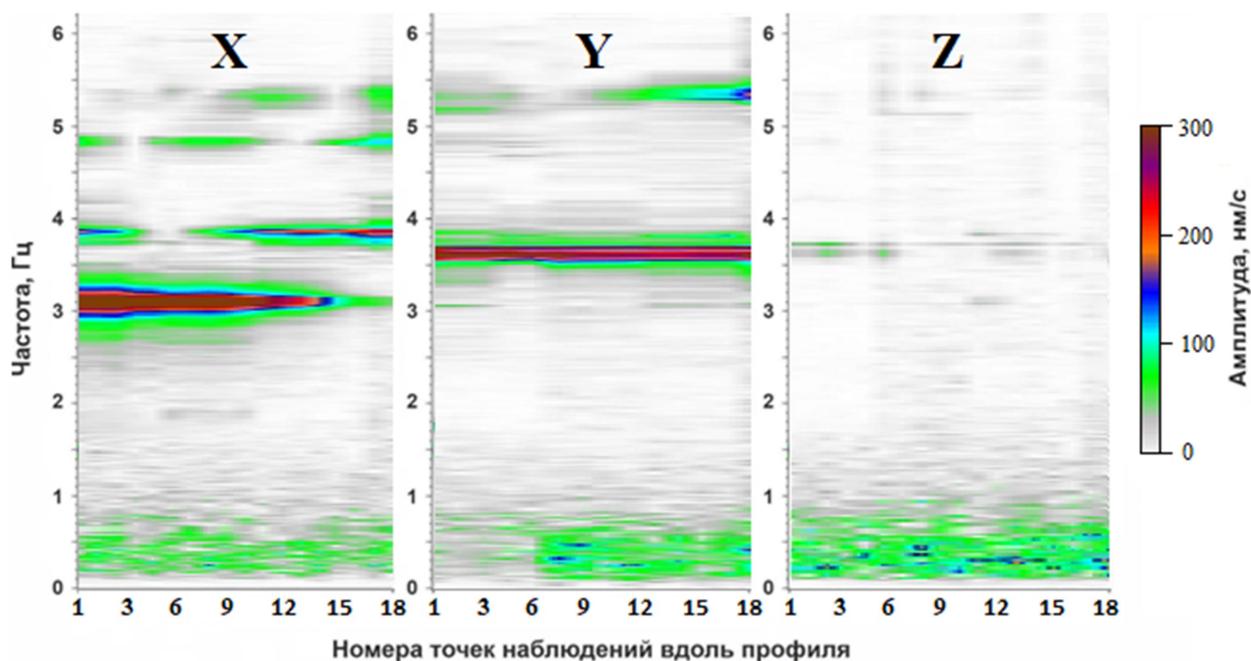


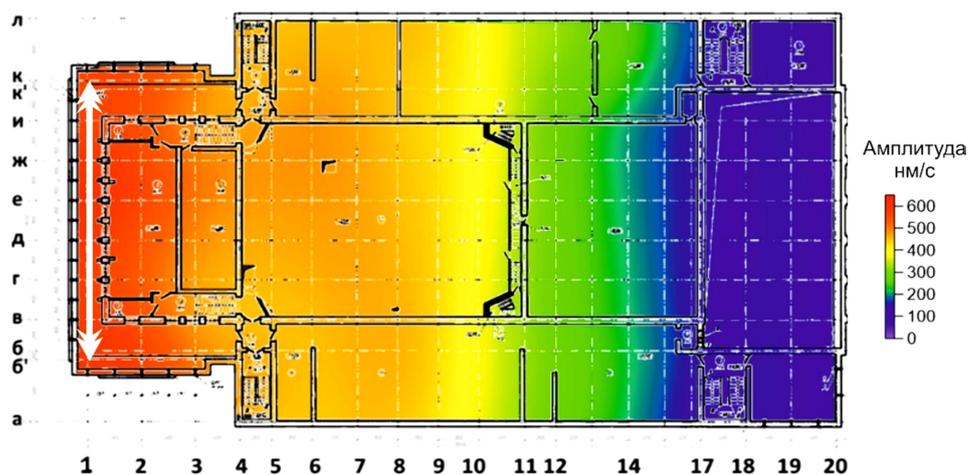
Рисунок 3.22 – Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля №2 на четвертом этаже здания по трем компонентам

Таблица 3.6 – Частоты собственных колебаний здания на четвертом этаже (данные от 28.08.2021 г.)

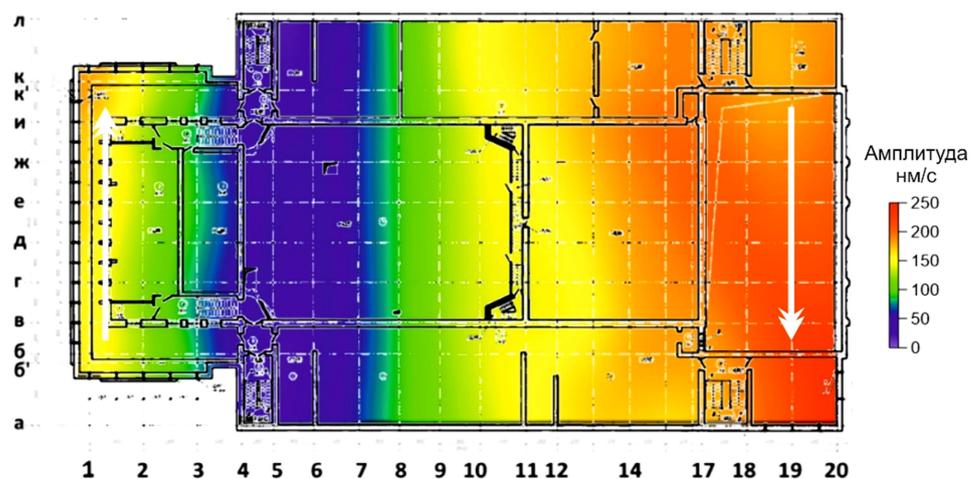
X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	2.98	1	3.53
2	3.70	2	5.20
3	4.68		

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на частотах собственных мод. Результаты карт амплитуд скоростей приведены: для четвертого этажа на рисунках 3.23-3.24; для первого этажа на рисунках 3.25-3.26. Для полученных данных была применена фильтрация сигнала по когерентному составу записей.

I форма



II форма



III форма

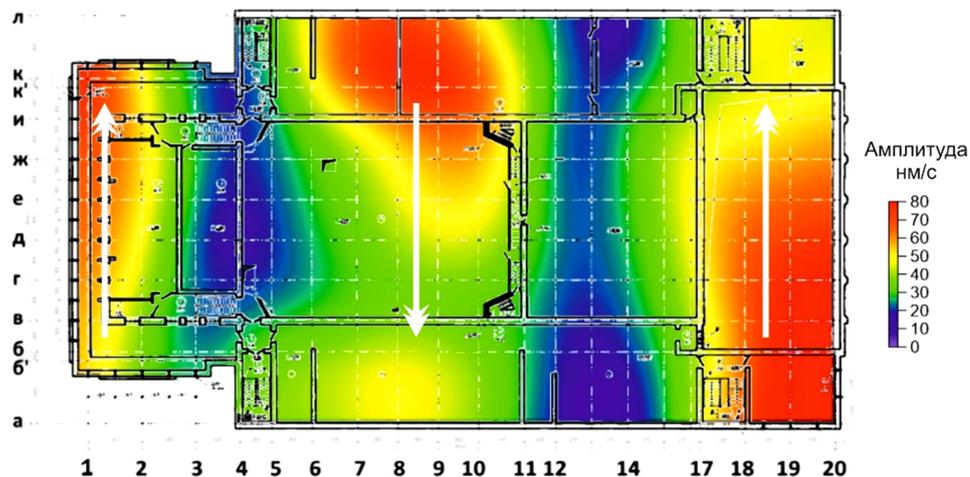


Рисунок 3.23 – Поперечные колебания зарегистрированные на чердачном этаже здания на собственной частоте 1, 2 и 3-й формы. Белыми стрелками обозначены направления колебаний

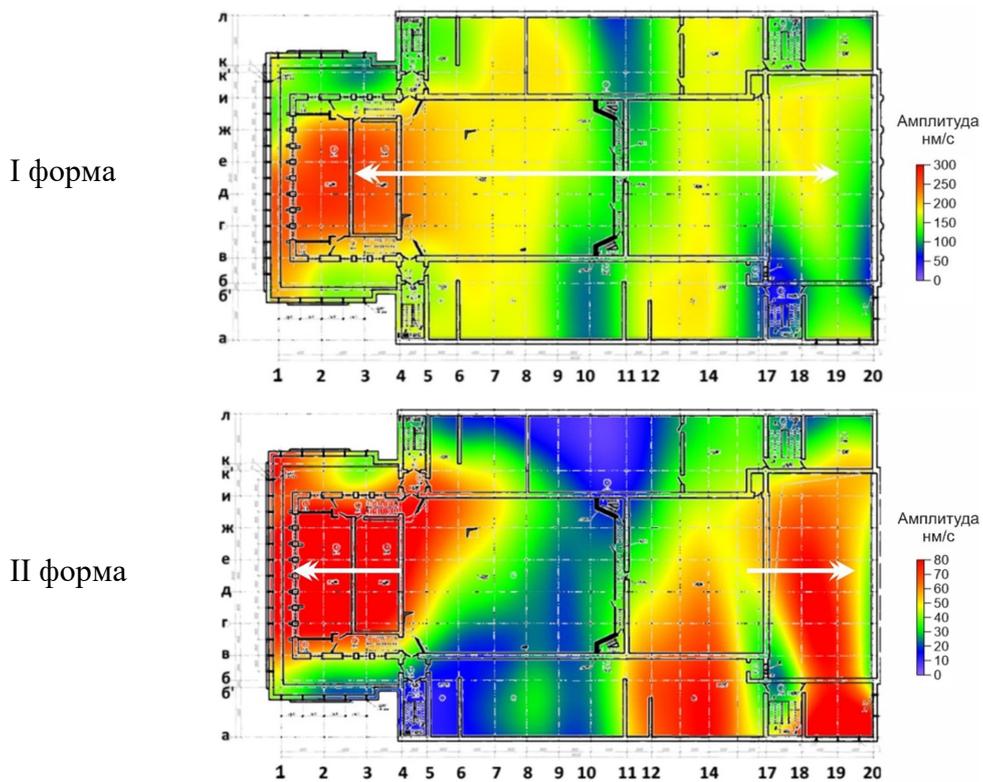


Рисунок 3.24 – Продольные колебания зарегистрированные на чердачном этаже здания на собственной частоте 1-й и 2-й формы. Белыми стрелками обозначены направления колебаний

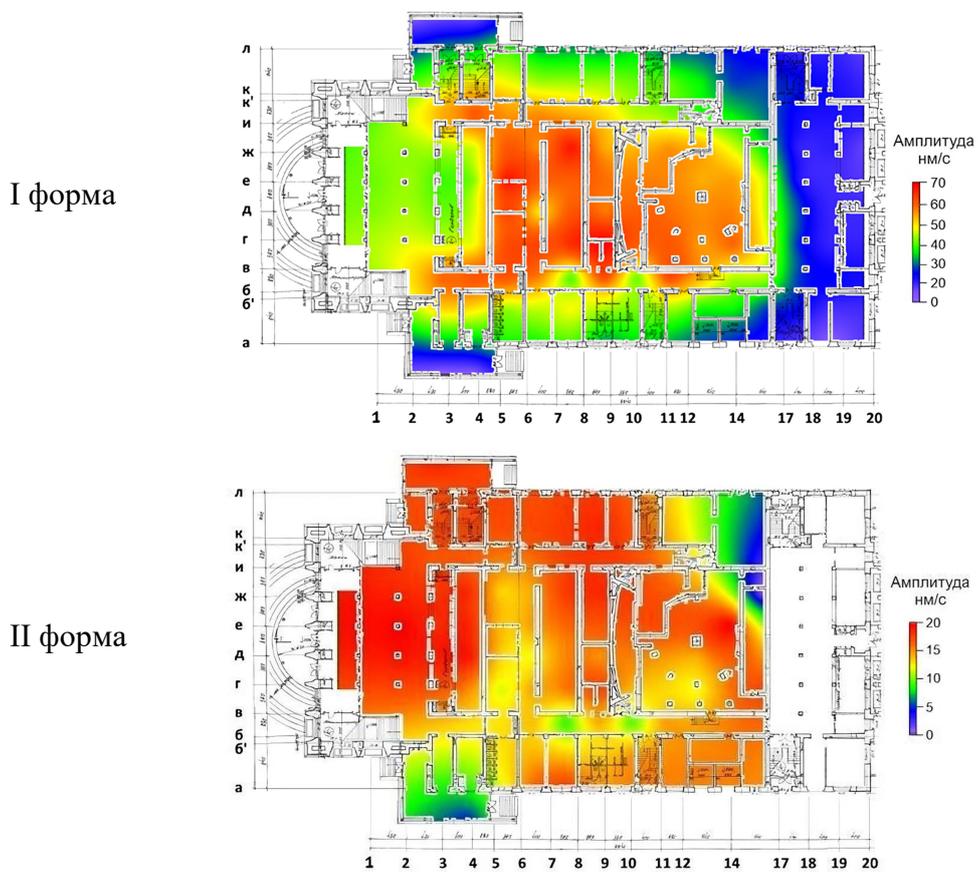


Рисунок 3.25 – Продольные колебания зарегистрированные на первом этаже здания на собственной частоте 1-й и 2-й формы

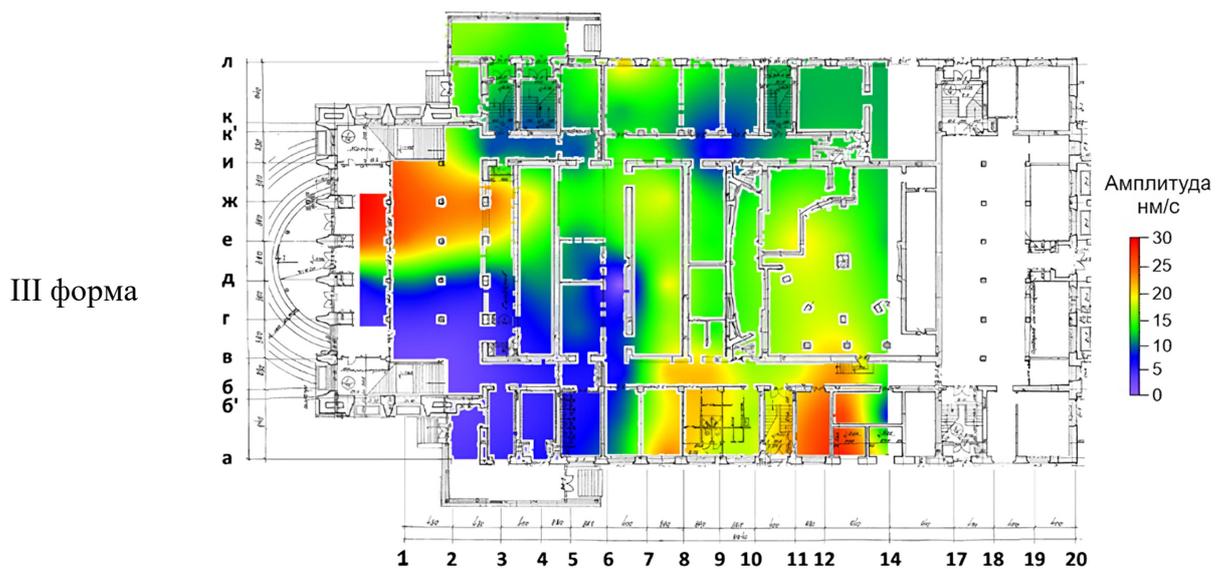
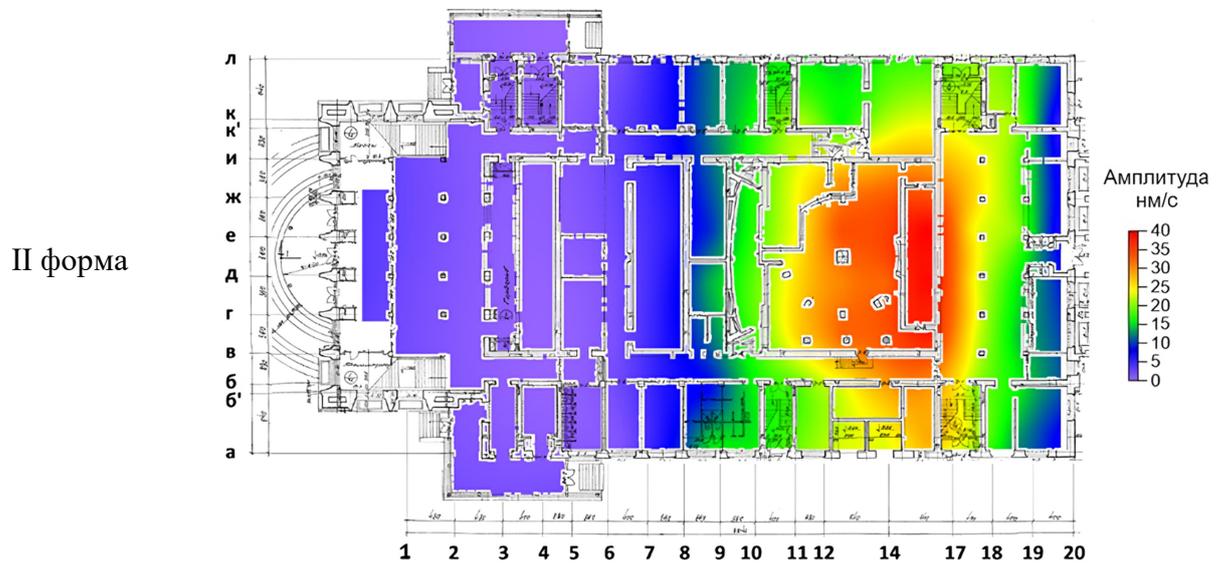
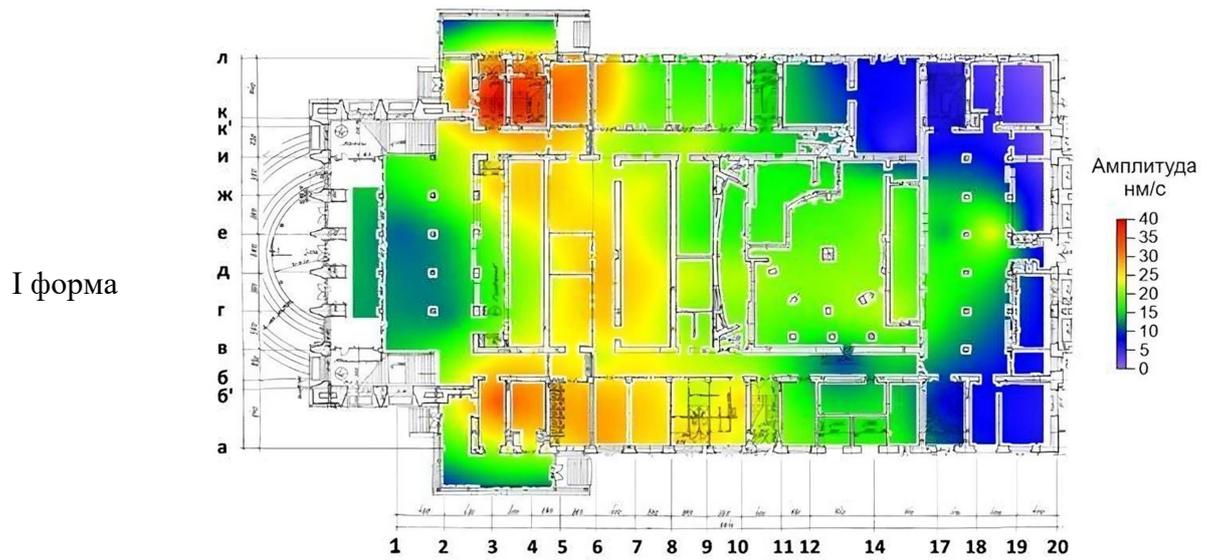


Рисунок 3.26 – Поперечные колебания зарегистрированные на первом этаже здания на собственной частоте 1, 2 и 3-й формы

– В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяются 3 собственные частоты, отвечающих по порядку с 1-й по 3-ю формам колебаний конструкции (Гц): 2.98; 3.72; 4.68 (рисунок 3.23, таблица 3.6). На выделенных частотах колебания здания распределены относительно равномерно. Линий смены фазы не обнаружено, что свидетельствует о том, что на этих частотах все точки колеблются в одном и том же направлении (без растягивающих нагрузок). Максимальные значения амплитуд за время проведения работ составили 500 нм/с для 1-й формы колебаний.

– В направлении Y (вдоль здания) в колебаниях здания выделяются 2 собственные частоты: 3.53 Гц и 5.2 Гц (рисунок 3.24, таблица 3.6). Судя по пространственному распределению амплитуд колебаний (рисунок 3.18), 1-я выделенная частота отвечает 1-й форме колебания здания в продольном направлении. На частоте 5.2 Гц наблюдаются растягивающие противофазные колебания, увеличивающиеся по амплитуде на краях здания.

Объект №5 – 10-ти этажный жилой дом

Объект представляет собой 10-ти этажное здание, шириной 13 м и длиной около 70 м (рисунок 3.27). Измерения проводились 28 июля 2022 г.



Рисунок 3.27 – Внешний вид исследуемого здания (а); вид с обратной стороны здания (б)

Для определения динамических характеристик здания была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунке 3.28.

– По крыше здания было отработано 3 профиля по 27 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 55 м. Расстояние между профилями 5.5 м при ширине здания 11.7 м. Расстояние между точками наблюдения на профиле ~2 м.

– Вдоль оси каждого из 3-х подъездов сооружения отработано по профилю по 18 точек регистрации, расстояние между точками наблюдения на профиле 1.5 м.

– Использовались 2 опорных точки, установленные в чердачном помещении сооружения.

Общее число точек измерения составило 140.

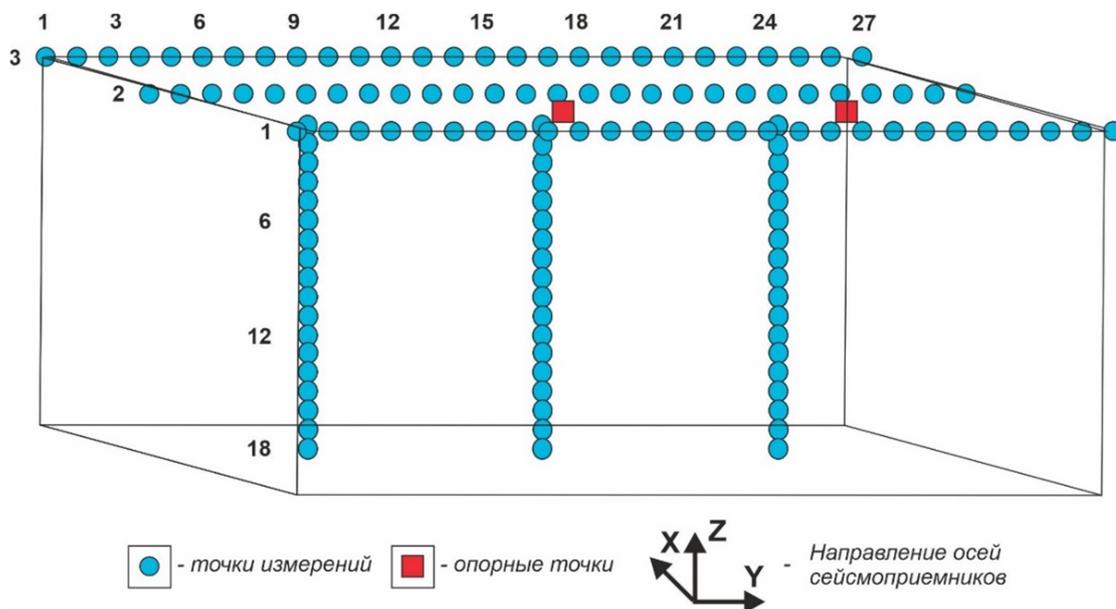


Рисунок 3.28 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний здания

На рисунке 3.29 представлено спектрально-пространственное изображение поля стоячих волн по профилю на верхнем этаже здания, по трем компонентам. В таблице 3.7 приведены частоты выделенных собственных колебаний. Всего выделено 4 собственных частоты для X-компоненты и 2 для Y-компоненты, в вертикальном направлении стоячие волны не формируются.

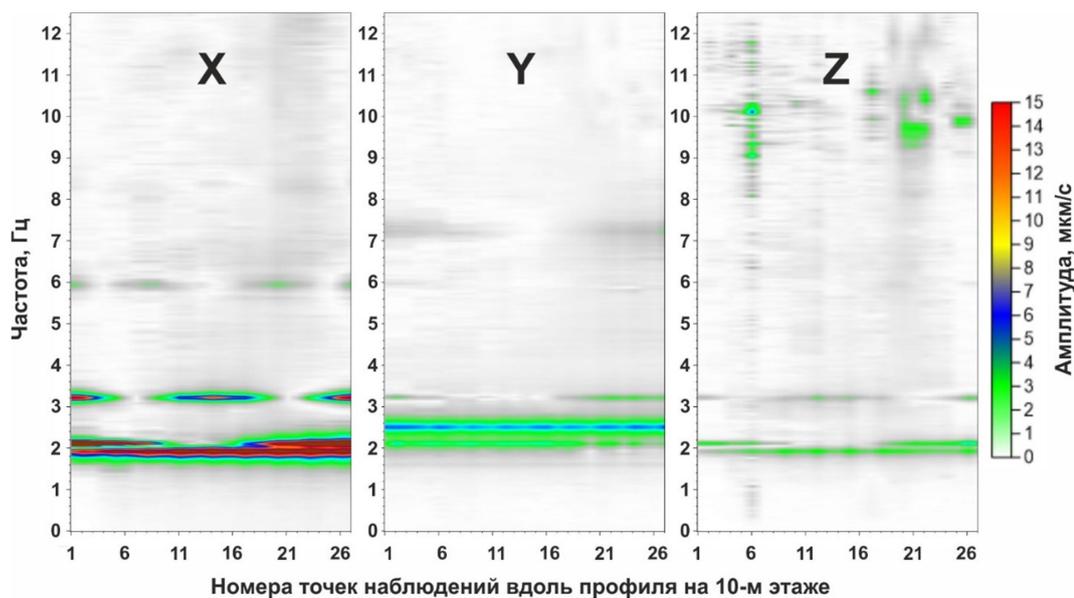


Рисунок 3.29 – Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля на 10-м этаже здания

Таблица 3.7 – Частоты собственных колебаний, полученных на крыше здания (данные от 28.07.2022 г.)

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	1.95	1	2.59
2	2.14	2	7.57
3	3.48		
4	6.71		

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на частотах собственных форм. Результаты в виде цветных карт амплитуд ускорений приведены на рисунках 3.30-3.32.

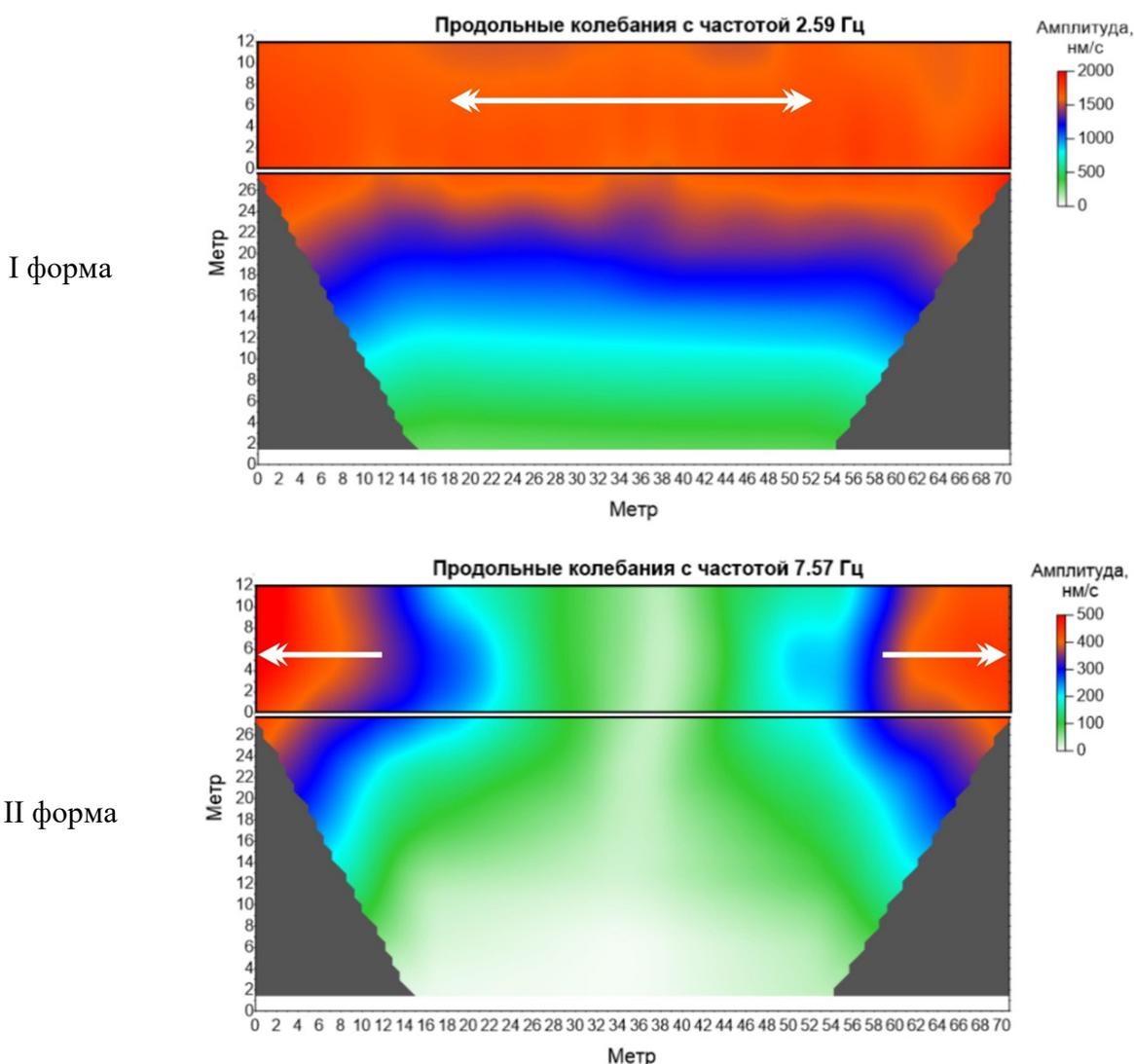


Рисунок 3.30 – Продольные колебания, зарегистрированные в здании на собственной частоте 1, 2 формы

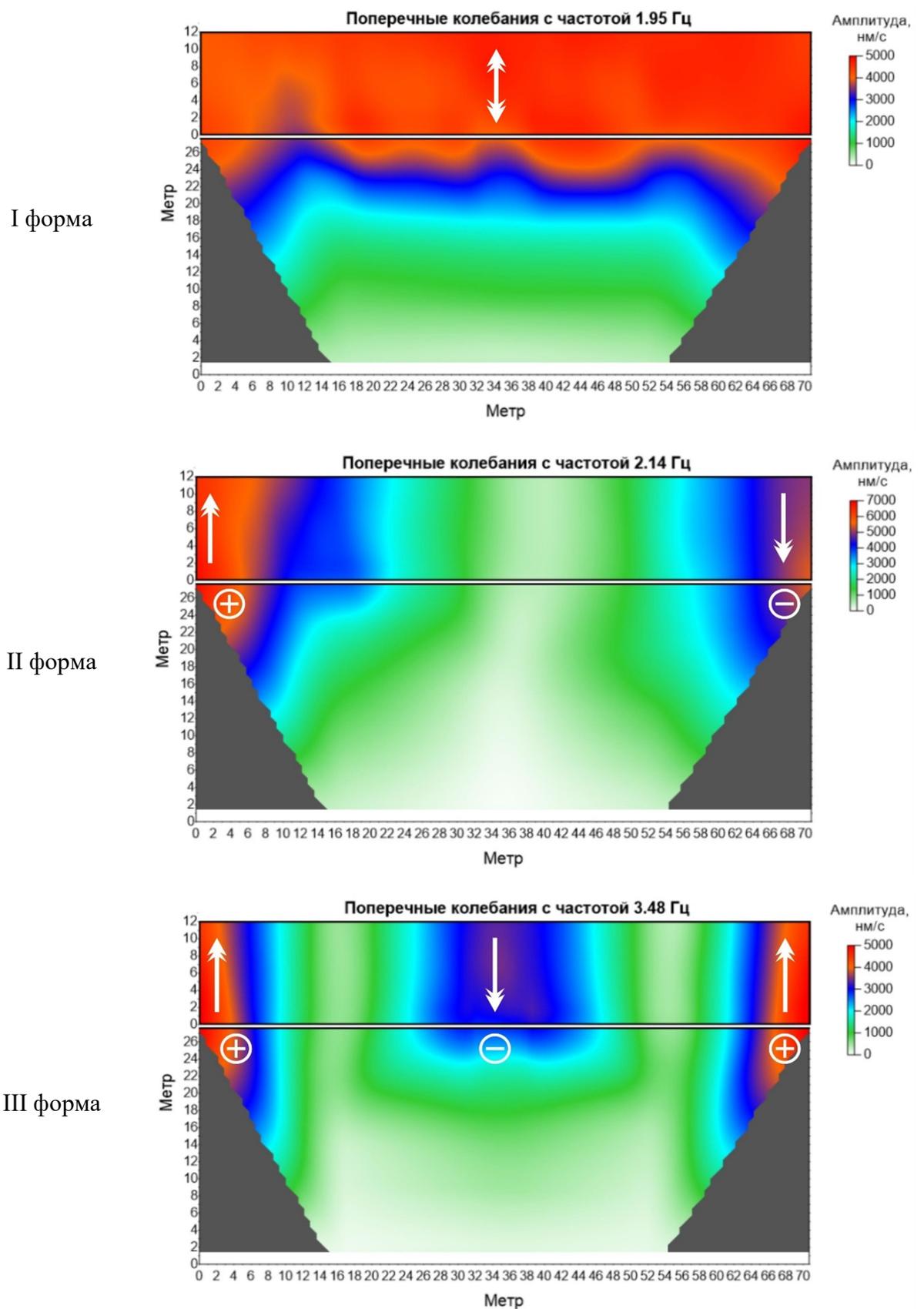


Рисунок 3.31 – Поперечные колебания, зарегистрированные в здании на собственной частоте 1, 2 и 3-й формы

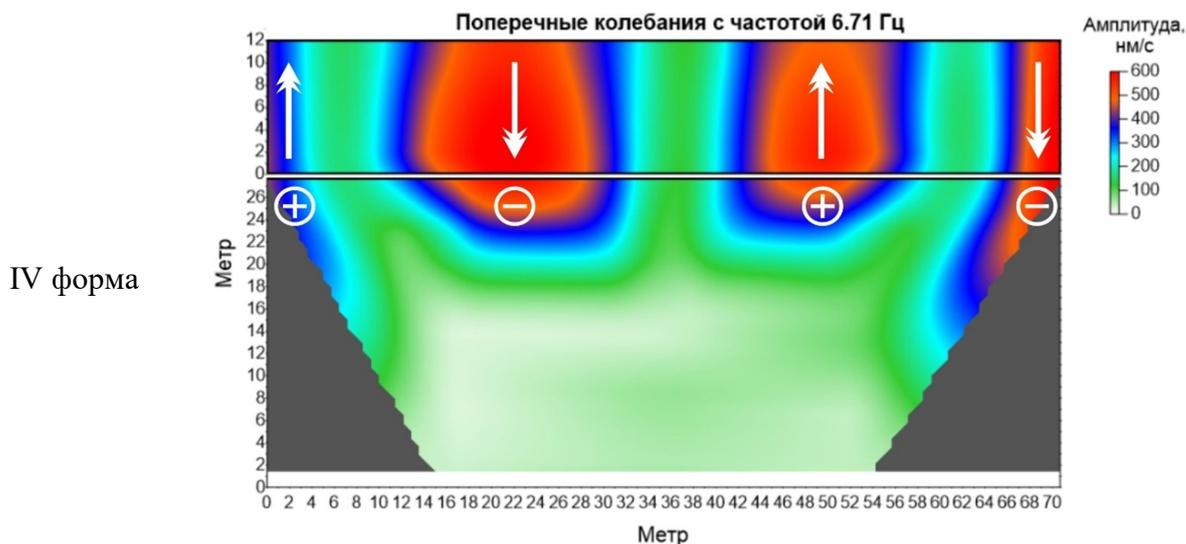


Рисунок 3.32 – Поперечные колебания, зарегистрированные в здании на собственной частоте 4-й формы

– В направлении X (поперек здания) в колебаниях объекта выделяются 4 собственных частоты, отвечающих по порядку с 1-й по 4-ю формам колебаний конструкции (Гц): 1.95; 2.14; 3.48; 6.71 (рисунок 3.31-3.32, таблица 3.7), при этом наиболее значимые из них первые три. На выделенных частотах колебания здания распределены относительно равномерно. Линий смены фазы не обнаружено, что свидетельствует о том, что на этих частотах все точки колеблются в одном и том же направлении (без растягивающих нагрузок). Максимальные значения амплитуд за время проведения работ составили 7000 нм/с для 2-й формы колебаний. Не обнаружено аномалий в распределении колебаний в поперечном направлении здания, которые бы указывали на наличие дефектов в строительной конструкции.

– В направлении Y (вдоль здания) в колебаниях здания выделяются 2 собственные частоты: 2.59 Гц и 7.57 Гц (рисунок 3.30, таблица 3.7). Судя по пространственному распределению амплитуд колебаний, 1-я выделенная частота отвечает 1-й форме колебания здания в продольном направлении. На частоте 7.25 Гц наблюдаются растягивающие противофазные колебания, увеличивающиеся по амплитуде на краях здания. Подобное распределение колебаний часто встречается на длинных зданиях, разделенных деформационными швами на секции. Не обнаружено аномалий в распределении колебаний в продольном направлении здания, которые бы указывали на наличие дефектов в строительной конструкции.

3.1.2 Мониторинг собственных частот сооружений

Для долгосрочной безаварийной эксплуатации зданий и сооружений необходим их технический контроль, в силу влияния на них различных факторов, как естественных (атмосферные, климатические, грунтовые, биологические, сейсмические воздействия), так и техногенных (различные виды нагрузок, взрывы, вибрации, удары, блуждающие токи). К примеру, в последние годы в северных регионах Западной Сибири отмечается значительное повышение температуры воздуха, в связи с чем температура многолетнемерзлых пород начинает повышаться, что приводит к уменьшению несущей способности грунтов и потере устойчивости любых инженерных сооружений в заполярье.

В настоящее время для оценки состояния инженерных сооружений применяется геодезическая съемка и осмотр на наличие фактических повреждений. Однако эти работы не способны выявить скрытые дефекты и участки с повышенным напряженно-деформированным состоянием. В СЕФ ФИЦ ЕГС РАН разрабатывается метод контроля технического состояния здания, основанный на мониторинге его собственных частот колебаний. Изменение мод и частот собственных колебаний может свидетельствовать как о деформационных процессах в основании, так и в конструкции сооружения. Предлагаемый способ определения частот собственных колебаний по микросейсмическому шуму позволяет обнаружить зоны аномальных напряжений, возможных дефектов, а также пронаблюдать влияние сезонных изменений на объект исследования.

Для этого проведен мониторинг годовых изменений значений собственных частот на примере зданий в Сибирском округе:

- Объект №1: Дворец культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель», расположенный по адресу г. Норильск, Ленинский проспект, 9 (рисунок 3.33а);
- Объект №2: Десятиэтажный жилой дом, расположенный по адресу: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 28 (рисунок 3.33б).



Рисунок 3.33 – Внешний вид исследуемых зданий: дворец культуры (а); десятиэтажный жилой дом (б)

Используемые методы и оборудование

Для проведения мониторинга в исследуемые сооружения была установлена система наблюдения, разработанная специалистами филиала. Система включает в себя программное обеспечение и аппаратную конфигурацию, позволяющую получать на удалённом сервере записи сейсмических сигналов от входящей в его состав сейсмостанции в формате miniSeed, посредством коммуникационной среды Интернет и сетевой инфраструктуры организации. Реализованное решение является малогабаритным, для его функционирования требуется подключение к электросети и обеспечение доступа в Интернет (проводное, или через стандартный модем оператора связи). Принципиальная схема системы мониторинга приведена на рисунке 3.34.

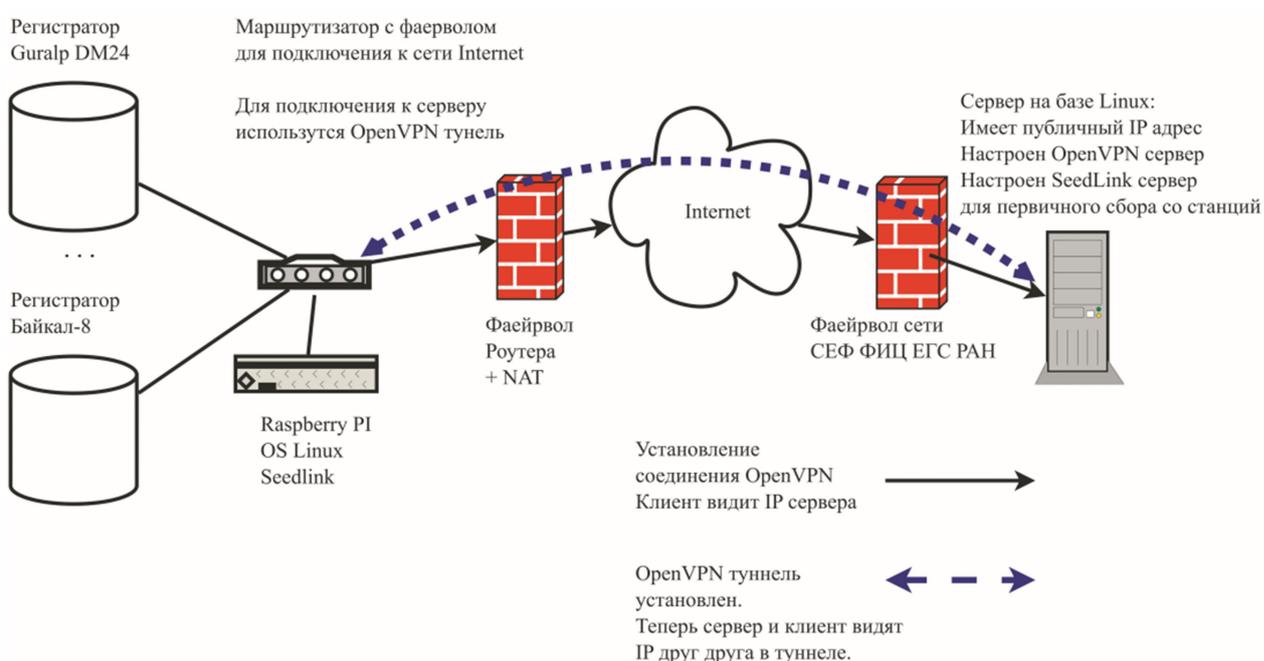


Рисунок 3.34 – Архитектура разработанного системы мониторинга

Аппаратная часть системы, состоит из следующих компонент:

- регистратор «Байкал-8» – сетевой мобильный 6-ти канальный регистратор с высококачественным аналого-цифровым трактом с записью и передачей данных в составе проводных и беспроводных сетей Ethernet [4] и сейсмические датчики GD-4.5 (рисунок 3.35а, таблицы 3.1-3.2);
 - микрокомпьютер Raspberry Pi (рисунок 3.35б);
 - роутер для организации локальной сети и доступа в интернет.
- На рисунке 3.35в представлена аппаратная часть комплекса в сборе.

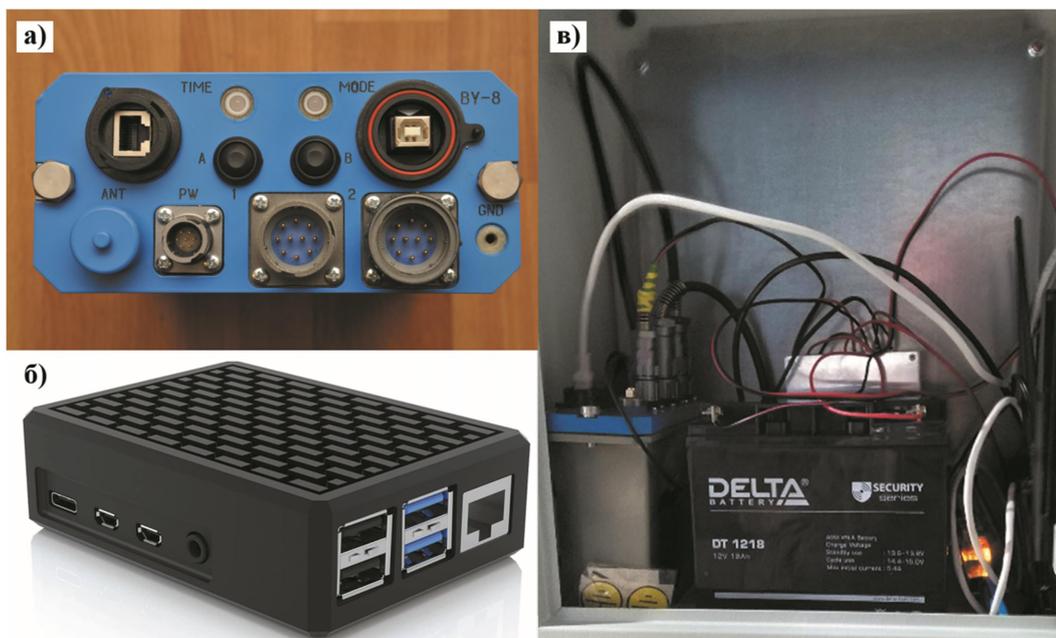


Рисунок 3.35 – Регистратор «Байкал-8» (а); микрокомпьютер Raspberry Pi (б) и пример аппаратной части комплекса в сборе (в)

В нормальном режиме (при условии непрерывной связи с основным сервером) сейсмические данные передаются с задержкой в 1-2 с, близком к реальному времени. При возникновении проблем с каналом передачи данных, информация буферизируется и после восстановления соединения передаётся в основное хранилище данных на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН.

Обработка полученных шумовых записей проводилась при помощи программного комплекса «SpectrumSeism» [5], разработанного Сейсмологическим филиалом ФИЦ ЕГС РАН. Данный программный комплекс позволяет рассчитывать и визуализировать преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (3.1)$$

где f – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда.

Для выделения значений собственных частот производилось накопление большого числа амплитудных спектров шумовых записей, в результате чего на усредненных спектрах проявлялись последовательности локальных максимумов, соответствующие семействам стоячих волн различных типов (таких как изгибные, сжатия-растяжения,

кручения, сдвиговые и т.д.). Данные значения сопоставлялись со значениями, полученными при обследовании сооружений методом стоячих волн [2] в пункте 3.1.

Результаты мониторинга объекта №1 (ДК «Норильский никель»)

Для мониторинга сооружения была реализована система наблюдений с точками измерения, установленными в чердачном помещении и на основании здания, приведенная на рисунке 3.36 и описанная в пункте «Используемые методы и оборудование».

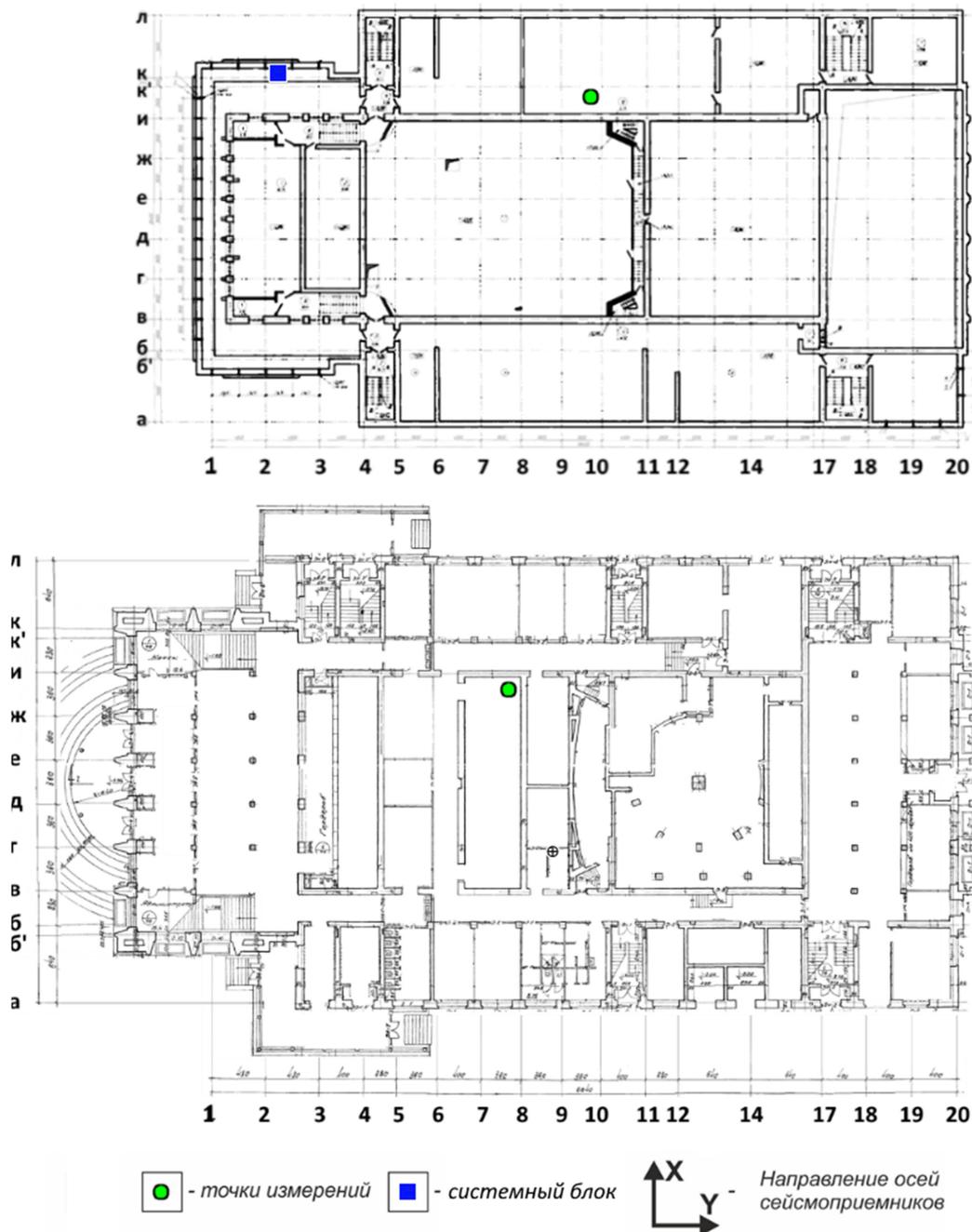


Рисунок 3.36 – Схема точек установки системы мониторинга

Как отмечалось выше в пункте «Объект №4 – Дворец культуры «Норильский никель»», в сооружении проводились измерительные работы для определения параметров

основных мод собственных колебаний здания простой формы, методом стоячих волн [2]. Значения частот, полученных методом стоячих волн приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Частоты собственных колебаний здания на четвертом этаже (данные от 28.08.2021 г.)

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер моды	Частота, Гц	Номер моды	Частота, Гц
1	2.98	1	3.53
2	3.70	2	5.20
3	4.68		

В данной работе рассмотрены результаты обработки записей микросейсмического шума с первого и четвертого этажей здания. На рисунке 3.37 приведены примеры усредненных амплитудных спектров суточных записей микросейсмических колебаний. Частоты приведенных локальных максимумов усредненных спектров совпадают, а амплитуда колебаний на четвертом этаже в несколько раз превышает амплитуду колебаний первого этажа. Следовательно, сравнив полученные значения с приведенными в таблице 3.8 можно сделать вывод о том, что на первом и четвертом этажах здания регистрируются сигналы, схожие по значениям с собственным частотам колебаний сооружения.

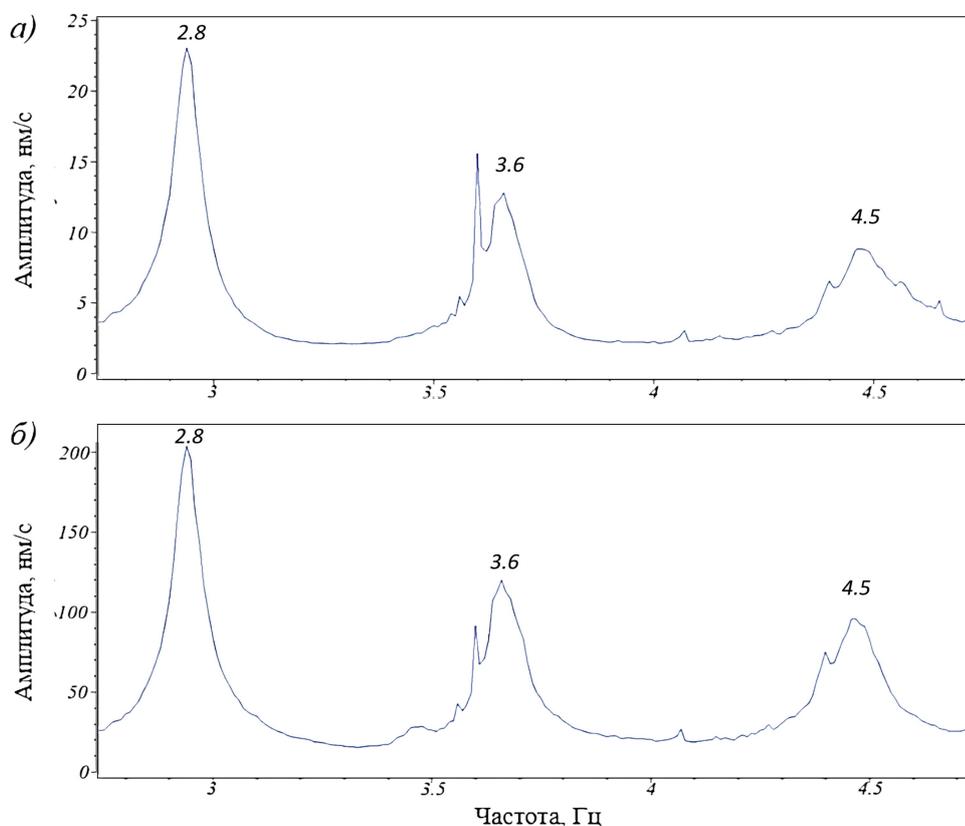


Рисунок 3.37 – Графики усредненных амплитудных спектров суточных записей микросейсмических шумов по компоненте X на первом (а) и четвертом (б) этажах здания при одновременной регистрации 01.07.2022 г.

Чтобы понять, чему соответствуют данные изменения частот локальных максимумов близких к собственным колебаниям сооружения Дворца культуры, было произведено исследование их годовых изменений. Для этого строились усредненные спектры записей, зарегистрированных в точке наблюдения, установленной на четвертом этаже сооружения (поскольку амплитуды собственных колебаний на нем выше). Из построенных спектров, усредненных за сутки, выделялись значения частот полученных локальных максимумов и наносились на графики, представленные на рисунках 3.38-3.39. В результате частоты близкие к значениям первых трех мод поперечных колебаний (по компоненте X), менялись в следующих пределах: близкие к первой моде от 2.87 до 3.26 Гц; ко второй моде от 3.57 до 4.05 Гц; к третьей моде от 4.40 до 4.96 Гц.

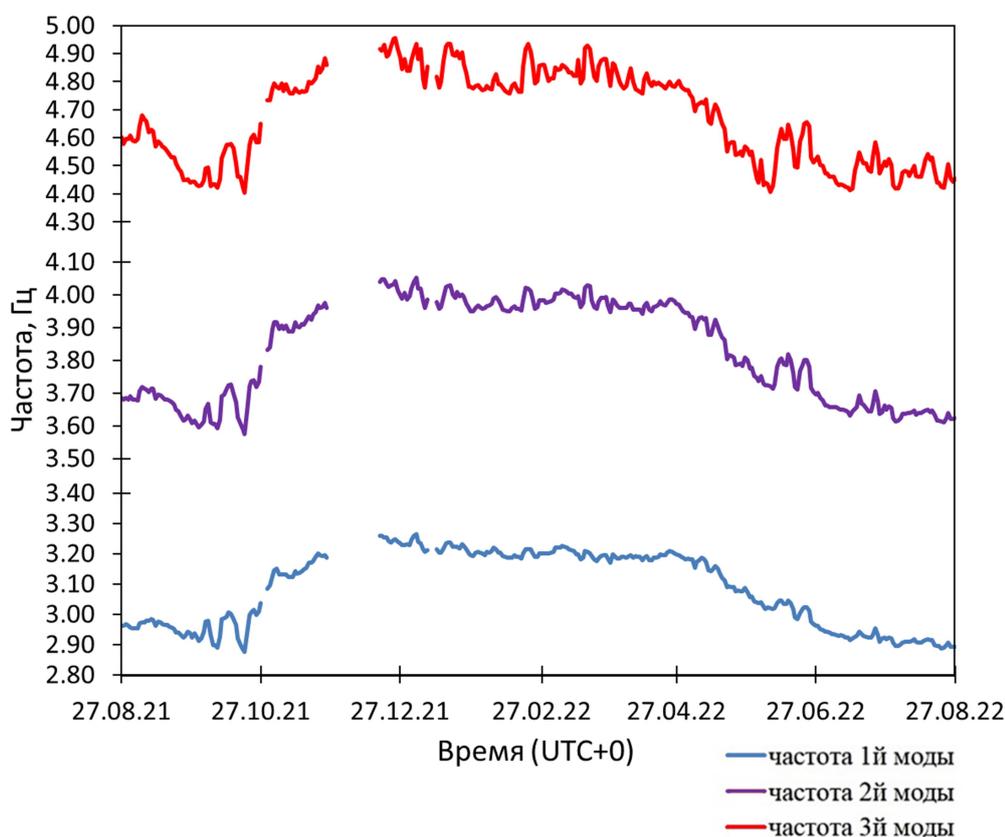


Рисунок 3.38 – Графики изменения частот локальных максимумов близких к первым трем модам поперечных колебаний, полученных с точки наблюдения, установленной на четвертом этаже сооружения

Собственные частоты первых двух видимых мод продольных колебаний (по компоненте Y) следующие (рисунок 3.39): первая мода от 3.35 до 3.93 Гц; вторая мода от 4.77 до 5.38 Гц.

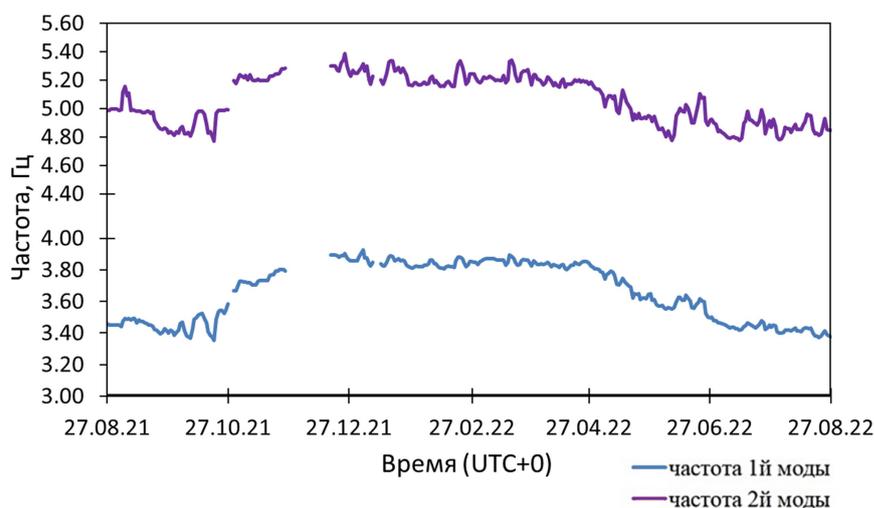


Рисунок 3.39 – Графики изменения частот локальных максимумов близких к первым двум модам продольных колебаний, полученных с точки наблюдения, установленной на первом этаже сооружения

На рисунках 3.40-3.41 показан пример сравнения значения частот локальных максимумов усредненных спектров близких к первым модам, зарегистрированных в точках наблюдения на 4-м и 1-м этажах сооружения, из рисунков видна полная корреляция изменений частот во времени.

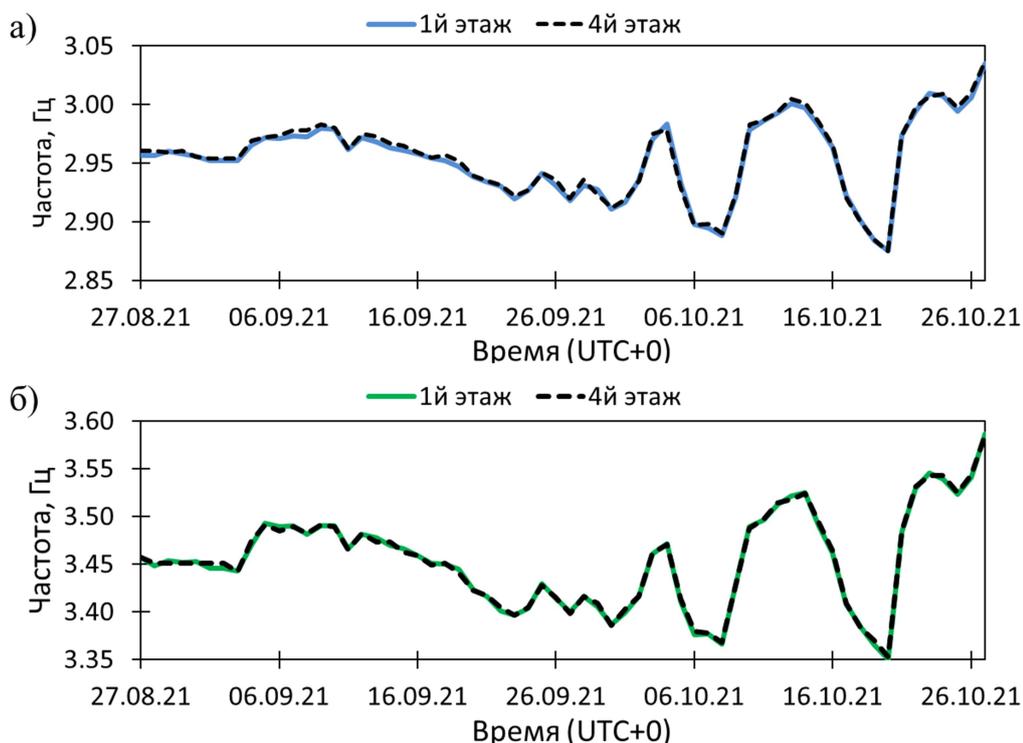


Рисунок 3.40 – Графики изменения частот локальных максимумов близких к первой моде поперечных (а) и продольных (б) колебаний, полученных с точек наблюдений, установленных на первом и четвертом этаже сооружения

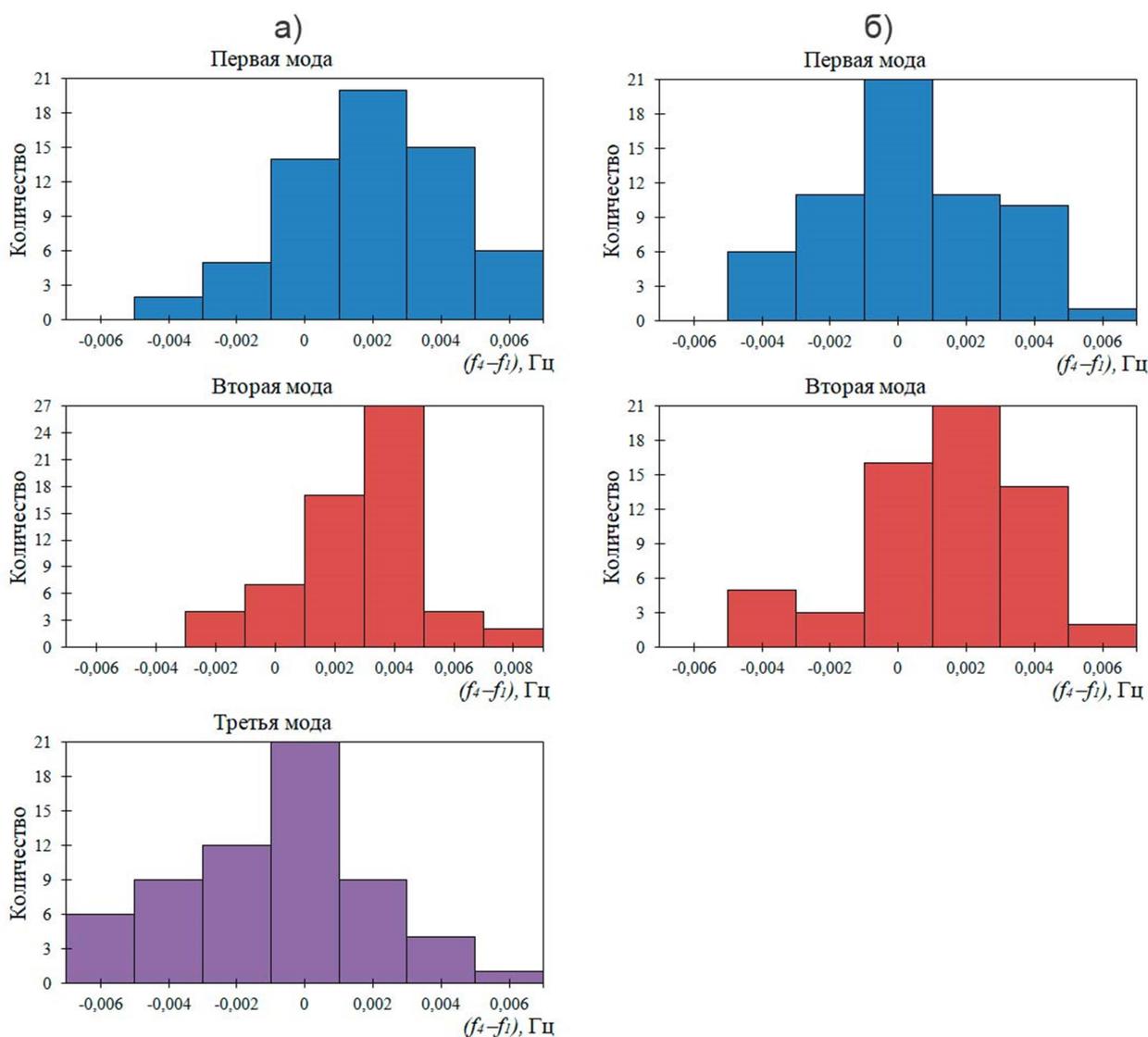


Рисунок 3.41 – Спектральное представление разностей частот локальных максимумов близких к первым модам поперечных (а) и продольных (б) колебаний, зарегистрированных на четвертом и первом этажах сооружения за двухмесячный период записи с 27.08.2021 г. по 27.10.2021 г

Из графиков изменения во времени частот первых мод поперечных и продольных колебаний здания видна хорошая корреляция значений частот друг с другом, что может также свидетельствовать о том, что полученные локальные максимумы являются собственными частотами сооружения.

Следующим шагом было проведено сравнение значений частот локальных максимумов близких к первым модам собственных колебаний и температуры внешней среды в г. Норильске (рисунок 3.42). Данные температуры были взяты с метеостанции, которая отдалена приблизительно на 2 км от исследуемого объекта. Видно, что в представленном примере с течением времени значения частот сооружения меняются, причем зависимость носит обратно пропорциональный характер – рост температуры

окружающей среды приводит к уменьшению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к росту значений.

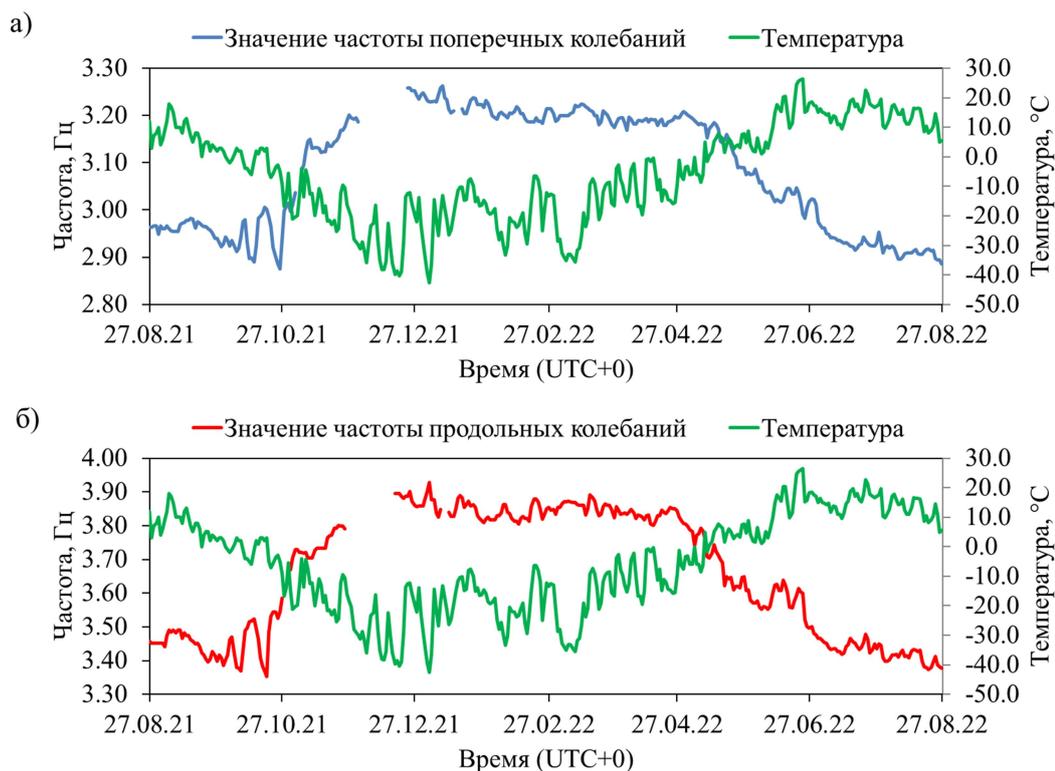


Рисунок 3.42 – Графики изменения температуры и частот локальных максимумов близких к первой моде поперечных (а) и продольных (б) колебаний, зарегистрированных в точке наблюдения на четвертом этаже сооружения

Мы связываем данные изменения со скоростью распространения волн в среде. Известно, что при понижении температуры среды, скорость распространения упругой волны в среде увеличивается, а соответственно увеличивается и частота. Об этом свидетельствует и годовая зависимость частоты от температуры низших мод продольных и поперечных колебаний на четвертом этаже здания (рисунок 3.43). Исходя из графиков, можно судить о том, что промерзание приводит к резкому изменению жесткости конструкции, поскольку вид зависимости частоты от температуры до и после 0 °C отличается.

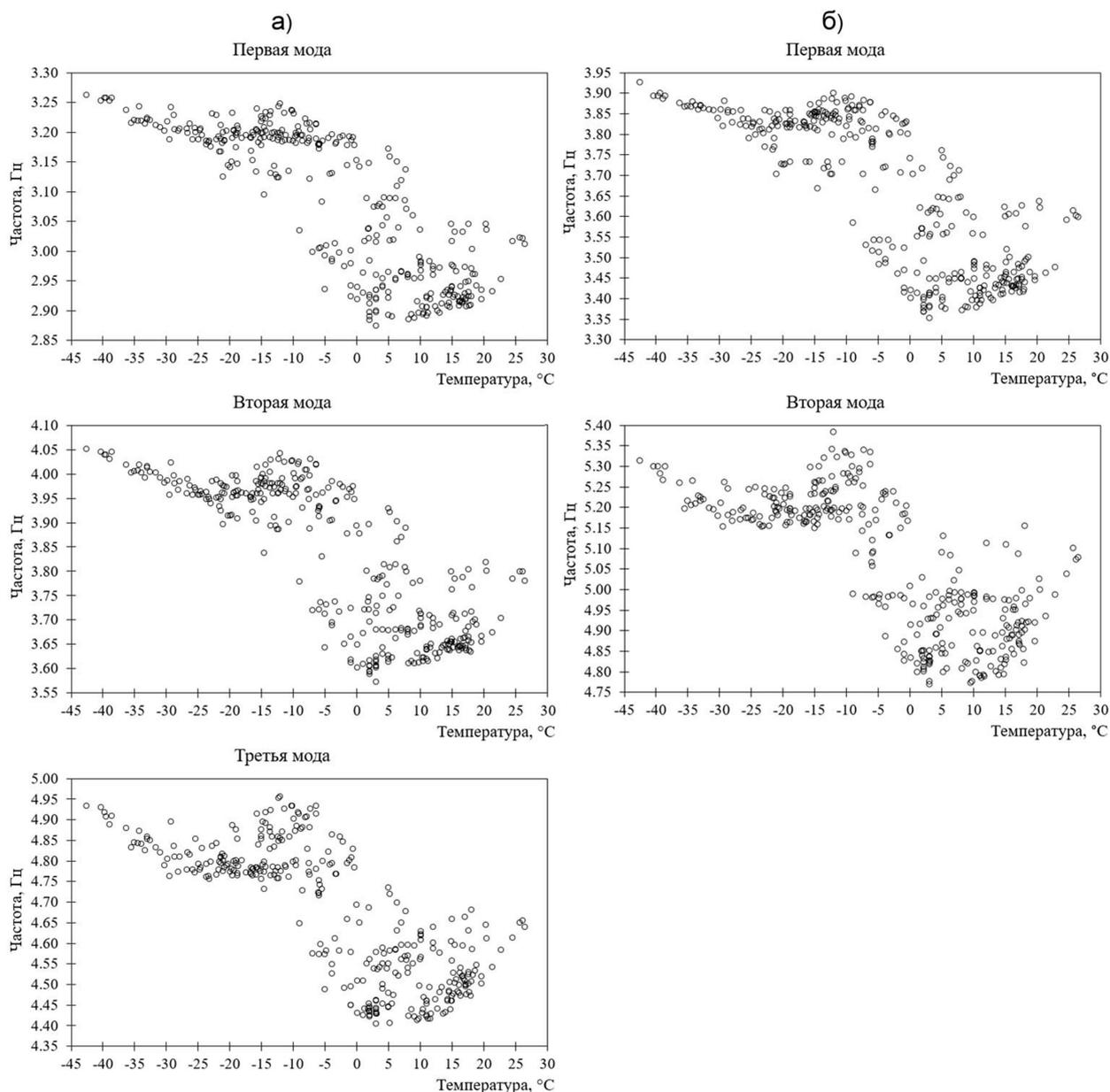


Рисунок 3.43 – Годовая зависимость среднесуточной температуры от изменения частот локальных максимумов близких к низшим модам продольных (а) и поперечных (б) колебаний, зарегистрированных в точке наблюдения на четвертом этаже сооружения

Результаты мониторинга объекта №2 (10-ти этажный жилой дом)

Для мониторинга здания по адресу г. Новосибирск, ул. Пирогова 28, на десятом этаже установлена система наблюдений, описанная в пункте «Используемые методы и оборудование». Направление компонент: X – поперек длинной части сооружения (поперечные), Y – вдоль (продольные колебания), Z – вертикально.

Как отмечалось в пункте «Объект №5 – 10-ти этажный жилой дом», в исследуемом сооружении проводились измерительные работы для определения параметров основных мод собственных колебаний здания простой формы, методом стоячих волн [2]. Значения частот, полученных данным методом, приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Частоты собственных колебаний, полученных на крыше здания (данные от 28.07.2022 г.)

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	1.95	1	2.59
2	2.14	2	7.57
3	3.48		
4	6.71		

В результате обработки данных микросейсмического шума с мониторингового пункта, установленного на десятом этаже здания, за тот же день, когда в нем проводились измерительные работы, описанные выше, был построен амплитудно-частотный спектр в интервале от 0 до 5 Гц (рисунок 3.44).

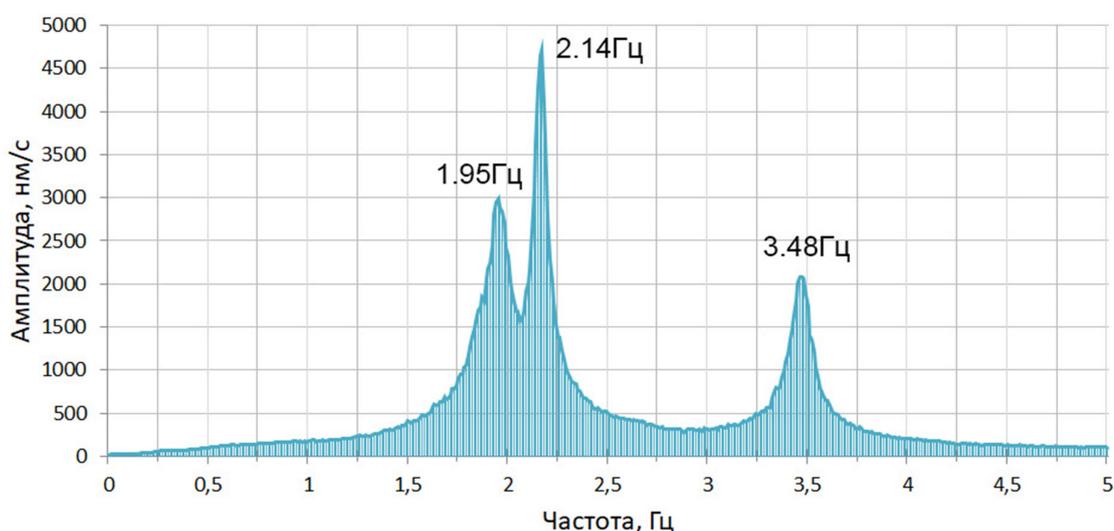


Рисунок 3.44 – Амплитудно-частотный спектр сейсмической записи для дома по адресу г. Новосибирск, ул. Пирогова д. 28, в интервале от 0 до 5 Гц, Y-компонента

На данном графике видны три локальных максимума, с частотами максимальных амплитуд сигнала близкие с частотами собственных поперечных колебаний здания из таблицы 3.9, следовательно, можно сделать вывод, что мы регистрируем схожие сигналы.

В результате анализа более чем годового объема данных, полученных с мониторинговой станции, установлено, что частоты локальных максимумов близких к частотам собственных поперечных колебаний дома могут изменяться в некоторых пределах: первая от 1.88 до 1.99 Гц, вторая от 2.05 до 2.2 Гц, третья от 3.05 до 3.75 Гц. В летние месяцы данные вариации более существенны, чем в зимние. Осуществив сравнение частот локальных максимумов близких к частотам собственных колебаний дома с температурой окружающей среды, между этими величинами была найдена хорошая корреляция (рисунок 3.45).

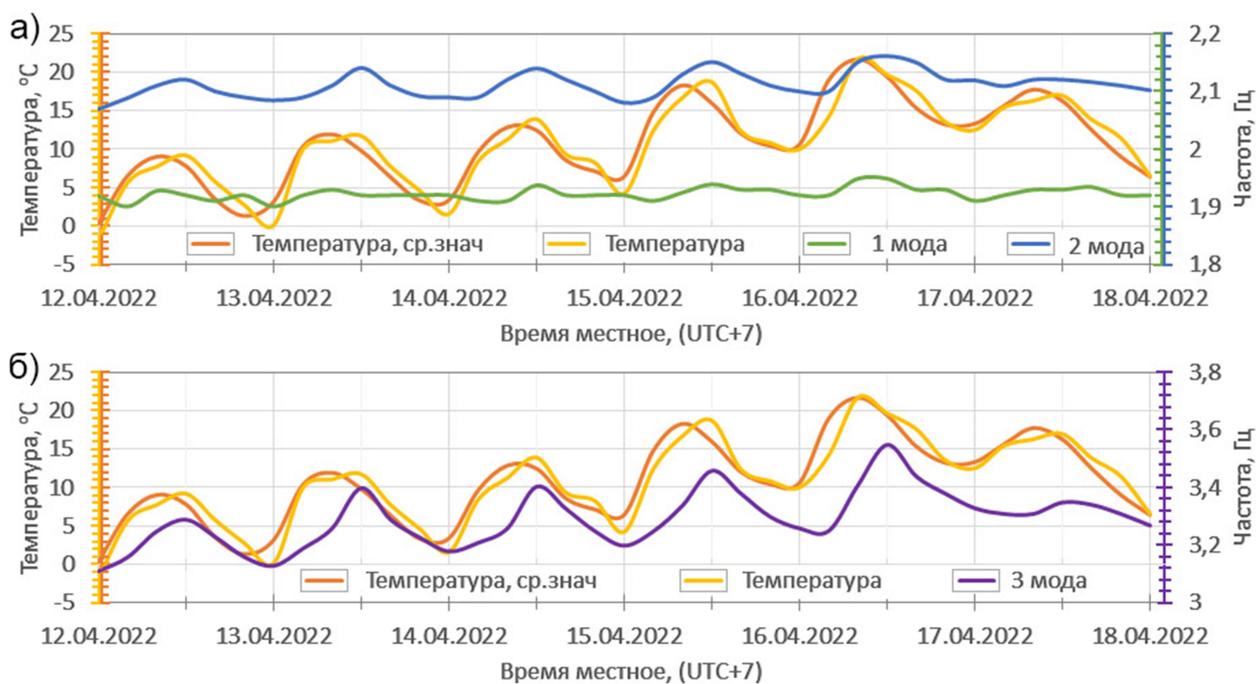


Рисунок 3.45 – Графики изменения температуры среды и значений частот локальных максимумов близких к первым трем модам собственных колебаний дома по ул. Пирогова 28, Е-компонента, с 12.04.22 г. по 18.04.22 г. (а) Изменение усредненной температуры за каждые 4 часа (оранжевый), текущей температуры, каждые 4 часа (желтый), 1 моды (зеленый) и 2 моды (синий); (б) изменение усредненной температуры за каждые 4 часа (оранжевый), текущей температуры, каждые 4 часа (желтый), изменение 3 моды (фиолетовый)

Из рисунка 3.45 видно, что при возрастании температуры, частота увеличивается и соответственно наоборот, с понижением убывает. Особенно хорошо эту связь описывает третья мода (рисунок 3.45б). Следует отметить, что вследствие отсутствия собственной портативной метеостанции на объекте исследования, данные по температуре брались с двух близлежащих станций, расположенных примерно в 900 метрах от здания. Первая, установлена в сооружении Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, вторая – это метеостанция Новосибирского государственного университета. Необходимо понимать, что, в силу их удаления температура на станциях не всегда соответствует температуре на объекте исследования и это может внести некоторую ошибку в конечный результат.

На рисунках 3.46-3.48 приведены результаты анализа зарегистрированных данных, начиная с июня 2021 и по сентябрь 2022 г. Для наглядности, под каждым графиком приведен текущий спектр сейсмической записи по каждому месяцу.

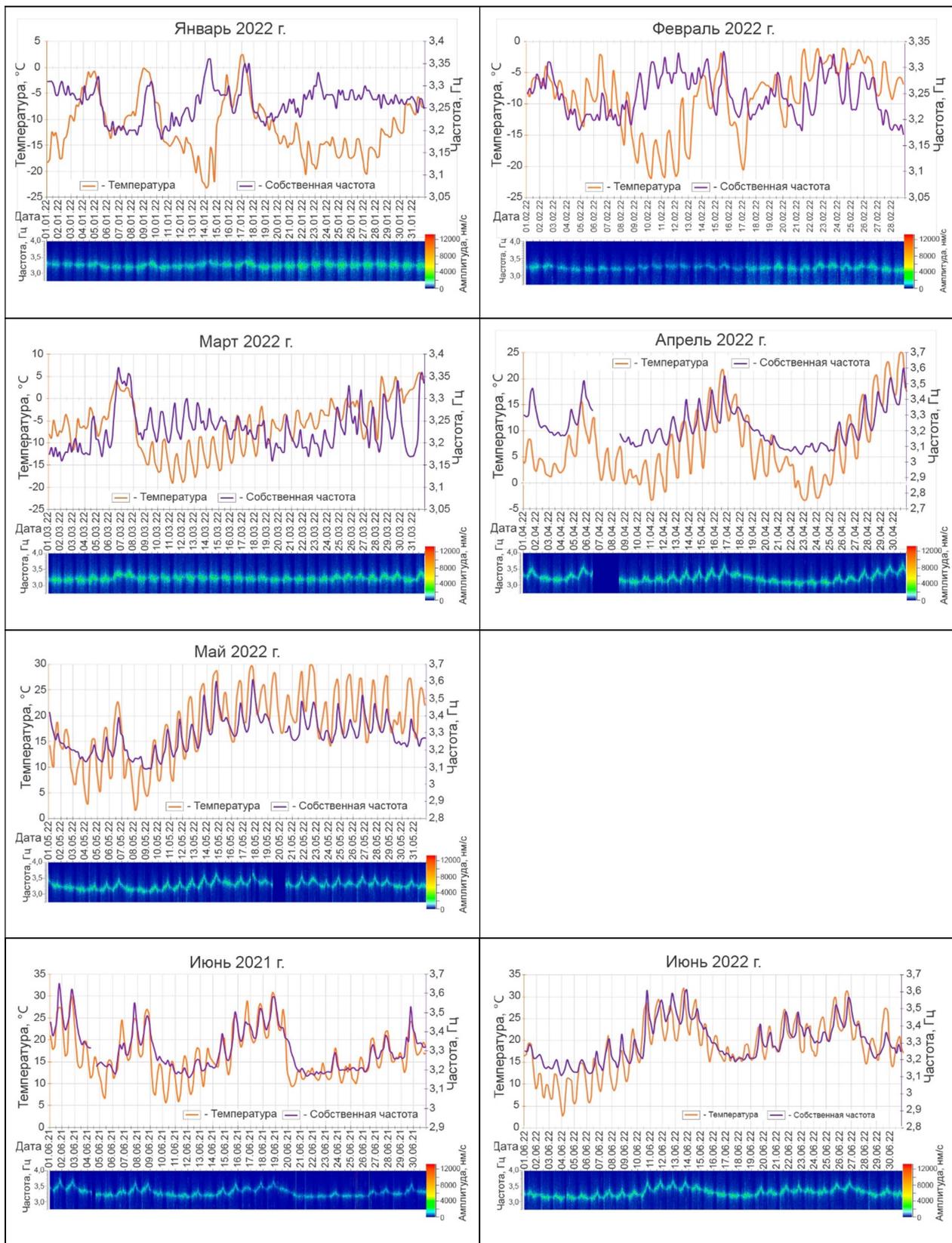


Рисунок 3.46 – Спектрограммы, графики изменения температуры и частот локальных максимумов близких к третьей моде поперечных колебаний, по данным, полученным в точке наблюдения, установленной на десятом этаже сооружения в период с января 2022 г. по июнь 2022 г. и июнь 2021 г.

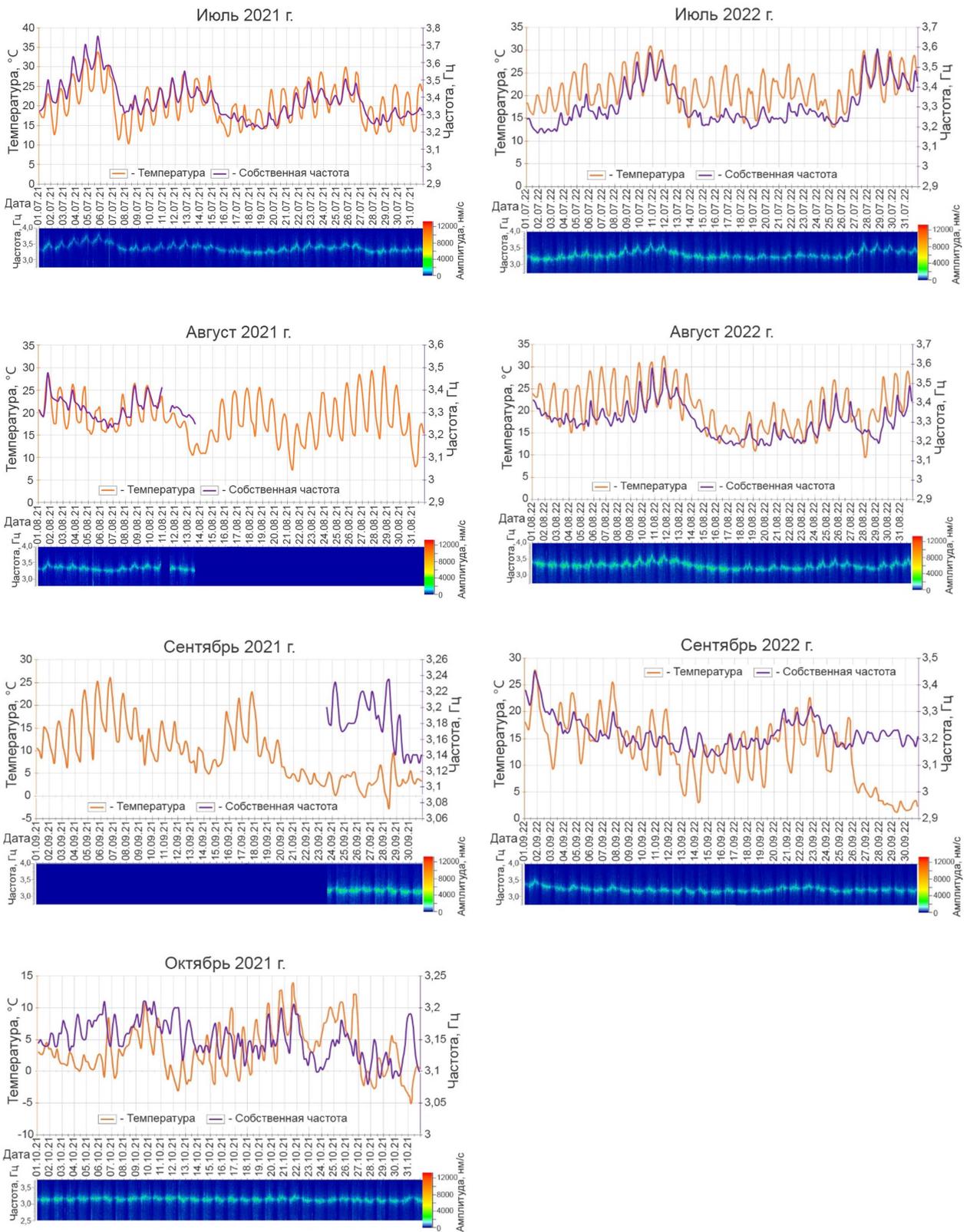


Рисунок 3.47 – Спектрограммы, графики изменения температуры и частот локальных максимумов близких к третьей моде поперечных колебаний, по данным, полученным в точке наблюдения, установленной на десятом этаже сооружения в период с июля 2021 г. по октябрь 2021 г. и с июля 2022 г. по сентябрь 2022 г.

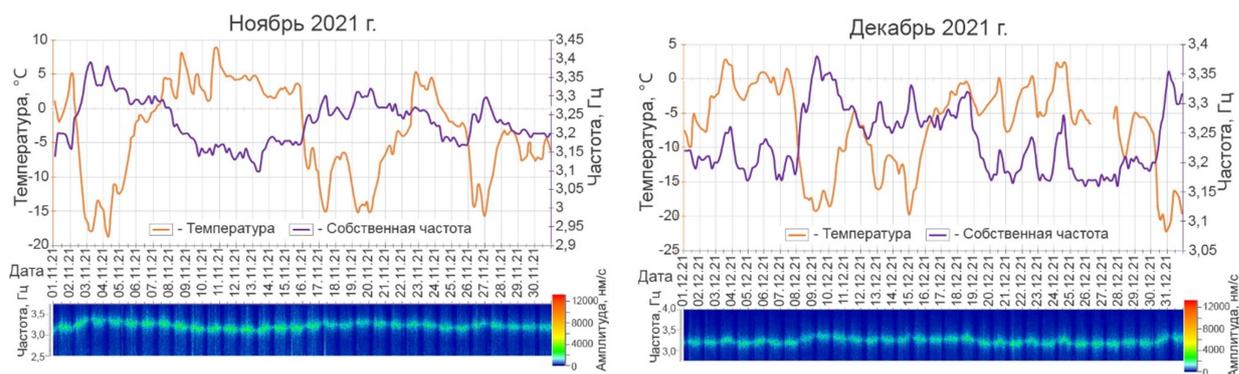


Рисунок 3.48 – Спектрограммы, графики изменения температуры и частот локальных максимумов близких к третьей моде поперечных колебаний, по данным, полученным в точке наблюдения, установленной на десятом этаже сооружения в период с ноября 2021 г. по декабрь 2021 г.

Замечено, что в теплые месяцы, начиная примерно с марта/апреля по август/сентябрь, когда средняя температура окружающей среды превышает 5 °С прослеживается хорошая корреляция между температурой и частотами локальных максимумов: с возрастанием температуры, частота увеличивается и соответственно наоборот, с понижением убывает (рисунки 3.45-3.46). В холодные же месяцы, с сентября по март, может происходить увеличение частоты, при резком понижении температуры, что хорошо видно на графиках за ноябрь, декабрь 2021 г. (рисунок 3.48). Вероятно, это связано с тем, что в зимний период происходит прогрев дома изнутри системой отопления. Когда температура окружающей среды резко опускается, батареи начинают топить гораздо интенсивнее, не давая дому промерзнуть. Соответственно при прогреве дома растет частота локальных максимумов, как это происходило в летние месяцы, несмотря на падение температуры за окном.

Природа данных изменений не до конца понятна, поэтому предлагается продолжить данное исследование для решения этого вопроса.

Влияние промышленных установок на общее состояние объекта №2 (10-ти этажный жилой дом)

Установлено, что на одну из частот локальных максимумов, схожую со второй модой поперечных колебаний дома, по адресу, г. Новосибирск, ул. Пирогова 28, накладывается сигнал от крупяного промышленного компрессора, принадлежащего Институту физики полупроводников им. академика А.В. Ржанова СО РАН, который осуществляет накачку объемных ёмкостей сжатым воздухом. Наблюдения за данным компрессором осуществляется с трех пунктов: сам дом по ул. Пирогова 28 (1.3 км от источника), далее самый ближний пункт к компрессору – станция на скважине, расположенная в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (далее ИВМиМГ) на удалении 700 м от источника и самый дальний пункт, это

сейсмостанция «Ключи», которая расположена в посёлке Каменушка Новосибирской области, в 9 км от объекта нашего исследования. Во всех этих пунктах наблюдений установлена аналогичная аппаратура, описанная в пункте «Используемые методы и оборудование». Расположение всех объектов, расстояния и ориентации осей показаны на рисунке 3.49.

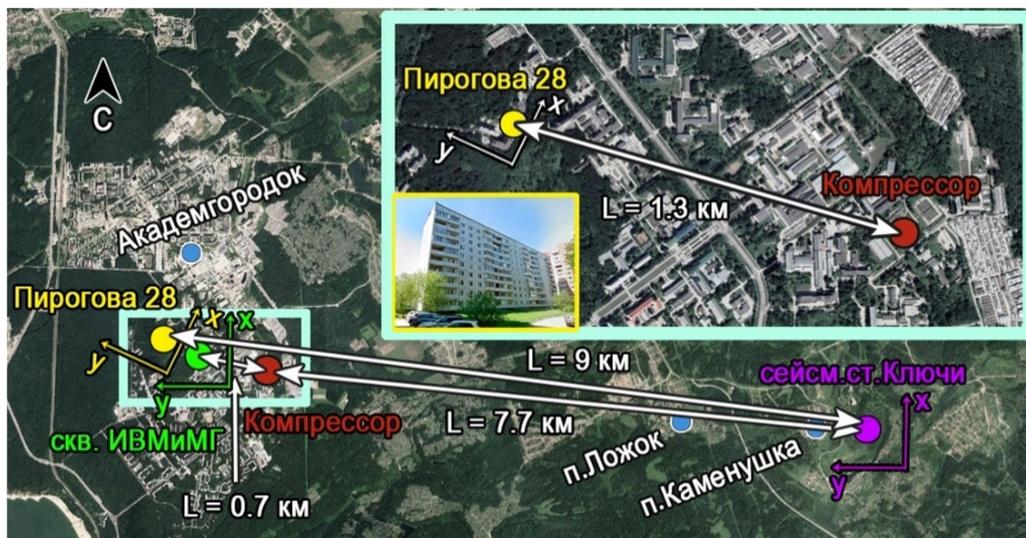


Рисунок 3.49 – Карта расположения объектов наблюдения

Компрессор излучает монохроматический сигнал, частотой 2.083 Гц, что хорошо видно на спектрограммах, в частности за 05.10.2021 г., во временном промежутке с 3:00 по 15:00 по местному времени, (рисунок 3.50).

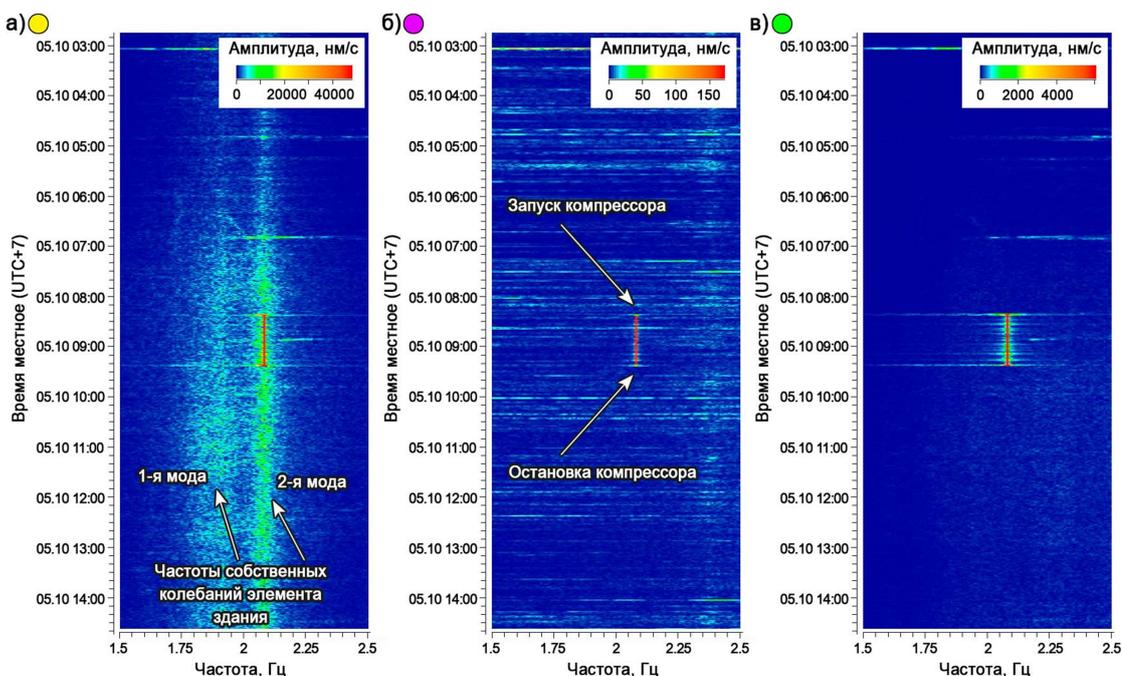


Рисунок 3.50 – Спектрограммы сейсмических записей за 05.10.21, в интервале от 1.5 до 2.5 Гц. (а) По ул. Пирогова д. 28, Y-компонента; (б) сейсмостанция Ключи, X-компонента; (в) скважина ИВМиМГ, X-компонента

На рисунке 3.50а видны две вертикальные полосы в районе 1.9 и 2.08 Гц, прослеживающиеся на всем протяжении спектрограммы, это первая и вторая частота локальных максимумов, близких к первой и второй моде собственных колебаний здания. Помимо этого, видно, что на записи присутствует сигнал, примерно с 8:20 до 9:20, с очень высокой амплитудой, излучаемый вышеописанным компрессором, который накладывается на вторую частоту, схожую со второй модой собственных колебаний дома. На рисунках 3.50б и 3.50в представлены спектрограммы со станции Ключи и ИВМиМГ, на них также прослеживается данный сигнал.

Напомним, что частоты локальных максимумов близких к собственным колебаниям дома могут изменяться, а именно варьироваться в некоторых границах, тем самым описанная нами выше ситуация наложения частот происходит не всегда. Рассмотрим довольно интересную ситуацию, произошедшую в мае 2022 года, когда частота, схожая с частотой собственных колебаний дома находилась во всех трех возможных положениях от сигнала компрессора, а именно, слева (рисунки 3.51а и 3.52а), наложилась (рисунки 3.51б и 3.52б) и оказалась справа от компрессора (рисунки 3.51в и 3.52в).

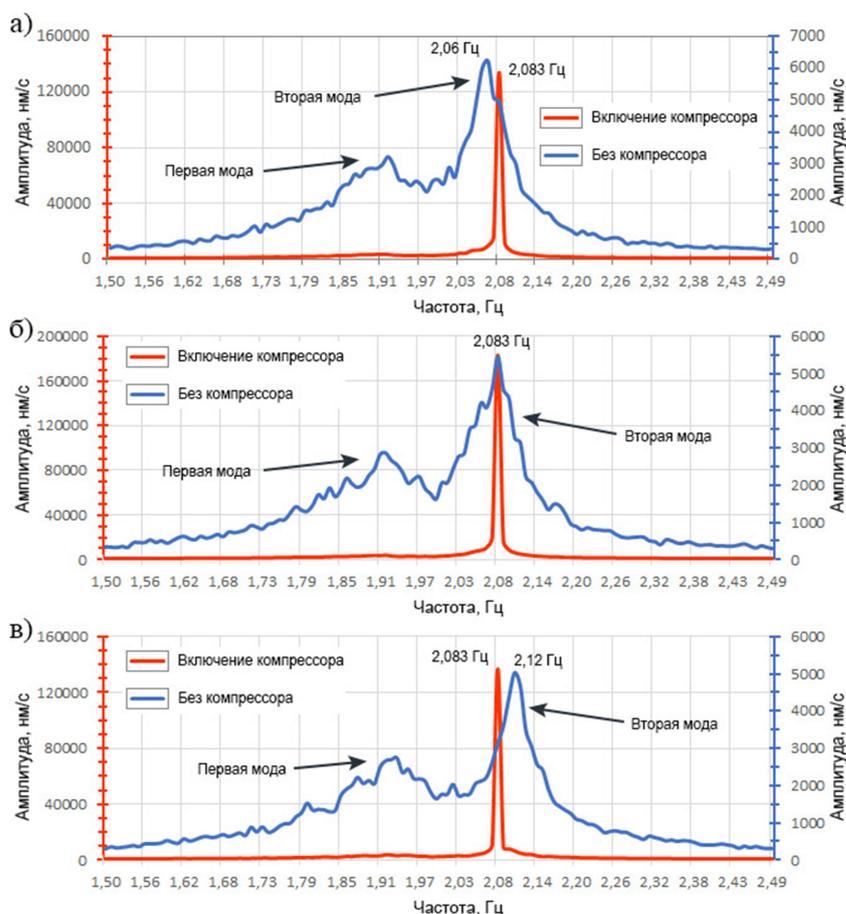


Рисунок 3.51 – Графики изменения амплитуд частот локальных максимумов, при включении компрессора (красный) и перед включением (синий), Y-компонента.
(а) частота максимума находится слева от излучаемой компрессором частоты. 05.05.22 г.;

(б) частота максимума совпадает с компрессором, 12.05.22 г.;
(в) частота максимума находится справа. 17.05.22 г.

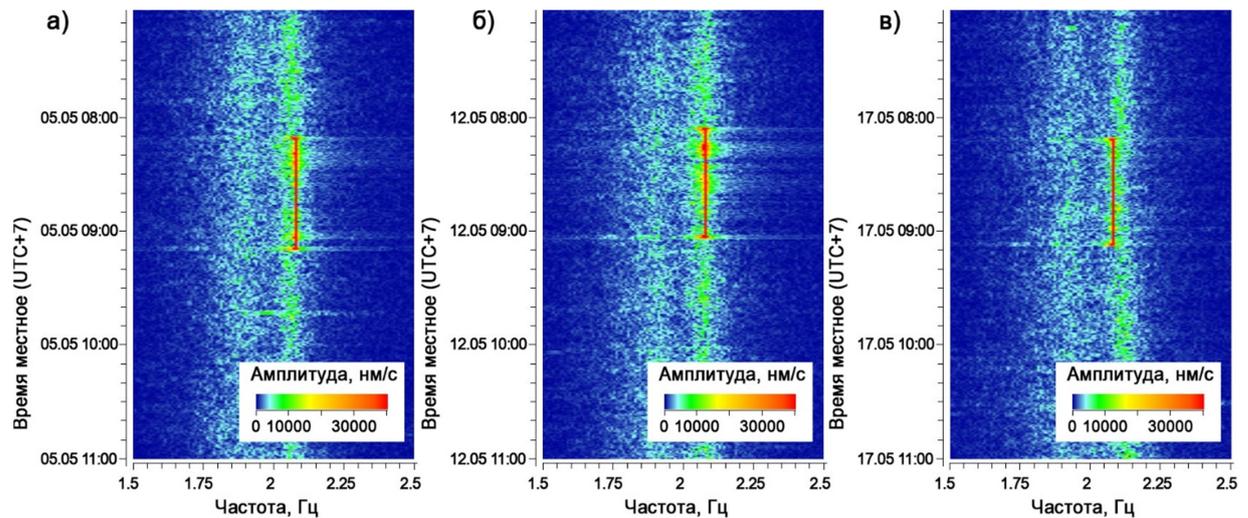


Рисунок 3.52 – Спектрограммы сигналов для здания по ул. Пирогова д. 28, Y-компонента (а) частота локального максимума находится слева от излучаемой компрессором частоты. 05.05.22 г.; (б) частота локального максимума совпадает с компрессором, 12.05.22 г.; (в) частота локального максимума находится справа. 17.05.22 г.

Наглядно видно, что при наложении частот, происходит увеличение амплитуды сигнала, примерно в 1.5 раза, в отличии ситуаций, когда наложение не произошло, тем самым, можно сказать, что происходит явление резонанса.

Известно, что если частота колебаний, передающихся от работающего механизма фундаменту здания, совпадает с собственной частотой колебаний отдельных частей здания, особенно верхних этажей и перекрытий, то, в результате его длительной работы, могут возникнуть значительные амплитуды колебаний. В ряде случаев это приводит к постепенному разрушению здания, оно оседает и даёт трещины. Это явление называется резонансом и может быть причиной разрушения машин, зданий, мостов и других сооружений, если собственные частоты их колебаний совпадут с частотой периодически действующей силы.

Изучив имеющиеся по сейсмостанциям записи, было определено, что данный компрессор включается с периодичностью несколько раз в месяц, в среднем около четырех, длительностью около часа, всегда в утренние часы. Ниже приведем таблицу всех включений компрессора за изучаемый период.

Таблица 3.10 – Включения компрессора (окно $T = 200$ с, шаг окна 100 с, в формуле 3.1).

Дата включений	Частота компрессора, Гц	Частота локального максимума ¹ , Гц	Резонансная частота по ГОСТ ² , Гц	Пирогова 28 Укомпонента, нм/с	ВЦ (вектор), нм/с	Ключи (вектор), нм/с
31.05.2021	2.085	2.1025	2.074	146951.2	23709.50	123.69
01.06.2021	2.085	2.1251	2.114	122450	22945.59	119.28
07.06.2021	2.085	2.1075	2.108	128784.8	24071.48	127.52
08.06.2021	2.085	2.1153	2.098	141134.6	26732.39	143.81
16.06.2021	2.085	2.12995	2.130	146132.45	23554.56	126.17
18.06.2021	2.085	2.14025	2.140	151540.92	25336.51	133.91
21.06.2021	2.085	2.0898	2.072	155442.86	24566.97	128.18
25.06.2021	2.085	2.09505	2.077	205553.5	27097.34	144.16
28.06.2021	2.085	2.11015	2.078	172061.5	23012.53	120.86
01.07.2021	2.085	2.1227	2.089	173769.6	26907.78	142.40
05.08.2021	2.085	2.12275	2.086	161849	25448.02	130.24
27.09.2021	2.085	2.1025	2.075	210720.52	22754.37	126.68
05.10.2021	2.085	2.08485	2.068	178955.17	24322.41	139.16
07.10.2021	2.085	2.08485	2.053	149079.67	22229.46	126.72
19.10.2021	2.085	2.0721	2.038	117329.36	21727.97	129.20
27.10.2021	2.085	2.08235	2.044	142782.07	24029.98	139.49
09.11.2021	2.085	2.0849	2.046	150139.96	22768.01	132.59
15.11.2021	2.085	2.06975	2.036	133643.5	20480.01	128.89
17.11.2021	2.085	2.1	2.061	135719.81	20155.75	122.62
22.11.2021	2.085	2.10755	2.066	72493.52	19914.44	108.66
01.12.2021	2.085	2.0975	2.053	101310.94	19557.06	110.63
06.12.2021	2.085	2.10505	2.060	77846.89	20378.92	110.26
09.12.2021	2.085	2.1176	2.076	54925.12	18869.67	109.14
14.12.2021	2.085	2.11005	2.071	72220.86	16894.56	99.07
19.01.2022	2.085	2.1025	2.067	60389.53	17679.23	118.74
26.01.2022	2.085	2.1202	2.077	52274.45	15613.63	-
24.02.2022	2.085	2.1328	2.101	11851.54	17433.04	111.40
22.03.2022	2.085	2.14535	2.106	20216.58	16867.51	115.48
23.03.2022	2.085	2.14535	2.106	16588.43	14980.09	101.87
24.03.2022	2.085	2.15295	2.117	16866.03	15184.37	103.56
29.03.2022	2.085	2.158	2.127	27782.62	16577.14	103.14
30.03.2022	2.085	2.13525	2.093	39967.94	17160.01	103.51
05.04.2022	2.085	2.1278	2.089	74371.67	20090.12	90.65
07.04.2022	2.085	-	-	-	22146.47	111.86
08.04.2022	2.085	-	-	-	24202.20	131.60
11.04.2022	2.085	2.0899	2.054	114564.62	20988.49	123.41
19.04.2022	2.085	2.08235	2.056	162260.57	23789.58	141.16
28.04.2022	2.085	2.0874	2.057	178900.91	-	129.05
04.05.2022	2.085	2.0748	2.052	122756.73	-	114.20
05.05.2022	2.085	2.0622	2.035	97585.56	-	103.98
12.05.2022	2.085	2.08495	2.054	150049.67	-	117.51
17.05.2022	2.085	2.11765	2.078	106348.3	-	109.21
19.05.2022	2.085	2.1164	2.102	127239.69	22297.94	109.09
24.05.2022	2.085	2.0975	2.062	141902.95	22390.78	109.21
26.05.2022	2.085	2.1227	2.089	132830.85	21070.54	104.34

Таблица 3.10 – (Продолжение) Включения компрессора (окно $T = 200$ с, шаг окна 100 с).

Дата включений	Частота компрессора, Гц	Частота локального максимума ¹ , Гц	Резонансная частота по ГОСТ ² , Гц	Пирогова 28 Укомпонента, нм/с	ВЦ (вектор), нм/с	Ключи (вектор), нм/с
31.05.2022	2.085	2.10505	2.069	172992.78	22124.52	112.05
02.06.2022	2.085	2.0975	2.062	171879.7	24040.44	134.47
03.06.2022	2.085	2.09495	2.058	168728.66	23333.78	133.95
07.06.2022	2.085	2.08995	2.059	168310.99	24640.33	138.27
21.06.2022	2.085	2.1189	2.086	138729.2	-	112.85
28.06.2022	2.085	2.1227	2.083	152195	-	131.51
27.07.2022	2.085	2.13785	2.097	127184.94	23874.72	130.44
17.08.2022	2.085	2.12525	2.089	161256.19	22920.60	121.03
17.08.2022	2.085	2.12525	2.089	145033.4	20556.38	107.53
25.08.2022	2.085	2.1225	2.080	145648.25	20709.40	107.99
29.08.2022	2.085	2.11	2.081	148911.86	21502.49	119.47
16.09.2022	2.085	2.09	2.062	222927.31	-	122.33
03.10.2022	2.085	2.075	2.043	233284.12	-	141.26
04.10.2022	2.085	2.08	2.054	237715.86	-	143.54
11.10.2022	2.085	2.085	2.054	221383.32	24923.59	-

1 - Частота локального максимума, схожего с частотой собственных колебаний здания в момент включения компрессора рассчитывалась по текущему спектру до и после включения компрессора путем усреднения.

2 - Резонансная частота, рассчитанная по ГОСТ 3481-2017, но данные показания даны для примера и пока не будут учитываться из-за большого разброса данных при их расчете.

Выводы

Результаты проведенных исследований выявили, что частоты локальных максимумов близких к собственным частотам колебаниям дома не являются статичной величиной и могут изменяться в определенных интервалах, а одним из факторов, влияющих на этот процесс, является изменение температуры окружающей среды. В теплые периоды года, когда средняя температура воздуха устанавливается больше 5 °С, мы наблюдаем хорошую корреляцию между температурой и частотами локальных максимумов: при возрастании первой происходит увеличение второй, соответственно, при остывании воздуха частота понижается. Но при отрицательных значениях температуры, когда воздух охлаждается значительно ниже 5 °С картина становится уже не так однозначна. В особо холодные дни, наблюдается обратная картина, при значительном понижении температуры частота начинает расти, вероятней всего это вызвано работой центрального отопления, чем холоднее температура на улице, тем интенсивней работают батареи, тем самым прогревая дом.

Помимо этого, был выявлен неблагоприятный фактор, влияющий на общее состояние жилого дома в виде периодически работающей мощной промышленной установки, а именно компрессора, находящегося на расстоянии 1.3 км от объекта нашего исследования и излучающего монохроматический сигнал частотой 2.083 Гц, который в

определенные интервалы времени может накладываться на частоту схожую со второй модой собственных колебаний дома, вызывая резонансное явление. По нашим наблюдениям столь кратковременные воздействия не оказывают большого влияния на конструкцию дома, к тому же частота локального максимума не всегда попадает в резонанс, но для дальнейшего определения рисков для других объектов, необходимо продолжать изучать это явление.

Следует отметить, что критических моментов при наблюдении за объектом отследить не удалось. А определить начало необратимых изменений конструкции, мы можем, когда увидим резкое скачкообразное изменение в частотах схожих с частотами собственных колебаний дома. В этом случае следует провести более детальные исследования для выявления подвергшихся разрушению деталей здания и их укрепление.

3.1.3 Анализ вибрации от гидроагрегатов СШ ГЭС

В данной главе будут показаны основные результаты исследования проводимых на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции, с целью определения причинно-следственных связей работы гидроагрегатов и регистрируемых колебаний. Для этого был произведен анализ изменения амплитудно-частотного состава записи от различных режимов работы гидроагрегатов и анализ изменения выделенных колебаний (кратных оборотной частоте гидроагрегатов, пульсаций давления жидкости в водоводе и отсасывающей трубе и пр.) от различных режимов их работы.

Экспериментальная часть, используемые методы и оборудование

Регистрация сейсмических колебаний проводилась с 24.05.2022г по 06.06.2022г. Схемы сейсмических наблюдений и машинном зале СШ ГЭС приведена на рисунке 3.53. Регистрация велась в 10 точках наблюдения, которые устанавливались у крышки каждого гидроагрегата (далее ГА) в машинном зале (отм. 321 м). Запись сейсмических сигналов проводилась в непрерывном режиме и включала регистрацию колебаний во время работы ГА-1-10 на различных режимах.

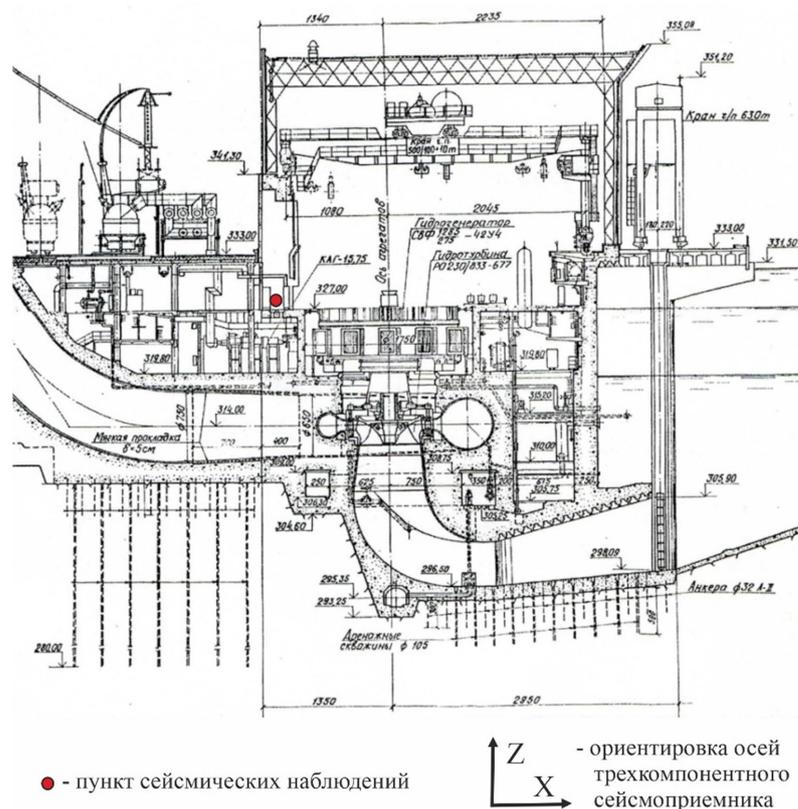


Рисунок 3.53 – Схема наблюдений

Регистрация в каждом пункте наблюдения проводилась с помощью трехкомпонентного сейсмоприемника GD-4.5 (датчики скорости) и автономного сейсмического регистратора «Байкал-7» (сейсмическая станция). Данную сейсмическую станцию последовательно перемещали в каждый пункт наблюдения согласно таблице 3.11. Направления осей трехкомпонентного сейсмоприемника, следующие: X – направлены по течению реки, Y – поперек, Z – вертикально.

Таблица 3.11 – Сведения о расстановке сейсмической станции

№ точки наблюдения	Место установки	начало регистрации	конец регистрации
т.8	у крышки ГА8 (отм. 321 м)	24.05.2022 09:30	25.05.2022 10:00
т.7	у крышки ГА7 (отм. 321 м)	25.05.2022 10:30	26.05.2022 08:30
т.1	у крышки ГА1 (отм. 321 м)	26.05.2022 09:00	27.05.2022 08:30
т.9	у крышки ГА9 (отм. 321 м)	27.05.2022 09:00	28.05.2022 08:30
т.10	у крышки ГА10 (отм. 321 м)	30.05.2022 09:00	31.05.2022 08:30
т.6	у крышки ГА6 (отм. 321 м)	31.05.2022 09:30	01.06.2022 08:30
т.3	у крышки ГА3 (отм. 321 м)	01.06.2022 09:00	02.06.2022 08:30
т.5	у крышки ГА5 (отм. 321 м)	02.06.2022 09:00	03.06.2022 08:00
т.4	у крышки ГА4 (отм. 321 м)	03.06.2022 08:30	03.06.2022 16:00
т.2	у крышки ГА2 (отм. 321 м)	06.06.2022 16:30	07.06.2022 07:00

При проведении геофизических исследований была задействована следующая аппаратура: автономные трехканальные сейсмические регистраторы «Байкал-7», датчики-велосиметры GD-4.5.

Регистратор «Байкал-7» представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 3-х канальный 24-х разрядный аналого-цифровой преобразователь, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник (внешняя антенна) и сменные гальванические элементы питания. Регистраторы устанавливаются в точках измерений, в непосредственной близости от сейсмических датчиков. Запись производится в непрерывном или старт-стопном режимах (по таймеру или критериям).

Общий вид комплектов аппаратуры и использованных сейсмических датчиков приведен на рисунке 3.54, краткие технические характеристики приведены в таблицах 3.1-3.2.



Рисунок 3.54 – Сейсмический регистратор «Байкал-7» с подключенным датчиком-велосиметром GD-4.5

Информация о времени и режиме работы гидроагрегатов предоставлена сотрудниками СШГЭС и показана на рисунке 3.55.

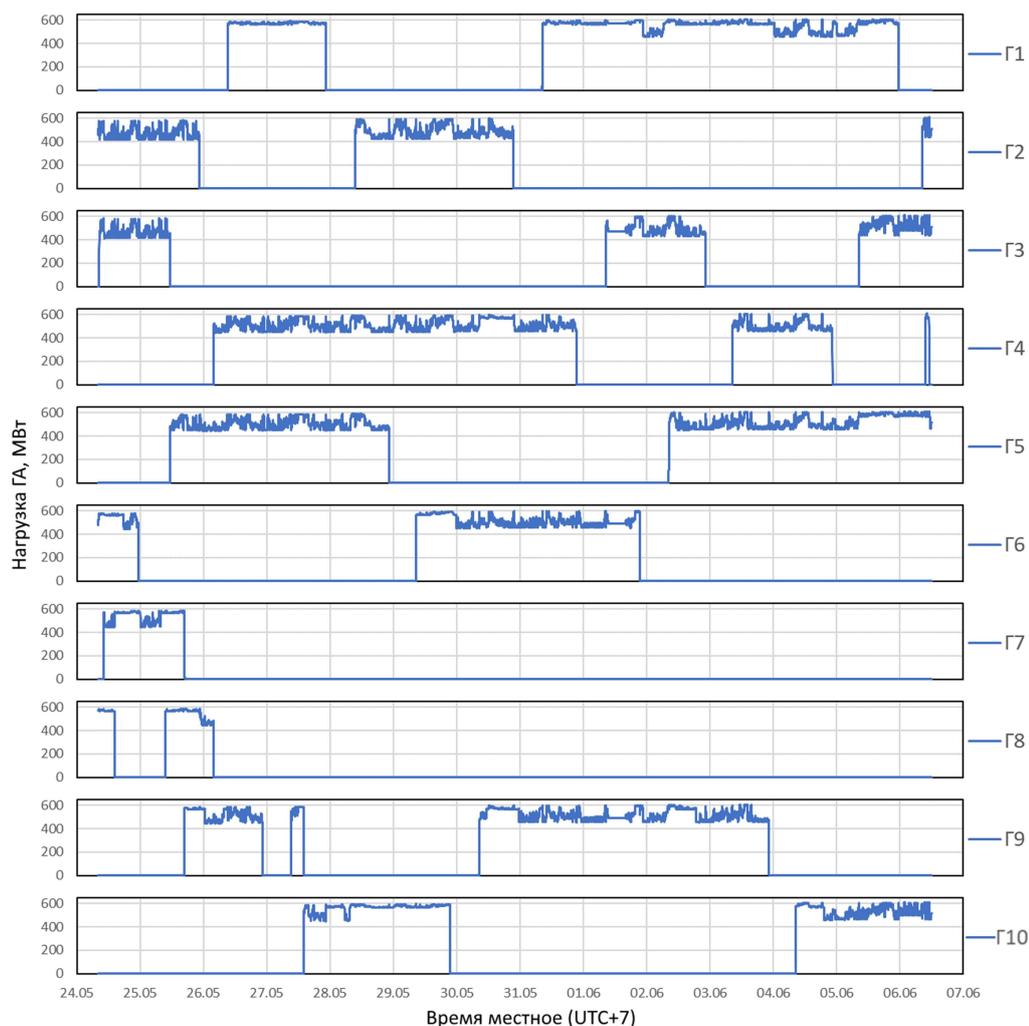


Рисунок 3.55 – Режимы поданных нагрузок на гидроагрегаты СШ ГЭС

В ФИЦ ЕГС РАН разработаны и запатентованы способы обработки сейсмических данных, полученных при регистрации колебаний в окрестности крупных промышленных установок [6]. Для качественного анализа зарегистрированных сейсмограмм используется методика построения спектрограмм. Принцип их построения, следующий: по сейсмической записи, скользят временным окном, для каждого положения которого рассчитывается амплитудный спектр. Множество таких спектров образует двумерное изображение, по одной шкале которого откладывается текущее время, по другой – частота. Амплитудам спектров соответствует цветная шкала, большие амплитуды отображаются более яркими (например, красными) цветами, а малые – более темными (например, синими).

В математическом выражении спектрограмма – это двумерная функция $A(\omega, t)$, вычисляемая по формуле 3.1.

Спектрограмма позволяет определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени. Необходимость разделения сейсмограммы на частотные

составляющие при помощи построения спектрограмм обусловлена тем, что, как правило, зарегистрированный сигнал содержит в себе сумму колебаний от нескольких различных источников, и выделить из этой записи интересующий источник не всегда возможно из-за того, что амплитуда этого «полезного» сигнала может быть ниже, чем амплитуды сигналов от других источников, создающих шумовой фон.

На рисунке 3.56 показан пример спектрограммы сейсмической записи с датчика, установленного в т.2. Видно, что зарегистрированный сигнал во время работы ГА2 представляет собой набор различных сейсмических источников, особенностью которых является то, что они работают на определенных частотах. Каждый из источников излучает свою частоту плюс набор кратных частот. Зная соответствие, источник-частота, можно найти на спектрограмме соответствующую частоту (или полосу частот), и по изменениям амплитуд контролировать работу этого источника.

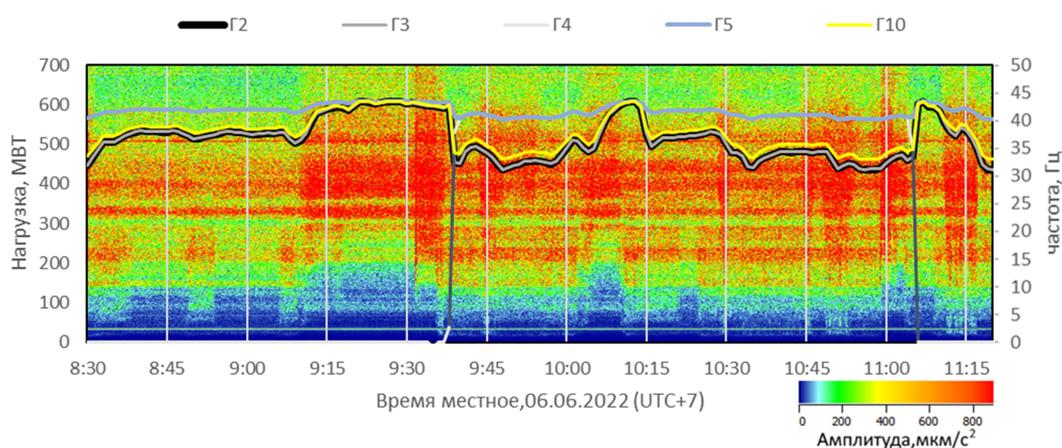


Рисунок 3.56 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной в т.2 у ГА2, во время его работы

Спектрограммы удобно использовать для качественного анализа изменений амплитудно-частотного состава записи с течением времени. Для перехода к количественным оценкам, когда нужно проанализировать работу определенного источника колебаний, нами был предложен подход построения графиков изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах (связанных с работой данного источника). Графики вычисляются по формуле 3.1.

Характеристики источников работающих на Саяно-Шушенской ГЭС

На первоначальном этапе обработки данных, согласно описанной выше методике, был определен набор частот, связанных с работой гидроагрегатов, и собственными колебаниями сооружения Саяно-Шушенской ГЭС.

На рисунке 3.57 представлены амплитудные спектры записи, полученной при регистрации колебаний в машинном зале возле ГА-3 (отм. 321 м), во время нагрузки на

исследуемом гидроагрегате 480-600 МВт. Во время проведения регистрации функционировали и сторонние гидроагрегаты ГА1, ГА6, ГА9. Из рисунков видно, что в спектрах присутствуют монохроматические сигналы, частоты которых кратны частоте вращения гидроагрегата, т.е. весь набор частот, описывается соотношением: $f = N \cdot 2.381$ Гц, где f – частота монохрома, N – целое число (значение кратности частоте вращения гидроагрегата), 2.381 Гц – оборотная частота агрегата. При этом абсолютные значения амплитуд этих монохромов различаются. Анализ спектров записей со всех пунктов регистрации показал, что наибольшая, в среднем, амплитуда (при работе гидроагрегатов под максимальной нагрузкой) наблюдается для монохромов 35.715 Гц, которые соответствуют кратности $N=15$ и являются «лопастными» частотами гидроагрегатов с 15-ю лопастями. Также, значительным по амплитуде является колебание с частотой 100 Гц, которая соответствует значению кратности частоты вращения гидроагрегата 42.

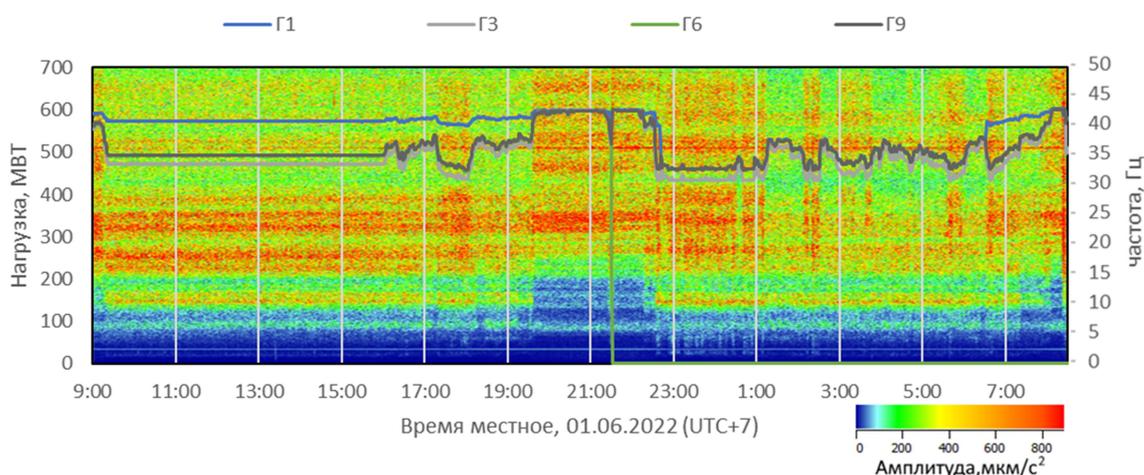


Рисунок 3.57 – Спектрограммы записи в т.3, установленной возле крышки ГА3. Y-компонента

Колебания с частотой 35.715 Гц наблюдаются на спектрах, изображенных на рисунке 3.58, наибольшие значения (до ~6000 мкм/с²) регистрируются на Y-компоненте при регистрации в машинном зале.

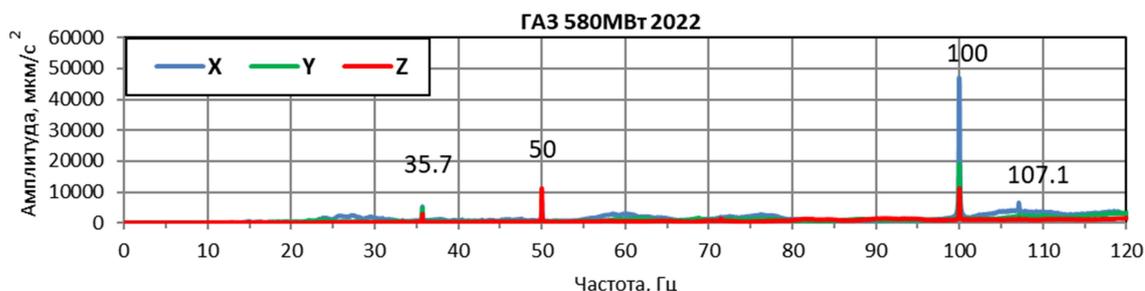


Рисунок 3.58 – Спектры записи с датчика, установленного в верхней части плотины в т.3 у крышки ГА3

На рисунке 3.59 представлены примеры низкочастотной части амплитудных спектров сейсмических записей, полученной при регистрации колебаний в машинном зале возле ГА2 (отм. 321 м), во время нагрузки на исследуемом гидроагрегате 440-600 МВт. Во время проведения регистрации функционировали и сторонние гидроагрегаты ГА3, ГА4, ГА5, ГА10. Из рисунков видно, что в спектрах присутствуют монохроматические сигналы, с частотой 0.68 Гц – данные колебания вызваны пульсациями жгута жидкости под колесом гидроагрегата [7].

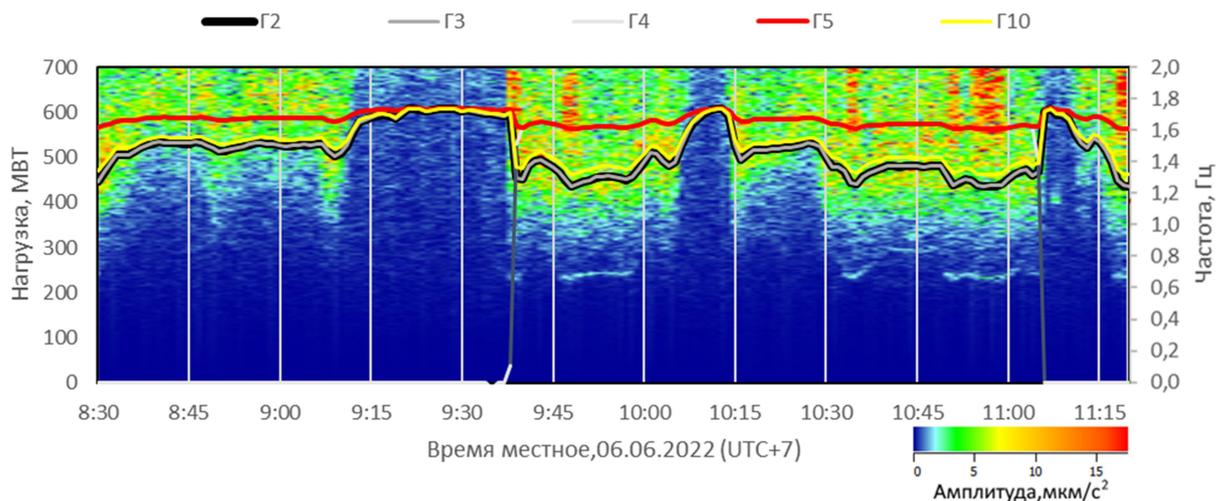


Рисунок 3.59 – Спектрограммы записи в т.2, установленной возле крышки ГА2. Y-компонента

Колебания с частотой 0.68 Гц наблюдаются на спектрах, изображенных на рисунке 3.60, наибольшие значения (до ~ 1.3 мкм/с²) регистрируются на X-компоненте при регистрации в машинном зале во время работы ГА2 на нагрузках $\sim 460-480$ МВт.

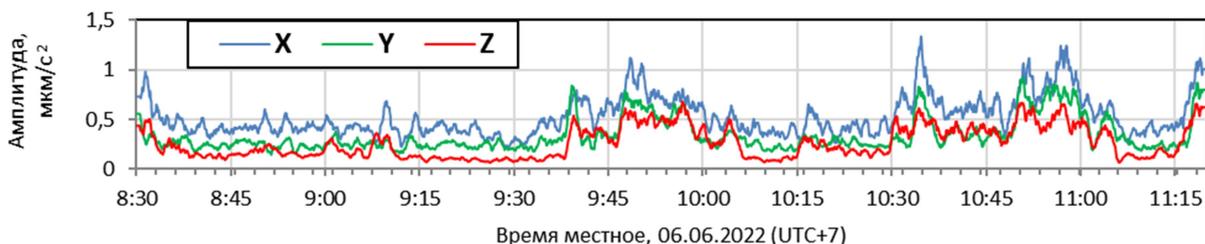


Рисунок 3.60 – График колебаний с частотой 0.68 Гц, полученный с записи с датчика, установленного в верхней части плотины в т.2 у крышки ГА2

На рисунке 3.61 представлены примеры низкочастотной части амплитудных спектров сейсмических записей, полученной при регистрации колебаний в машинном зале возле ГА2 (отм. 321 м), во время нагрузки на исследуемом гидроагрегате 560-580 МВт. Во время проведения регистрации функционировали и сторонние гидроагрегаты ГА4, ГА5,

ГА9. Из рисунков видно, что в спектрах присутствуют монохроматические сигналы, с частотой 1.36 Гц – данные колебания вызваны пульсациями жидкости в водоводе [8].

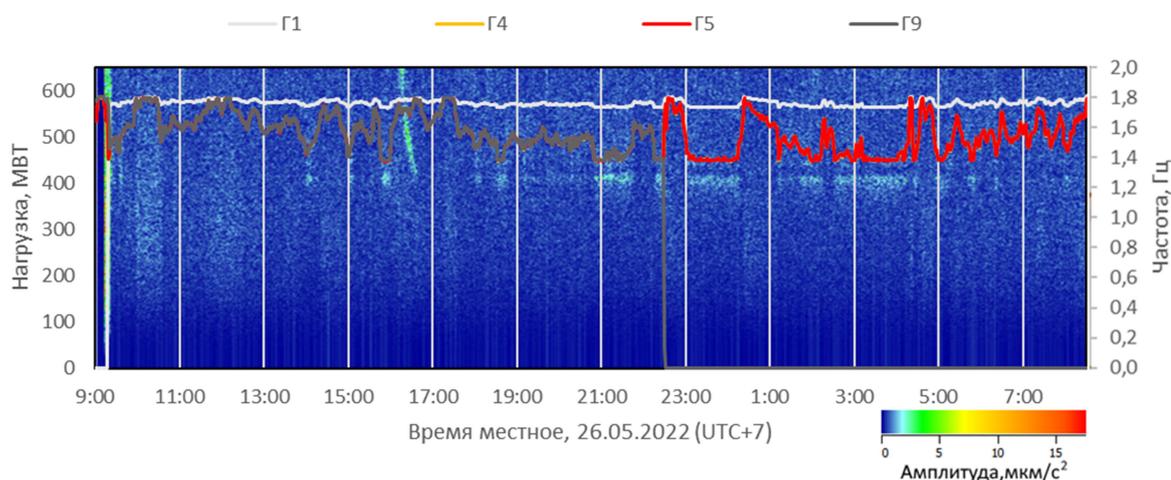


Рисунок 3.61 – Спектрограммы записи в т.1, установленной возле крышки ГА1. Y-компонента

Колебания с частотой 1.36 Гц наблюдаются на спектрах, изображенных на рисунке 3.62, наибольшие значения (до ~ 1.3 мкм/с²) регистрируются на X-компоненте при регистрации в машинном зале во время работы ГА2 на нагрузках ~ 560 -580 МВт.



Рисунок 3.62 – График колебаний с частотой 1.36 Гц, полученный с записи с датчика, установленного в верхней части плотины в т.2 у крышки ГА2

На рисунке 3.63 представлены примеры низкочастотной части амплитудных спектров сейсмических записей, полученной при регистрации колебаний в машинном зале возле ГА2 (отм. 321 м), во время нагрузки на исследуемом гидроагрегате 440-600 МВт. Во время проведения регистрации функционировали и сторонние гидроагрегаты ГА3, ГА4, ГА5, ГА10. Из рисунков видно, что в спектрах присутствуют монохроматические сигналы, с частотой 10-20 Гц.

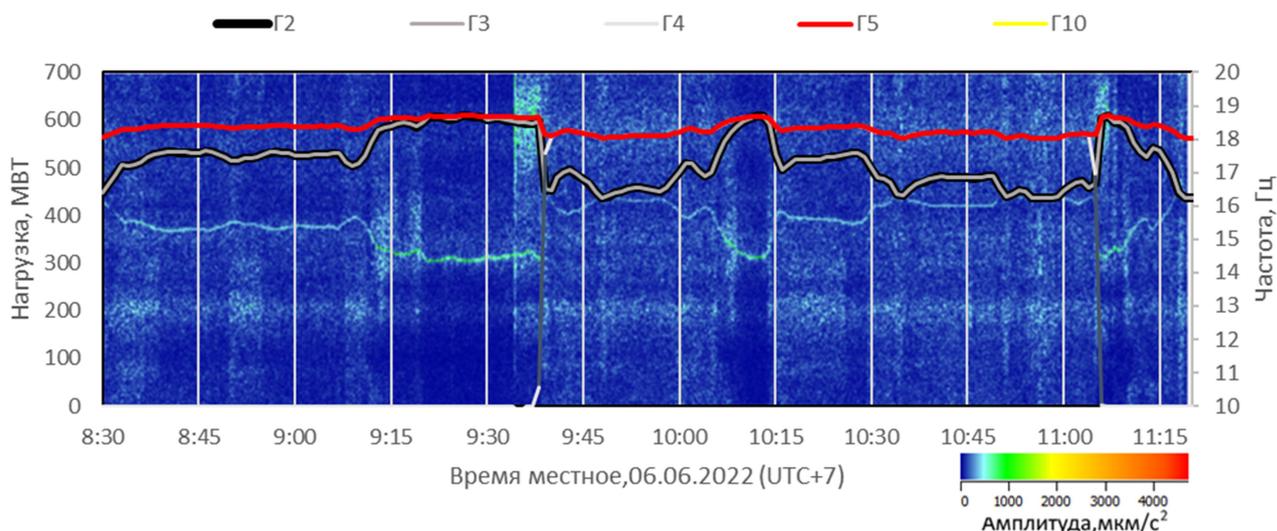


Рисунок 3.63 – Спектрограммы записи в т.2, установленной возле крышки ГА2. Y-компонента

Отметим, что в результате анализа спектров колебаний, построенных по записям сейсмической аппаратуры, установлен набор частот, регистрируемых в машинном зале СШГЭС. Ниже, в таблице 3.12, содержатся сведения об основных зарегистрированных частотах колебаний.

Таблица 3.12 – Сведения о частотах колебаний, зарегистрированных в плотине СШГЭС и конструкциях здания ГЭС

Объект (источник колебаний)	Частоты, Гц	Описание
Гидроагрегаты	$N \cdot 2.381$, N - целое	Частоты, кратные частоте вращения гидроагрегатов. Больше всего проявляются в высокочастотной части спектра ($N \geq 15$), при этом, максимумы соответствуют $f = 15 \cdot 2.381 \approx 35.715$ Гц - «лопастная» частота гидроагрегатов
	~ 0.68	Колебания жгута жидкости под колесом гидроагрегата
	~ 1.36 Гц	Колебания пульсациями жидкости в водоводе
	$\sim 10-20$ Гц	Колебания, вызванные изменением нагрузок на гидроагрегате

Результаты анализа зарегистрированных данных

Как отмечалось выше, в низкочастотной части спектров колебаний, присутствуют колебания с частотой 0.68 Гц. При анализе были рассмотрены изменения амплитуд колебаний на данной частоте, в каждой из точек регистрации. Для этого строились графики изменения амплитуд колебаний для каждой из выделенных собственных частот колебаний. На рисунке 3.64 представлены примеры низкочастотной части амплитудных спектров сейсмических записей и графики выделенных колебаний на данной частоте, полученные при регистрации колебаний в машинном зале возле ГА-3 (отм. 321 м), во

время нагрузки на исследуемом гидроагрегате 440-580 МВт. Во время проведения регистрации функционировали и сторонние гидроагрегаты ГА1, ГА6, ГА9. Из рисунков видно, что в спектрах присутствуют монохроматические сигналы, с частотами 0.67 Гц (рисунок 3.64) и 0.82 Гц (рисунок 3.65) – данные колебания вызваны пульсациями жгута жидкости под колесом гидроагрегата. Получено, что максимальные по амплитудам значения колебаний, вызванные пульсацией жгута, происходят при нагрузках на гидроагрегате 460 МВт для 0.67 Гц и 480 МВт для 0.82 Гц. Причем при работе гидроагрегата на нагрузке 480 МВт в трассах и графиках выделенных колебаний на частоте 0.82 Гц наблюдаются ударные воздействия, вероятно вызванные воздействием образованного жгута (рисунок 3.65).

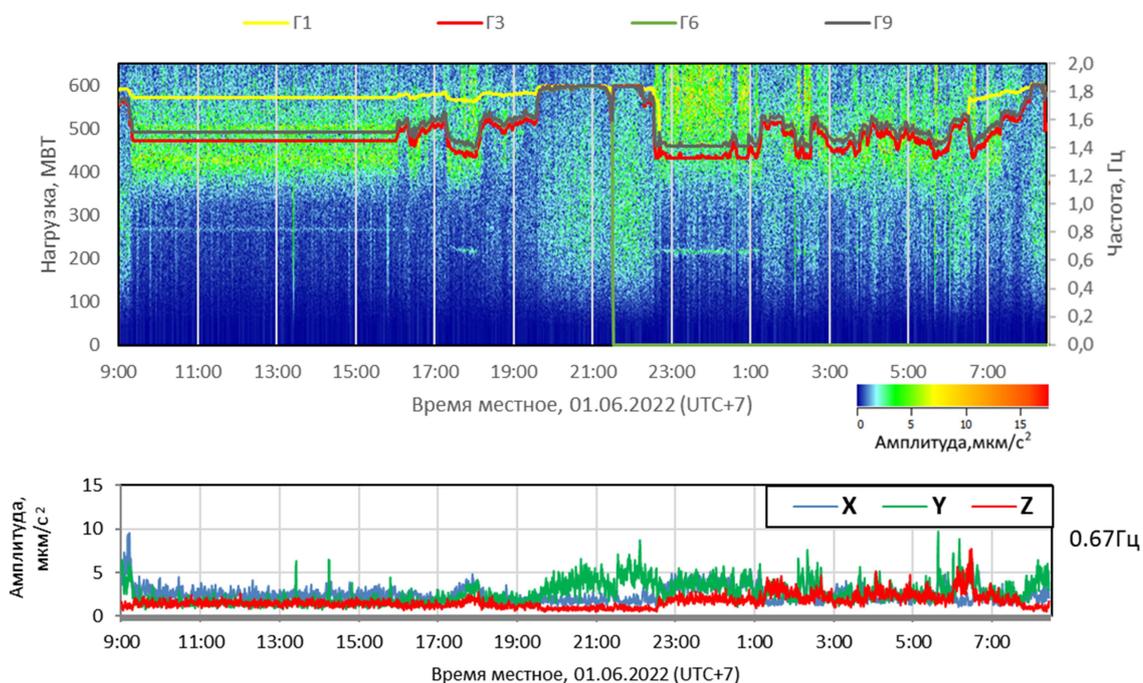


Рисунок 3.64 – Спектрограммы Y компоненты записи и графики колебаний на выделенной частоте 0.67 Гц в т.3, установленной возле крышки ГАЗ

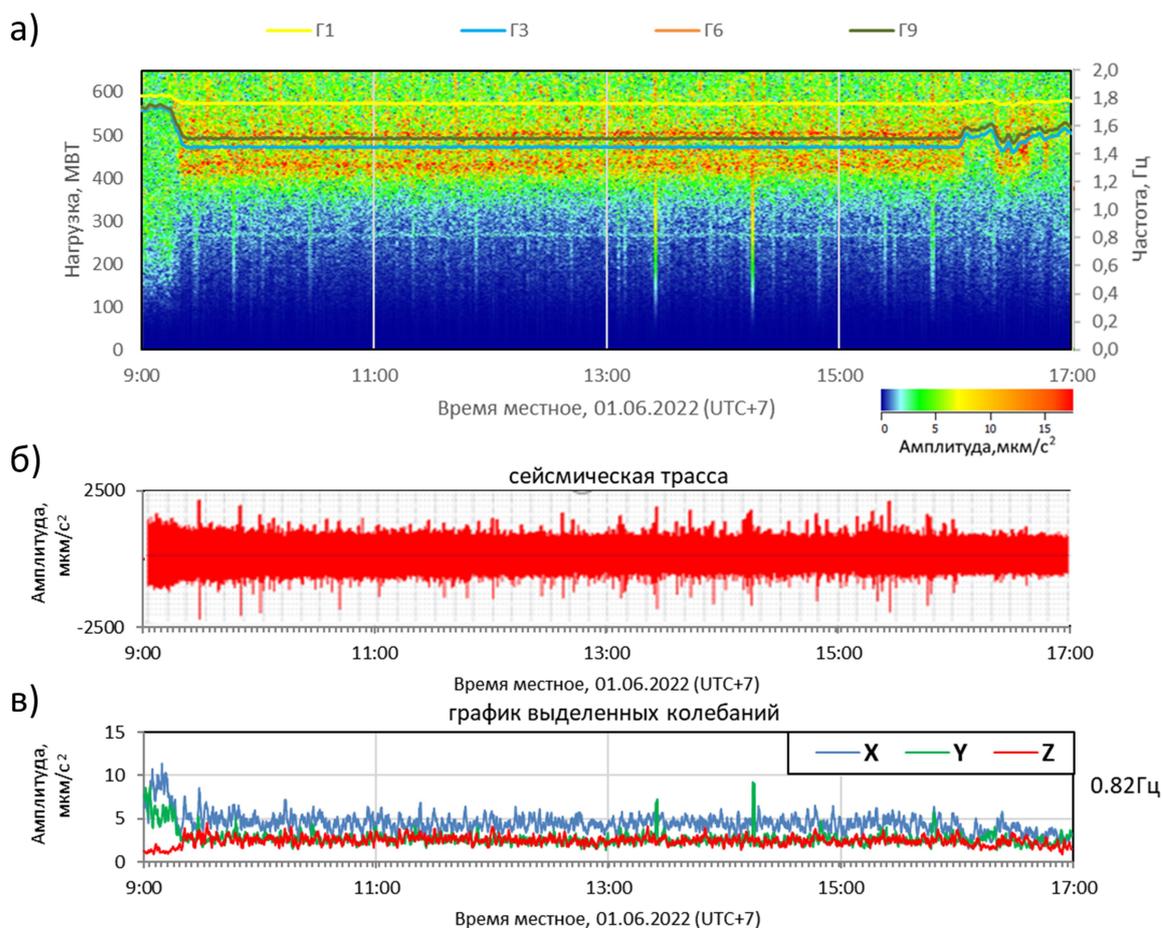


Рисунок 3.65 – Спектрограммы Y компоненты записи (а); сейсмическая трасса (б) и графики на выделенной частоте 0.82 Гц в т.3, установленной возле крышки ГА3 (в)

Влияние жгута удалось выделить только при работе ГА2, ГА5, ГА6. Проведя анализ, подобный вышеописанному, получен вывод о том, что подача нагрузки на гидроагрегатах 450-480 МВт приводит к активизации пульсаций давлений жгута, что, как в случае с ГА3 может привести к возникновению ударных воздействий в агрегатном блоке гидроагрегата.

Проведена сравнительная оценка вибрационного состояния гидроагрегатов старого и нового типов при схожих нагрузках, по данным показания спектров записей, зарегистрированных у крышки турбины в 2010 и 2022 г. (рисунок 3.66). Положение точки наблюдений относительно каждого из гидроагрегатов одинаково – т.3, при сходных режимах нагрузок. Видно, что в спектрах колебаний, зарегистрированных возле ГА3 новой конструкции при нагрузках 580 МВт почти отсутствуют монохроматические сигналы, частоты которых кратны оборотной частоте вращения гидроагрегата 2.381 Гц. С другой стороны, при тех же нагрузках у ГА3 старой конструкции монохроматические колебания выражены явно и их амплитуда в несколько раз выше, чем у ГА3 новой конструкции.

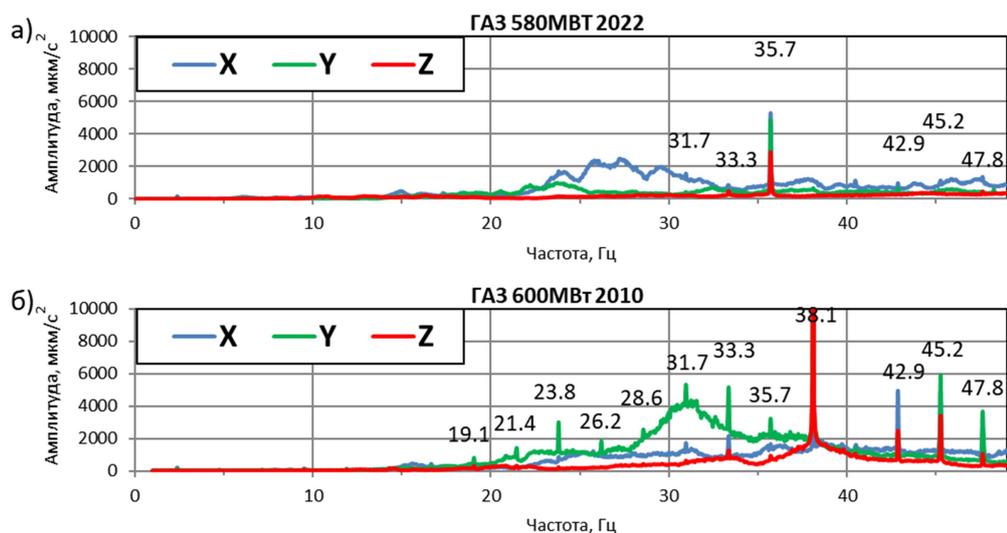


Рисунок 3.66 – Амплитудные спектры сейсмических колебаний, зарегистрированных в машинном зале возле гидроагрегатов № 3 (старой и новой конструкции) (т.3), полученных: в 2022 г. (а) и в 2010 г. (б)

Мы связываем проявление данных монохроматических сигналов с изношенностью элементов оборудования гидроагрегата под влиянием кавитации жидкости под его рабочим колесом (износ лопаток и т.п.). Это можно подтвердить тем фактом что с по прошествии лет на новых гидроагрегатах так же происходит рост данных монохроматических сигналов. На рисунке 3.67 представлен пример спектров в т.3 зарегистрированных у крышки ГАЗ в 2014 г. и 2022 г. Как можно видеть из графиков в спектрах, по прошествии 8 лет вибрационное состояние ГАЗ ухудшилось, наблюдается появление монохроматических сигналов на частотах 40.5, 42.9, 45.2 Гц. Схожее вибрационное состояние наблюдалось у всех 9-ти обследованных гидроагрегатов.

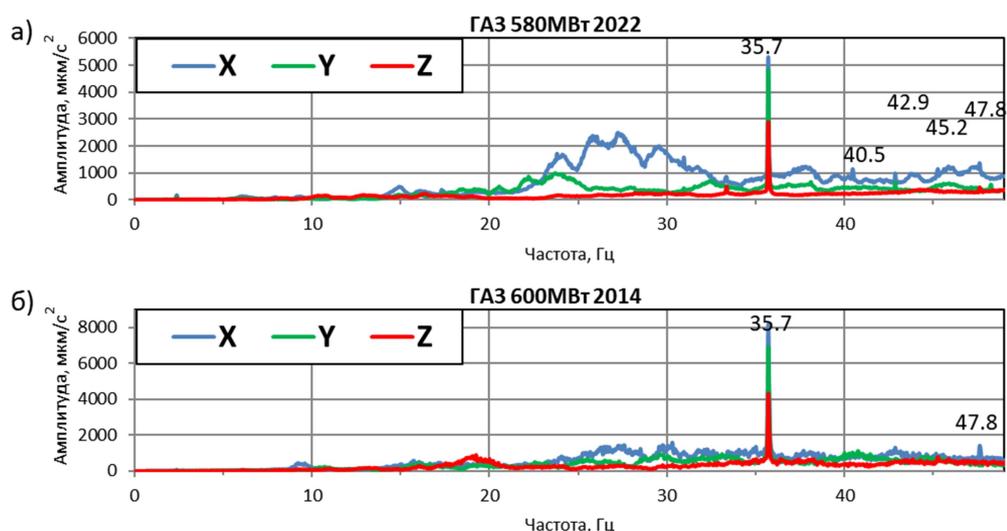


Рисунок 3.67 – Амплитудные спектры сейсмических колебаний, зарегистрированных в машинном зале возле гидроагрегата № 3 новой конструкции в т.3, полученных: в 2022 г. (а) и в 2014 г. (б)

Также было проанализировано влияние поданных нагрузок гидроагрегатами на излучаемые ими колебания. На рисунке 3.68 приведены спектрограммы, с нанесенными на неё нагрузками поданных на гидроагрегаты, и графики на выделенных частотах кратных оборотной частоте ГАБ. Из рисунка видно, что из всего набора частот, за исключением колебаний на частоте 40.5 Гц, изменения амплитуд колебаний хорошо коррелируют с графиком изменения нагрузок на гидроагрегатах. Также на частоте 35.71 Гц колебания являются наиболее высокоамплитудными по сравнению с остальными, достигая значений 12000 мкм/с² при работе ГАБ с нагрузкой 580 МВт.

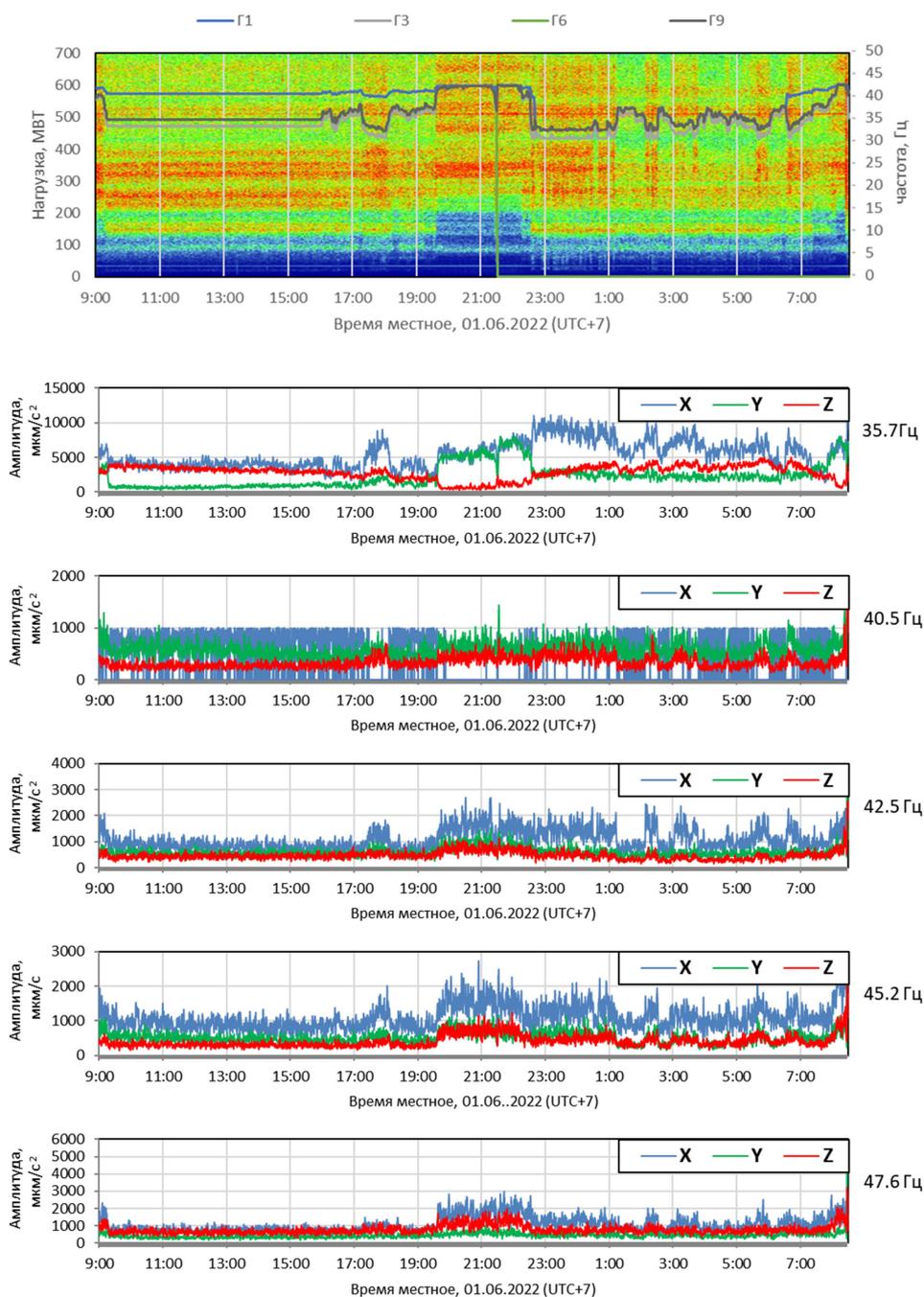


Рисунок 3.68 – Спектрограммы Y компоненты записи и графики на выделенной частоте 0.67 Гц в т.б. установленной возле крышки ГАБ

Подводя итог, в ходе исследования получен набор монохроматических колебаний с частотами кратными частоте вращения гидроагрегатов 2.381 Гц, коррелирующих с изменениями нагрузок на гидроагрегатах, причем наиболее высокоамплитудные значения соответствуют 35.715 Гц – «лопастной» частоте гидроагрегатов. Показано влияние квантанционных процессов под рабочим колесом на рост монохроматических сигналов с течение времени.

Выделены колебания жгута жидкости под колесом гидроагрегата на частоте порядка 0.68 Гц. Влияние жгута удалось выделить только при работе ГА2, ГА5, ГА6. Причем подача нагрузки на гидроагрегатах 450-480 МВт приводит к активизации пульсаций давлений жгута. В случае с ГА3 это привело к возникновению ударных воздействий в агрегатном блоке гидроагрегата.

Выделены колебания пульсациями жидкости в водоводе порядка 1.36 Гц, проявляющихся при нагрузках на гидроагрегатах порядка 560-600 МВт.

3.1.4 Опытные-методические работы по созданию системы мониторинга технического состояния канатно-кресельных дорог

Исследование посвящено разработке метода мониторинга технического состояния канатно-кресельных дорог (далее ККД) в условиях ООО «Шахта «Есаульская» (г. Новокузнецк). Цель исследований состояла в определении возможности применения технологии сейсмического мониторинга крупного промышленного оборудования, разработанной в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в том числе:

- выполнить регистрацию микросейсмических колебаний и анализ данных на неработающей установке ККД в наземных условиях, в трех пунктах измерения, с целью определения референтных значений собственных частот для аналогичных установок;
- выполнить регистрацию микросейсмических колебаний и анализ на работающей установке ККД в подземных условиях ООО «Шахта «Есаульская» в трех пунктах измерения, в течение 2-3 дней, с целью определения в натурном эксперименте собственных частот установки и параметров динамических воздействий, возникающих при работе ККД.

Экспериментальная часть, используемые методы и оборудование

Объектом исследования являются две канатно-кресельные дороги, представляющие собой трос с установленными на нем сиденьями, которые приводятся в движение вращением тросового вала. Вал соединён с двигателем посредством редукционной коробки, оснащён системой переключения скорости вращения тросового вала и тормозным устройством (рисунок 3.69). Согласно техническим характеристикам

канатно-кресельной дороги скорость вращения тросового вала составляет от 0.3 до 1.3 м/с, скорость двигателя 735 об/мин.

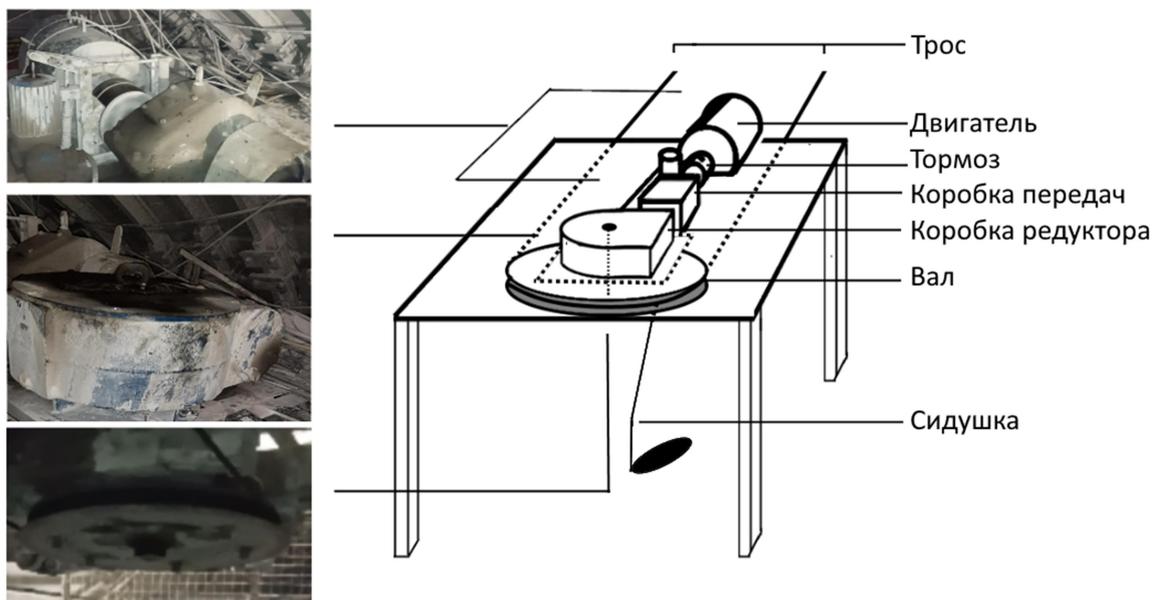


Рисунок 3.69 – Устройство канатно-кресельных дорог

Для решения поставленных задач осуществлялась регистрация сейсмических колебаний в различных пунктах наблюдения ККД №1 и №2 в шахте (рисунок 3.70), в таблице 3.13 приведена информация об используемой сейсмической аппаратуре. Каждый пункт наблюдения состоял из трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-10) и автономного сейсмического регистратора («Байкал-7»). Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников, следующие: X – направлены вдоль ККД, Y – поперек, Z – вертикально. Запись сейсмических сигналов проводилась в непрерывном режиме и включала регистрацию колебаний во время работы канатно-кресельных дорог и во время отключения (далее – ККД -1 и ККД -2, соответственно).



Рисунок 3.70 – Схема сейсмических наблюдений ККД

Таблица 3.13 – Сведения стационарных сейсмических станциях СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

	№РР	№ регистратора	№ датчика	Тип регистратора	тип датчика	Итоговый коэффициент преобразования (нм/с) (паспорт)
ККД №1	1	79	4	«Байкал-7»	GD-10	17.36
	2	67	2	«Байкал-7»	GD-10	17.36
	3	72	3	«Байкал-7»	GD-10	17.36
ККД №2	1	115	5	«Байкал-7»	GD-10	17.36
	2	117	8	«Байкал-7»	GD-10	17.36
	3	128	7	«Байкал-7»	GD-10	17.36

При проведении геофизических исследований была задействована следующая аппаратура: автономные трехканальные сейсмические регистраторы «Байкал-7», датчики-велосиметры GD-10.

Регистратор «Байкал-7» представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 3-х-канальный 24-х-разрядный аналого-цифровой преобразователь, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник (внешняя антенна) и сменные гальванические элементы питания. Регистраторы устанавливаются в точках измерений, в непосредственной близости от сейсмических датчиков. Запись производится в непрерывном или старт-стопном режимах (по таймеру или критериям).

Общий вид комплектов аппаратуры и использованных сейсмических датчиков приведен на рисунке 3.71, краткие технические характеристики приведены в таблицах 3.1-3.2.



Рисунок 3.71 – Сейсмический регистратор «Байкал-7» с подключенным датчиком-велосиметром GD-4.5

Перед началом работ по регистрации сейсмическая аппаратура была проверена на идентичность. Данная проверка, которая заключается в сравнении записей одного и того же сейсмического сигнала различными регистрирующими станциями, необходима как для калибровки каналов используемой аппаратуры в сравнении с эталоном (пара регистратор-сейсмоприемник, прошедшая калибровочные испытания на сертифицированном вибростенде), так и для проверки работоспособности используемой аппаратуры в целом.

Для выполнения теста на идентичность в одном и том же месте проводилась расстановка регистраторов, с подключенными к ним одинаково ориентированными сейсмоприемниками, совместно с аналогично расположенным эталоном. Используемые в проверке регистраторы одинаково синхронизованы и запрограммированы. Время записи сейсмического сигнала выбирается из расчета необходимых накоплений: чем дольше будет продолжаться эксперимент, тем выше будет точность полученных коэффициентов пересчета «регистратор-сейсмоприемник». Рекомендуемое время для подобных проверок 10-30 минут.

На рисунке 3.72 показан пример спектрограммы сейсмической записи с датчика, установленного в т.2 (рисунок 3.70). Видно, что зарегистрированный сигнал, во время работающей канатно-кресельной дороги, представляет собой набор различных сейсмических источников, особенностью которых является то, что они работают на определенных частотах. Каждый из источников излучает свою частоту, плюс набор

кратных частот. Зная соответствие источник - частота, можно найти на спектрограмме соответствующую частоту (или полосу частот) и по изменениям амплитуд контролировать работу этого источника. Откалибровав шкалу спектрограммы таким образом, чтобы, например, красным цветом обозначались опасные для канатно-кресельной дороги или сооружения амплитуды колебаний, можно производить дистанционный контроль над ее работой.

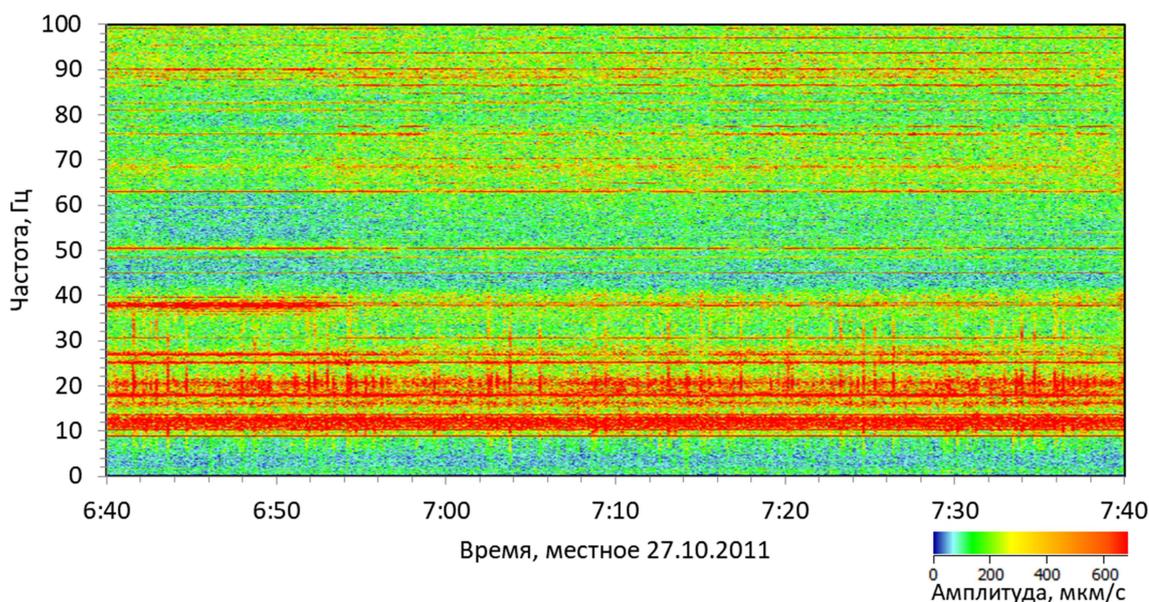


Рисунок 3.72 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной во время работы ККД-2

Собственные колебания тросового вала

Существующие вибрации в приводной части канатной дороги создают усталостные напряжения, под влиянием которых возможно возникновение деформаций (трещины и т.д.) и, как следствие, разрушение тросового вала. Возникает необходимость периодического просвечивания тросового вала, с целью определения усталостных напряжений и обнаружения трещин. Следует понимать, что периодическое обследование вала требует его физического демонтажа с установки и транспортировки на поверхность, что приводит к остановке работы канатной дороги и является довольно трудоемкой работой. Ввиду этого, была поставлена задача – разработать систему мониторинга физического состояния вала канатных дорог.

Возникла идея определять собственную частоту тросового вала в процессе работы канатной дороги и, только в случае ее изменения, проводить детальный осмотр вала.

Перед тем как устанавливать датчики на работающие канатные дороги, был проведен следующий эксперимент для определения собственной частоты вала. На перевернутую установку, приводящую в движение канатную дорогу, в верхней точке вала

был установлен трехкомпонентный датчик, и по валу произвели несколько ударов в горизонтальной плоскости с целью определения его собственной частоты (рисунок 3.73).

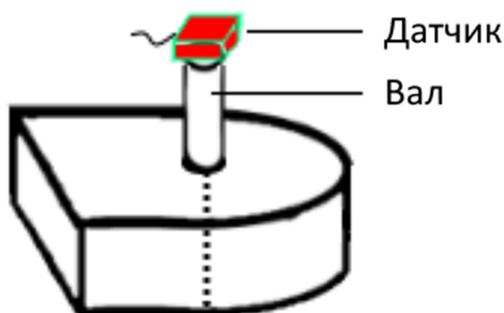


Рисунок 3.73 – Схема расположения датчика на тросовом валу

На рисунке 3.74 представлена спектрограмма полученной записи с установленного вышеописанным образом датчика во время 9-ти произведенных ударов. Видно, что во время ударов в амплитудно-частотном составе записи, в низкочастотной части сигнала наблюдаются 2 максимума на частотах 8.5 и 16.6 Гц. На рисунке 3.75 представлены спектры записи, полученные во время одного удара. Как можно видеть, в амплитудно-частотном составе записи, на всем диапазоне частот, ярко выделяются только колебания с частотами 8.5-9 Гц и 16.6-16.8 Гц.

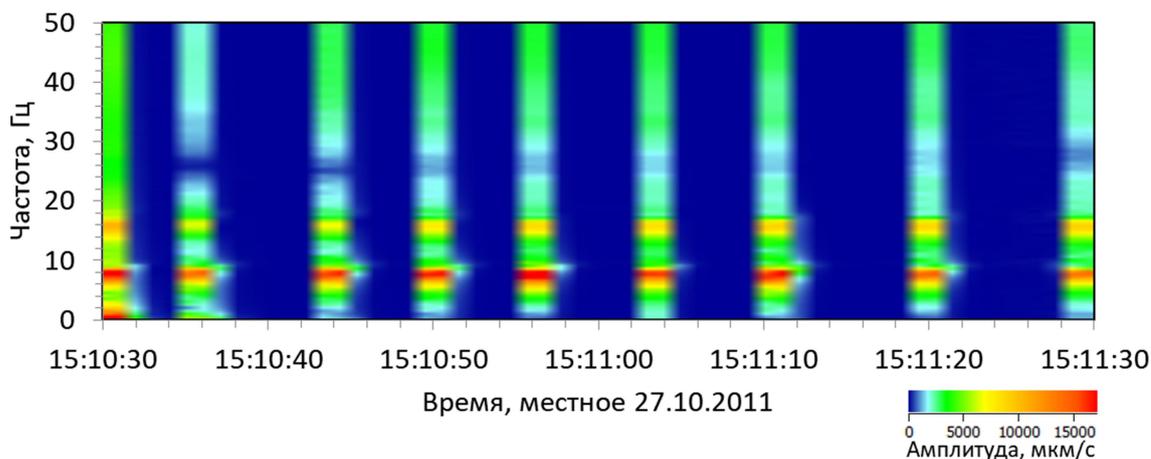


Рисунок 3.74 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной во время ударов по тросовому валу

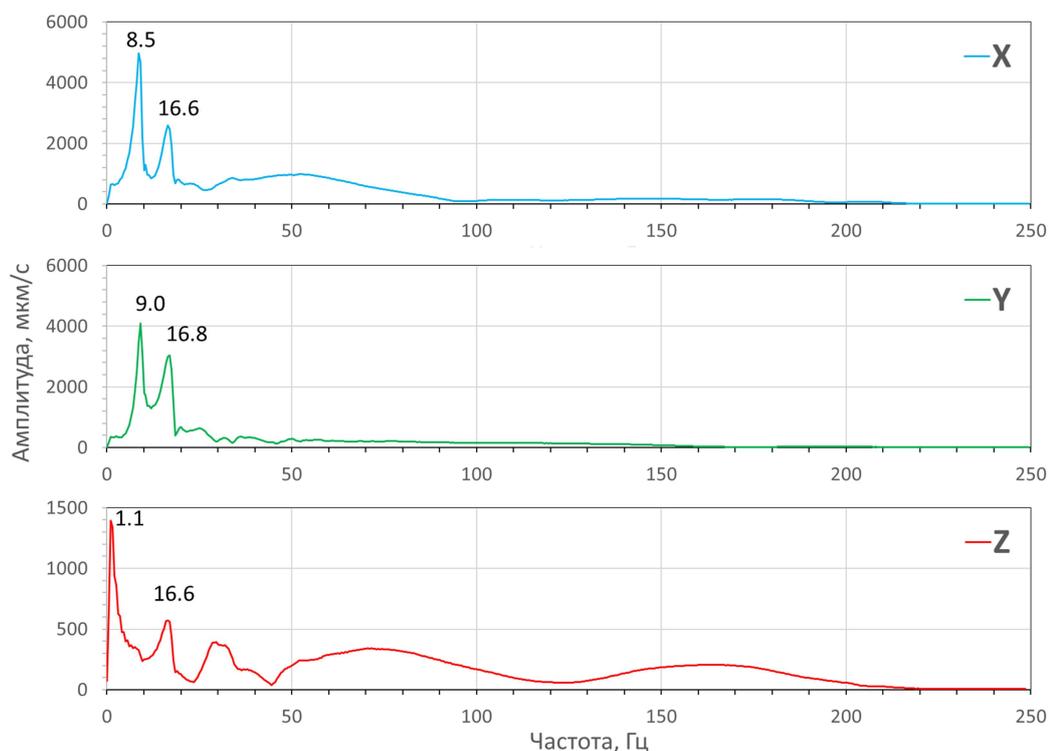


Рисунок 3.75 – Спектры сейсмической записи, полученной во время ударов по тросовому валу

Известно, что для балки на незакрепленных концах, на противоположных границах образуются только пучности или только узлы, то между этими границами будет укладываться целое число полудлин стоячих волн. Соответствующие собственные частоты тела в этом случае равны:

$$f_n = \frac{nV}{2l}, \quad (3.2)$$

где V – скорость распространения интерферирующих волн, l – расстояние между границами, n – номер моды стоячей волны.

Если в грубом приближении тросовый вал представить как балку с незакрепленными концами, то в нашем случае первой модой собственных колебаний равной 8.8- 9.1 Гц, а второй 16.6-16.8 Гц. То, что вторая форма по частоте не является удвоением первой, можно объяснить тем, что формула 3.2 в полной мере не может учесть всех нюансов. Надо учитывать то, что тросовый вал не является классической балкой с незакрепленными концами, а является сложно закреплённым механизмом с большой степенью свободы во вращении, благодаря системе подшипников, с одной стороны, и тросовой части, с другой. Кроме того, формула не учитывает присоединённых масс подшипников и механизмов, которые, в свою очередь, также могут влиять на значение собственных частот.

Характеристика источников сейсмических колебаний

Следующим шагом необходимо изучить волновое поле, излучаемое аппаратной частью канатно-кресельных дорог, и выделить колебания с частотами, близкими к 8.5-9 Гц и 16.6-16.8 Гц. Дальнейшее наблюдение и анализ изменения колебаний на данных частотах должен дать информацию о состоянии тросового вала.

Согласно описанной методике (пункт «Экспериментальная часть, используемые методы и оборудование»), был проведен анализ зарегистрированных данных для определения набора частот, связанных с канатно-кресельных дорогой. На рисунке 3.76 представлены примеры спектрограмм записей, полученных при регистрации колебаний в т.2 (рисунок 3.70), при остановке и во время работы канатно-кресельных дорог.

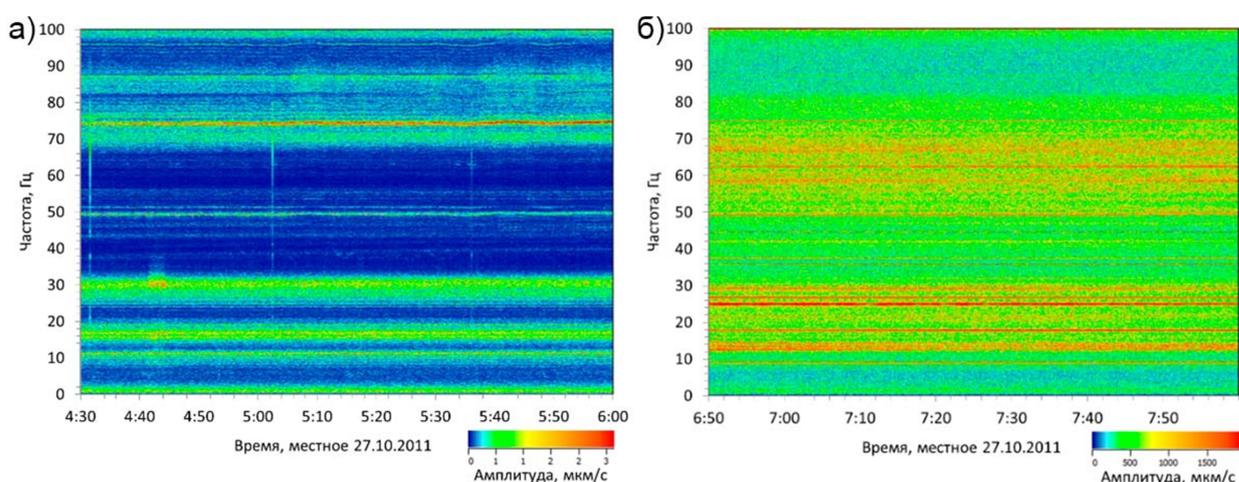


Рисунок 3.76 – Спектрограммы записи в т.2: установленной возле редуктора ККД-2, в период: установка отключена (а); установка включена (б)

Рассмотрим волновое поле, полученное во время остановки канатно-кресельных дорог. На рисунках 3.77 представлены низкочастотные части спектров записей в т.2, установленной возле редуктора ККД-1 и ККД-2, в период, когда установки остановлены. Из рисунков хорошо видно, что спектральный состав с точек наблюдения, установленных у ККД-1 и ККД-2, сильно различается. В большей мере данные различия мы связываем со следующими факторами: во-первых, в области установки ККД-1 (в отличие от области ККД-2) проходит сильный воздушный поток от главной нагнетательной установки шахты, который возбуждает колебание конструкции ККД-1 и приводит к появлению паразитных колебаний (у ККД-1 уровень колебаний в ~ 40 раз выше, чем у ККД-2); во-вторых, различная длина троса, что может дать примыкание массы к тросовому валу и изменить его собственную частоту колебаний; в-третьих, источники сторонних сигналов, вызванных работой различных устройств, расположенных в шахте. Частоты выделенных колебаний, полученные при исследовании ККД-1 – 5.5, 6.8, 7.5, 8.5, 9.7, 11.5, 12.9, 13.5, 15.4, 15.9 Гц. Наиболее высокоамплитудные колебания наблюдались на частоте 11.5 Гц с

амплитудой порядка 170 мкм/с (Z-компонента). Частоты выделенных колебаний, полученные при исследовании ККД-1 7.5, 9.1, 9.7, 11.3, 13.2, 13.5, 15.2, 15.6, 16.7, 19 Гц. Наиболее высокоамплитудные колебания наблюдались на частоте 9.75 Гц с амплитудой порядка 4.9 мкм/с (Y-компонента).

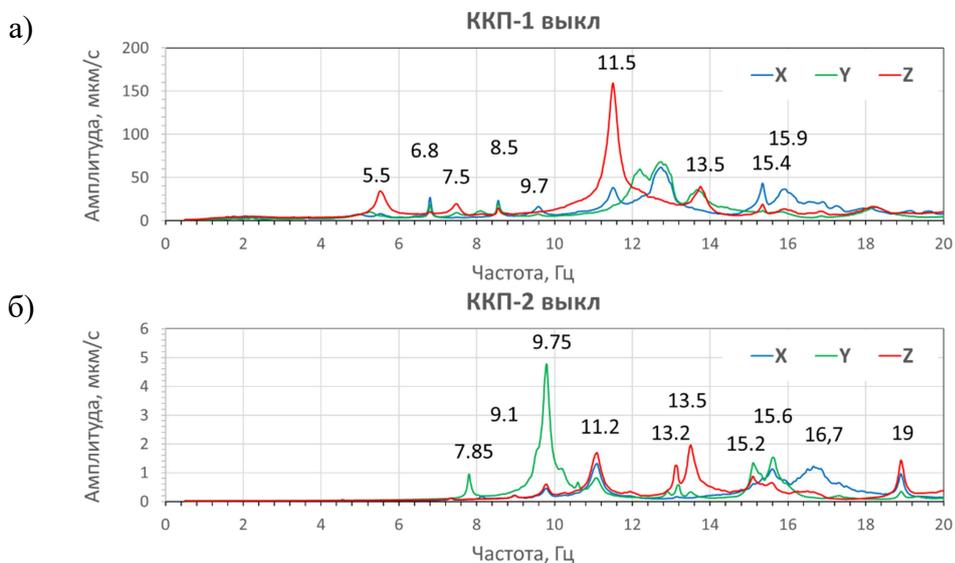


Рисунок 3.77 – Спектры записи в т.2, установленной возле редуктора ККД-1 (а) и ККД-2 (б), в период, когда установка остановлена

Волновое поле, полученное при проведении экспериментов на ККД-1 и ККД-2 во время их работы, достаточно сложное и представлено на спектрах на рисунке 3.78. Наблюдается большое число монохроматических сигналов. Это связано с тем, что все элементы канатной дороги установлены на металлическое основание, происходит нелинейное взаимодействие колебательных систем с основанием, и возникает большой набор кратных частот.

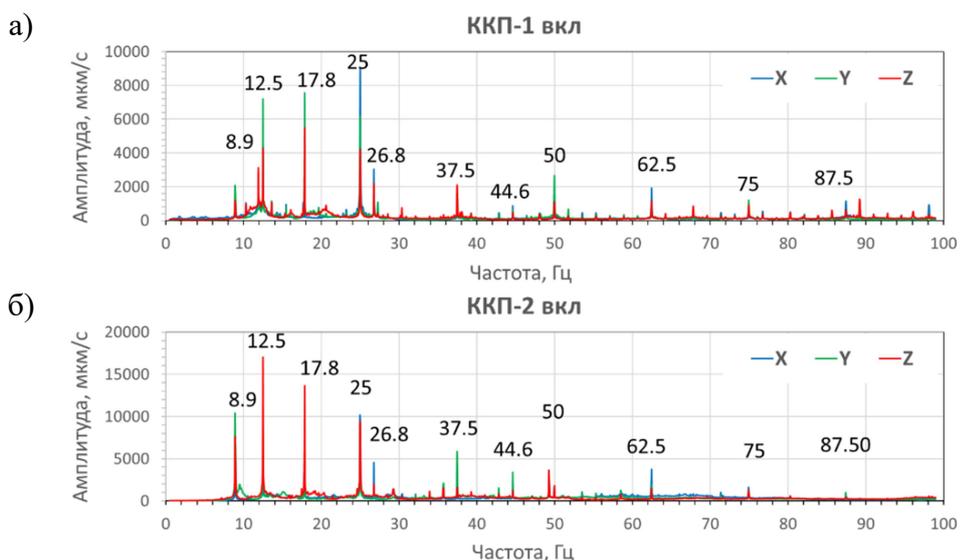


Рисунок 3.78 – Спектры записи в т.2, установленной возле редуктора ККД-1 (а) и ККД-2 (б), в период, когда установка включена

Среди набора полученных во время работы установок монохроматических колебаний хорошо выделяются 3 источника колебаний, описываемых соотношениями:

$f_1 = N_2 \cdot 1.7$ Гц, где f_1 – частота монохрома, N – целое число (значение кратности частоте вращения), 1.7 Гц – вероятно оборотная частота вала коробки передач (информация по данной частоте в паспорте устройства отсутствует).

$f_2 = N_2 \cdot 12.5$ Гц, где f_2 – частота монохрома, N – целое число (значение кратности частоте вращения), 12.5 Гц – вероятно оборотная частота приводного электродвигателя (750 об/мин вместо 735 об/мин, указанных в паспорте устройства).

$f_3 = N_3 \cdot 8.9$ Гц, где f_3 – частота монохрома, N – целое число (значение кратности), 8.9 Гц – наиболее близкая по значениям, полученным в эксперименте с ударами по тросовому валу (имеющих значения 8.5-9.1 Гц) и, вероятно, собственная частота системы тросового вала (трос, ролики и т.д.). Отчетливо наблюдаются высокоамплитудные колебания на частоте 8.9 Гц и кратными ей 17.8; 26.7, 35.6 Гц (рисунок 3.78), первые четыре гармоники собственных колебаний.

На рисунке 3.78 в низкочастотной части амплитудных спектров сейсмических записей, зарегистрированных в т.2, установленной возле редуктора ККД-1 и ККД-2, в период, когда установки включены, наблюдаются низкодобротные колебания на частотах 8.9, 17.8; 26.7, 35.6 Гц. Данные колебания предположительно являются первыми четырьмя гармониками собственных колебаний системы тросового вала.

Рассмотрим, как изменяются амплитуды колебаний этих частот при смене работы канатно-кресельных дорог (рисунок 3.79-3.80). Из рисунка видно, что колебания всего набора частот фиксируют момент включения и отключения агрегатов, а также изменение амплитуд колебаний.

Следует отметить, что колебания вала вдоль направления троса (X-компонента) всегда были в несколько раз ниже аналогичных колебаний по Y-компоненте. Это связано с тем, что колебания вала глушатся натяжением троса вдоль его направления, чего не происходит по Y-компоненте. Если сравнивать уровень колебаний у установок, то значения амплитуд колебаний, зарегистрированных у ККД-1, в несколько раз ниже, чем у ККД-2. Наиболее высокоамплитудные зарегистрированные значения колебаний для ККД-1, на собственной частоте 8.9 Гц, достигают значений ~ 3000 мкм/с на Y-компоненте колебаний. В то же время, у ККД-2 аналогичное значение колебаний составляет ~ 20000 мкм/с, что в почти 7 раз выше. Данное различие в уровне колебаний свидетельствует о высоком вибрационном уровне системы тросового вала ККД-2 и может служить диагностическим признаком для внеочередного проведения проверки целостности элементов тросового вала и состояния их закрепления.

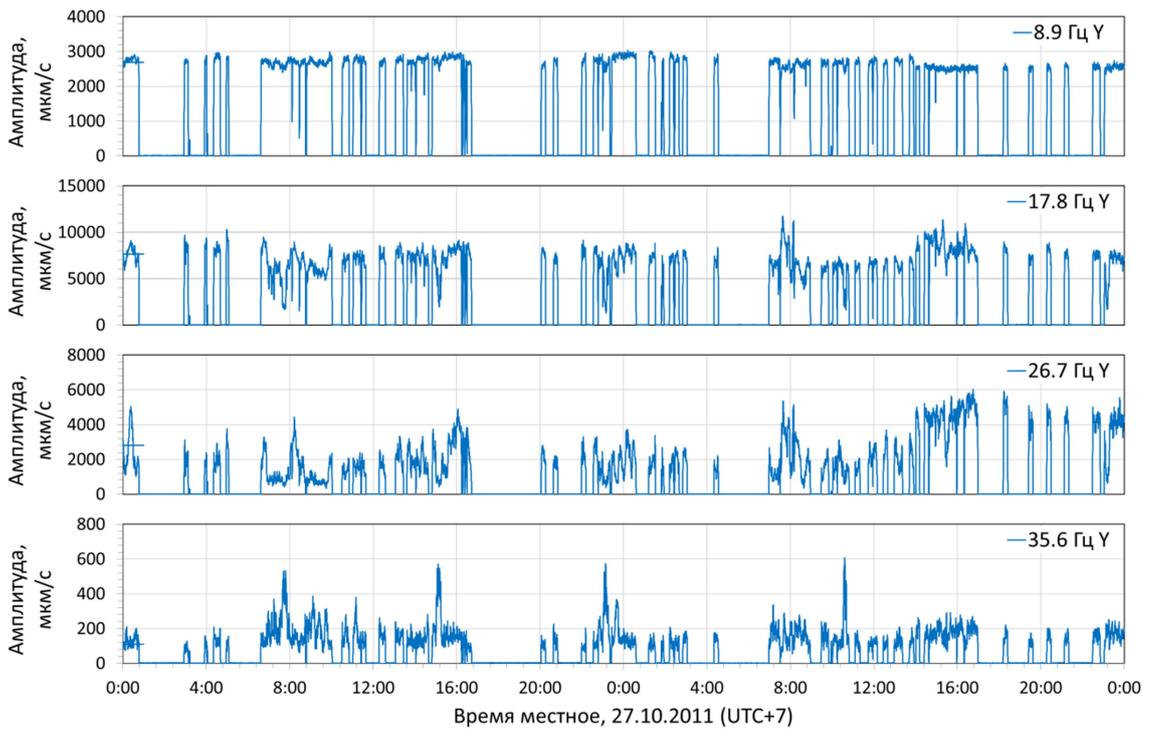


Рисунок 3.79 – Изменения амплитуд колебаний на собственных частотах тросового вала, зарегистрированных в т.2, установленной возле редуктора ККД-1. Y-компонента

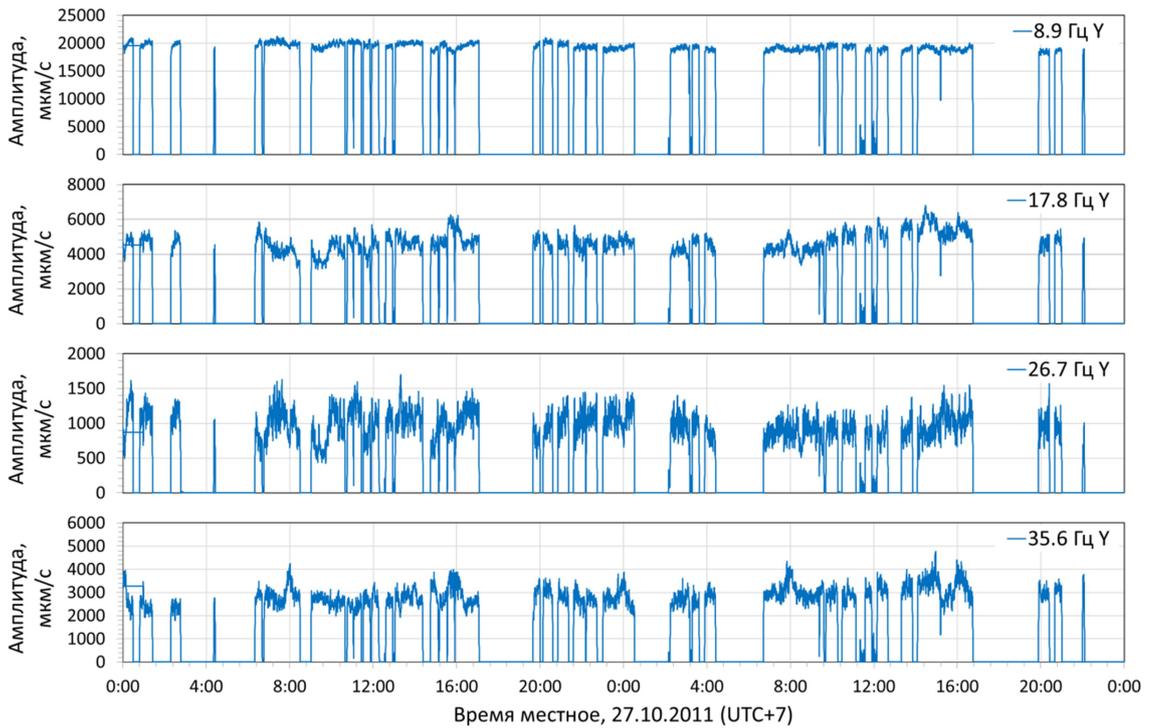


Рисунок 3.80 – Изменения амплитуд колебаний на собственных частотах тросового вала, зарегистрированных в т.2, установленной возле редуктора ККД-2. Y-компонента

Результаты физического моделирования

Суть разрабатываемого метода – мониторинг изменения значения собственной частоты системы тросового вала в процессе работы канатной дороги. Изменение значения данной частоты является диагностическим признаком развития деформации в элементах конструкции системы тросового вала или разуплотнения креплений.

Для демонстрации данного утверждения, сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН были проведены экспериментальные работы по изучению изменения значений собственных частот изучаемого объекта под влиянием деформаций.

В качестве объекта исследований были выбраны деревянный брусок и арматурный прут. Брус устанавливался горизонтально поверхности без закрепления. Арматурный прут закреплялся вертикально и фиксировался в тисках на отметке 80 см.

Регистрация сейсмических колебаний велась в 1-й точке наблюдения, с некоторым отступом от точки распила. Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников, следующие: X – направлены вдоль оси объекта, Y – поперек, Z – перпендикулярно оси X-Y. Изображение установок приведено на рисунке 3.81.



Рисунок 3.81 – Деревянный брусок и арматурный прут с установленной сейсмической аппаратурой

В качестве имитации развития деформации в исследуемых объектах производились пропилы. Для деревянного бруска осуществлен пропил 50% отверстия, для арматурного прута 25, 50, 75 %, пример произведенных пропилов приведен на рисунке 3.82.



Рисунок 3.82 – Произведенные пропилы в деревянном бруске и арматурном пруте

Для возбуждения собственных колебаний по объектам производились ударные воздействия. На рисунках 3.83-3.84 изображены спектрограммы сейсмических записей с точек наблюдения на бруске и пруте, полученных во время экспериментов. Хорошо видно, что при ударах при одном и том же уровне пропила, амплитудно-частотный состав записи не изменяется. Но при расширении уровня пропила, видны значительные изменения.

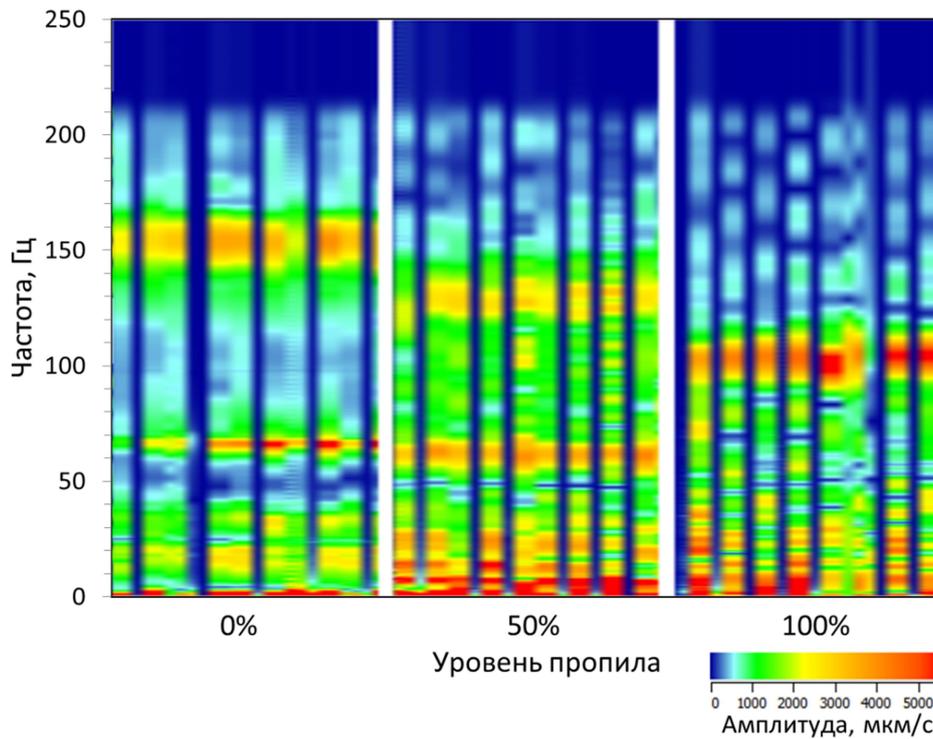


Рисунок 3.83 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной во время ударов по деревянному бруску с различным уровнем пропила. Z-компонента

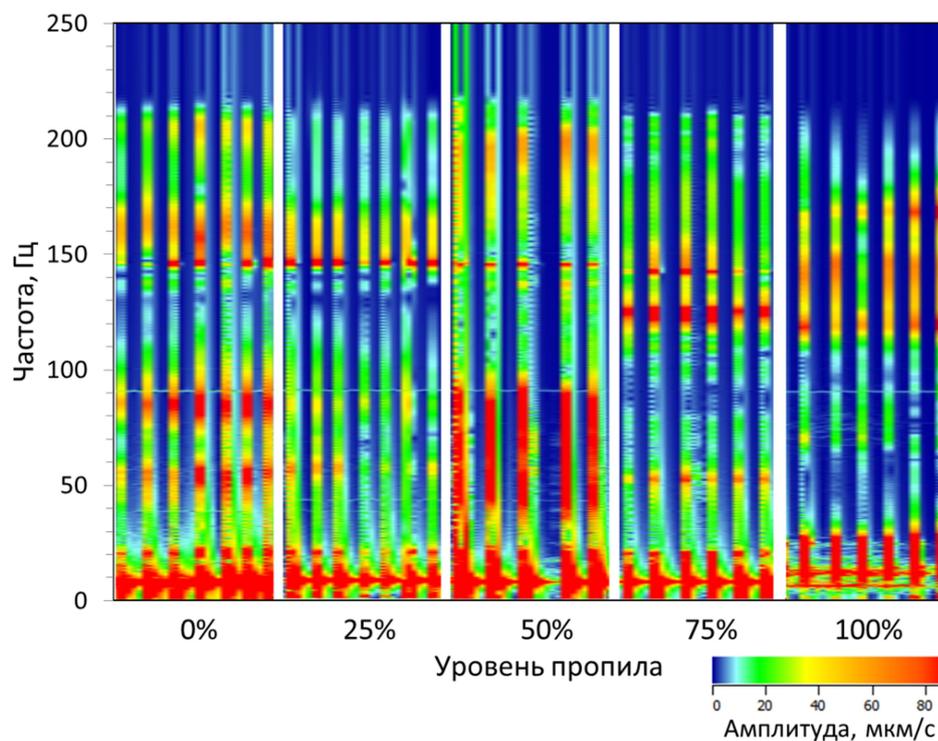


Рисунок 3.84 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной во время ударов по деревянному брусу с различным уровнем пропила. Y-компонента

На рисунках 3.85-3.86 изображены спектры сейсмических записей с точек наблюдения на брусе и пруте, полученных во время ударов. Из рисунков хорошо видно, что, при увеличении пропила, то есть развитии деформации, происходит понижение частот колебаний: для бруса наиболее заметно снижение с 67 по 49 Гц и со 155 по 117 Гц; для прута с 57 по 53 Гц, с 87 по 69, Гц с 139 по 117 Гц и с 146 по 142 Гц.

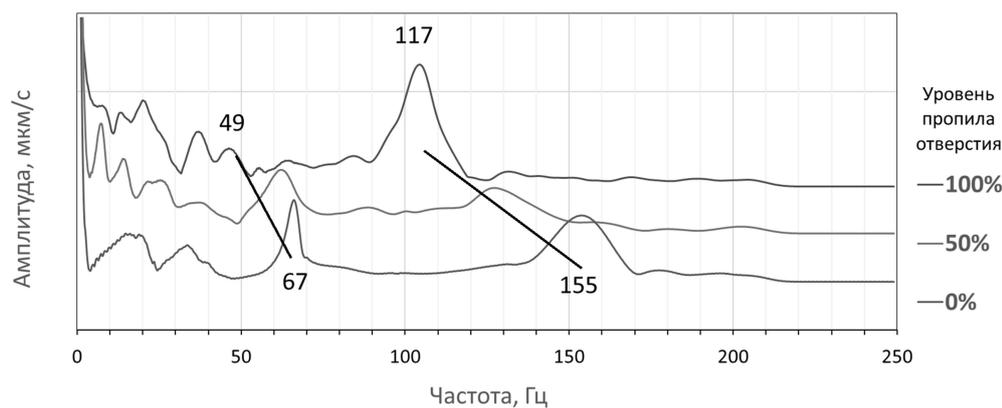


Рисунок 3.85 – Спектры сейсмических записей, полученных во время ударов по деревянному брусу с различным уровнем, пропила. Z-компонента

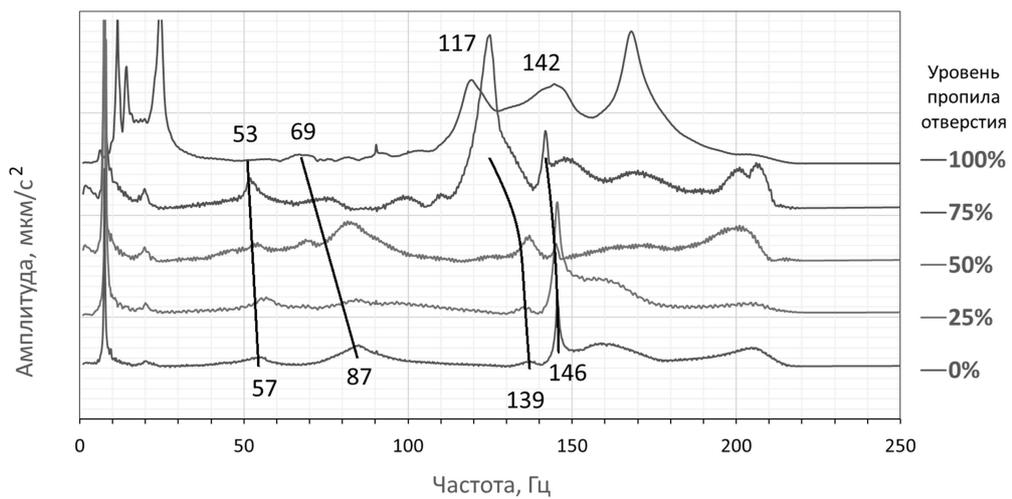


Рисунок 3.86 – Спектры сейсмических записей, полученных во время ударов по пруту арматуры с различным уровнем, пропила. Y-компонента

3.2 Проведение мониторинга технического состояния крупных плотин ГЭС, основанного на анализе изменений параметров собственных колебаний

3.2.1 Мониторинг частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Оценка устойчивости зданий и инженерных сооружений по данным сейсмического мониторинга, несомненно, представляет существенный практический интерес в части контроля их технического состояния. Известно, что такие факторы, как появление трещин, ослабленных зон, смена напряженно-деформированного состояния, температурное изменение, изменение граничных условий на контакте с внешней средой и др., с течением времени приводят к изменению параметров собственных колебаний сооружений, в том числе значений их частот. Такие факторы ослабляют устойчивость техногенных сооружений при сейсмическом воздействии, и при этом риск их разрушения в сейсмоактивных регионах очень высокий. Поэтому оценка частот собственных колебаний сооружений и их изменений во времени дает возможность определять их устойчивость, риски разрушения, а значит, и предупреждать их за счет своевременного обнаружения аномальных явлений, приводящих к снижению устойчивости сооружений.

На сегодня известны различные способы определения частот собственных колебаний сооружений. Например, по зарегистрированным колебаниям, вызванным воздействием искусственных источников типа вибратор, или вследствие промышленных взрывов [9,10], или в результате природных землетрясений [11]. Трудоемкие и затратные способы с искусственными источниками, особенно в случае крупных сооружений (таких как плотины ГЭС), нечасто используются для решения задач оперативного контроля устойчивости сооружений. Мало применяются способы, основанные на записях природных землетрясений, в силу невозможности прогнозирования времени и места их возникновения. Тем не менее они реализуются с получением некоторой информации о техническом состоянии конструкций, хотя и с недостаточной точностью [11]. Известны также способы определения частот собственных колебаний сооружений по зарегистрированным фоновым микросейсмическим колебаниям объекта. Они основаны на известном факте, что практически в любом инженерном сооружении из-за его ограниченного объема при воздействии микросейсм формируется совокупность стоячих волн [2]. С учетом этого в исследованиях ряда авторов частоты собственных колебаний сооружений определяются по локальным максимумам спектров сейсмических записей, зарегистрированных в нескольких точках сооружения [12,13]. Этот способ прост в реализации, но из-за сложности геометрической формы стоячих волн в сооружениях

возможны ошибки в идентификации их мод. Кроме того, на полезный сигнал могут накладываться разнообразные помехи от работающего в сооружении оборудования, а при расположении датчиков в области узлов стоячих волн определить их частоты практически невозможно [14]. Разработанный В.С. Селезевым и А.Ф. Емановым метод когерентного восстановления полей стоячих волн позволяет выделять из зарегистрированных микросейсмических колебаний когерентные во времени и пространстве колебания – стоячие волны [2]. За счет регистрации в опорной точке измерения осуществляются ограниченным числом датчиков на сколь угодно плотной сети наблюдений. Это позволяет строить детальные моды для каждой из частот собственных колебаний и исключает ошибки в их идентификации. Однако данный метод требует, прежде всего, больших временных, а также материальных затрат на: регистрацию колебаний на плотной сети наблюдений, обработку цифровых данных и интерпретацию результатов и поэтому не подходит для оперативных (например, ежедневных) определений значений частот собственных колебаний сооружений.

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС, являясь самой крупной в России, к тому же расположенной в зоне высокой сейсмической активности (9 баллов по карте ОСР-97С), представляет важный объект исследования в части разработки новых подходов в получении высокоточных данных и практический интерес в плане оперативного контроля технического состояния любых инженерных сооружений. Известны исследования 1993-1995 гг. материалов, полученных с использованием мощного дебалансного вибратора [15] и 1997-1998 гг., выполненные методом когерентного восстановления полей стоячих волн [2], по результатам анализа которых определены частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при минимальном и максимальном заполнении водой водохранилища (таблица 3.14). Из анализа табличных данных следует, что при максимальном уровне воды значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины на 0.1-0.2 Гц меньше, чем при минимальном. Специалистами такое искажение частот объясняется общеизвестным «эффектом присоединенной массы»: чем выше уровень воды в водохранилище, тем больше совместная масса плотины с присоединенной водой, следовательно, частоты собственных колебаний становятся меньше. Обращает внимание разница в значениях частот, определенных при одном и том же уровне воды в водохранилище, но в разные годы: она составляет от 0.005 до 0.072 Гц; в публикациях не дается объяснения, чем она вызвана. Вместе с тем, из анализа результатов численного конечно-элементного моделирования колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС следует, что при появлении трещин в модели сооружения частоты собственных колебаний понижаются на величину до 0.05 Гц [16].

Таблица 3.14 – Значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по результатам других исследователей [2,15]

Номер моды	Значения при максимальном уровне воды, Гц		Разница частот, Гц	Значения при минимальном уровне воды, Гц		Разница частот, Гц
	Исследования 1993-1995 гг. [15]	Исследования 1997-1998 гг. [2]		Исследования 1993-1995 гг. [15]	Исследования 1997-1998 гг. [2]	
1	1.1	1.129	-0.029	1.25	1.236	0.014
2	1.2	1.217	-0.017	1.33	1.325	0.005
3	1.5	1.527	-0.027	1.65	1.633	0.017
4	1.85	1.921	-0.071	2.0	2.035	-0.035
5	2.4	2.448	-0.048	2.5	2.531	-0.031
6	2.9	2.972	-0.072	3.1	3.064	0.036
7	3.6	3.635	-0.035	3.7	3.679	0.021

Последние годы (начиная с 2014 г.) ведется непрерывный сейсмометрический мониторинг колебаний в ряде точек плотины Саяно-Шушенской ГЭС автоматизированной системой сейсмометрического контроля (АССК), установленной по заказу ПАО «РусГидро». Известны исследования по определению частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по спектрам микросейсмических колебаний, записанных названной системой [17]. Однако до 2014 года такой мониторинг не проводился из-за отсутствия непрерывно регистрирующей аппаратуры. Вместе с тем, изменение технического состояния плотины, связанное, например, со старением материалов конструкции, как известно, длится годами, даже десятилетиями.

В связи с этим необходимы новые подходы в оценке устойчивости сооружений (с высокой точностью при оперативном контроле): менее затратные при реализации, простые в использовании на основе определения частот собственных колебаний сооружений и анализа их изменений с течением времени с учетом влияния внешних факторов, приводящих к искажению значений частот.

Постановка задачи

Из публикаций известен способ определения значений частот собственных колебаний сооружения с использованием непрерывных сейсмограмм, записанных на сейсмостанциях в его окрестности [18]. Результаты исследования показывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС, колеблющаяся в результате формирования в ней стоячих волн, является источником упругих волн, которые, распространяясь в среде, фиксируются станциями сейсмологической сети на расстояниях даже в несколько километров, несмотря на их существенно низкую амплитуду (на несколько порядков ниже по сравнению с общим уровнем микросейсмического шума). Причем частоты собственных колебаний плотины определяются по локальным максимумам усредненных спектров записей

сейсмического шума, при этом с высокой степенью достоверности определяются значения частот первых семи мод. Поскольку сейсмические записи со станций сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН передаются оперативно (по большинству станций – в режиме реального времени) в обрабатывающие центры и хранятся в цифровом виде неограниченное время (с момента ввода в эксплуатацию современной цифровой регистрирующей аппаратуры 2-3 десятилетия назад), то это дает возможность выполнять их обработку и интерпретацию для определения частот собственных колебаний сооружения за многолетний период мониторинга. Это актуально как для оперативного, так и для длительного контроля за изменением технического состояния плотины под воздействием таких факторов, как старение материалов конструкции, растрескивание горных пород в основании плотины, их обводнение, заиливание и накопление наносов на дне водохранилища в области примыкания к плотине и др., которые, как известно, длятся годами, даже десятилетиями.

Из публикаций известно, что определяемое изменение частот собственных колебаний сооружения свидетельствует не только о разрушительных процессах в конструкции, но и в ряде случаев вызвано искажающими факторами воздействия внешней среды, как правило, сезонного характера. К ним относятся приведенные выше примеры изменения частот собственных колебаний плотин от изменения уровня воды в водохранилище. Кроме этого, так как Саяно-Шушенская ГЭС расположена в условиях умеренного климата (среднемесячные температуры зимой до минус 20° С, летом – до плюс 20° С), то и это необходимо учитывать, поскольку частоты собственных колебаний изменяются в том числе и от изменения температуры материалов конструкций [19]. Кроме того, исследователями отмечается, что изменение частот собственных колебаний сооружений при смене температур с отрицательных на положительные и наоборот (промерзание/оттаивание конструкций) имеет свои особенности, существенно затрудняющие их учет [20].

В настоящем исследовании по многолетним цифровым записям на одной из станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона – «Черемушки» (международный код CERR), расположенной на расстоянии 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, после их обработки по специально разработанной методике [18], определяются частоты первых семи мод собственных колебаний плотины за период 2001-2021 гг., выполняется анализ их изменения в связи с воздействиями внешней среды, такими как изменение уровня воды в водохранилище и температуры воздуха.

Использованные данные, методы исследования, аппаратура

Исходной информацией для регулярного определения значений частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС служат данные мониторинга (с 2001 г. по 2021 г.) со станции «Черемушки» (международный код CERR) локальной сейсмологической сети района Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС, принадлежащей ПАО «РусГидро», цифровые сейсмические записи которой (в формате miniseed) исследуются сейсмологами АСФ ФИЦ ЕГС РАН [21]. Используемая геофизическая аппаратура с 2001 по 2012 год – регистраторы серии «Байкал» с сейсмометрами СМЗ-КВ (Россия); с 2013 г. по настоящее время – широкополосные велосиметры CMG-3ESPCDE производства компании Guralp (Великобритания). Сейсмостанция расположена в 4.4 км с северо-востока от Саяно-Шушенской гидроэлектростанции на территории одноименного поселка (рисунок 3.87). Также при анализе используются материалы, полученные в 2010-2014 гг. при регистрации в ряде точек плотины микросейсмических колебаний с помощью мобильных сейсмических регистраторов серии «Байкал». Эти колебания регистрируются в разное время года в течение нескольких дней для идентификации зарегистрированных сейсмостанцией «Черемушки» малоамплитудных сигналов от плотины, колеблющейся на частотах собственных колебаний. При анализе связи изменения частот собственных колебаний плотины с изменением уровня воды в водохранилище используются значения уровня воды в верхнем бьефе, предоставленные сотрудниками ПАО «РусГидро» (до 2016 г.) и заимствованные с Интернет-ресурса [<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/>] (с 2016 по 2021 г.).

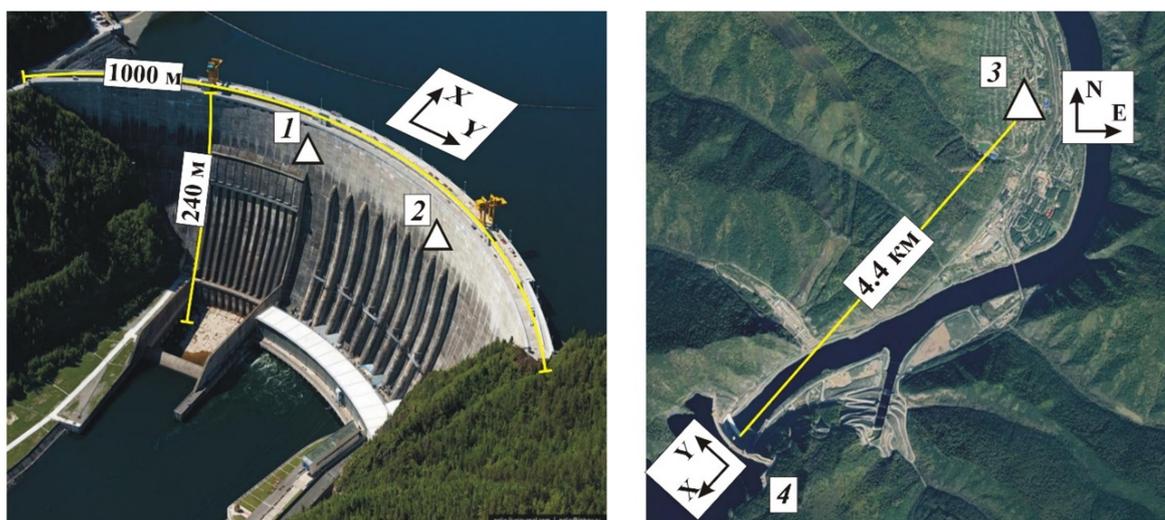


Рисунок 3.87 – Плотина Саяно-Шушенской ГЭС [<https://wikimapia.org/>] и расположение ее и сейсмостанции на снимке со спутника [<https://earth.google.com/>]. Автономные сейсмические регистраторы серии «Байкал» для временного мониторинга (1, 2); станция «Черемушки» сейсмологической сети для постоянной регистрации (обслуживается АСФ ФИЦ ЕГС РАН) (3); плотина Саяно-Шушенской ГЭС (4)

Из-за удаленности сейсмостанции «Черемушки» от ГЭС (расположена на территории поселка) и повышенной сейсмической активности региона сейсмические записи «зашумлены» всевозможными помехами техногенного и природного происхождения, затрудняющими выделение малоамплитудных сигналов от собственных колебаний плотины и определение их частот (рисунок 3.88а). Для повышения достоверности их выделения применяются следующие способы цифровой обработки данных [18]. Прежде всего записи традиционно отфильтровываются от высокоамплитудных помех (от движущегося транспорта, от землетрясений или промышленных взрывов и др.) обнулением участков записей с амплитудами колебаний выше фоновых значений. Затем полезный сигнал накапливается: сейсмическая запись разделяется на ограниченные по времени блоки, для каждого блока с использованием преобразования Фурье вычисляются амплитудные спектры и усредняются. На усредненных амплитудных спектрах (рисунок 3.88б), рассчитанных с ростом длины записи микросейсмического шума и ростом количества усреднений от 100 с (количество усреднений одно) до 51200 с (количество усреднений 512), видно, что при длине записи от 12800 с (около четырех часов, 128 усреднений) спектры сглаживаются и с дальнейшим увеличением длины записи не меняются.

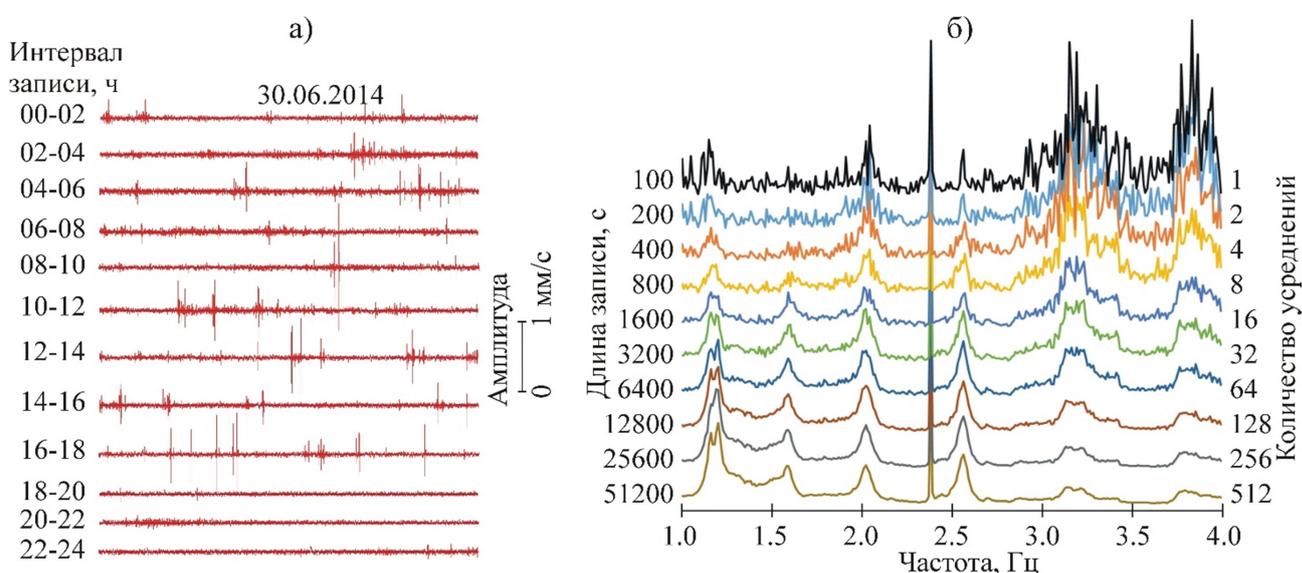


Рисунок 3.88 – Суточная запись микросейсмического шума на Е-компоненте сейсмостанции «Черемушки» (а) и набор усредненных амплитудных спектров с ростом длины записи и количества усреднений (б)

Из результатов спектрального анализа записи микросейсмического шума на станции «Черемушки» следует вывод, что аргументы локальных максимумов усредненных амплитудных спектров (рисунок 3.88б) соответствуют частотам собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Для строгого доказательства

этого вывода сопоставляются усредненные амплитудные спектры от одновременных записей сейсмического шума, зарегистрированных в двух точках плотины (рисунок 3.89а) и на сейсмостанции «Черемушки» (рисунок 3.89б,в). Из сопоставления спектров с двух разнесенных в плотине точек регистрации (1 и 2 по схеме на рисунке 3.87) следует, что из-за различного их положения относительно узлов и пучностей стоячих волн (где амплитуда минимальна и максимальна, соответственно) амплитуды собственных колебаний плотины также отличаются. Для большей достоверности определения частот каждой из мод собственных колебаний их значения берутся с тех точек, где амплитуда локального максимума принимает наибольшее значение (такие точки расположены в местах, отличных от узлов соответствующей моды стоячей волны). На усредненных спектрах (рисунок 3.89б,в) микросейсмического шума, зарегистрированного на сейсмостанции «Черемушки», видно, что аргументы локальных максимумов совпадают с таковыми при одновременной регистрации сейсмического шума в плотине (рисунок 3.89а). Причем наиболее точное совпадение (разница не превышает 0.01 Гц) достигается при сопоставлении среднеквадратичных значений амплитуд усредненных спектров по трем компонентам (N, E, Z) записи. Это хорошо видно на графике (рисунок 3.89в). Таким образом, из сопоставления усредненных спектров одновременных записей в плотине и на удаленной в 4.4 км от нее сейсмостанции «Черемушки» следует, что по записям последней частоты собственных колебаний плотины определяются с незначительной погрешностью – не более 0.01 Гц.

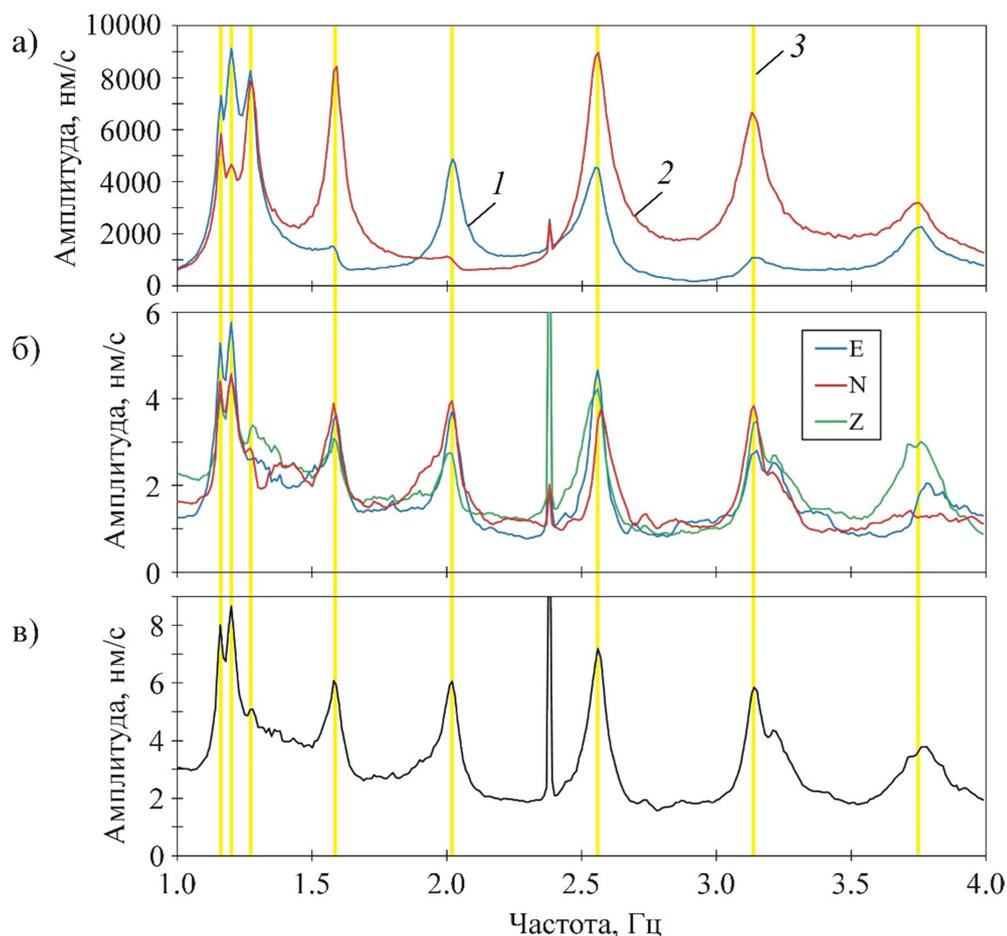


Рисунок 3.89 – Усредненные амплитудные спектры суточной записи микросейсмических шумов в плотине Саяно-Шушенской ГЭС(а) и на сейсмостанции «Черемушки» (б, в), при одновременной регистрации 30.06.2014 г.

а – радиальная X-компонента в точках 1 (1) и 2 (2) на рисунке 2.1 с выделенными локальными максимумами спектров (3); б – три (E, N, Z) компоненты записи сейсмостанции; в – график среднеквадратичных значений амплитуд спектров по трем компонентам

Количество усреднений, необходимое для построения сглаженного усредненного спектра (рисунок 3.88б, рисунок 3.89б), зависит как от уровня помех, так и значений амплитуд «полезных» малоамплитудных сигналов. В известном исследовании [22] доказывается, что в разное время, в зависимости от режимов работы ГЭС, амплитуда собственных колебаний плотины меняется до 10-20 раз. На рисунке 3.90 видно, что соотношение между амплитудами спектров записей микросейсмического шума, зарегистрированных в плотине и на сейсмостанции в 4.4 км от ГЭС, фактически линейное, а значит, амплитуда «полезного» малоамплитудного сигнала, регистрируемого на сейсмостанции «Черемушки», также пропорционально меняется в широких пределах (от единиц до десятков нм/с) в разные даты и время года. Следовательно, для выделения «полезных» малоамплитудных сигналов по усредненным амплитудным спектрам микросейсмического шума в разное время требуется разное количество их усреднений:

например, при увеличении амплитуды сигнала в 10 раз необходимое количество усреднений уменьшится в 100 раз. Из анализа спектров записей микросейсмического шума, зарегистрированных в разное время года, следует, что для надежного выделения на сейсмостанции «Черемушки» сигналов, связанных с собственными колебаниями плотины Саяно-Шушенской ГЭС (при условии очистки сейсмограмм от высокоамплитудных помех), количество усреднений не превышает 500-1000 при длине записи 0.5-1.0 сутки.

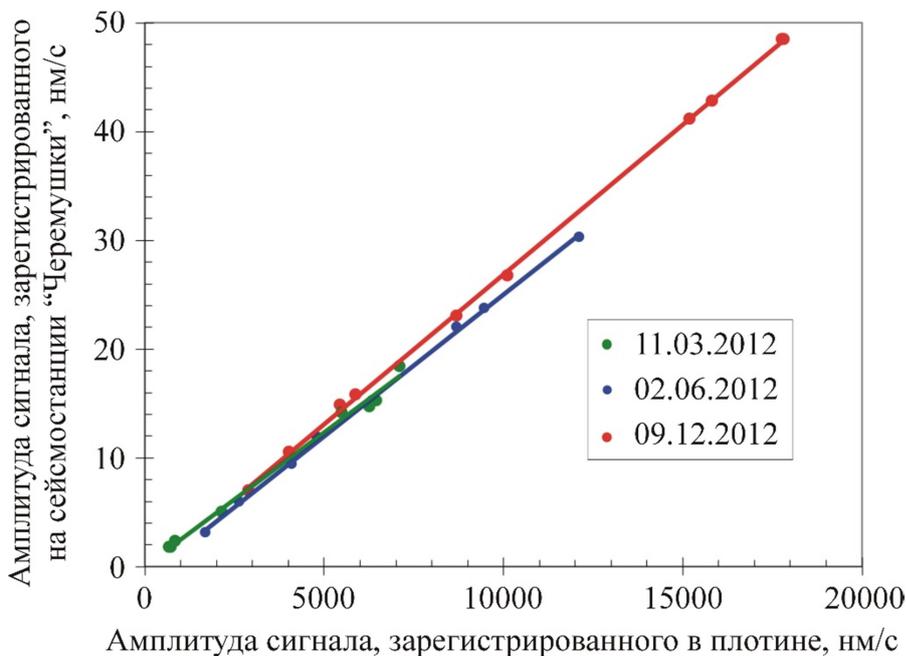


Рисунок 3.90 – Линейная связь между амплитудами сигнала (амплитуда локальных максимумов спектров микросейсмического шума в области частоты 3.7-3.8 Гц) при одновременной его регистрации в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС и на сейсмостанции «Черемушки» для трех разных дат в разное время года

Для вычисления единичных спектров необходимо знать критерии оценки временного интервала, который определяется следующим образом. Общеизвестно, что разрешенность спектра по частоте обратно пропорциональна длине временного интервала записи, по которой он вычисляется. Поэтому чем выше интервал, тем точнее можно определить значение частот собственных колебаний (при отсутствии помех). Однако увеличение временного интервала ведет к снижению числа слагаемых при вычислении усредненного спектра, а значит, уменьшается и соотношение «сигнал/помеха». Для минимизации этого эффекта определяется оптимальный временной интервал следующим образом. При исследовании собственных колебаний сложных объектов, имеющих ряд степеней свободы и соответствующий ряд резонансных областей в частотной характеристике, разрешение увязывается с шириной этих резонансных областей и расстоянием по частоте между ними. Для определения этой величины используются записи микросейсмического шума в верхней части плотины, по которым вычисляются

спектры при разных временных интервалах. На спектрах (рисунок 3.91) видно, что при временном интервале менее 100 с их графики существенно «изломаны», что не позволяет точно определять значение частоты, а при интервале 25 с и менее разрешенность становится настолько низкой, что не позволяет различить сигналы, близкие по частоте. Исходя из вышеизложенного, временной интервал для вычисления единичных спектров берется 200 с, что соответствует высокой разрешенности в 0.005 Гц.

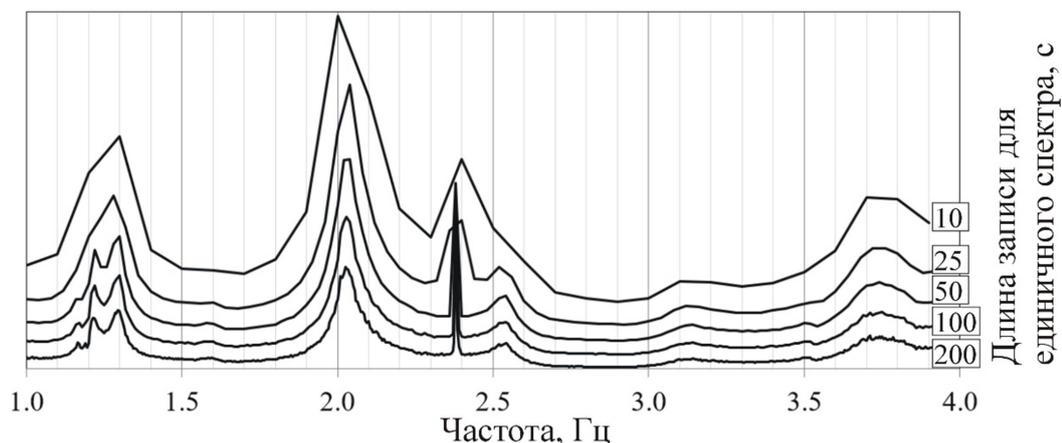


Рисунок 3.91 – Усредненные амплитудные спектры радиальных X-колебаний верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС при разной длине записи для единичного спектра по результатам измерения 06.02.2015 в точке 1 (рисунок 3.87)

На графиках изменения во времени частот первых семи мод собственных колебаний плотины, определенных описанным выше способом по усредненным спектрам микросейсмического шума на сеймостанции «Черемушки» (рисунок 3.92б-з), видна их сезонная периодичность, как и периодичность изменения уровня воды в водохранилище над уровнем моря (рисунок 3.92а), причем разброс названных частот составляет 0.16-0.22 Гц при изменении уровня воды на 35-39 м (в зависимости от года). При линейной аппроксимации значений частот собственных колебаний плотины отмечается их увеличение в течение 20-летнего периода наблюдений на 0.02-0.03 Гц, что на порядок ниже средних значений их сезонных изменений. При этом, аппроксимированные значения уровня воды в водохранилище, практически не изменяются за тот же временной период, несмотря на неодинаковость его изменения из года в год (рисунок 3.92а). Отсюда следует вывод, что для повышения точности определения значений частот собственных колебаний плотины необходим способ учета влияния сезонных факторов, искажающих их значения.

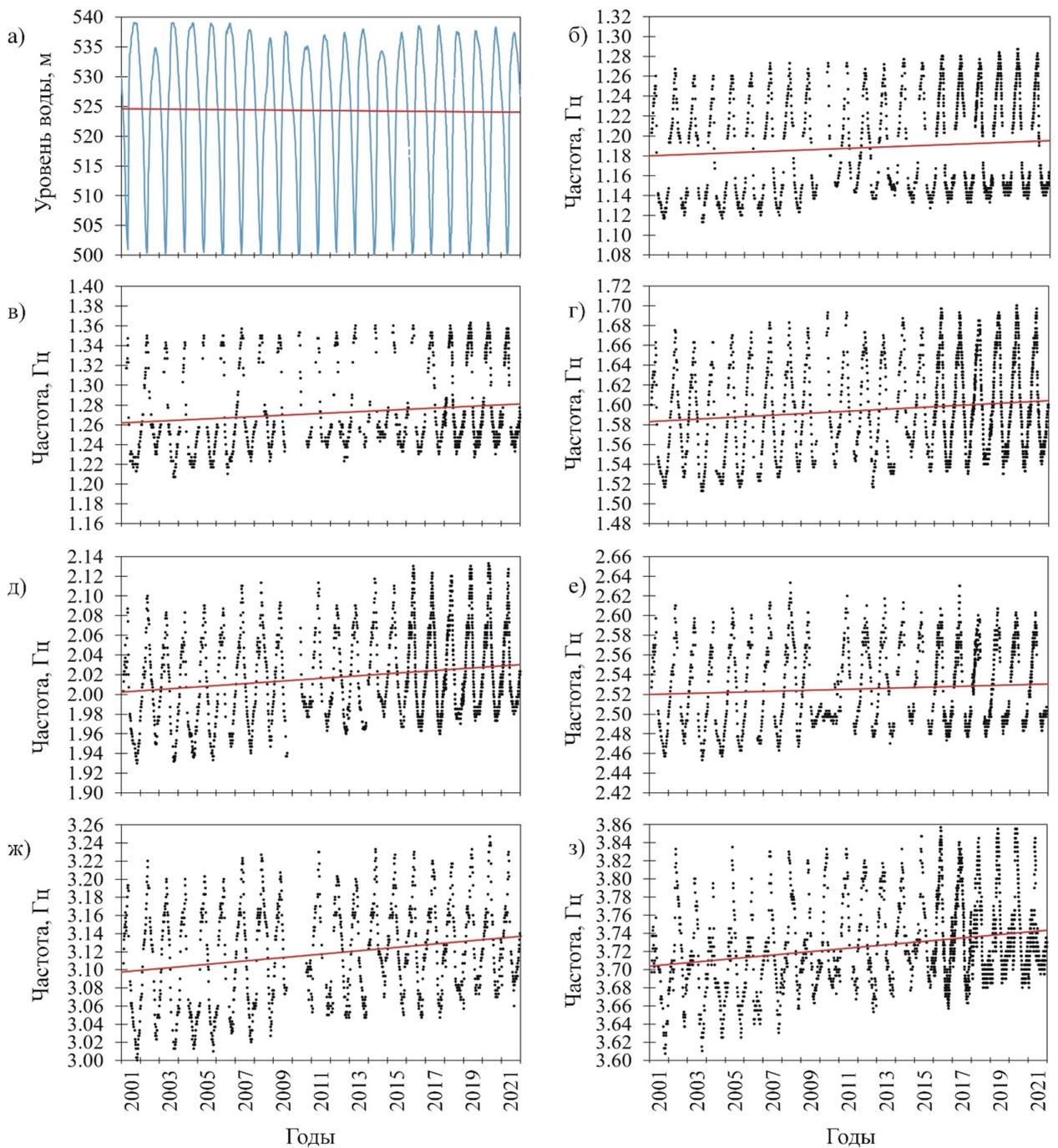


Рисунок 3.92 – Изменение уровня воды в водохранилище (а) и частот 1-7 мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (б-з) за период с 2001 по 2021 год; линейная аппроксимация их значений (красная линия)

На графиках зависимости частот с 1-й по 7-ю моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений (рисунок 3.93) видно, что в целом (при линейной аппроксимации зависимостей) при возрастании уровня воды отмечается понижение частот ее колебаний. Как отмечалось выше, специалистами это объясняется эффектом «присоединенной массы» воды (чем выше уровень воды, тем больше масса колебательной системы, плотины с присоединенной водой, и тем ниже частота собственных колебаний,

соответственно) и установлено другими исследователями по однократным определениям частот при максимальном и минимальном уровне воды [2,15], а также по данным мониторинга собственных колебаний плотины в период 2016-2017 гг. [17]. Некоторые исследователи (например, [23]) при мониторинге частот собственных колебаний плотин учитывают названный эффект путем ввода корректирующей функции, зависящей только от уровня воды в водохранилище. Однако из анализа всей совокупности данных (ежедневные определения значений частот собственных колебаний плотины за 20-летний период мониторинга) следует, что связь между частотой и уровнем воды неоднозначна: при одном и том же уровне воды разброс частот составляет 0.04-0.14 Гц (разброс отличается как от моды к моде, так и от уровня воды на момент регистрации колебаний) при погрешности их определения не более 0.01 Гц. Это указывает на то, что изменение значений частот собственных колебаний плотины происходит не только от изменения уровня воды, но и от воздействия других факторов.

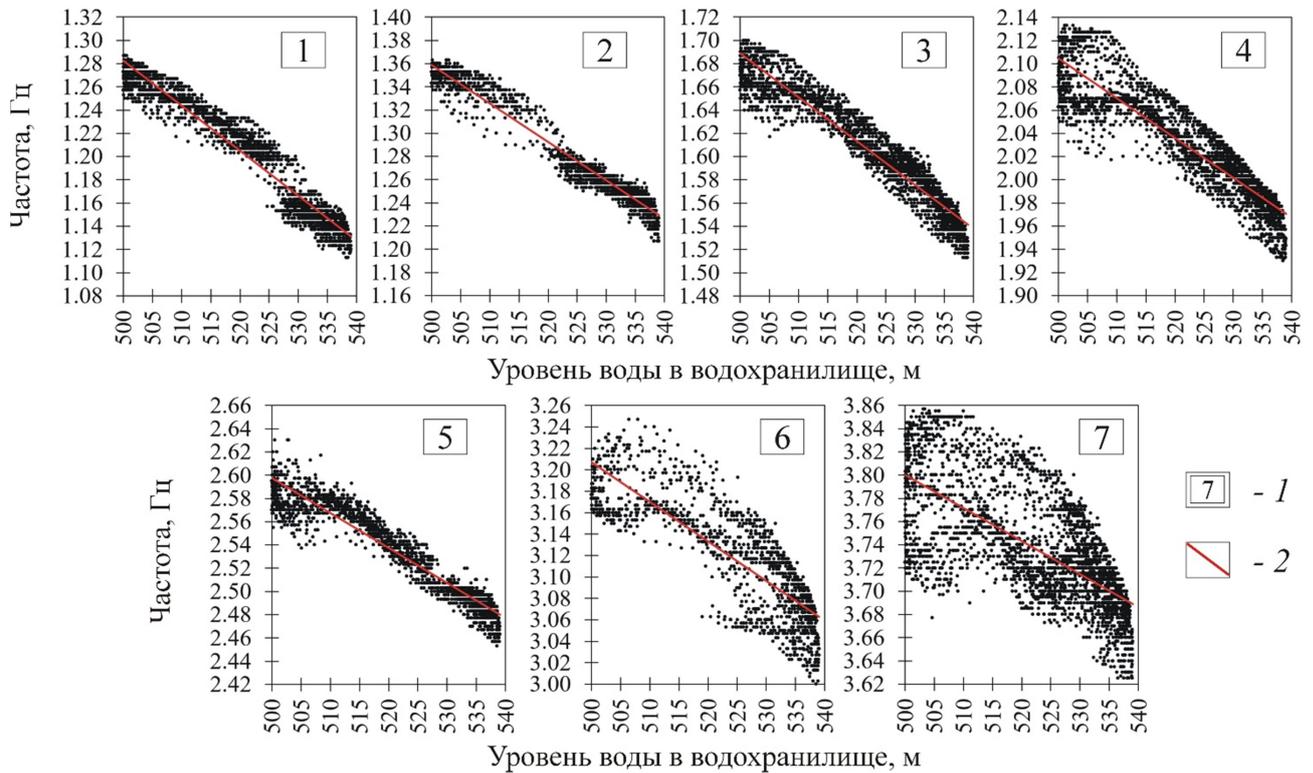


Рисунок 3.93 – Зависимости частот 1-7 мод собственных колебаний плотины от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений по спектрам записей микросейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки». 1 – номер соответствующей моды; 2 – линейная аппроксимация зависимостей

Так, М.И. Саранцевым доказывается, что дополнительным фактором изменения значения частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС может быть замерзание воды в водохранилище [17]. Отсюда следует вывод, что и промерзание/оттаивание бетона самой плотины в холодное время года влияет на частоту

колебаний: она уменьшается или увеличивается. Результаты анализа изменения частот собственных колебаний плотины во времени за 20-летний период мониторинга это подтверждают. Из сопоставления графиков изменения частоты четвертой моды собственных колебаний плотины и уровня воды в водохранилище (рисунок 3.94) следует, что в зимне-весенний период (с декабря по март), когда уровень воды монотонно понижается (значит, частота должна увеличиваться, так как присоединенная масса уменьшается), частота собственных колебаний в ряде случаев аномально снижается на 0.02-0.03 Гц, а по прошествии одного-двух месяцев снова увеличивается. Это обстоятельство объясняется воздействием нескольких факторов в зимний и весенний периоды, при этом точность определения частот собственных колебаний плотины снижается в связи с неразработанностью способа их учета. В частности, масса намёрзшего льда на плотине постоянно изменяется, так как регулярно происходят как дополнительное намерзание, так и откол. Глубина промерзания бетона на различных уровнях плотины также отличается в зависимости как от температуры окружающего воздуха, так и от уровня воды в водохранилище на момент регистрации колебаний. В связи с этим частота собственных колебаний плотины начинает скачкообразно и непредсказуемо меняться. Однако при мониторинге частот собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС в других климатических условиях (без замерзания воды и промерзания бетона в зимнее время) описанное аномальное изменение частот не отмечается [14].

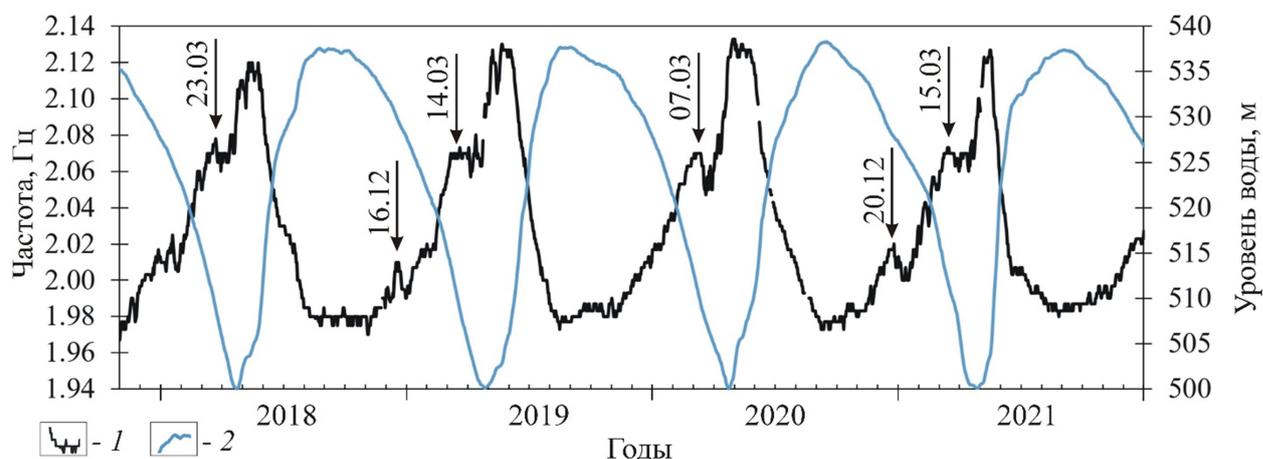


Рисунок 3.94 – Изменение во времени частоты четвертой моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (1) изменение уровня воды в водохранилище (2)

Из сопоставления графиков изменения частот собственных колебаний плотины с изменением уровня воды в водохранилище (рисунок 3.94) следует, что максимумы первых запаздывают по времени относительно минимумов вторых. Аналогичное соотношение отмечается в изменениях частот собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС и уровня воды: по результатам многомесячного мониторинга (с октября 2015 по декабрь

2016 г.) установлено, что изменение частот запаздывает относительно изменения уровня воды в водохранилище на 5-11 суток [14]. Это хорошо видно на графиках (рисунок 3.95) по петлевидному соотношению частот собственных колебаний плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС, и уровня воды, разделенных по годам. Так, на графике изменения частоты 4-й моды для Саяно-Шушенской ГЭС (рисунок 3.95а) видно, что при одном и том же уровне воды отмечаются два значения частот (например, при уровне 505 м – 2.06 и 2.13 Гц; при уровне 525 м – 2.01 и 2.05 Гц и т.д.). Причем в процессе наполнения водохранилища значения частот выше, а при понижении уровня воды (сработке) – ниже. Так же, как и в случае с плотиной Чиркейской ГЭС (рисунок 3.95б), это происходит из-за запаздывания изменения частот собственных колебаний сооружения относительно изменения уровня воды. Причина такого запаздывания, предположительно, связана с тепловой инертностью бетона: процессы изменения уровня воды в водохранилище длятся не один месяц, за эти периоды происходит существенное изменение среднемесячной температуры окружающего воздуха, а именно от минус 10-20 °С при сработке в зимнее время до плюс 10-20 °С при наполнении в летние месяцы (рисунок 3.96).

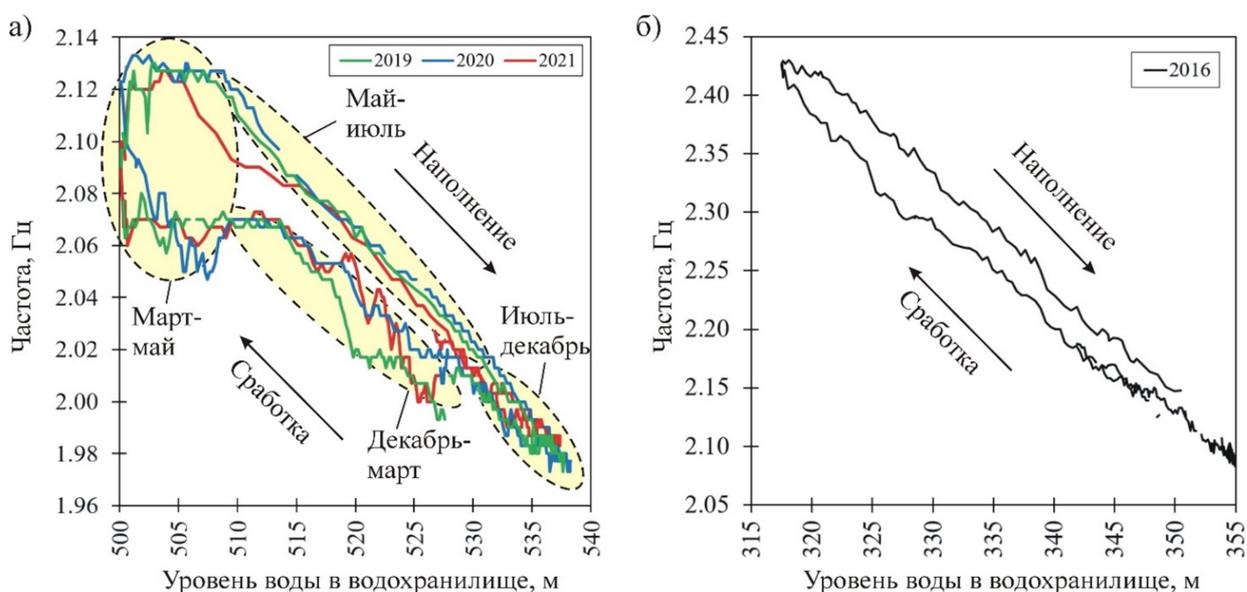


Рисунок 3.95 – Изменение частот 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (а) и 1-й моды собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС (б) [14] от изменения уровня воды в водохранилищах

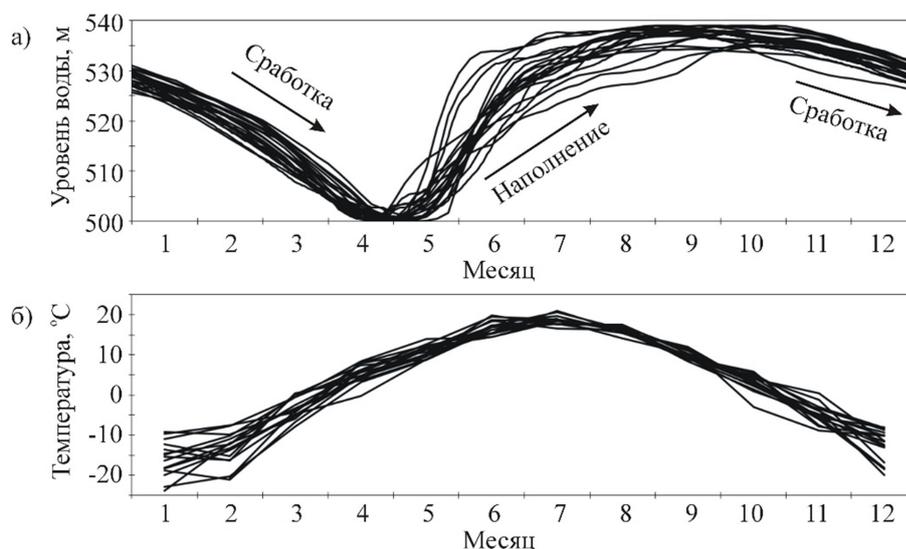


Рисунок 3.96 – Графики сезонных изменений уровня воды в Саяно-Шушенском водохранилище с 2001 по 2021 г. (а) и среднемесячной температуры воздуха в 40 км с северо-запада от ГЭС (ближайшая постоянно действующая метеостанция в п. Бея по данным сайта rp5.ru) с 2005 по 2021 г. (б)

В результате анализа представленных на графике (рисунок 3.95) изменений частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от уровня воды и в разное время года, а также сезонных изменений уровня воды и среднемесячных изменений температуры воздуха (рисунок 3.96) выделяются четыре условных интервала (для остальных мод собственных колебаний плотины результаты анализа подобны):

1. Наполнение водохранилища водой с уровня 510 до уровня 530 м происходит, как правило, в течение 2-3 месяцев с мая по июль, характеризуется высокой скоростью наполнения (увеличение уровня воды на 20 м за период 2-3 месяца) и, соответственно, высокой скоростью монотонного снижения значений частоты собственных колебаний (примерно, на 0.1 Гц за тот же период). Среднемесячные температуры в этом периоде фиксируются положительные (от 5 до 20° C), что сопровождается активным прогреванием бетона плотины (после зимне-весеннего периода).

2. Наполнение водохранилища водой с уровня 530 до 535-539 м (в зависимости от года) и последующая сработка до уровня 530 м происходят, как правило, в течение 5-6 месяцев с июля по декабрь (до замерзания водохранилища). Этот этап характеризуется низкой скоростью наполнения или сработки (порядка 5-9 м за 2-3 месяца) и, соответственно, низкой скоростью изменения частоты собственных колебаний плотины (около 0.04 Гц за 2-3 месяца). Частота при этом изменяется монотонно (при увеличении уровня воды уменьшается, при уменьшении – увеличивается).

3. Сработка водохранилища с уровня 530 до уровня 510 м, происходит, как правило, в течение 3-4 месяцев с декабря по март (период, когда вода замерзает, среднемесячная температура окружающего воздуха от 0 до минус 25° С). В среднем понижение уровня воды происходит со скоростью 20 м за 3-4 месяца, частота собственных колебаний при этом увеличивается на 0.06 Гц. Однако в этом интервале изменение частоты не является монотонным: при интегральном увеличении частоты наблюдаются участки, где она внезапно снижается. Такое аномальное явление, как было отмечено выше, предположительно, объясняется связью с эффектами намерзания и откола льда и неравномерного промерзания бетона плотины.

4. Сработка водохранилища с уровня 510 до 500 м и последующее наполнение до уровня 510 м происходят, преимущественно, в течение 2-3 месяцев с марта по май. Среднемесячная температура воздуха изменяется с отрицательных (минус 10° С) до положительных (плюс 15° С), что сопровождается активным оттаиванием льда в водохранилище и оттаиванием бетона плотины. При этом фиксируется существенное отличие значений частоты собственных колебаний, определенных в период сработки и наполнения водохранилища для одного и того же уровня воды. Например, при минимальном ее уровне 500 м частота 4-й моды увеличивается на 0.05 Гц, и это изменение происходит быстро, за считанные дни (в среднем, за 10-15 дней). Из этого следует, что использование для оценки устойчивости плотины значений частот собственных колебаний при минимальном уровне воды (который происходит в период активного таяния льда) приводит к значительным погрешностям.

Итак, из анализа вышеизложенного следует вывод, что при определении частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, выполненных в разные годы, необходимо использовать интервалы мониторинга, при которых воздействие факторов внешней среды (прежде всего, температурных изменений) минимально. Этому условию удовлетворяет 2-й интервал (наполнение водохранилища водой с уровня 530 до 535-539 м (в зависимости от года) и последующая сработка до уровня 530 м), причем длительность его составляет 5-6 месяцев, с июля по декабрь. Значение частот собственных колебаний плотины определяется для уровня 535 м (это наименьшее значение из всех максимумов уровней воды в водохранилище за период 2001-2021 гг.) как среднее между всеми значениями в интервале уровней 534-536 м.

Полученные результаты

В результате обработки записей сейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки» за 20-летний период (2001-2021 гг.) и интерпретации изменений частот

собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС с учетом воздействия на плотину таких факторов, как изменение уровня воды в водохранилище и изменение температуры окружающего воздуха по описанной выше методике установлено, что частоты первых семи мод собственных колебаний плотины, определенных на уровне 535 м, непрерывно возрастают на 0.02-0.05 Гц (рисунок 3.97). Это объясняется, или увеличением механической жесткости плотины, или длительным (десятилетиями) изменением граничных условий, продолжающимся в настоящее время. На сегодня в научных публикациях нет объяснения, с чем связано такое медленное, но постоянное увеличение значений частот собственных колебаний сооружения. В своем исследовании Н.А. Вульфвич и Л.П. Потехин доказывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС в последние годы эксплуатации (начиная с 2013 г.) перешла в так называемое «стабилизированное состояние», что, по данным геодезического мониторинга проявляется в прекращении роста необратимых перемещений ее гребня [24]. Из анализа результатов мониторинга собственных колебаний плотины следует, что рост значений частот первых семи мод не прекращается и до настоящего времени, т.е. процесс, вызвавший этот рост, не стабилизируется. В исследовании других ученых предполагается, что «адаптация плотины к своему основанию в случае плотины Саяно-Шушенской ГЭС продолжается вместо ожидаемых нескольких лет гораздо больший срок – 30 лет и более», а также «адаптационный процесс, вероятнее всего, обусловлен реологическими явлениями в бетоне плотины и основании» [25]. Отсюда следует вывод, что наблюдаемый рост значений частот собственных колебаний плотины связан с упомянутыми «адаптационными процессами». Альтернативная версия причины упомянутого явления может быть также связана с заиливанием и накоплением наносов на дне водохранилища на участке, примыкающем к плотине, так как при этом неизбежно меняются граничные условия на контакте плотины и основания, этот процесс идет непрерывно, что и вызывает медленное увеличение частот собственных колебаний. Из публикаций неизвестно, проводились ли исследования по оценке роста мощности наносов именно вблизи плотины, но в некоторых публикациях доказывается, что процессы разрушения берегов Саяно-Шушенского водохранилища идут непрерывно, а значит наносы вблизи плотины постоянно накапливаются [26]. Какова бы ни была причина, такой продолжительный и незамедляющийся рост значений частот собственных колебаний плотины является показателем изменения состояния плотины необратимого характера, последствия которых на сегодня необходимо спрогнозировать. Этим объясняется актуальность исследования, направленного на определение причин необратимых процессов и прогнозирование их протекания, особенно при выявлении процессов разрушительного характера.

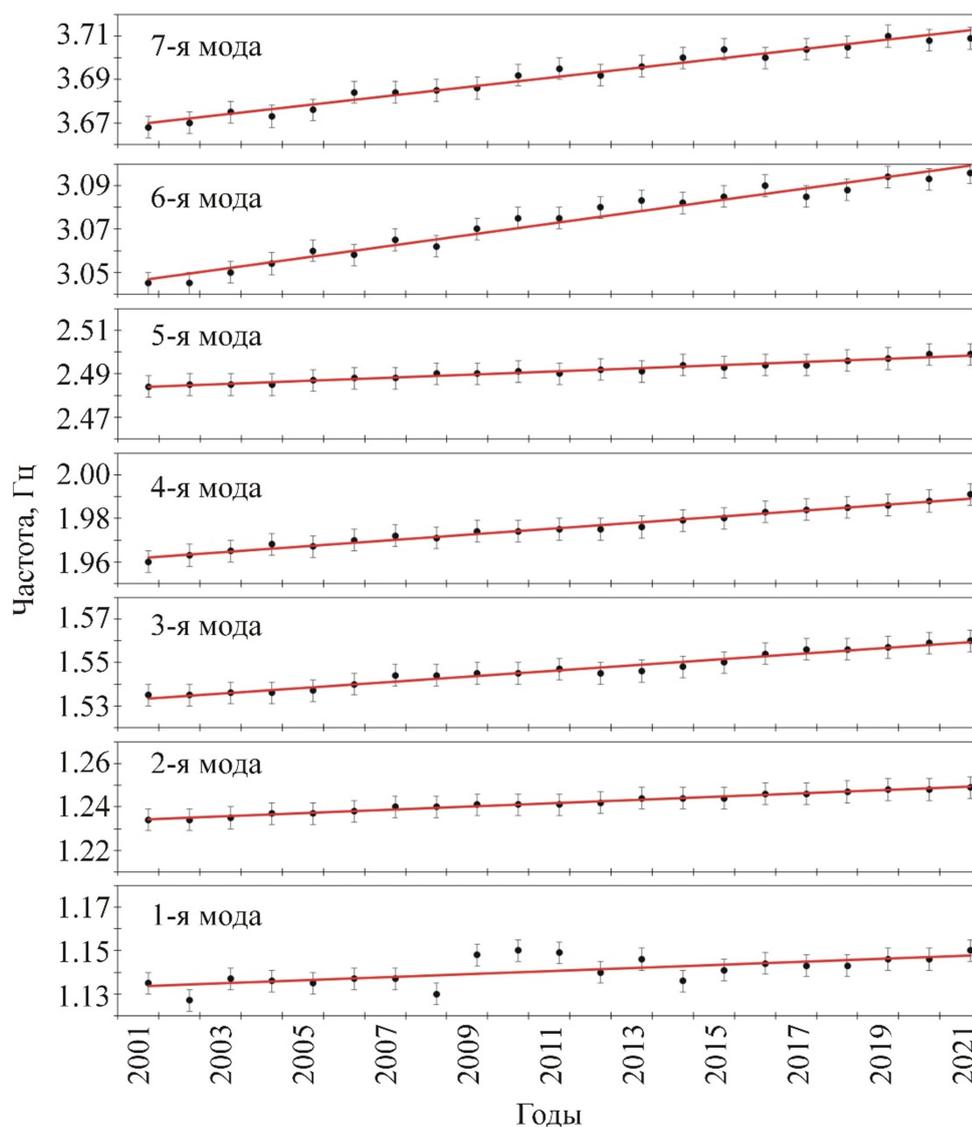


Рисунок 3.97 – Увеличение значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при уровне воды в водохранилище 535 м за 20-летний период наблюдений

Заключение

Результаты спектрально-временного анализа данных многолетнего мониторинга показывают, что разрушительные процессы при эксплуатации технических сооружений контролируются с использованием разработанной методики, малозатратной при реализации, простой в использовании, которая основывается на выделении и интерпретации малоамплитудных сейсмических сигналов от колеблющихся на частотах собственных колебаний объектов, регистрируемых станциями сейсмологической сети на расстоянии в несколько километров и включает следующие этапы:

Спектрально-временной анализ одновременных записей сеймостанций, расположенных в нескольких километрах от исследуемого объекта и на самом объекте

для идентификации малоамплитудных сигналов, связанных с колебаниями объекта, и определения оптимальных параметров цифровой обработки сейсмических записей.

Доказательство, что выделяемые малоамплитудные сигналы вызваны собственными колебаниями объекта исследования за счет интерпретации его колебаний методом когерентного восстановления полей стоячих волн.

Набор статистических данных, полученных в результате обработки сейсмических записей многолетнего мониторинга и их ретроспективный анализ для определения закономерностей в изменениях частот малоамплитудных сигналов в связи с воздействиями внешней среды, такими как температурные изменения, изменения уровня воды в водохранилище, промерзание/оттаивание материалов конструкций и т.п.

Обнаружение разрушительных процессов на технических сооружениях, таких как снижение их устойчивости из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п. по аномальным изменениям частот собственных колебаний сооружений.

Преимущество разработанной методики:

За счет использования представительного материала, а именно накопленных многолетних (измеряемых десятилетиями) данных мониторинга в виде непрерывных цифровых записей сейсмологической сети станций появляются малозатратные, при этом достоверные данные о частотах собственных колебаний различных важных объектов (плотины ГЭС, мосты, гражданские здания и др.), что выгодно отличает ее от методик разовых измерений колебаний непосредственно на объектах исследования.

Ограниченность применения:

В связи с малой амплитудой анализируемых сигналов (в ряде случаев на порядки ниже уровня сейсмического шума) накладываются ограничения на применимость методики: расстояние от исследуемых объектов до станций, где можно распознать «полезные» сигналы составляет несколько километров (в отдельных случаях, первые десятки километров), поэтому из-за неравномерности расположения сеймостанций и редкой сейсмологической сети в районах пониженной сейсмичности снижается количество объектов, которые могут быть исследованы.

3.3 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области

Введение

Применение комплекса электромагнитных методов: зондирований становлением поля (ЗС), вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) позволило значительно уточнить геоэлектрическую модель Чуйской сейсмоактивной области в широком диапазоне глубин. По данным ЗС получены количественные оценки удельного электрического сопротивления (УЭС) и мощности отложений осадочного заполнения, а также УЭС верхней части палеозойского фундамента Чуйской впадины, выявлено разломно-блоковое строение, определено положение разломных нарушений. Подготовлены геоэлектрические материалы для построения подробной неотектонической схемы этой территории. Разработана методика совместной интерпретации данных ЗС и ВЭЗ. Дальнейшее развитие комплексной обработки позволит выяснить соотношение поверхностных и глубинных структур Горного Алтая, что крайне важно для понимания сценария происходящих геодинамических процессов.

В 2022 году продолжены изучения Горловского прогиба Кольвань-Томской складчатой зоны с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами.

3.3.1 Электромагнитный мониторинг. Измерения методом ЗС в режимных точках Чуйской впадины Горного Алтая

Регулярные наблюдения за изменениями УЭС геологического массива методом становления электромагнитного поля (ЗС) с соосными петлями больших размеров (500x500 м) выполняются в западной части Чуйской впадины. Пункты этих зондирований расположены на профилях ЗС 80-х годов прошлого столетия с сохранением момента установок предшествующих работ. Измерения начаты в 2004 г. после Чуйского землетрясения и продолжаются в настоящее время. Анализ данных мониторинга осуществлялся с учётом особенностей геоэлектрического строения участка измерений [36].

В 2022 году в западной части Чуйской впадины проведены мониторинговые измерения в девяти регулярных пунктах (рисунок 3.98) квадратными совмещенными центральными петлями (Q, q). Размеры генераторной петли составляют 500x500 м. Размеры приемной петли: 200x200 м. Ток в генераторном контуре достигает 25 А.

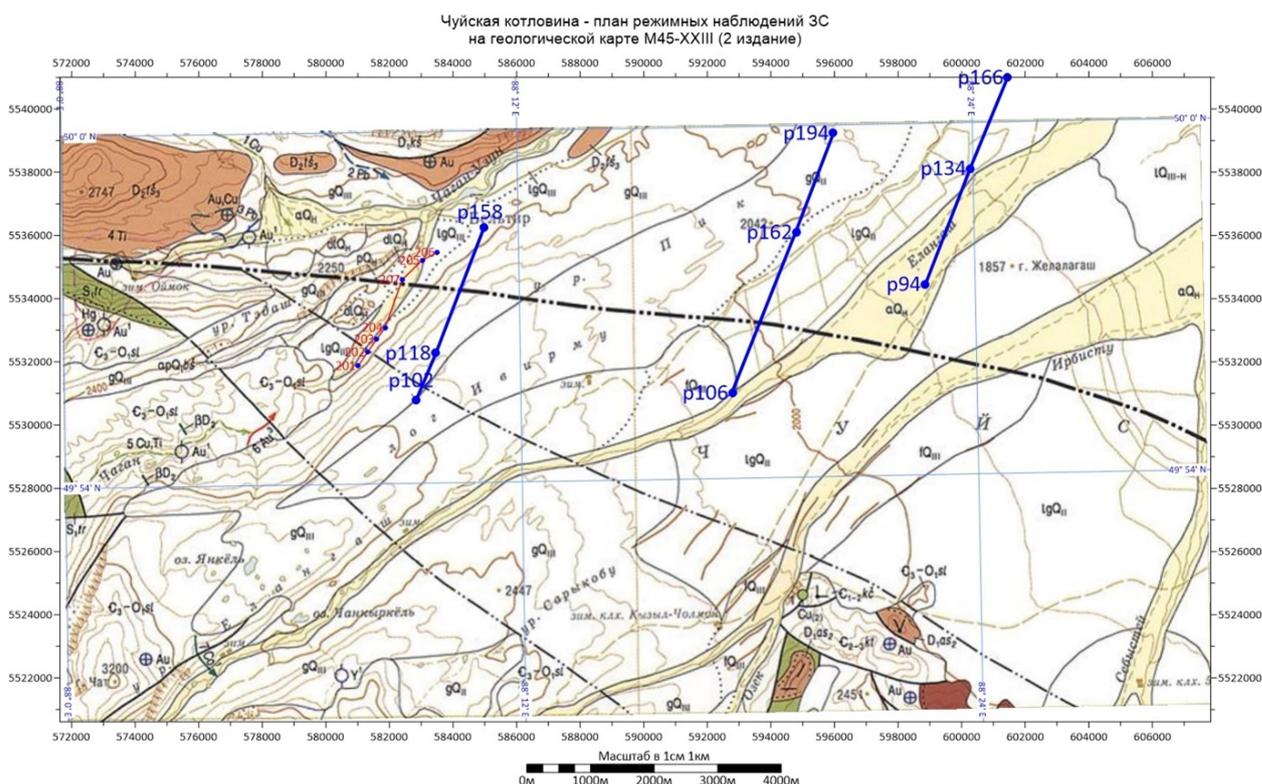


Рисунок 3.98 – Схема размещения режимных пунктов в Чуйской впадине Горного Алтая

Полевые работы

В ходе проведения работ выполнен запланированный объем полевых наблюдений в девяти режимных пунктах. В каждом из них осуществлялось по три цикла измерений, что позволило достичь уровня выделения сигнала порядка $1.0 \cdot 10^{-8}$ В. Фактический объем работ приведен в таблице 3.15.

Рапорт оператора с характеристиками полевого эксперимента на каждом пикете приведен в таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Чуйская котловина, режимные измерения 2022г. Рапорт оператора

Пикет / файл	Установка (метр)	Ток (А)	Координаты: UTM 45		К усиления
			Восток	Север	
ПК102	Гн 500х500 х 200х200		582842	5530800	
pk102-m.txt		1.4			1
pk102-1.txt		20.0			1
pk102-16.txt		20.0			16
ПК106	Гн 500х500 х 200х200		592788	5531019	
pk106-m.txt		1.31			1
pk106-1.txt		20.3			1
pk106-16.txt		20.3			16
ПК118	Гн 500х500 х 200х200		583442	5532279	
pk118-m.txt		1.41			1
pk118-1.txt		20.8			1
pk118-16.txt		20.8			16
ПК134	Гн 500х500 х 200х200		600275	5538117	
pk134-m.txt		1.27			1

Таблица 3.15 – (Продолжение) Чуйская котловина, режимные измерения 2022г. Рапорт оператора

pk134-1.txt		19.2			1
pk134-16.txt		19.2			16
ПК158	Гн 500x500 x 200x200		584976	5536252	
pk158-m.txt		1.34			1
pk158-1.txt		20.5			1
pk158-16.txt		20.5			16
ПК162	Гн 500x500 x 200x200		594806	5536099	
pk162-m.txt		1.4			1
pk162-1.txt		21.5			1
pk162-16.txt		21.5			16
ПК166	Гн 500x500 x 200x200		601447	5540999	
pk166-m.txt		1.4			1
pk166-1.txt		21.5			1
pk166-16.txt		21.5			16
ПК194	Гн 500x500 x 200x200		595957	5539236	
pk194-m.txt		1.33			1
pk194-1.txt		20.5			1
pk194-16.txt		20.5			16
ПК094	Гн 500x500 x 200x200		598846	5534458	
pk94-m.txt		1.31			1
pk94-1.txt		20.0			1
pk94-16.txt		20.0			16

Первичная обработка материалов для контроля качества проведена непосредственно в период полевых работ.

Расчет кривых ЭДС становления поля, полученные в режимных точках, приведены на рисунке 3.99.

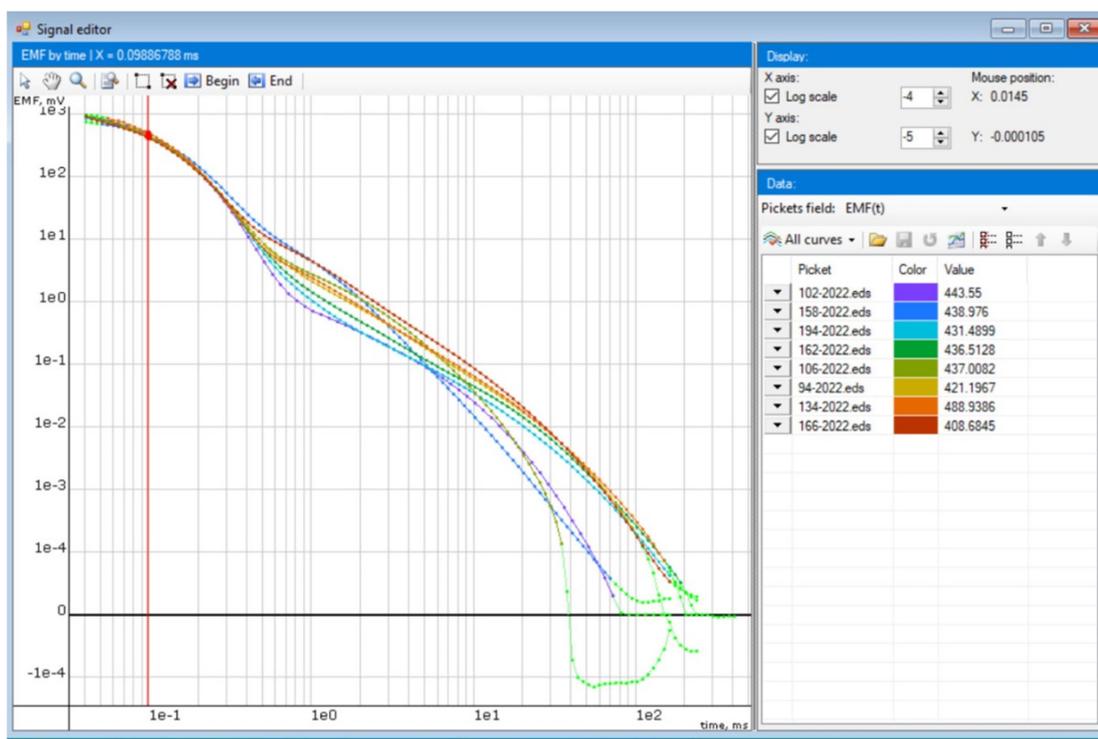


Рисунок 3.99 – Кривые ЭДС становления поля в режимных точках

При наблюдениях в одном пункте выполнялось три цикла измерений с малым током, амплитуда порядка $1.4 \div 1.6 \text{ A}$ и с большим током $25 \div 27 \text{ A}$. Коэффициенту усиления $1 \div 16$. Уровни амплитуды токовых импульсов регистрируются в цифровом виде на электронный носитель. При обработке сигналов программным путем производится нормировка каждого единичного воздействия на соответствующий ему уровень токового импульса.

Проведена обработка, рассчитаны и построены кривые ρ_{τ} (рисунок 3.100) и s_{τ} (рисунок 3.101). Кривые ρ_{τ} и s_{τ} характеризуют разную глубинность и соответственно разные геоэлектрические модели.

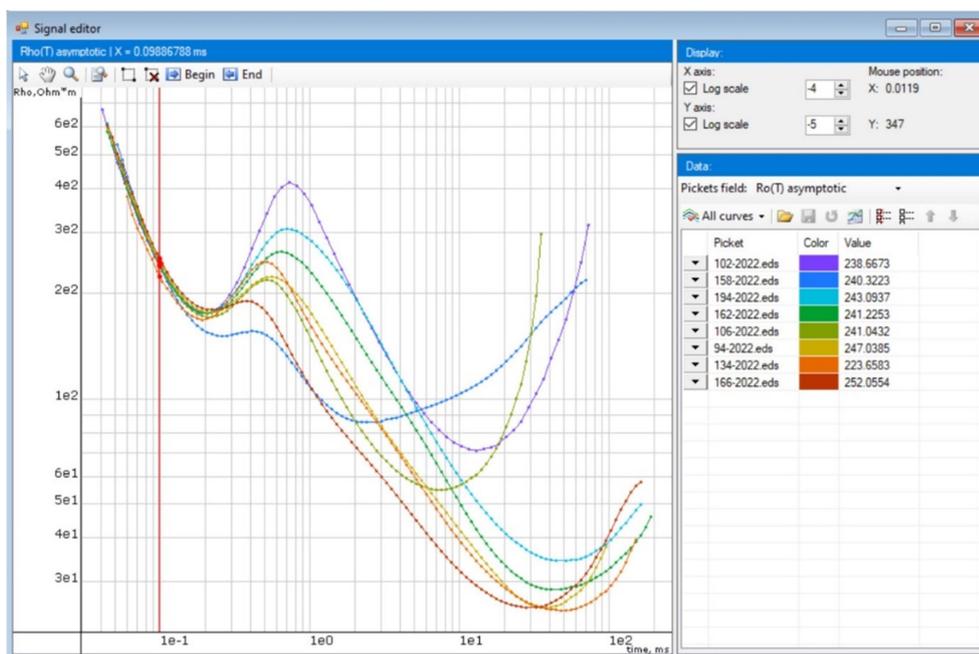


Рисунок 3.100 – Кривые ρ_{τ} становления поля в режимных точках

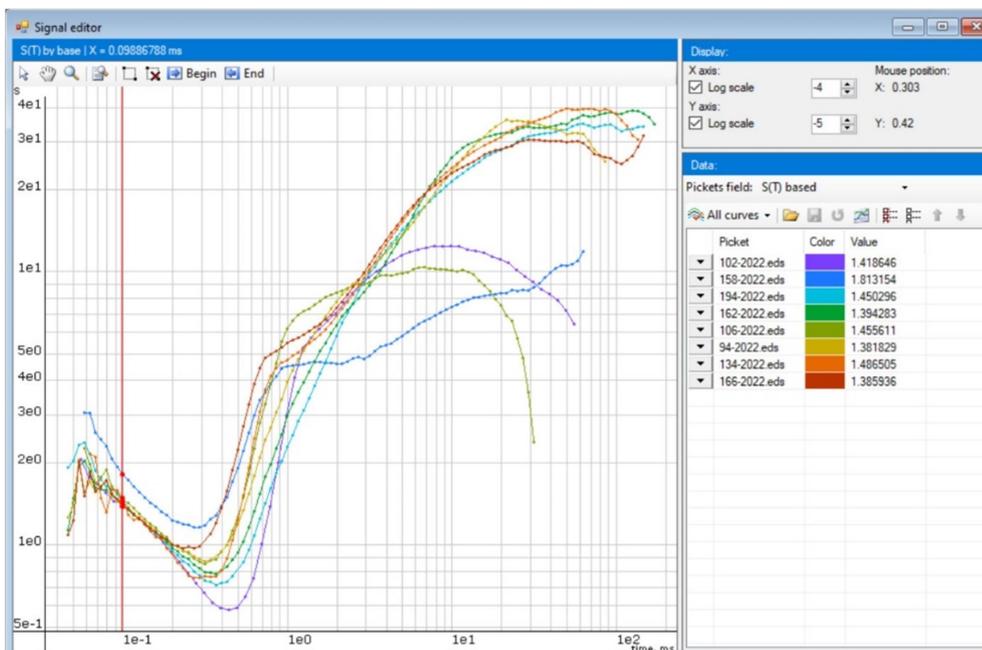


Рисунок 3.101 – Кривые s_t становления поля в режимных точках

Контрольные измерения

При проведении измерений в режимных точках особые требования предъявляются к точности и повторяемости измерений [37].

Для анализа относительной ошибки измерений в режимных точках были проведены повторные измерения (контрольные физические наблюдения) на пикете ПК 106 и Измерения проведены с повторной раскладкой генераторных и измерительных контуров. Как и при регулярных наблюдениях в контрольных точках было выполнено по три цикла измерений, с малым током порядка 1.31А и с большим током порядка 20.3А. Уровни амплитуды токовых импульсов регистрируются в цифровом виде на электронный носитель. При обработке сигналов программным путем производится нормировка каждого единичного воздействия на соответствующий ему уровень токового импульса.

Основные параметры контрольных измерений таблица 3.16.

- Генераторная петля, одновитковая квадратной формы, со сторонами 500 метров
- Измерительный контур, одновитковый квадратной формы, со стороной 200 метров
- Ток в генераторном контуре стабилизирован на уровнях 1.31 А малый ток и 20.3 А большой ток. Коэффициенты усиления 1 и 16.

Таблица 3.16 – Основные параметры контрольных измерений

Площадка проведения испытаний	Координаты центра генераторной петли в системе WGS84: Широта – Долгота -
Температура окружающего воздуха	25±10 °С
Питание силовой части генератора	От одного до двенадцати аккумуляторов емкостью по 130А*час, в зависимости от требуемого тока
Тип синхронизации	GPS (внешняя)
Погрешность GPS – синхронизации	не более 1 мкс
Ток генераторной петли, А	1.31 А; 20.3 А
Форма тока	П-образные импульсы: 400мс – ток, 400мс – пауза.
Фронт выключения тока	Не более 0.1 мс при токе 35.0А
Генераторный контур	ГПМП квадрат 500х500 м. М=250000 м ²
Пассивная измерительная антенна	ГПМП квадрат 200х200 м. М=40000 м ² .

Контрольные измерения были проведены в следующей последовательности:

Измерения в контрольной точке ПК 106 с двумя уровнями токовых импульсов, малым током порядка 1.31 А и большим током (рисунок 3.105) Измерения проводились в

центре генераторной петли три цикла измерений (три дубля) в каждом количестве накоплений более 100.

Относительная погрешность рассчитывалась по данным рабочей и контрольной физических точек относительно среднего значения этих измерений:

$$\delta = \frac{|e_i(t) - \bar{e}_i(t)|}{\bar{e}_i(t)} \times 100\%, \quad (3.3)$$

где δ – относительная погрешность в %, $e_i(t)$ – измеренное значение ЭДС, $\bar{e}_i(t)$ – среднее значение ЭДС.

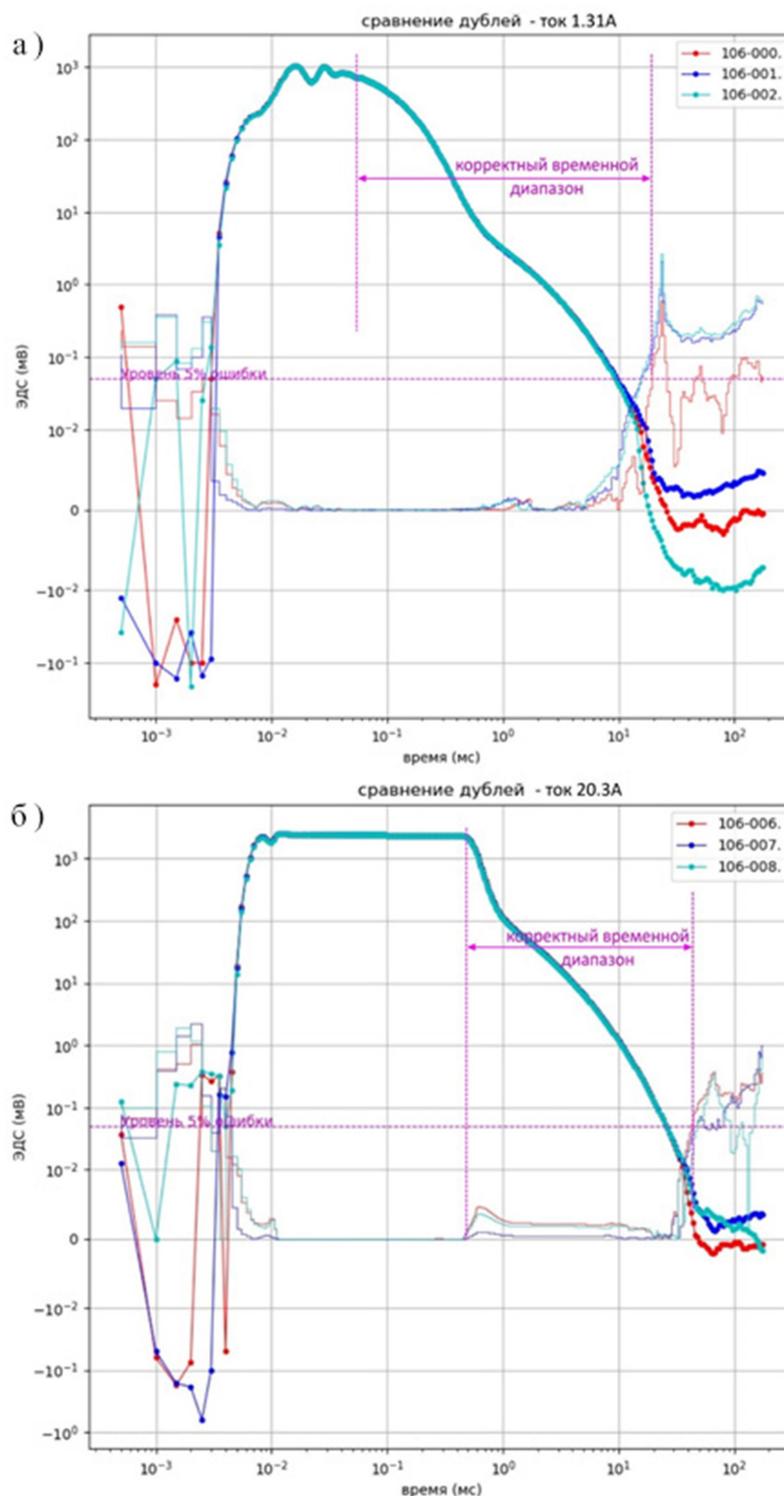


Рисунок 3.102 – Графики относительной погрешности ПК 106, малый ток 1.31А (а), большой ток 20.3А (б)

Анализ значений относительной погрешности измерений на ПК 106 на разных токах показывает то, что в рабочем интервале измерений $0.1 \div 60$ мс относительная погрешность в режимной точке ПК 106 не превышает 0.1 – 0.2 % (рисунок 3.102).

Достигнутый уровень точности повторных измерений позволяет проводить анализ вариаций УЭС в режимных точках по годам проведения работ.

Вариации УЭС за период измерений с 2004 по 2022 год, рассмотрим на примере пикетов ЗС 106, ЗС 158 и ЗС 166

Обработка полевых данных за 2005-2022 годы подтвердила сделанные ранее выводы о происходящих процессах консолидации среды. На рисунке 3.103 приводятся данные, ЭДС полученные в пункте ЗС 106, за весь интервал измерений. Этот пункт расположен в пределах приподнятого блока фундамента в зоне основного разрыва Чуйского землетрясения.

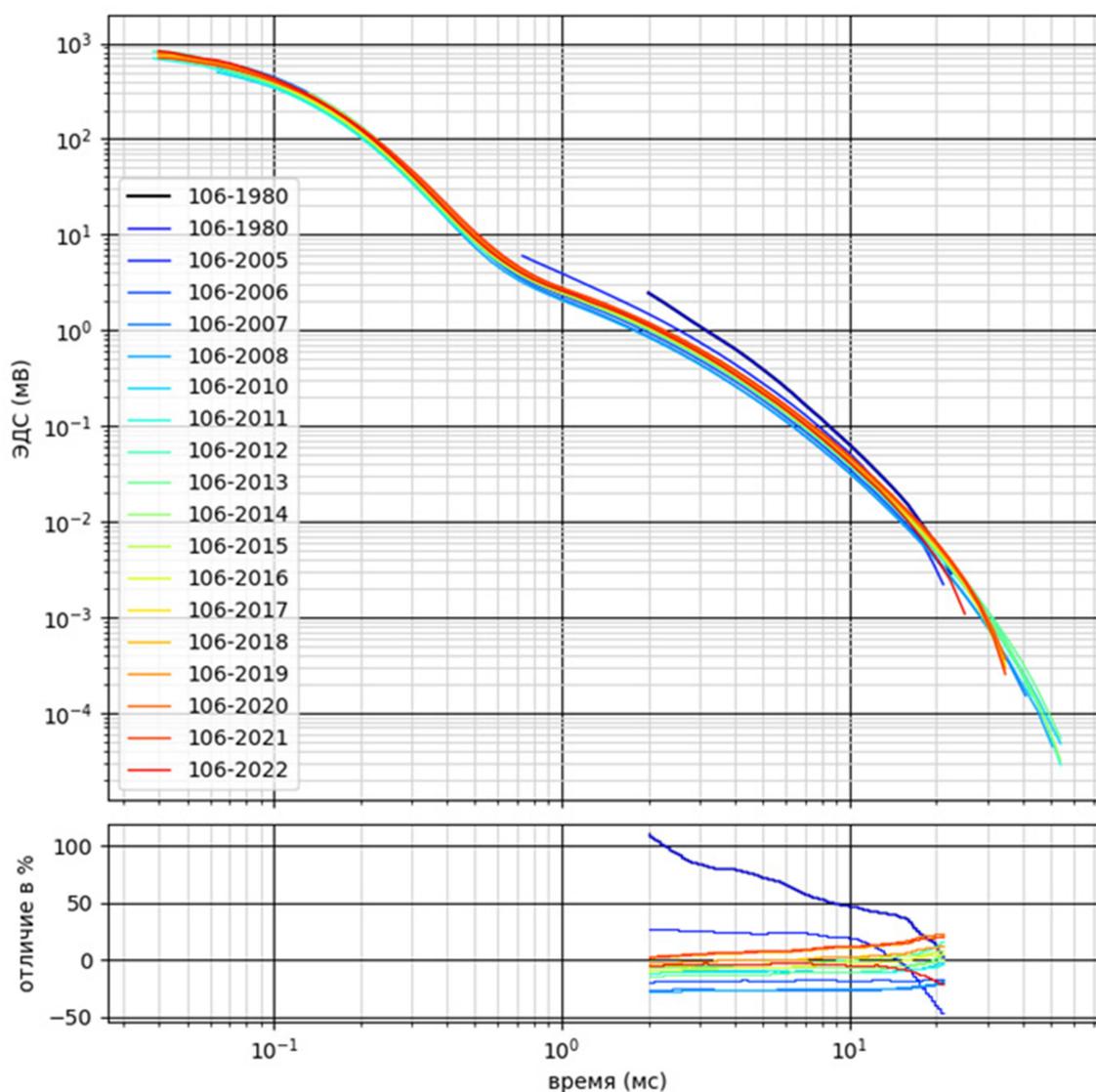


Рисунок 3.103 – Кривые ЭДС становления поля в режимной точке 106 за период наблюдений 1980-2022 гг.

Отмечаются вариации значений ρ_t (рисунок 3.104) по годам в следующем временном ряду:

- 1980 год, до Чуйского землетрясения 2003г, сопротивления ρ_t маркирующего проводящего горизонта имело значения ~ 70.0 Ом·м

– 2005 год, начало режимных инструментальных наблюдений после сейсмического события 2003г, сопротивления ρ_{τ} маркирующего проводящего горизонта резко снизилось до - 45.0 Ом·м

– 2006 – 2022 г.г. сопротивления ρ_{τ} маркирующего проводящего горизонта варьируется в интервале значений 50.0 Ом·м – 65.0 Ом·м

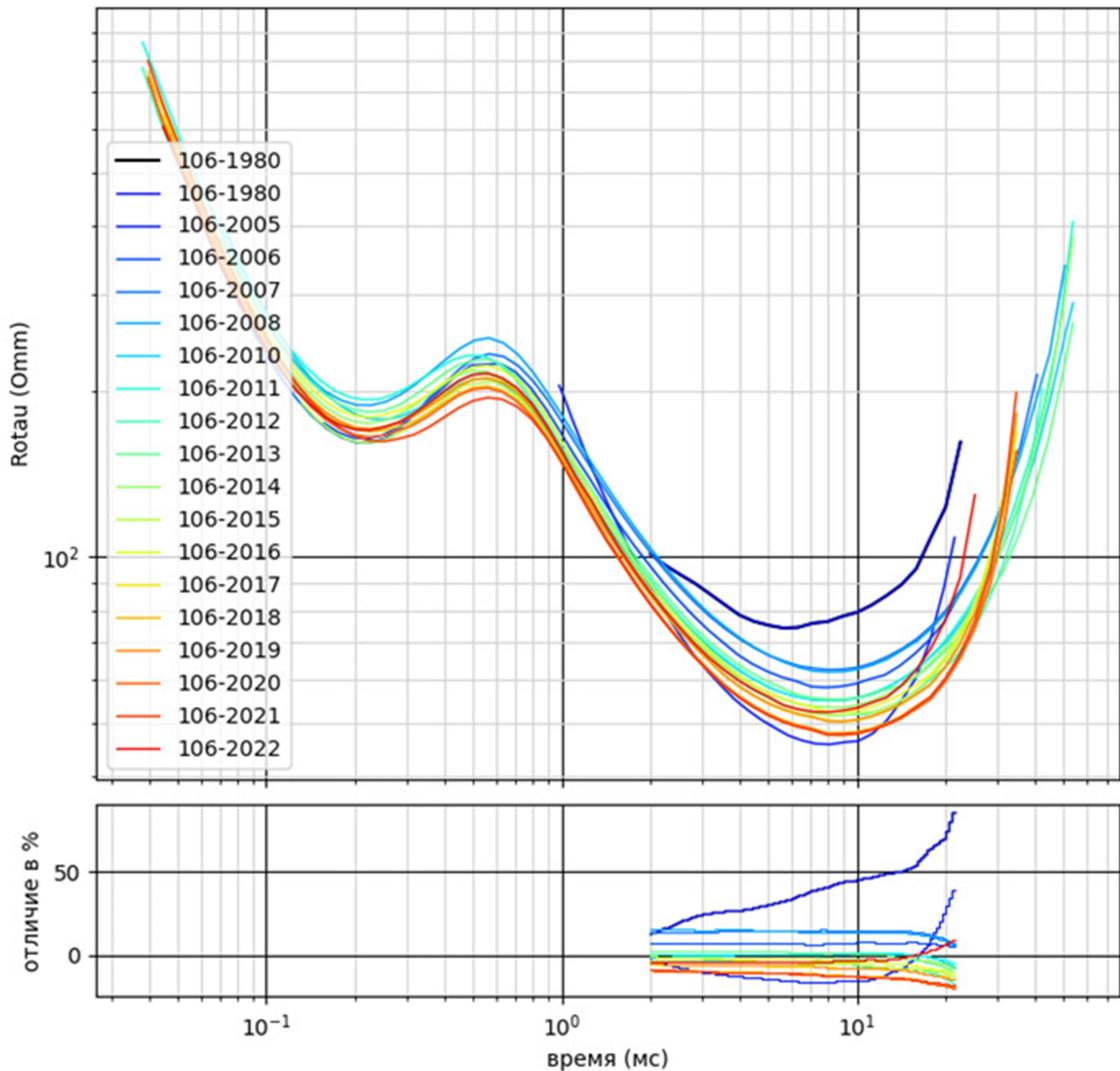


Рисунок 3.104 – Кривые кажущегося удельного сопротивления для ЗС 106 за весь временной интервал измерений

Наблюдаемые вариации значений ρ_{τ} маркирующего проводящего горизонта за временной период наблюдений (2006 – 2022 г.г.) отражают афтершоковые процессы, не позволяющие параметру ρ_{τ} выйти на уровень значений до сейсмического события 2003 г.

3.3.2 Учет анизотропных свойств геологической среды

В центральной части Чуйской впадины на участке Мухор-Тархата в 2022 г. были выполнены ежегодные измерения методом зондирования становлением электромагнитного поля с использованием гальванических и индукционных установок. Применение гальванических установок позволяет определять значения коэффициента электрической анизотропии. Цель исследования 2022 г. – получение вариаций электрофизических параметров горных пород (УЭС, коэффициент электрической анизотропии) по данным регулярных измерений методом ЗС на территории Чуйской впадины для их анализа за 2007-2022 гг. и оценке влияния происходящих сейсмических событий. На рисунок 3.105 приведена схема размещения пунктов ЗС на участке исследования, измерения повторяются ежегодно с 2007 года.

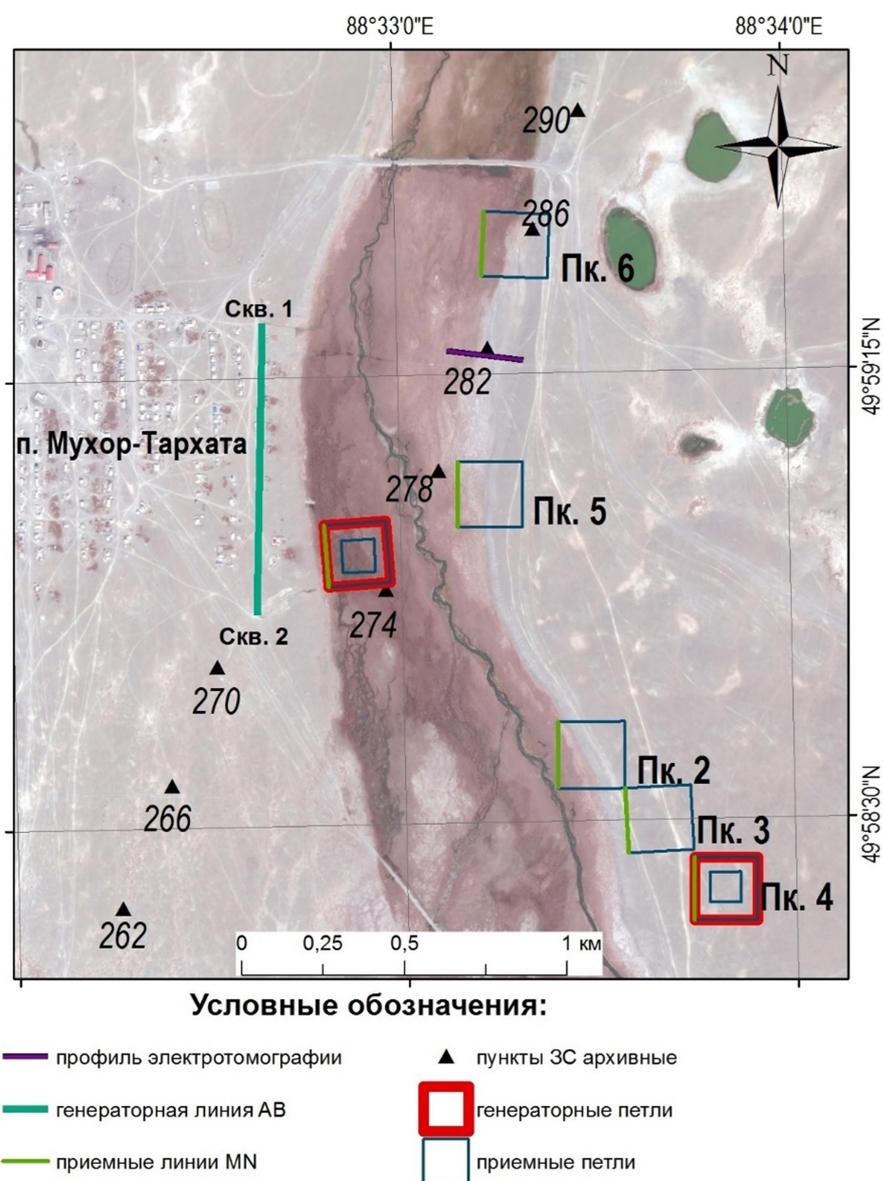


Рисунок 3.105 – Схема размещения пунктов ЗС в районе села Мухор-Тархата в 2022 г.

Полевые работы

Для реализации полевых работ тремя модификациями метода ЗС с гальваническими и индуктивными установками предложена методика измерений. В качестве генераторной конструкции использована заземленная линия АВ длиной 910 м., заземляющими электродами служили обсадные колонны самоизливающихся скважин (скв. 1, 2). Комплексные измерения выполнялись с использованием следующих установок: а) установка АВ – q (q – приемный одновитковый контур квадратной формы со стороной 200 м); б) установка АВ-MN (MN – заземленная электрическая линия длиной 200 м).

На рисунках 3.106 и 3.107 приведены полевые кривые ЭДС 2022 года установки АВ-q и АВ-MN, которые характеризуют геоэлектрическую модель в каждом пункте ЗС.

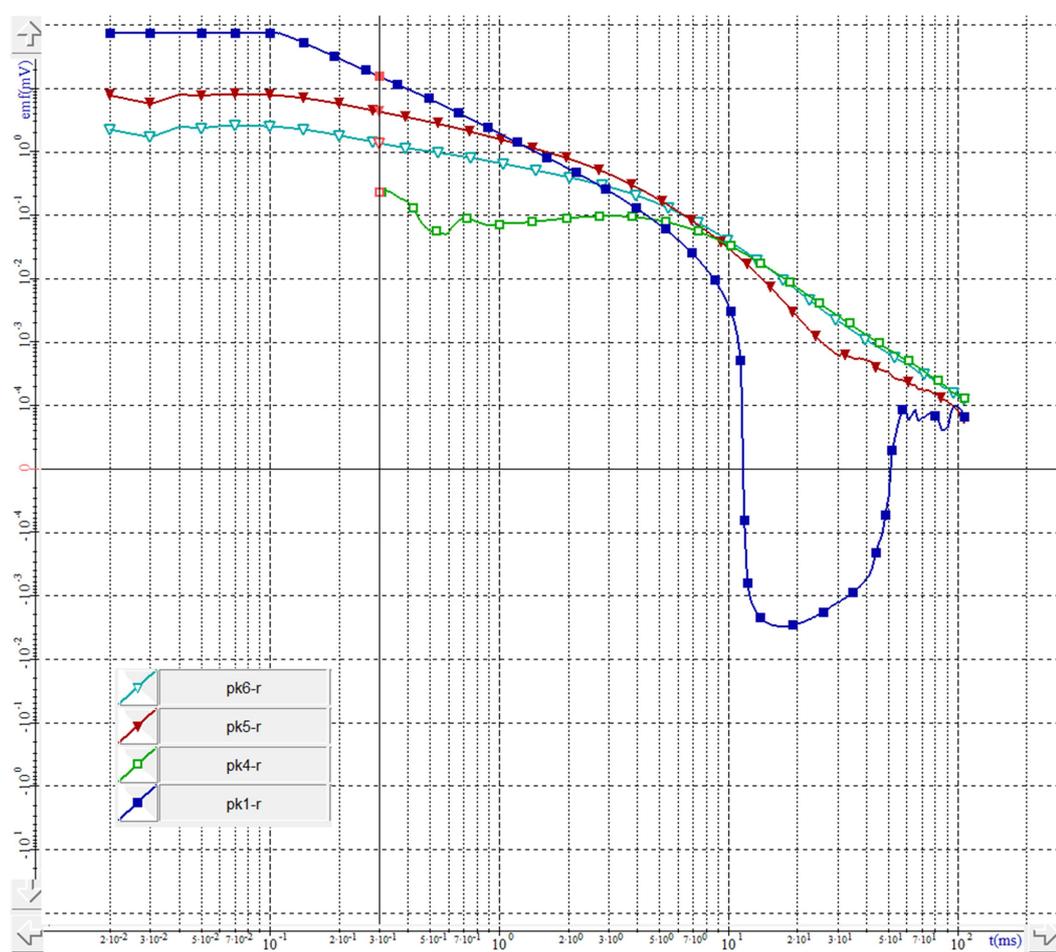


Рисунок 3.106 – Полевые кривые ЭДС 2022 г., установка АВ-q

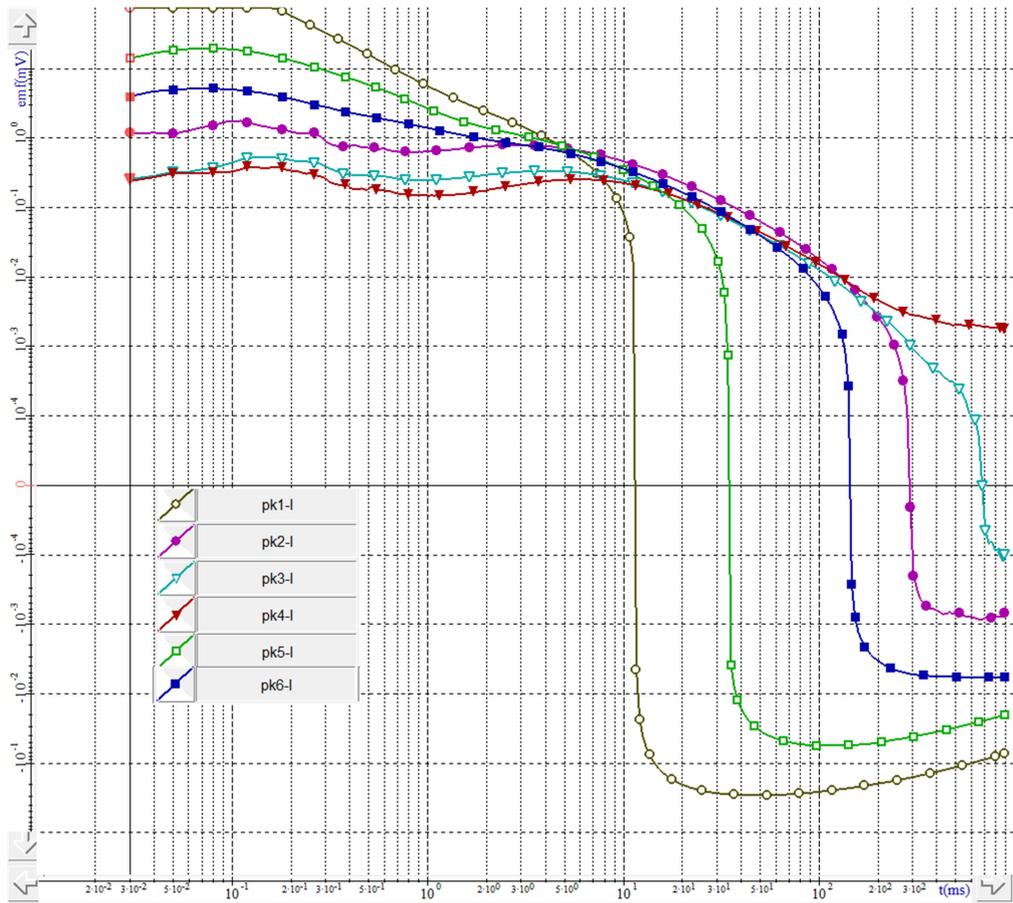


Рисунок 3.107 – Полевые кривые ЭДС 2022 г., установка АВ-МН

Выполнена предварительная обработка и интерпретация данных ЗС. На рисунке 3.108 представлен пример интерпретации данных ЗС 1 с соосной установкой, а на рисунках 3.109 и 3.110 результат интерпретации ЗС 1 и 4 с установкой АВ-МН.

Вариации УЭС за период измерений с 2007 по 2022

Регулярные наблюдения за вариациями УЭС с установкой «соосные петли» осуществляются в двух пунктах ЗС 1 и 4. Из сопоставления временных рядов продольной проводимости 2-го проводящего слоя разреза с характеристиками сейсмичности получено, что в периоды сейсмических активизаций 2008-2009 гг. и 2012-2013 гг. наблюдалась прямая корреляция изменения продольной проводимости с показателями сейсмической активности.

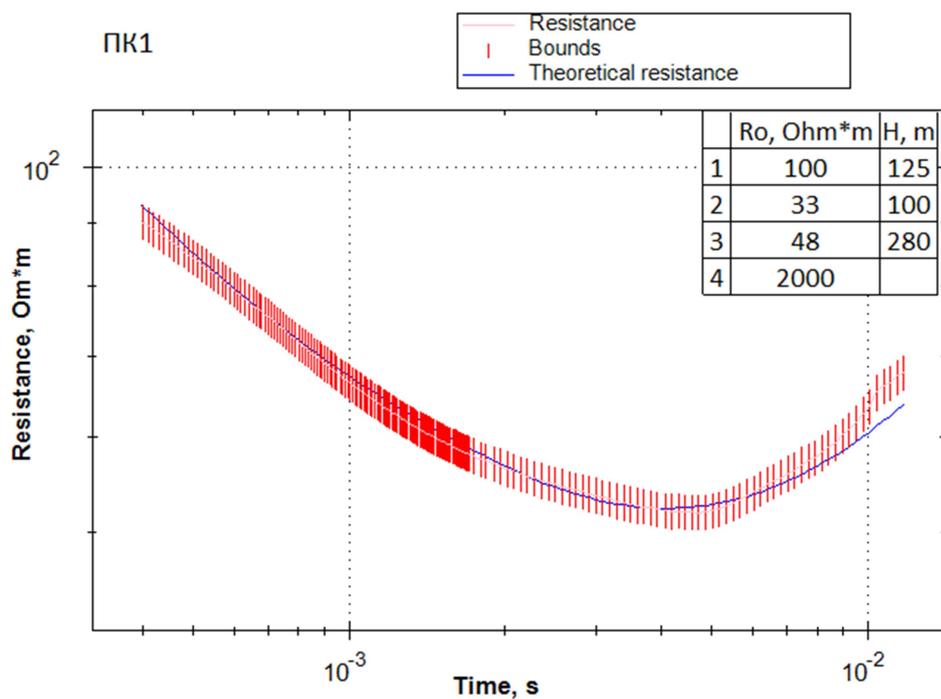


Рисунок 3.108 – Пример интерпретации данных ЗС1 с соосной установкой

В результате интерпретация данных ЗС с установкой АВ-МН в шести пунктах (ЗС 1, 2, 3, 4, 5, 6) определены значения коэффициента электрической анизотропии для каждого слоя геоэлектрической модели (рисунок 3.102, 3.103). По результатам интерпретации данных 2022 г. максимальные значения коэффициента электрической анизотропии λ приурочены к ранее выделенной активной области (пункты ЗС 1, 2, 5, 6), приуроченной к зоне разлома. В 2022 г. значения коэффициента электрической анизотропии в выявленной области в среднем сопоставимы со значениями 2020-2021 гг.

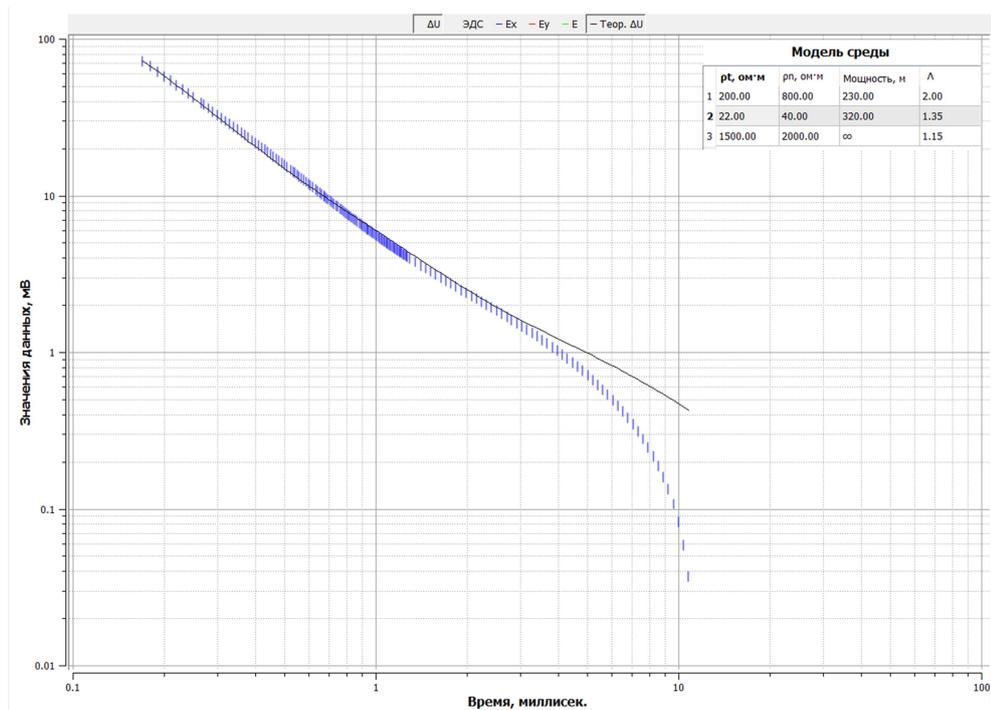


Рисунок 3.109 – Пример интерпретации данных ЗС1 с установкой АВ-МН

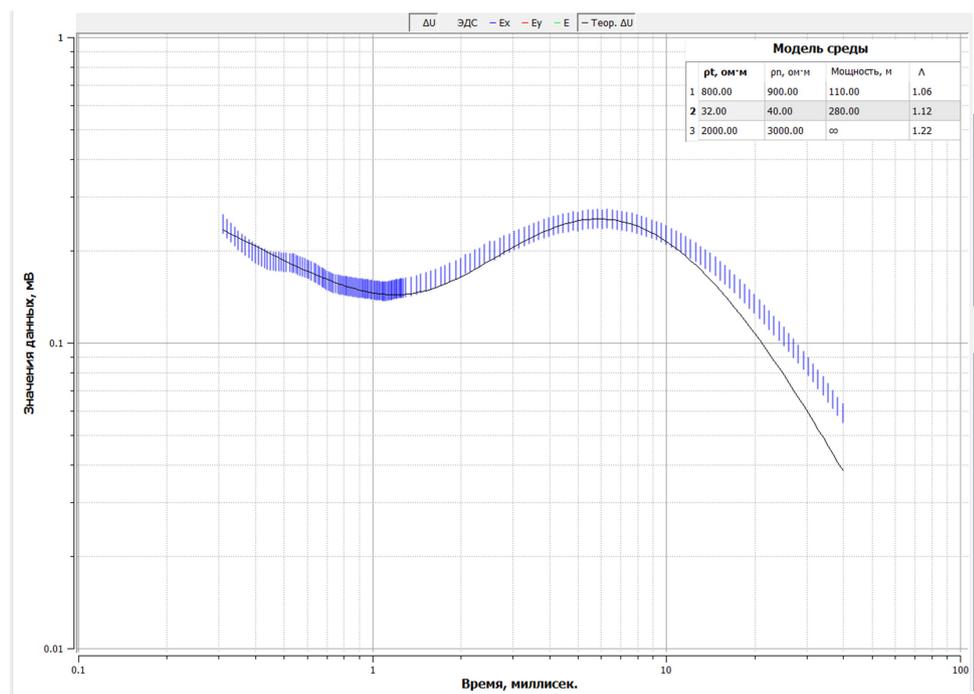


Рисунок 3.110 – Пример интерпретации данных ЗС4 с установкой АВ-МН

Из сопоставления значений коэффициента анизотропии для выделенной области с показателями сейсмической активности (количество сейсмической энергии и число землетрясений) за период 2014-2020 гг. выявлена прямая корреляция (рисунок 3.111).

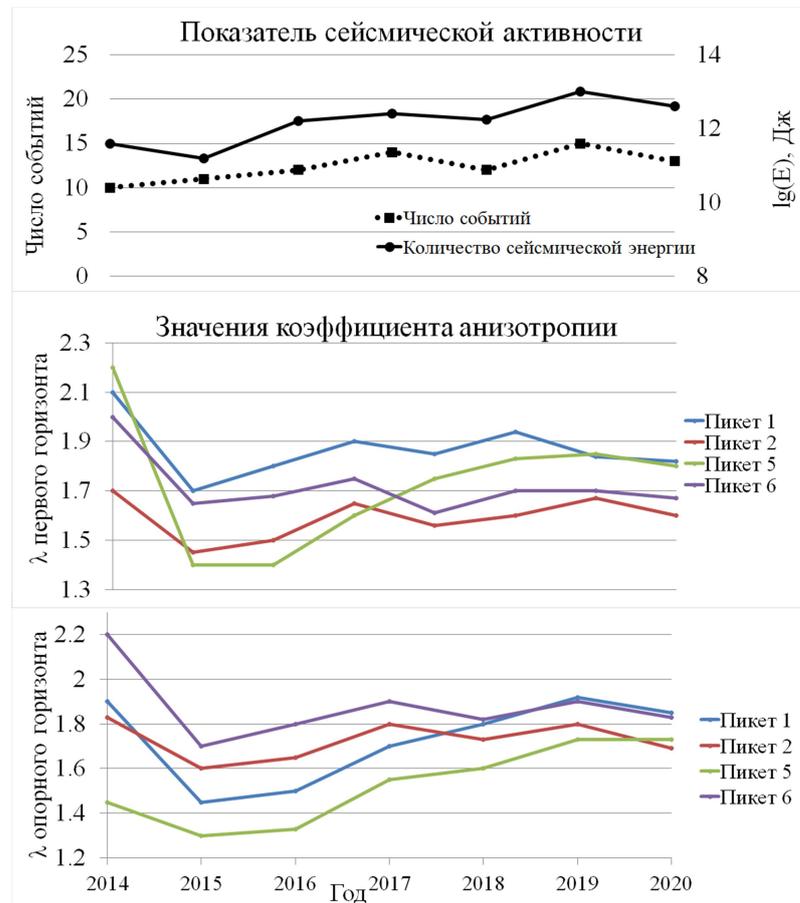


Рисунок 3.111 – Сопоставление значений коэффициента электрической анизотропии с показателями сейсмической активности

Кроме того, максимальные вариации коэффициента электрической анизотропии по данным ЗС 1, 2, 5 и 6, пункты которых расположены в зоне влияния разлома, подтверждают его активность. Следовательно, мониторинг электрофизических параметров в зоне влияния разлома с использованием коэффициента электрической анизотропии позволяет следить за степенью его активности.

Из анализа данных электромагнитного мониторинга и геологических, сейсмологических данных за 2014-2022 гг. на участке Мухор-Тархата, следует, что временные изменения (вариации) анизотропии λ на участке исследования в этот период указывают на продолжающийся афтершоковый процесс Чуйского землетрясения 2003 г. Установлено, что вариации коэффициента электрической анизотропии выше, чем вариации УЭС. Кроме того, значимые вариации λ наблюдаются для первого и третьего горизонтов, в то время как максимальные вариации УЭС получены для второго горизонта, т.е. наблюдается не только разная чувствительность параметров к сейсмическому воздействию, но и каждый из них характеризует свой интервал разреза.

3.3.3 Получены геоэлектрические характеристики разреза методами ВЭЗ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения.

С целью изучения геодинамических процессов, связанных с разрушительным землетрясением 2003 года, в полевом сезоне 2022 года были проведены измерения методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) в районе западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир») [38].

На рисунке 3.112 приведена схема размещения пунктов ВЭЗ. В 2022 году были выполнены регулярные пункты ВЭЗ: профиль по правому берегу р. Чаган (ВЭЗ №9-12), круговой ВЭЗ на левом берегу в зоне видимых сейсмических нарушений (ВЭЗ №13-16), крестовый ВЭЗ №17-18, ВЭЗ №29, а также крестовый ВЭЗ №19-20 в зоне отсутствия нарушений.

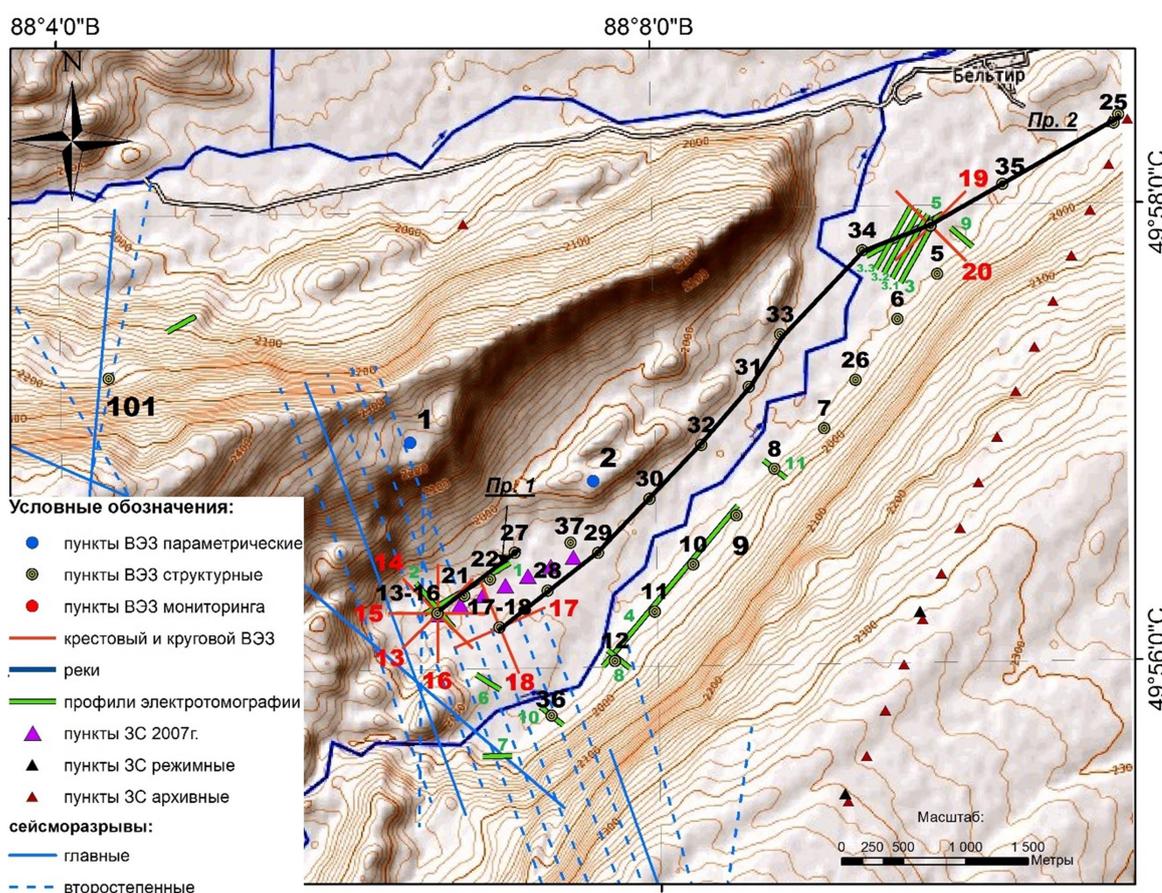


Рисунок 3.112 – Схема размещения пунктов ВЭЗ и профилей ЭТ в районе села Бельтир

Аппаратура и методика измерений

Измерения методом ВЭЗ проводились симметричной градиентной четырехэлектродной установкой Шлюмберже (MN«AB»). Схема установки представлена на рисунке 3.113. Размеры питающей линии АВ/2 находятся в интервале значений 1.5 - 480 м.

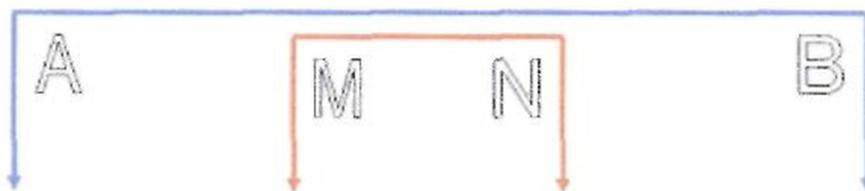


Рисунок 3.113 – Схема установки Шлюмберже

Для проведения измерений методом ВЭЗ использовался электроразведочный генератор Астра-100 (рисунок 3.114) и измеритель SGD-EET «MEDUSA» (рисунок 3.115)



Рисунок 3.114 – Электроразведочный генератор Астра-100

Генератор предназначен для формирования прямоугольных разнополярных импульсов (без паузы) в питающей линии (АБ) с частотой от 0.063 до 2500 Гц и силой тока от 1 до 1000 мА. Максимальная выходная мощность генератора в 100 Вт способна обеспечить глубинность исследований в диапазоне от первых метров до первых сотен метров. Отличительная особенность генератора – возможность программирования режима работы: 7 программ до 16 шагов в каждой.

Благодаря небольшому весу (около 4 кг вместе со стандартным 12 В аккумулятором емкостью 7 А*ч), компактным размерам и удобной сумке для переноски АСТРА-100 хорошо подходит для профилирования, зондирования (ВЭЗ) и других методик, предполагающих частые перемещения питающей линии.

Генератор применяется при геофизических исследованиях методами:

- Сопротивлений (КС)
- Вызванной поляризации (ВП)

- Частотного зондирования (ЧЗ)
- Импедансного частотного зондирования (ИЧЗ или CSMT)
- Зондирования становлением поля (ЗС)

Таблица 3.17 – Технические характеристики генератора Астра-100

Максимальная выходная мощность	100 Вт
Максимальное выходное напряжение	400 В
Форма выходного тока	РПИ-1 («меандр», прямоугольные разнополярные импульсы без паузы)
Рабочие частоты (всего 46 частот):	
Первый ряд частот	0.076, 0.153, 0.305, 0.610, 1.22, 2.44, 4.88, 9.77, 19.5, 39.1, 78.1, 156, 313, 625, 1250, 2500 Гц
Второй ряд частот	0.063, 0.125, 0.250, 0.500, 1.00, 2.00, 4.00, 8.00, 16.0, 32.0, 64.0, 128, 256, 512, 1024, 2048 Гц
Третий ряд частот	0.083, 0.167, 0.333, 0.667, 1.33, 2.67, 5.33, 10.7, 21.3, 42.7, 85.3, 171 341, 683 Гц
КПД	до 80 %
Погрешность заводской подгонки выходных токов	не более 0.1 % (при комнатной температуре и нагрузке 50% от максимальной)
Нестабильность выходных токов	не более 0.05 % (при изменении напряжения питания от 10.5В до 14.5В)
Нестабильность выходных токов при изменении нагрузки от 2% до 99% от максимальной	не более, для токов: 141 мА – 1000 мА: 0.05% 14.1 мА – 100 мА: 0.1% 1 мА – 10 мА: 0.5%
Дрейф выходных токов в диапазоне рабочих температур относительно значений при +20°C	не более ±0.5 %
Относительная погрешность формирования частот	не более $5 \cdot 10^{-6}$ (включая дрейф в диапазоне рабочих температур и старение за первый год эксплуатации)
Длительность фронта на активной нагрузке 1 кОм	не более 2 мкс
Диапазон рабочих температур	- 20 ÷ + 50 °С, без конденсации
Напряжение питания	12.6 В (минимум 10.5, максимум 14.8)
Вес	~ 2 кг (без аккумулятора)
Габариты	200 x 173 x 113 мм
Корпус герметичный	стандарт IP-65



Рисунок 3.115 – Измеритель SGD-EET «MEDUSA»

Назначение

- измерение значений электрического потенциала для медленно меняющихся сигналов
- измерение в частотной области амплитудных и фазовых характеристик периодических сигналов
- измерение во временной области переходных характеристик периодических сигналов

Область применения

Геофизические исследования методами постоянных и переменных токов: ВЭЗ, ЕП, ЧЗ, ВП во временной и в частотной областях, блуждающие токи, электротомография [39].

Особенности:

- Два измерительных канала
- Широкий частотный диапазон измерений

Измеритель MEDUSA-B2 предназначен для измерения и сохранения в энергонезависимой памяти значений разности потенциалов на приёмном диполе (MN) и тока в питающем диполе (AB) при производстве электроразведочных работ методами постоянного и переменного тока.

Таблица 3.18 – Технические характеристики измеритель SGD-EET «MEDUSA»

Количество гальванически развязанных измерительных каналов (MN)	2
Рабочие частоты измерений (частотная область), Гц	0 (постоянный ток), 0.019, 0.038, 0.076, 0.152, 0.305, 0.61, 1.22, 2.44, 4.88, 9.76, 19.5, 39.0, 78.1, 156.25, 312.5 и 625.0
Длительность импульса тока (время спада) во временной области, с	0.5, 1, 2, 4, 8, 16
Уровень собственных шумов канала MN ($K_u = 8$, $F_\Delta = 0,1 \dots 10$ Гц), мкВ	< 1
Значение единицы младшего разряда измерения, мкВ	1
Максимальное напряжение измеряемого входного сигнала, В	± 5
Коэффициенты усиления предварительного усилителя	1, 8
Входное сопротивление измерительного канала по постоянному току, МОм	≥ 60
Относительная погрешность измерения в диапазоне от 0.5...10 мВ, %	< 1
Относительная погрешность измерения в диапазоне 10 мВ...5 В, %	< 0.1
Количество разрядов АЦП	24
Максимальное количество сохраненных записей в ЗУ	16384
Встроенные часы и календарь	да
Напряжение питания/заряда от внешнего источника постоянного тока, В	4.5...15

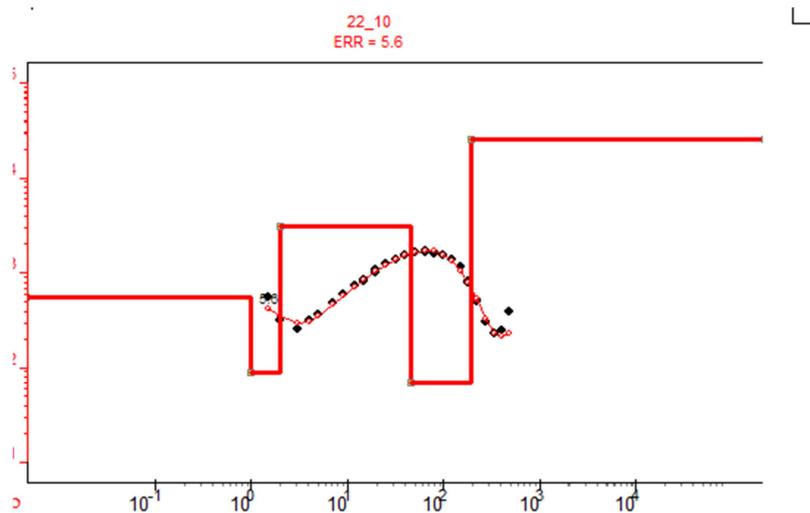
Таблица 3.18 – (Продолжение) Технические характеристики измеритель SGD-ЕЕТ «MEDUSA»

Время заряда встроенного аккумулятора, ч	< 2.5
Потребляемая мощность при работе с одним измерительным каналом, Вт	3.5
Номинальная ёмкость встроенного аккумулятора, Втч	51
Степень защиты по ГОСТ14254-96 (МЭК 529-89 CEI 70-1 EN 60529)	IP66
Диапазон рабочих температур, °С	-40...+70
Габаритные размеры, мм	208×110×70
Масса, кг	< 1.4

Результаты по данным ВЭЗ

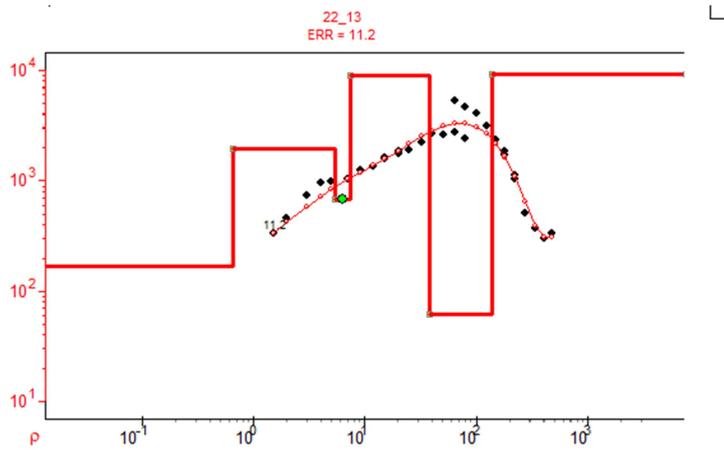
Для полигона «Бельтир» получена пятислойная модель: в самой верхней части присутствуют два маломощных низкоомных слоя, далее мощный слой аномально высокоомных отложений (более 5000 Ом·м), прослеживаемый практически на всех кривых ВЭЗ участка, эти породы в соответствии с априорной информацией отнесены к многолетнемерзлым. На опорном геоэлектрическом горизонте залегает мощный слой низкоомных пород, скорее всего более тонкослоистых и обводненных.

На рисунках 3.116-3.118 приведены характерные полевые кривые ВЭЗ за 2022 год и геоэлектрические модели, полученные по результатам решения обратной задачи в комплексе ZondIP.



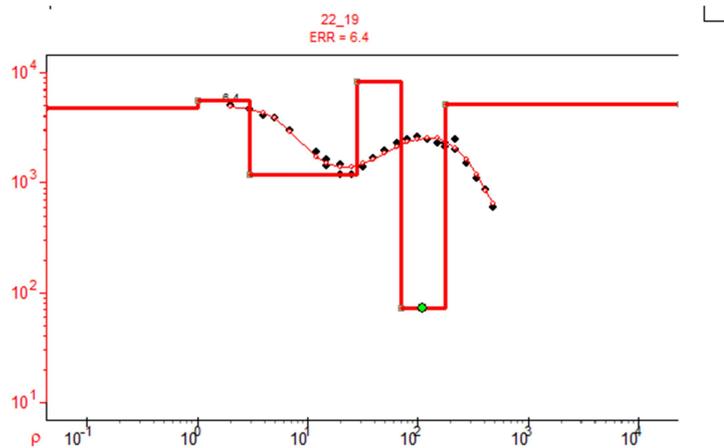
N	ρ	h	z
1	541.40	1	0/0
2	86.99	1	1
3	3061.83	44	2
4	69.36	150	46
5	25227.21		196

Рисунок 3.116 – Кривая ВЭЗ номер 10



N	ρ	h	z
1	170.13	0.65	0/0
2	1966.56	4.75	0.65
3	678.85	2	5.40
4	9030.48	30	7.40
5	60.96	100	37.40
6	9226.46		137.40

Рисунок 3.117 – Кривая ВЭЗ номер 13



N	ρ	h	z
1	4833.32	1	0/0
2	5623.39	2	1
3	1174.26	25	3
4	8268.96	42.60	28
5	73.09	107.40	70.60
6	5152.78		178

Рисунок 3.118 – Кривая ВЭЗ номер 19

Электрическая анизотропия разреза была оценена на основе решения обратной задачи. Были рассчитаны коэффициенты электрической анизотропии (λ) за все годы наблюдений после сильного сейсмического события для крестовых ВЭЗ как отношения суммарных продольных проводимостей вдоль и поперек выбранного направления.

Таблица 3.19 – Коэффициенты анизотропии для кругового ВЭЗ 13-16 в зоне трещин

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
λ_{13-14}	4.87	1.19	0.79	0.74	0.78	0.86	0.67	0.60	0.80	0.67
λ_{15-16}	2.04	1.05	0.90	0.94	1.06	0.90	0.81	0.96	0.86	1.00
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
λ_{13-14}	0.62	0.66	0.74	0.91	0.84	0.77	0.84	0,86	0.79	
λ_{15-16}	0.75	0.63	0.70	0.71	0.9	0.83	0.96	1,1	1.03	

В таблице 3.19 приведены значения λ за все годы измерений. Анализ данных таблицы 3.19 свидетельствует о том, что в районе пункта ВЭЗ 13-16, расположенного в зоне развития трещин, со временем происходит уменьшение коэффициента электрической анизотропии. На рисунке 3.119 представлены графики значений λ и сейсмичности в районе работ.

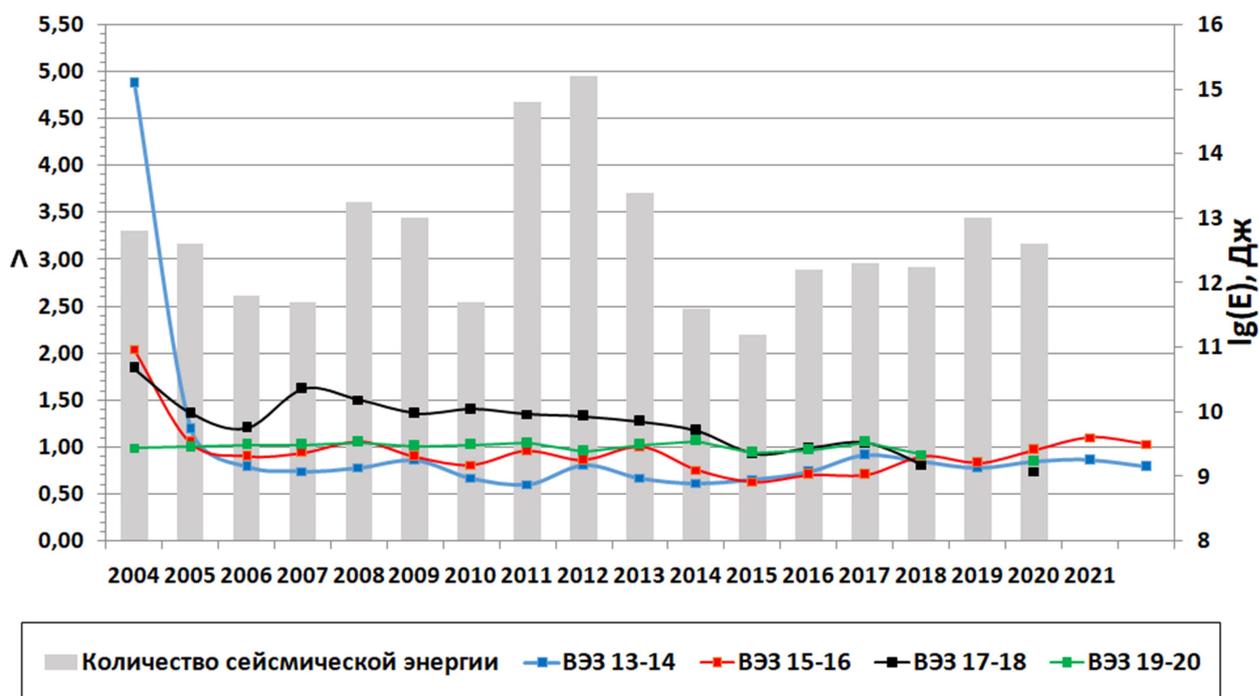


Рисунок 3.119 – Графики значений λ за все годы измерений

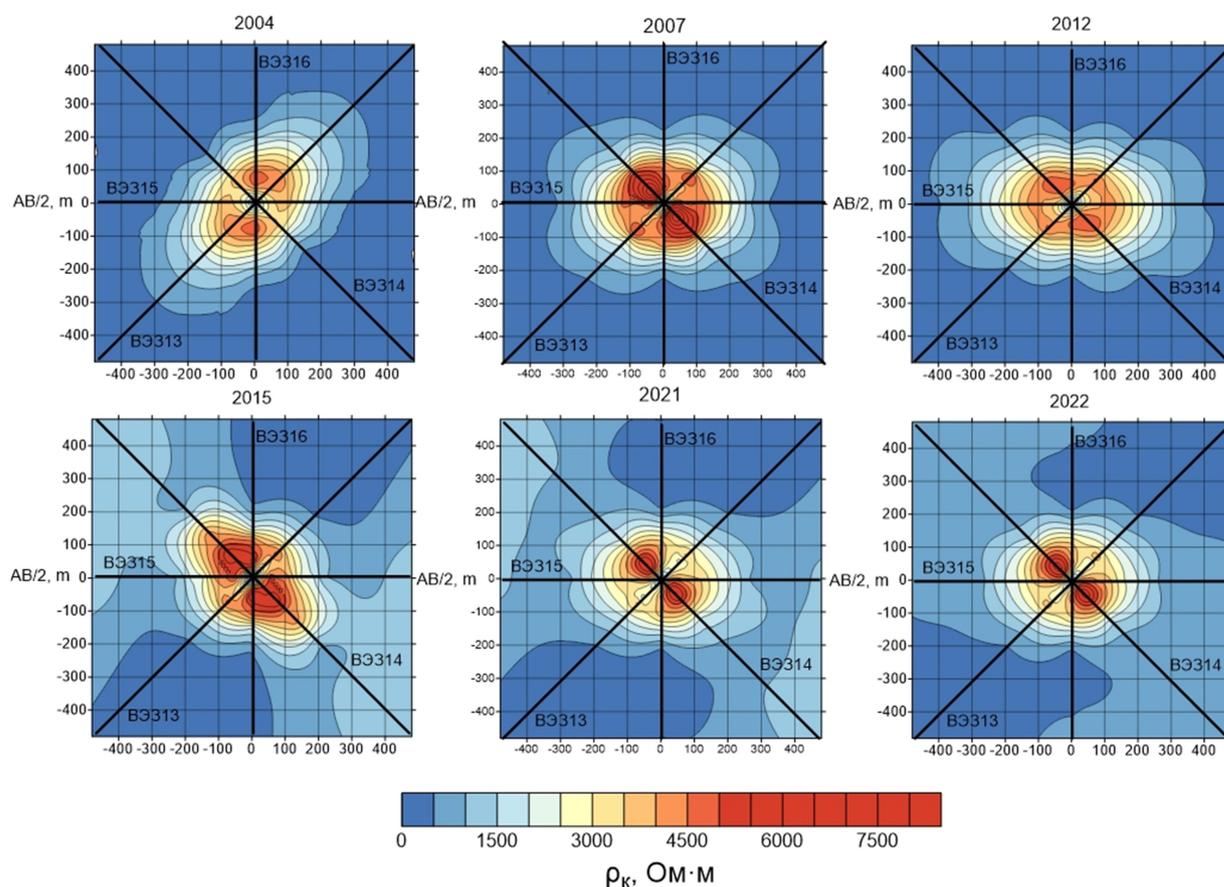


Рисунок 3.120 – Контурные диаграммы для кругового ВЭЗ в зоне видимых трещин

По данным многолетних измерений методом ВЭЗ построены контурные диаграммы распределения ρ_k для кругового ВЭЗ №13-16. На рисунке 3.120 приведены диаграммы за 2004, 2007, 2012, 2015, 2021 и 2022 года.

Для однородного изотропного полупространства изолинии ρ_k по форме соответствуют окружностям, для реальной геологической среды эта форма может нарушаться из-за анизотропии электрических свойств.

Анализ диаграмм ρ_k , полученных в области сейсмогенных трещин показал, что в первые годы измерений наибольшие значения кажущееся сопротивления определены для ВЭЗ № 13 (установка ориентирована поперек направления распространения трещин). Наименьшие значения сопротивления соответствуют ВЭЗ № 14, азимут установки которого располагался вдоль простирания трещин. Изолинии ρ_k образуют эллипс, и его оси меняют свое положение с течением времени, кроме того, изменяется величина отношения этих осей, т.е. анизотропные свойства среды. Анизотропия массива уменьшилась, что свидетельствует о процессах консолидации массива горных пород в области трещин, приповерхностные трещины залечились, и среда стала более однородной.

3.3.4 Проведены измерения методом зондирования становлением поля (ЗС), в расширенном частотно-временном диапазоне, западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир»). Детально изучен геоэлектрический разрез зоны землетрясения 2003 года

Полевые работы

В 2022 году на геодинамическом полигоне «Бельтир» проведены измерения в семи пунктах (7 ф.н.) квадратными совмещенными центральными петлями (Q-q). Размеры генераторной петли составляют 200x200 м. Размеры приемной петли: 100x100 м. Ток в генераторном контуре достигает 20 - 21 А.

На рисунке 3.121 показано карта фактического материала работ зондированием становлением поля (ЗС) на геодинамическом полигоне «Бельтир» за 2008, 2020 и 2022 годов. Общее количество физических наблюдений за весь период составило 23 ф.н.

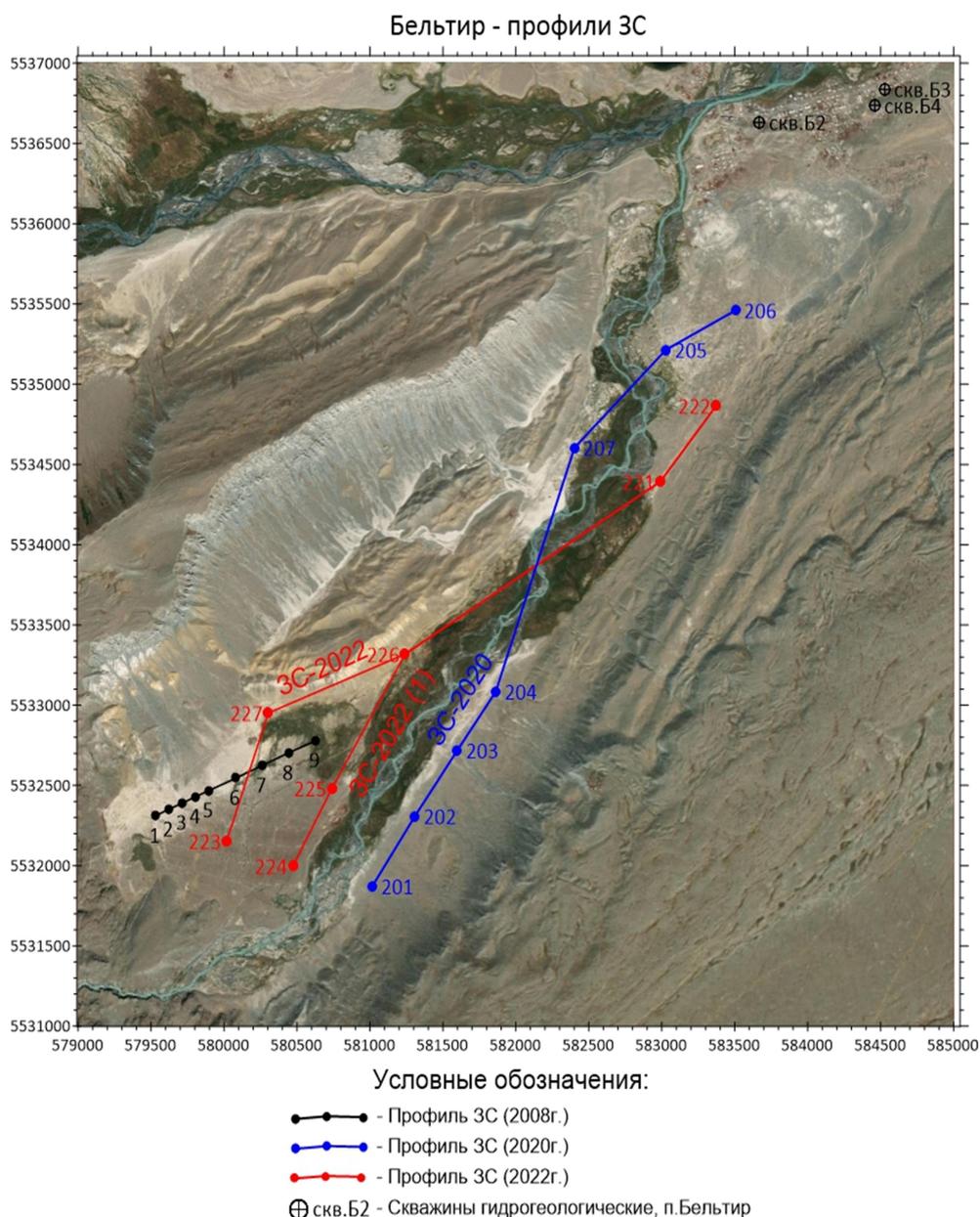


Рисунок 3.121 – Схема размещения пунктов ЗС в районе села Бельтир

Построение геоэлектрических разрезов

На рисунках 3.122-3.125 приводятся геоэлектрические разрезы по профилям зондирований, выполненных 2008, 2020, 2022 гг. На всех профилях выявлена тенденция погружения пород фундамента со значениями УЭС более 1000 Ом·м в северо-восточном направлении. Максимальная глубина до фундамента достигается на абсолютных высотных отметках в 1550 – 1600 м для пикетов пк 9, пк 206, пк 222. Выявлена тектоническая структура типа уступ по данным ЗС в пк 6, пк 202, пк 225, ось данной структуры наблюдается с простиранием Ю-В С-З.

Профиль ЗС-2022(1) проходит через центральную часть трехмерной модели. В юго-западном интервале профиля (пк 224, пк 225) в зоне видимых сейсмических нарушений отмечена локальная зона пониженных значений УЭС ($УЭС < 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) с глубиной погружения до абсолютной высотной отметки в 1650 метров. На фоне погружения кровли фундамента ($УЭС > 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$) в северо-восточном направлении отмечается еще одна тектоническая зона в виде уступа (пк 226).

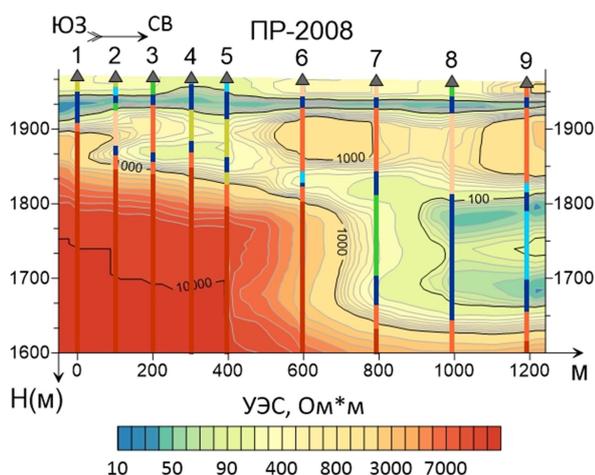


Рисунок 3.122 – Геоэлектрический разрез. Измерения 2008 г.

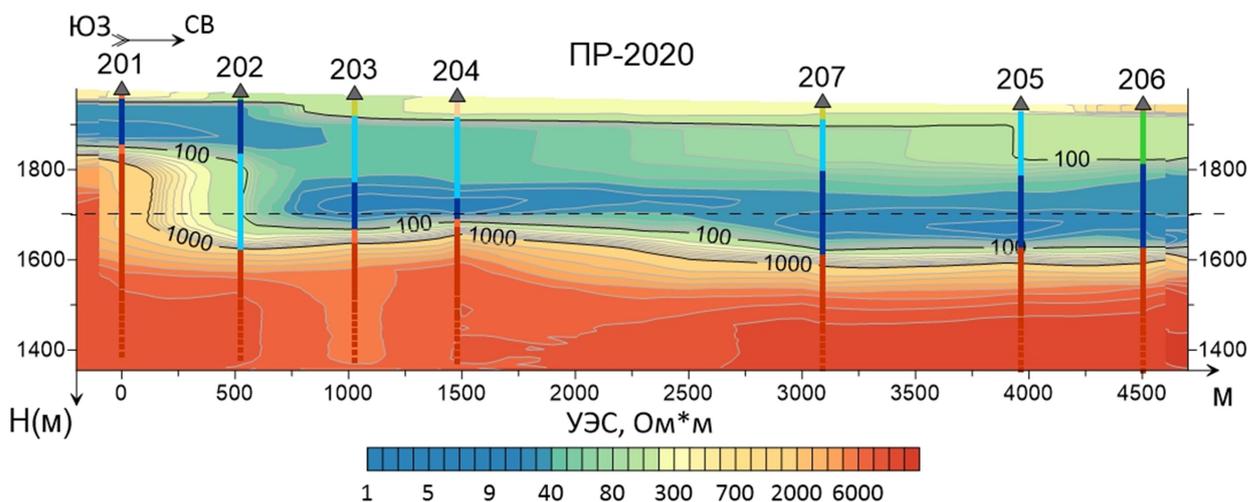


Рисунок 3.123 – Геоэлектрический разрез. Измерения 2020 г.

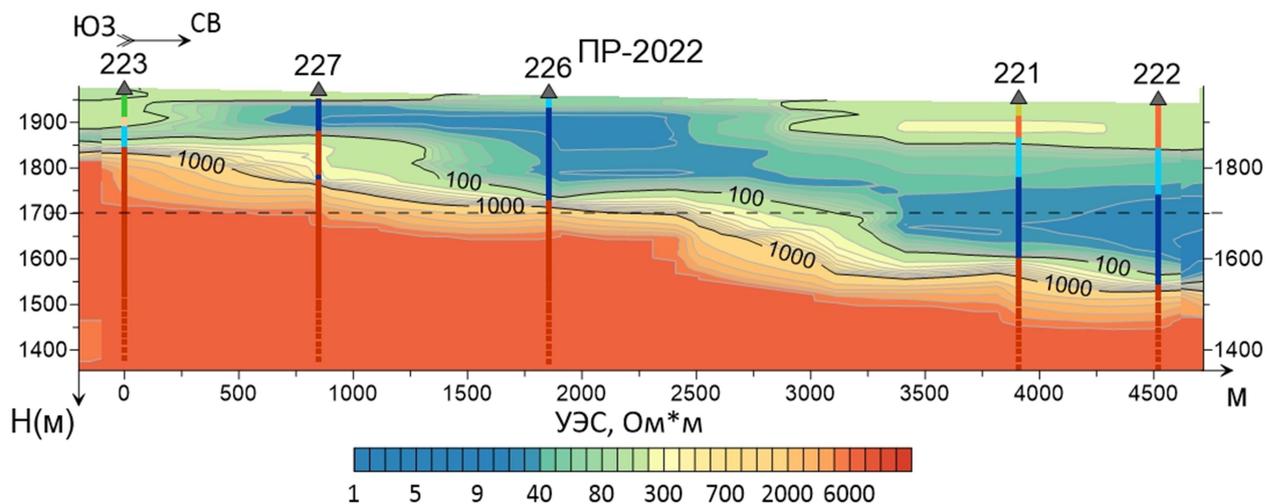


Рисунок 3.124 – Геоэлектрический разрез. Измерения 2022 г.

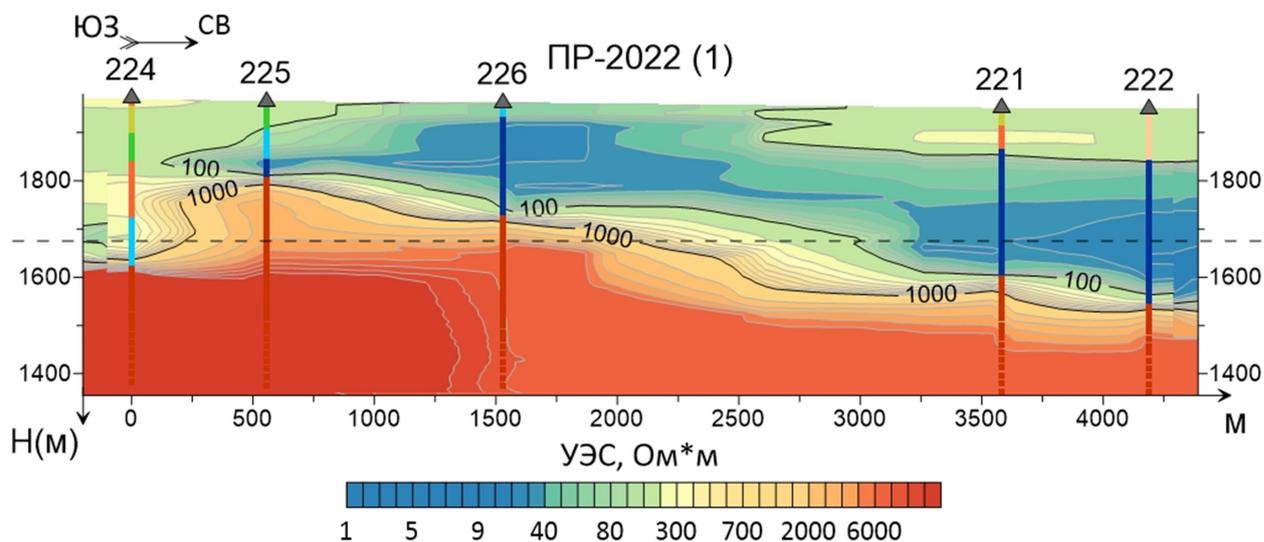


Рисунок 3.125 – Геоэлектрический разрез. Измерения 2022 г.

Трехмерная визуализация по данным ЗС

По итогам интерпретации данных ЗС за 2008, 2020 и 2022 гг. была построена трехмерная модель с использованием пакета Zond (рисунок 3.126).

Для того, чтобы детально оценить геоэлектрическую модель для зоны видимых сейсмических нарушений, построены вертикальные срезы по двум ортогональным осям относительно простирания долины р. Чаган.

Вариант №1.

Срез ортогональный оси Ю-В С-3 (пикеты 201, 202, 203, 204, 221, 222) и срез ортогональный оси Ю-З С-В (пикеты 5, 223, 224) (рисунок 3.127).

Вариант №2.

Срез ортогональный оси Ю-В С-3 (пикеты 224, 225, 226, 207, 225), и срез ортогональный оси Ю-З С-В (пикеты 5, 223, 224) (рисунок 3.128).

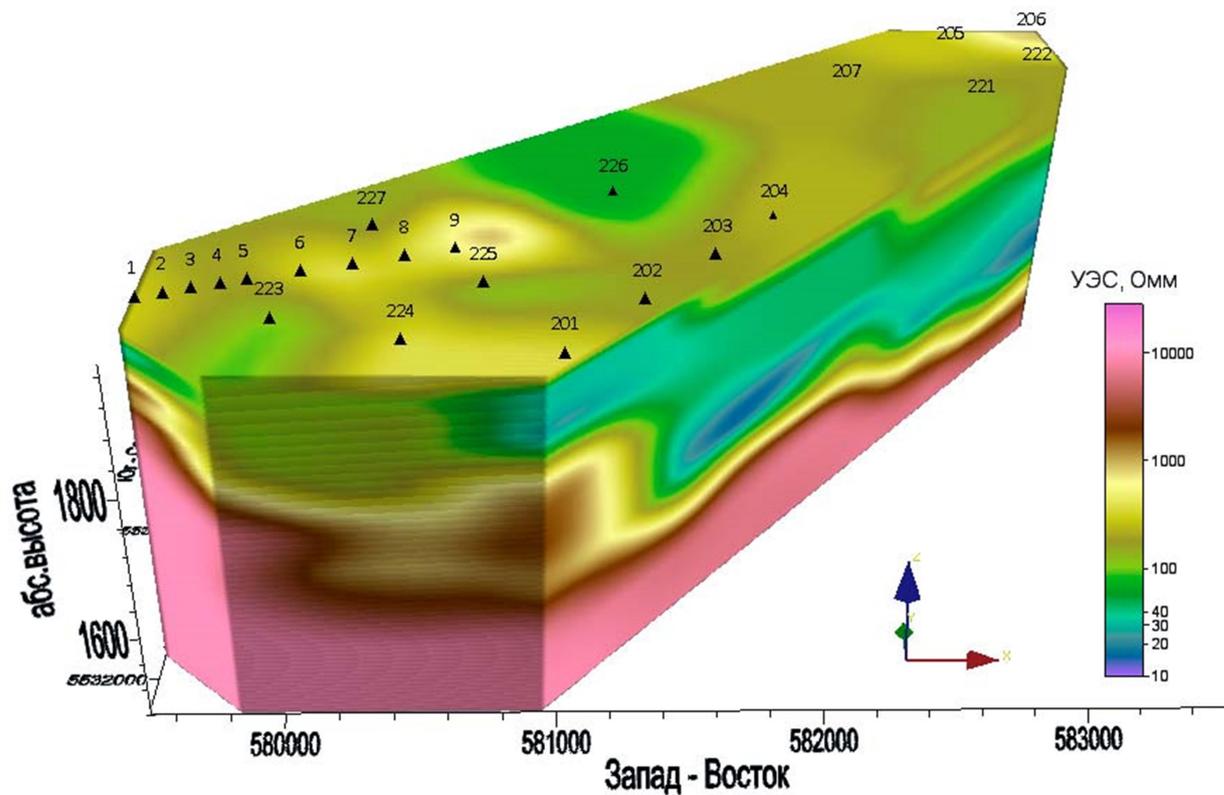


Рисунок 3.126 – Трехмерная геоэлектрическая модель по данным ЗС в долине р. Чаган

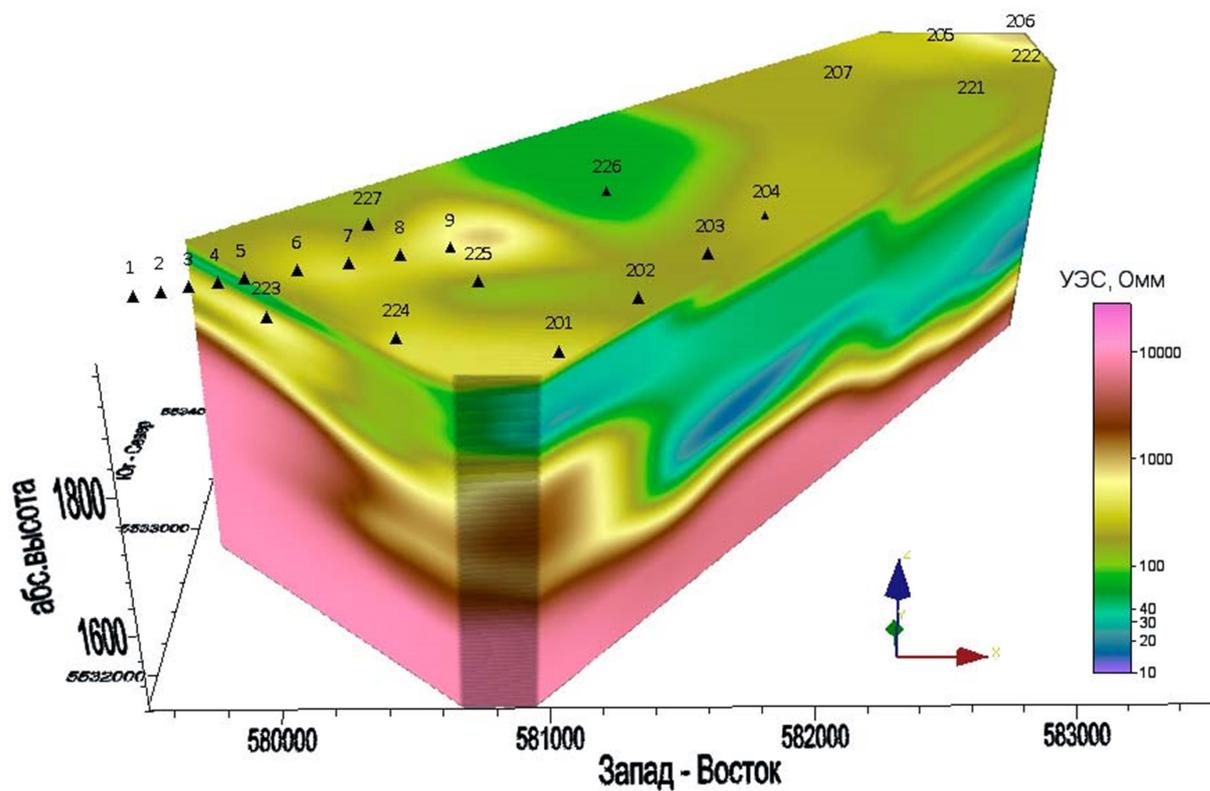


Рисунок 3.127 – Трехмерная геоэлектрическая модель по данным ЗС в долине р. Чаган.
Срезы вариант №1

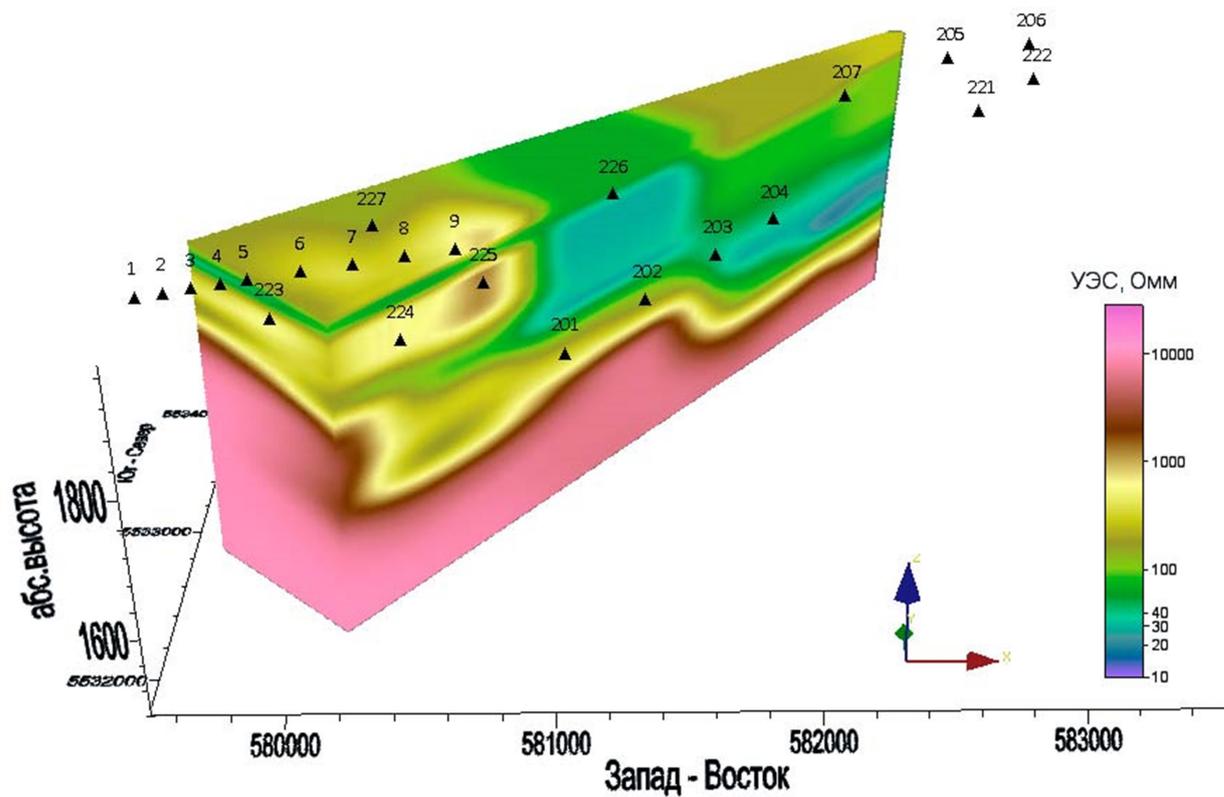


Рисунок 3.128 – Трехмерная геоэлектрическая модель по данным ЗС в долине р. Чаган.
Срезы вариант №2

Данные срезы 3D визуализации подтверждает наличие локальной низкоомной зоны на участке видимых тектонических нарушений, а также тектонические структуры типа уступ, выявленные на геоэлектрических разрезах.

3.3.5 Изучение геоэлектрических характеристик разреза по выделенному направлению (электроразведочные профили) в основных блоковых структурах Горловского прогиба с установлением характера глубинного распределения геоэлектрических неоднородностей

В районе угольных месторождений Новосибирской области методами наземной электроразведки с использованием зондирования становлением поля получены глубинные геоэлектрические характеристики осадочного заполнения впадины, юго-восточного и северо-западного разломного ограничений [40].

В настоящее время Колывань-Томская складчатая зона и сопряжённые с ней структуры такие, как Горловский прогиб относятся к недостаточно изученным районам Алтае-Саянской области. К Горловскому прогибу приурочены крупные угленосные месторождения России. В последнее время повысилась сейсмичность в восточной части Новосибирской области. Эпицентры землетрясений разных магнитуд, включая последние с магнитудами 4 и выше, сосредоточены севернее и восточнее г. Искитим в районах угледобывающих карьеров Горловского бассейна, в зонах пересечения активных разломов. В публикациях сейсмологов современную сейсмическую активизацию предположительно связывают с техногенными землетрясениями, обусловленными разработкой угольных месторождений [41].

Полевые работы

В 2022 году сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН продолжены работы по изучению геоэлектрического строения Горловского прогиба с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами.

Проведены измерения в девяти пунктах квадратными совмещенными центральными петлями (Q-q) на северо-западном участке профиля Пр 2.

Работы методом ЗСБ выполнены с использованием цифровой аппаратуры «Байкал» соосными установками (Q, q). В качестве генераторной конструкции (Q) использовалась незаземленная петля квадратной формы со стороной равной 200 м. Измерения выполнялись с помощью незаземленной квадратной петли (q) со стороной в 100 м. Синхронизация генератора и приемника осуществляется по каналу GPS сигнала. Процесс измерения включал запись не менее трех дублей переходного процесса на каждом уровне токов в генераторном контуре. Количество накоплений в каждом дубле составляло не менее 100. Погрешность регистрации переходного процесса в информативной области времен (0.01-200 мс) составила менее 5 %. При проведении опытных работ ток в генераторной петле был выбран на уровнях 3.5-4.0 А для измерения начальной стадии переходного процесса и на уровнях 25.0-30.0 А для поздней стадии переходного процесса.

Измерение формы и амплитуды токовых импульсов проводилась цифровым регистратором, погрешность амплитуды токовых импульсов не более 1 %. Минимальная амплитуда измеряемого сигнала составила 0.2 - 0.5 мкВ, что позволило достигнуть глубинности исследования в несколько сотен метров. Выполнено 9 зондирований по профилю №2, по направлению с юго-востока на северо-запад от центральной части впадины к западному борту.

В районе поселка Девкино выполнен детальный профиль с шагом между точками физических наблюдений 100 метров, объем работ составил тринадцать пунктов ф.н.

На рисунке 3.129 показано карта фактического материала работ зондированием становлением поля (ЗС) за 2020, 2021 и 2022 годов. Общее количество физических наблюдений составило 42 ф.н.

Профили на Гео N44-18

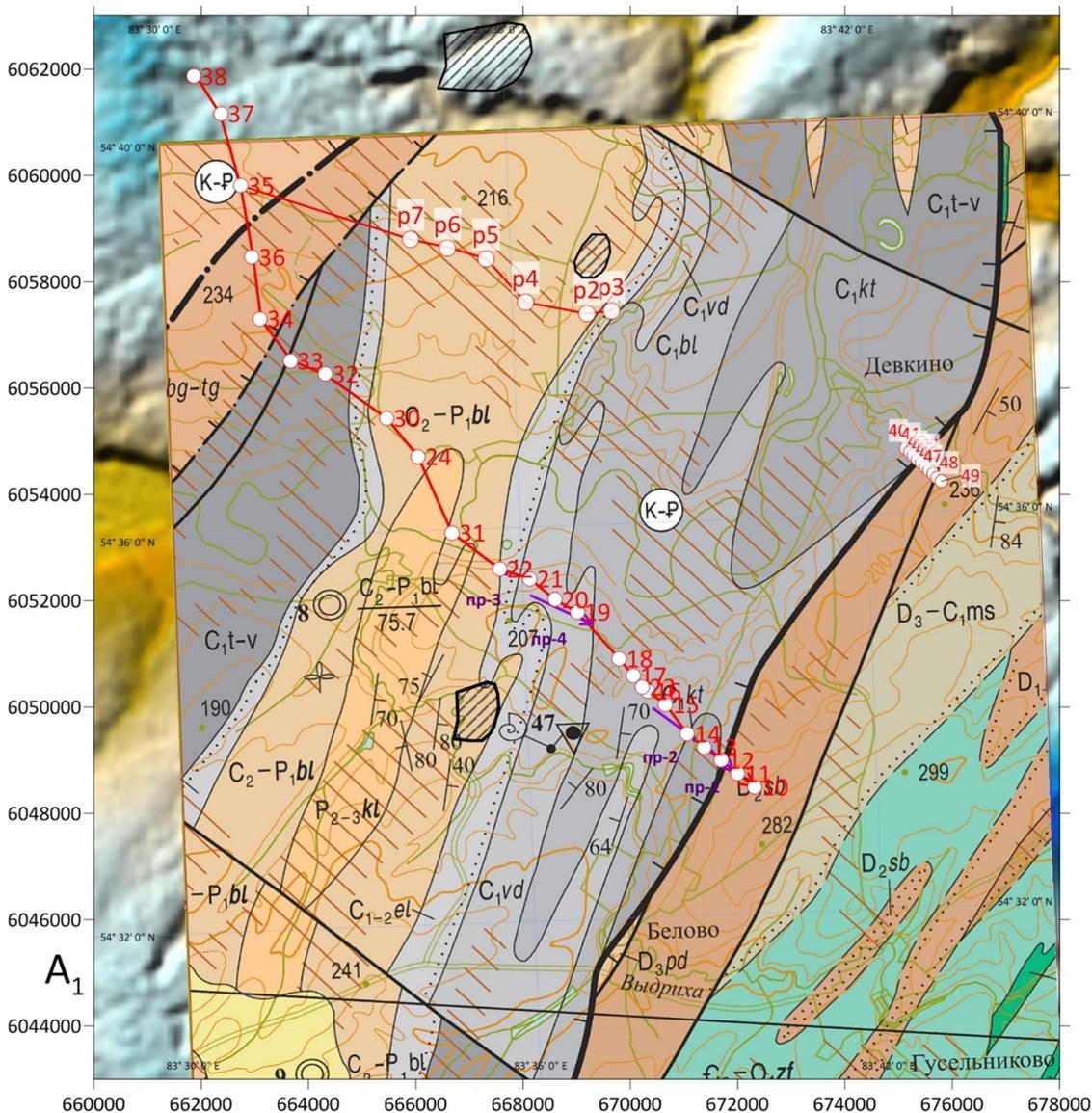


Рисунок 3.129 – Схема размещения пунктов ЗС, Горловский прогиб, работы 2020, 2021, 2022 годов

Геология участка работ

Горловский прогиб расположен между северо-западной окраиной Салаира и Колывань-Томской складчатой зоной, развитие которых оказало огромное влияние на его структуру. Со стороны последней, оформившейся в герцинский период, происходили активные тектонические движения, а Салаирский кряж, как жесткая к этому времени консолидированная глыба, являлся упором. Это, несомненно, сказалось на конфигурации прогиба, вытянутого по простиранию с небольшой шириной. Для него характерна высокая напряженность тектонических деформаций. Сопряжение Горловского прогиба с соседними региональными геологическими структурами происходит по крупным разломам. В геологическом строении района принимают участие отложения верхнего девона, карбона и перми, перекрытые мощной корой выветривания мел-палеогенового возраста, а также рыхлыми отложениями неогенового и четвертичного возраста. Горловский угольный бассейн характеризуется крупнейшими в России запасами антрацита. Максимальная угленосность в Горловском прогибе приурочена к отложениям нижней перми, которые специалистами-геологами сопоставляются с аналогичными породами Кузбасса [42].

Интерпретация

Обработка и интерпретация данных осуществлялась с помощью программного комплекса моделирования и инверсии EMS [43].

На рисунке 3.130 приведены результаты регистрации процессов становления поля по пикетам.

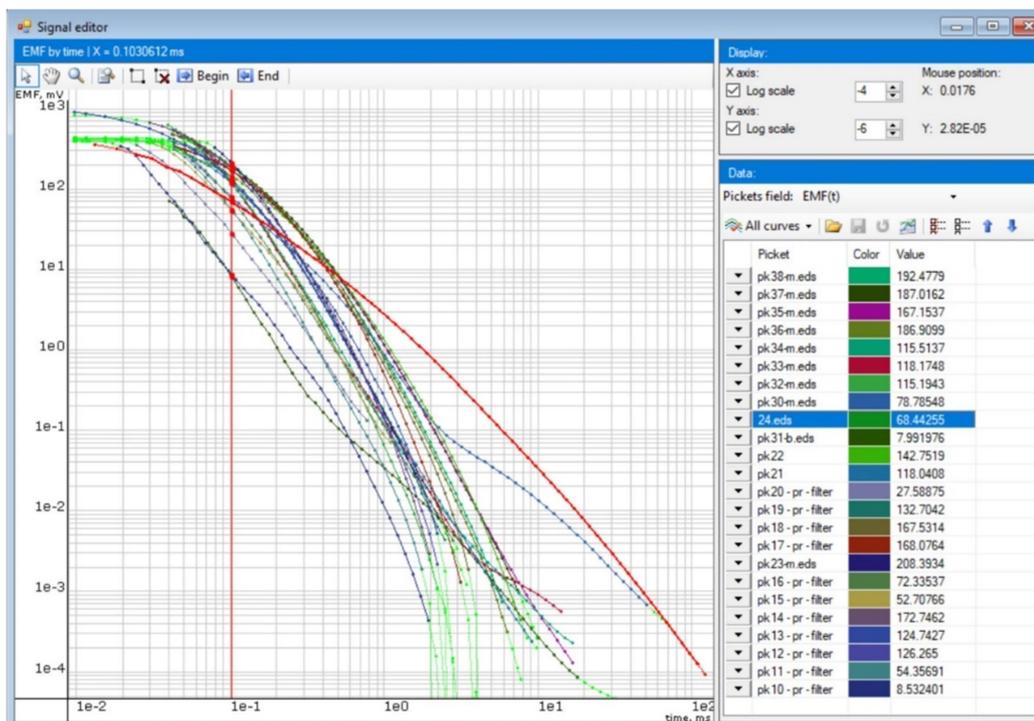


Рисунок 3.130 – Процессы становления электромагнитного поля, регистрация установкой ГК -200x200м, ИК -100x100м. Индекс кривой - номер пикета

Анализ первичной информации позволяет сделать следующие выводы:

1. Современная цифровая аппаратура и методика проведения работ позволили достичь уровней регистрации сигнала переходных процессов до значений до 2.0×10^{-5} мВ.
2. Временной интервал регистрации переходных процессов составляет от 0.03-0.04 до 500 мс.

После предварительной обработки результатов полевых наблюдений проведен расчет трансформант $\rho_r(t)$ (рисунок 3.131).

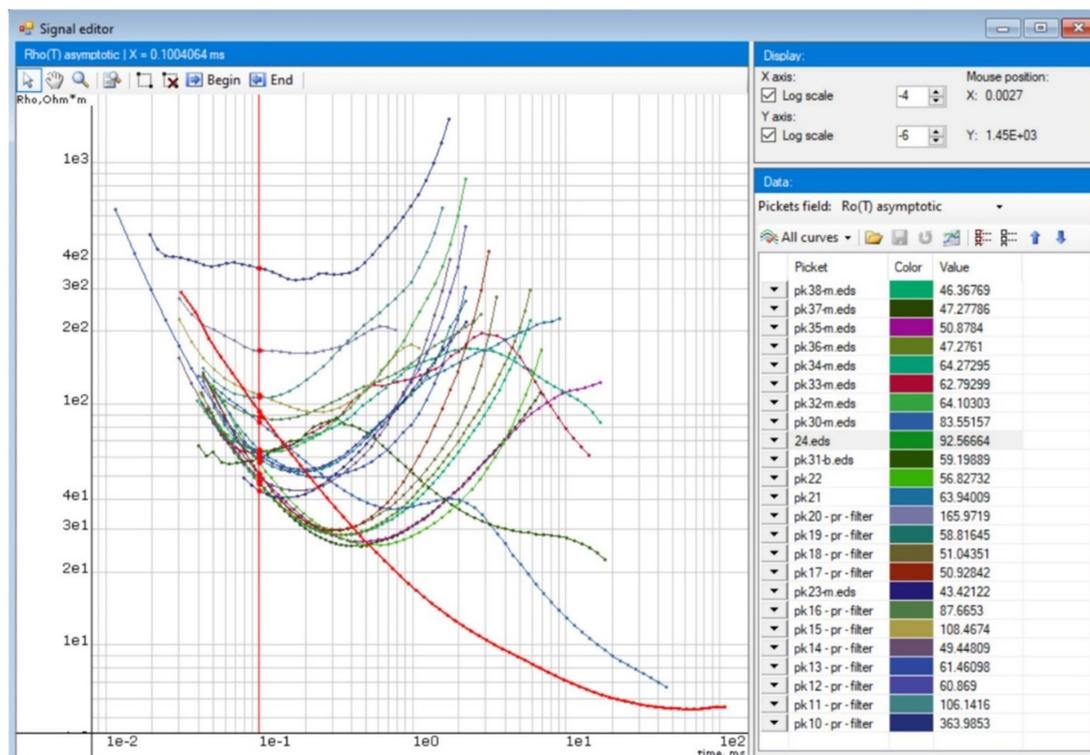


Рисунок 3.131 – Трансформанты сигнала - $\rho_{\tau}(t)$, регистрация установкой ГК - 200x200м, ИК -100x100 м. Индекс кривой - номер пикета

Расчет трансформант $\rho_{\tau}(t)$ показал, что на всем интервале регистрации процессов становления поля можно достоверно построить геоэлектрические модели исследуемых объектов.

Анализ предварительной обработки (расчет параметра $\rho_{\tau}(t)$) подтверждает правильность выбранных параметров регистрации, кривые ЭДС имеют явно выраженную правую восходящую ветвь с устойчивым выходом на опорный горизонт. Трансформанта $\rho_{\tau}(t)$ пикетов pk24, pk30 и pk31 не имеет восходящей правой части, что говорит о низкоомных значениях УЭС глубинных горизонтов разреза

Построение геоэлектрических моделей

Для всех данных ЗС были получены геоэлектрические параметры в результате инверсии, построены геоэлектрические модели.

Геоэлектрические модели по данным ЗС профиля ПР1.

На рисунке 3.132 приведены геоэлектрические модели для пикетов центральной части Горловской впадины (р4, р5, р6). В результате инверсии получены шестислойные модели. Значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) в целом низкие и изменяются в интервалах от 0,99 Ом·м (пятый низкоомны горизонт) до 134.9 Ом·м для современных четвертичных отложений.

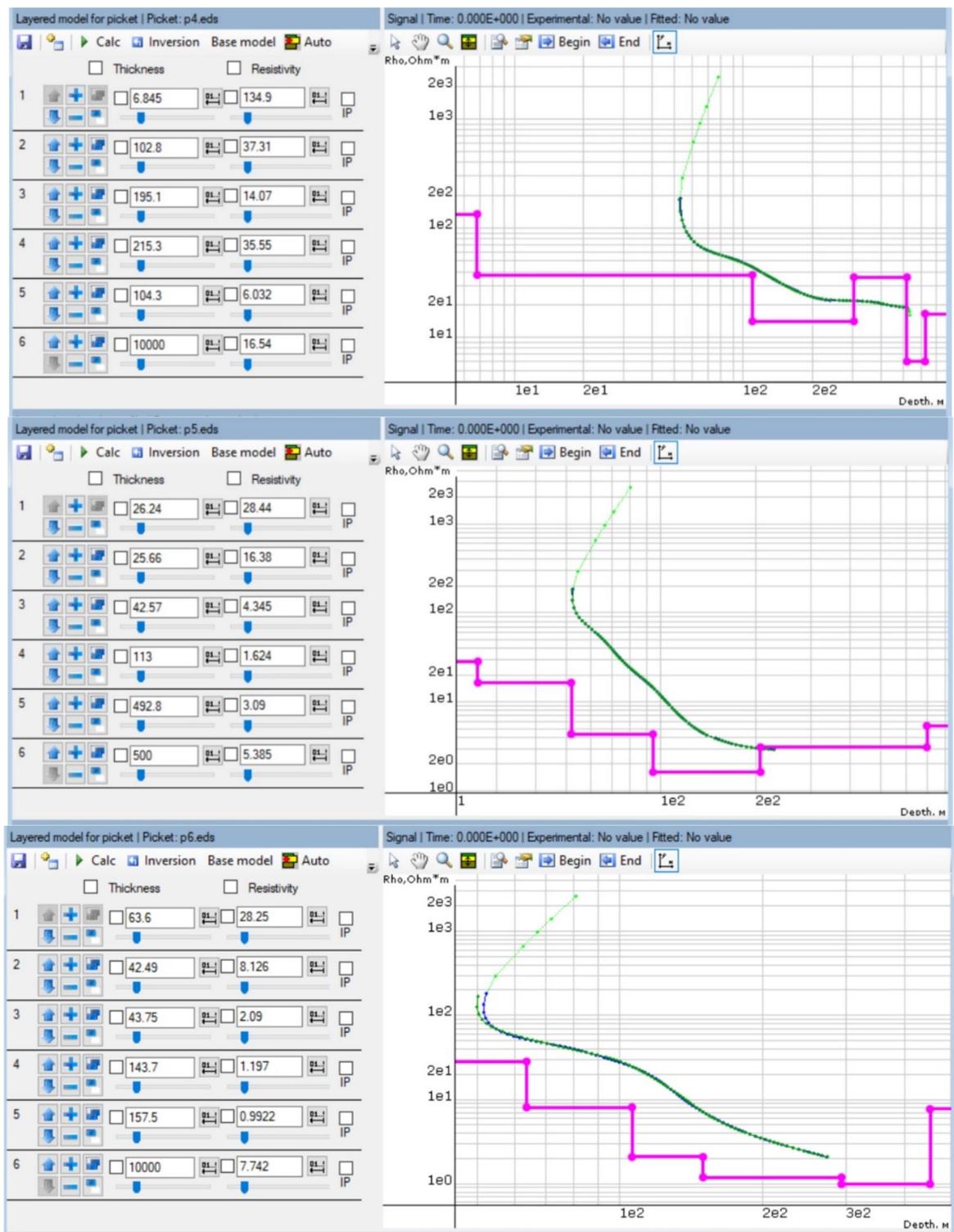


Рисунок 3.132 – Геоэлектрические модели для пунктов p4, p5, p6

На рисунке 3.133 приведена геоэлектрическая модель приборовой части впадины (пикет pk35).

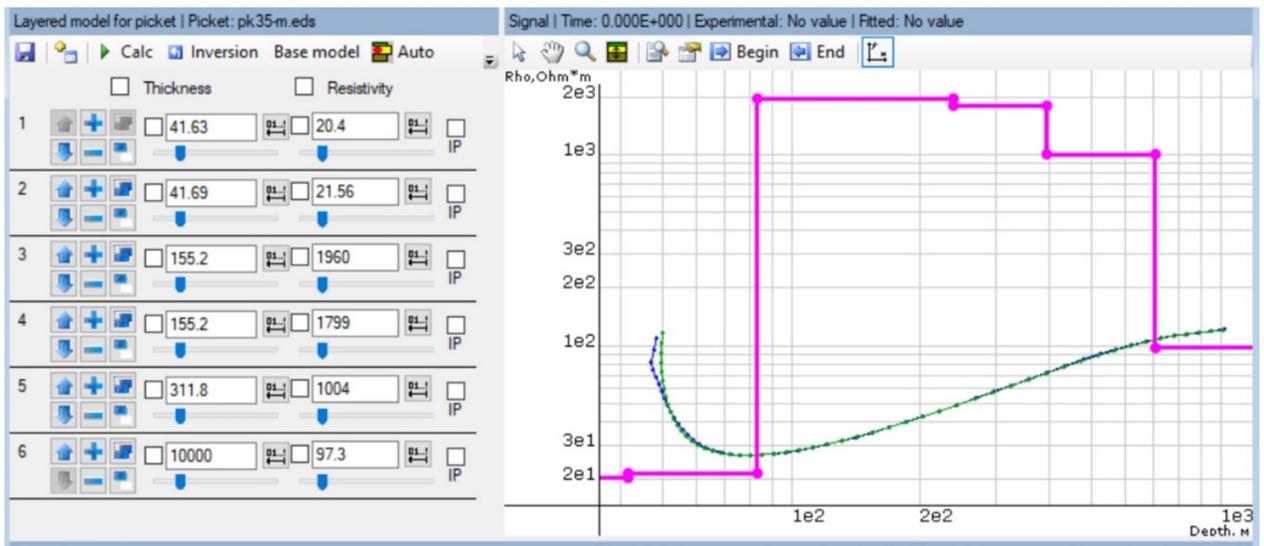
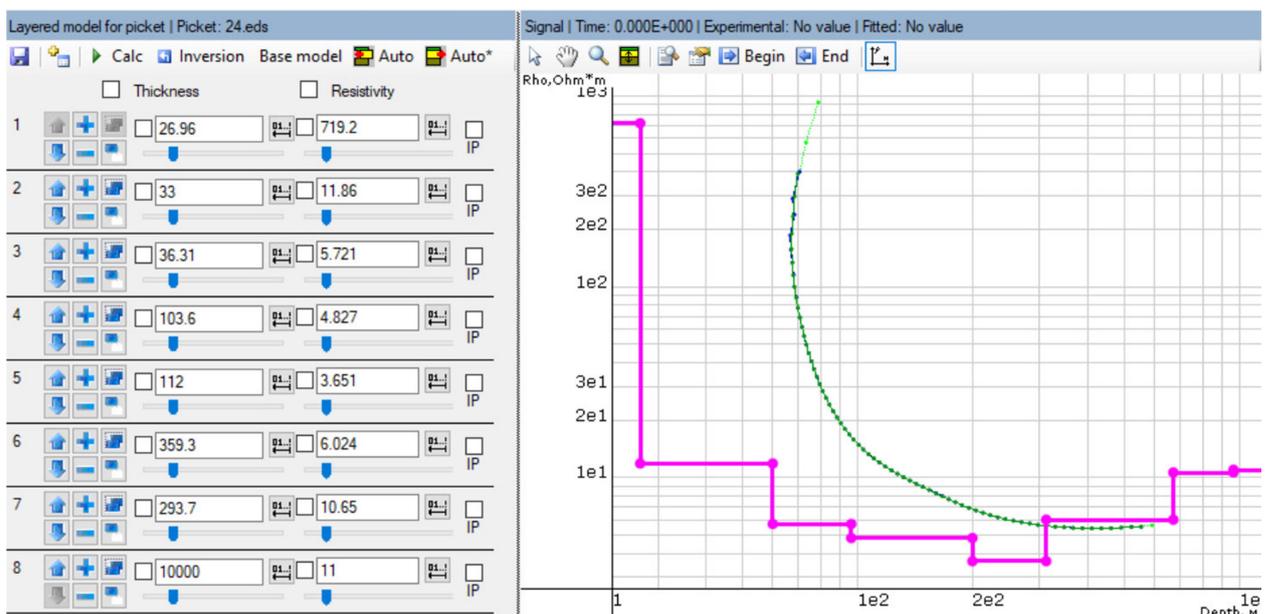


Рисунок 3.133 – Геоэлектрическая модель для пикета рк 35

Приповерхностные горизонты - низкоомные со значениями УЭС в 20.4 и 21.6 Ом·м. Подстилающие геоэлектрические горизонты высокоомные, значения УЭС находятся в интервале от 1000 до 2000 Ом·м.

Геоэлектрические модели профиля ПР2.

На рисунке 3.134 приведены геоэлектрические модели для пикетов центральной части Горловской впадины (рк24, рк30, рк31). В результате инверсия получены шестислойная и восьмислойная модели. Для приповерхностных горизонтов четвертичного возраста УЭС изменяется от 48.9 Ом·м до 719.2 Ом·м. Подстилающие горизонты выполнены низкоомными породами с УЭС в интервале от 0.6 Ом·м (пятый горизонт модели в пикете рк 30) до 58.3 Ом·м. Геоэлектрическая модель для пикета рк31 отличается повышенным УЭС третьего слоя до значений 1211 Ом·м.



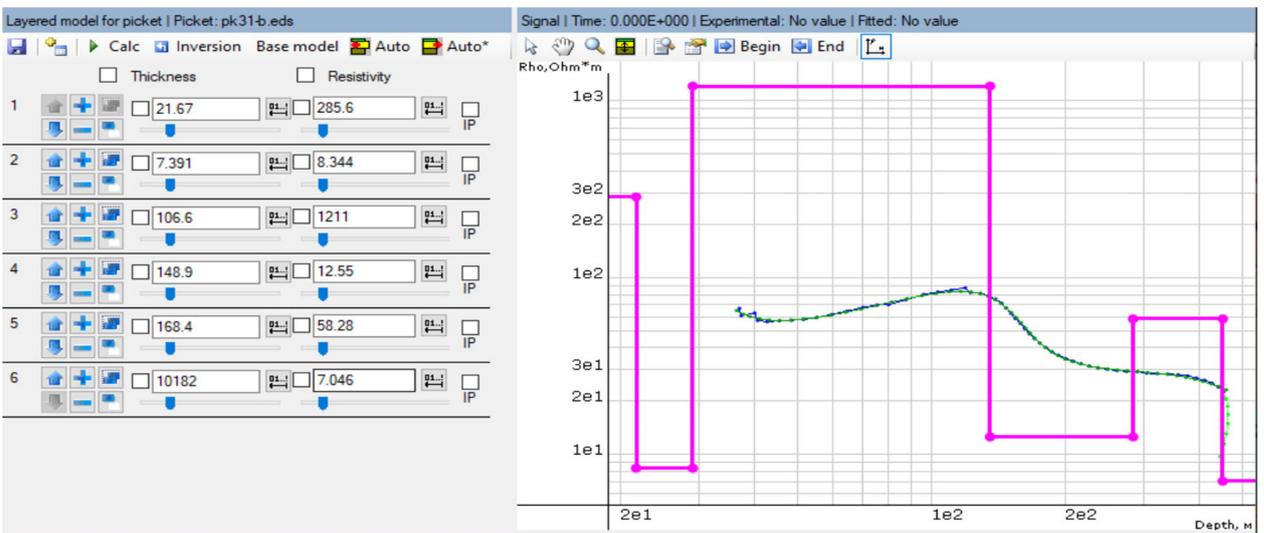
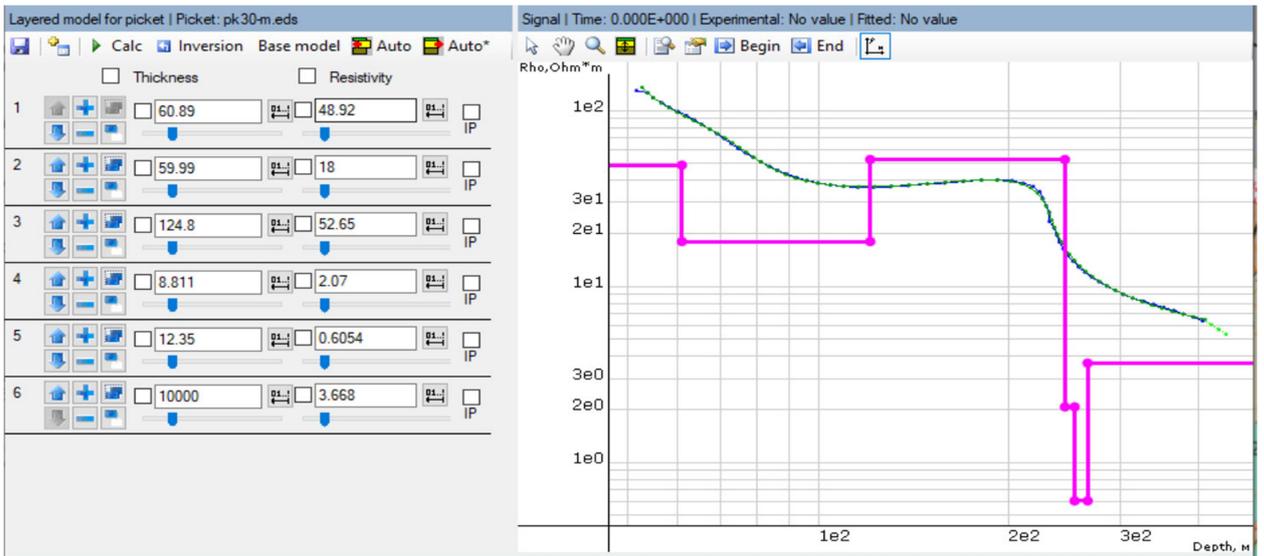


Рисунок 3.134 – Геоэлектрические модели для пикетов pk24, pk30, pk31

На рисунке 3.135 приведена геоэлектрическая модель прибортовой части впадины пикеты pk 34

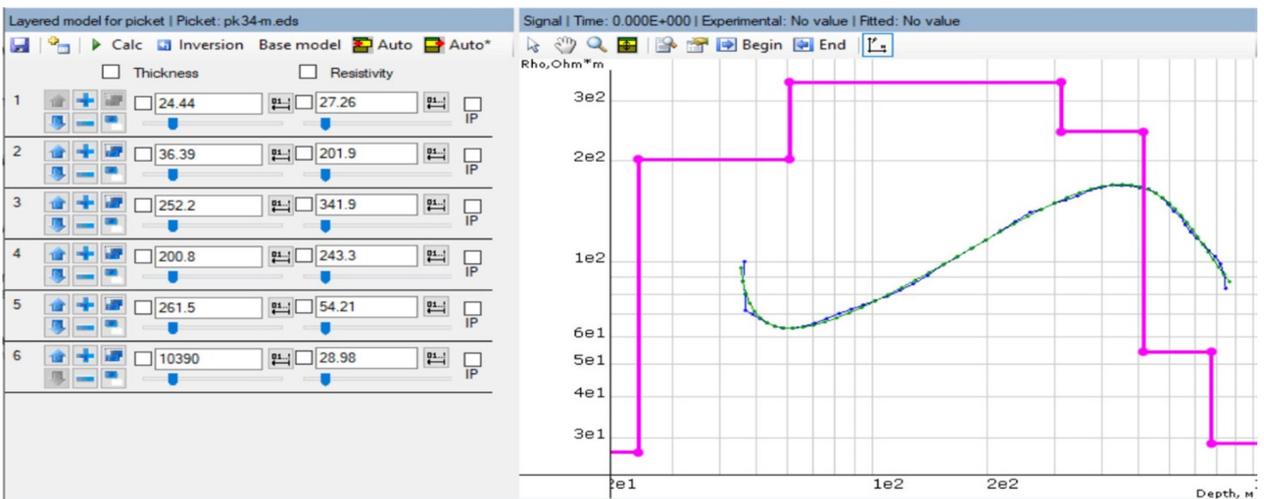


Рисунок 3.135 – Геоэлектрическая модель для пикета pk34

Приповерхностный горизонт - низкоомный со значениями УЭС в 27.3 Ом·м. Подстилающие геоэлектрические горизонты более высокоомные, для них значения УЭС находятся в интервале от 200 до 300 Ом·м.

Построение геоэлектрического разреза

По результатам инверсии с использованием горизонтально-слоистой модели построен геоэлектрический разрез по профилю ПР2, отражающий строение впадины и ее прибортовых частей до глубин более 600 м (рисунок 3.136). Профиль пересекает Горловскую впадину и её юго-восточный и северо-западный борта в крест простираения. В интервале пикетов рк24, рк30, рк31, начиная с глубин 20 - 60 метров прослеживается мощный до шестисот метров горизонт со значениями УЭС от 0.6 до 58.3 Ом·м, который по геологическим данным, скорей всего, соответствующий залежам каменноугольной системы (С₂) с присутствием антрацита.

Юго-восточный прибортовой участок профиля.

В интервале профиля (пикеты рк10 – рк22) геоэлектрические параметры разреза отличаются от параметров пикета рк24. В районе пикета рк22 УЭС повышаются на 2 порядка и далее на юго-восток по профилю в районе пикетов рк21 – рк10 сопротивление палеозойских горных пород начинает превышать 2000 Ом·м. Судя по разрезу, можно предполагать, что между пикетами рк22 и рк31 присутствует локальная зона сочленений прибортовой зоны прогиба и самой впадины. Предположительная разломная зона надвинута на проводящие отложения. Непосредственно зона разлома хорошо выделяется по изолинии УЭС в 100 Ом·м.

Особо стоит отметить два интервала в юго-восточной части профиля, первый в районе пикетов рк15 – рк16, второй в районе пикетов рк20 – рк21. Выделенные низкоомные образования со значениями УЭС от 100 Ом·м до 1000 Ом·м можно проинтерпретировать как тектонические структуры типа надвига более высокоомных пород палеозоя.

Северо-западный прибортовой участок профиля.

Интервал профиля в районе пикетов рк32 – рк38 отмечается повышенными значениями УЭС от 200 Ом·м до 1000 – 4000 Ом·м и более.

На данном участке профиля выделяются три структурных единицы:

1. Интервал профиля (рк30 – рк 32) - сочленение впадины с прибортовой зоной.
2. В районе пикета рк34 - тектоническая структура типа надвиг.
3. В районе пикета рк37 - тектоническая структура типа разлом или уступ.

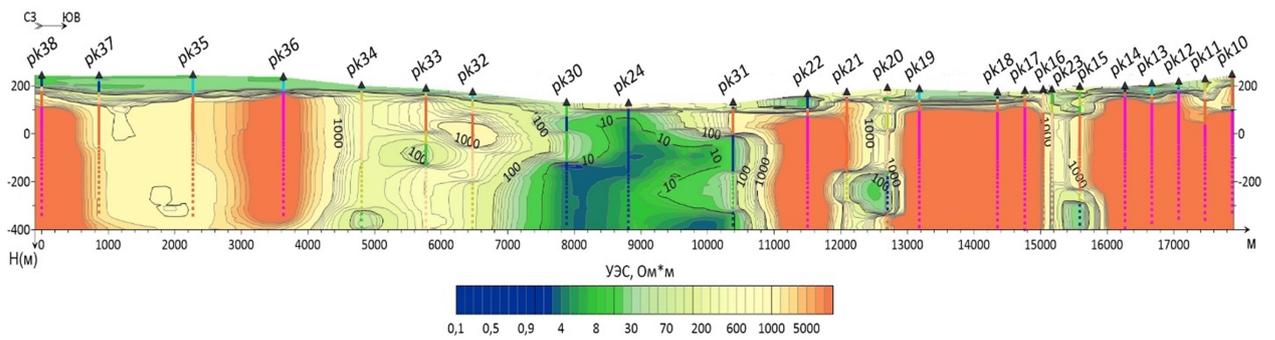


Рисунок 3.136 – Разрез по данным ЗСБ

Проведена совместная интерпретация геоэлектрических аномалий выявленных по данным 2020 – 2022 годов по профилям ПР 1 и ПР 2.

Локализованы проводящие зоны, и участки с высокоомными геоэлектрическими параметрами как по глубинам, так и по латерали.

Показана высокая степень корреляции основных геоэлектрических структур на этих профилях, как между собой, так и с геологическими данными (Геологическая карта N 44-18) [44], рисунок 3.137.

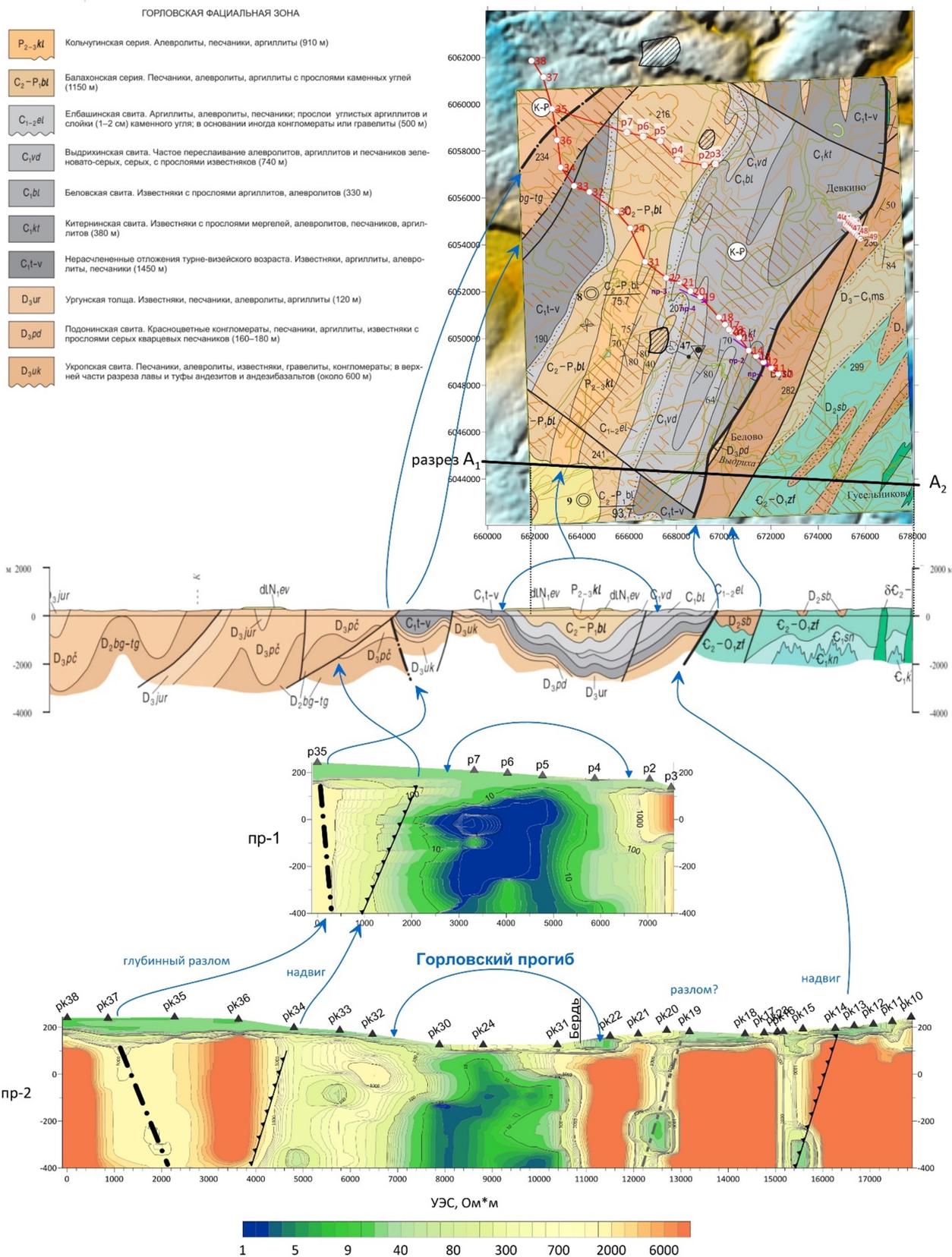


Рисунок 3.137. Геологическая интерпретация геоэлектрических разрезов

Размеры генераторно-приёмной установки метода ЗСБ, геоэлектрические характеристики Горловской впадины не позволили достигнуть глубины до опорного

горизонта (фундамента), но первые представление о разрезе непосредственно впадины получены. В интервале пикетов ЗСБ 5, 6, 7 околтурена низкоомная аномалия с понижением сопротивлений до долей Ом·м. Коллектив будет продолжать работы методами электроразведки, в Горловской впадине, скорректировав параметры установки.

Выводы

В 2022 году выполнен значительный объем полевых наблюдений в сейсмоактивном регионе Горного Алтая и, таким образом, существенно дополнена база полевых данных.

Изучены вариации удельных электрических сопротивлений (УЭС) и коэффициентов анизотропии за весь период инструментальных наблюдений. Прослежена их корреляция с сейсмическими событиями.

Продолжены детальные работы методом ЗСБ в западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир»). Построена 3D модель участка работ. Что позволило изучить зону магистрального разрыва Чуйского землетрясения 2003 года и структуру опорного высокоомного горизонта (фундамента).

Выполнен профиль пересекающий передовой Горловский прогиб. Выявлены разломные контакты прибортовых частей и самой впадины. Локализованы разломы типа надвигов и тектонические уступы.

3.3.6 Объем полевых работ, выполненных в 2022 г.

Чуйская впадина:

– Мониторинг ЗС. Девять физических точек, в каждой ф.т. было выполнено по три физических наблюдения.

Объем работ 27 физических наблюдений.

Район работ: Республика Горный Алтай, Кош-Агачский район.

– Мониторинг ЗС. Измерения по площади, расположенной на восточной окраине пос. Мухор-Тархата (Чуйская впадина) методом ЗС.

Шесть физических точек.

Выполнено 18 физических наблюдений.

Район работ: Республика Горный Алтай, Кош-Агачский район.

– Измерения методом зондирования становлением поля (ЗС), в расширенном частотно-временном диапазоне, западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир»), зона землетрясения 2003 год.

Семь физических точек.

Выполнено 21 физических наблюдений.

Район работ: Республика Горный Алтай, Кош-Агачский район.

- Мониторинг ВЭЗ.

Район поселка Бельтир.

Объем работ: 12 физических наблюдений.

Район работ: Республика Горный Алтай, Кош-Агачский район.

- Высокоразрешающие электроразведочные работы (электротомография).

Чуйская впадина - 2850 погонных метров профилей.

Район работ: Республика Горный Алтай, Кош-Агачский район.

Горловский прогиб

- Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Профильные работы (Пр №2). Девять физических точек, в каждой ф.т. было выполнено по три физических наблюдения.

Объем работ 27 физических наблюдений.

- Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Профильные работы (Пр №3), район пос. Девкино. Тринадцать физических точек, в каждой ф.т. было выполнено по три физических наблюдения.

Объем работ 39 физических наблюдений.

Район работ: Новосибирская область, Искитимский район.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете приведены результаты исследований СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за 2022 год, выполненных по научным проектам: № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору», № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сеймотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений», № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» и № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных».

Основные результаты следующие:

В развитие экспериментальных методик регистрации малоамплитудных геофизических сигналов исследованы методом стоячих волн пять различных по конструкции, материалам и размерам инженерных сооружений: в г. Тюмень – 8-ми этажное панельное и 2-х этажное кирпичное жилые здания, 2-х уровневая подземная парковка; в г. Новосибирск – 10-ти этажное панельное жилое здание; в г. Норильск – 4-х этажное здание (Дворец культуры) на свайном фундаменте на многолетнемерзлом грунте. На четырех объектах, кроме подземной парковки, выделены стоячие волны: определены 2-3 моды и соответствующие им частоты собственных колебаний. Два объекта (жилые здания в г. Тюмень) имеют различные дефекты (трещины) в строительных конструкциях, которыми объясняются аномалии в распределении мод собственных колебаний (наличие растягивающих колебаний вдоль длинных осей зданий, несимметричность форм изгибных колебаний по коротким осям зданий). Данные о частотах и модах стоячих волн в исследованных зданиях будут использованы для мониторинга их технического состояния, основанного на слежении за изменением характеристик собственных колебаний.

Выполнен непрерывный годовой мониторинг микросейсмических колебаний двух зданий (10-ти этажный панельный дом в г. Новосибирске и 4-х этажное здание на свайном фундаменте на многолетнемерзлых грунтах в г. Норильске). Использовались комплекты сейсмической аппаратуры (регистратор «Байкал-8», трехкомпонентный сейсмоприемник GD-4.5, микрокомпьютер «Raspberry Pi», роутер), настроенные на передачу в реальном времени сейсмограмм в центр сбора и обработки данных. По спектрам микросейсмического шума определены изменения значений частот собственных колебаний сооружений во времени и установлена их зависимость от температуры. Так,

для 10-этажного панельного дома, при положительных температурах окружающего воздуха, наблюдается прямая корреляционная зависимость: с ростом/понижением температуры окружающего воздуха, частоты собственных колебаний увеличиваются/понижаются. Однако, при отрицательных температурах наблюдается обратная зависимость. Это объясняется, предположительно, включением системы отопления в холодное время года, когда температурный режим конструкций здания существенно изменяется. Для 4-этажного здания наблюдается принципиально другая зависимость: с ростом температуры происходит понижение значений частот собственных колебаний, причем, при отрицательных температурах воздуха, график зависимости частота-температура становится более пологим. На сегодня из известных публикаций не существует разработанного способа учета изменений частот собственных колебаний сооружений от температуры, который бы позволит перейти к достоверной оценке устойчивости сооружений. Этим объясняется необходимость в дальнейшей разработке такого способа.

Исследованы колебания на агрегатных блоках машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС, возникающие при работе каждого из десяти гидроагрегатов. В волновом поле наблюдается набор монохроматических колебаний с частотами кратными частоте вращения гидроагрегатов (2.381 Гц), коррелирующих с изменениями их нагрузок, причем наиболее высокоамплитудные значения соответствуют 35.715 Гц – «лопастной» частоте гидроагрегатов. Показано влияние квантационных процессов под рабочим колесом на рост амплитуд монохроматических сигналов с течением времени. Выделены колебания жгута жидкости под колесом гидроагрегата на частоте около 0.68 Гц. Причем нагрузка на гидроагрегатах в пределах 450-480 МВт приводит к активизации пульсаций давления и появлению жгута. Для третьего гидроагрегата это привело к возникновению ударных воздействий в агрегатном блоке. Выделены колебания, вызванные пульсациями жидкости в водоводе на частоте около 1.36 Гц, проявляющихся при нагрузках на гидроагрегатах 560-600 МВт.

Проведены опытно-методические работы по созданию системы мониторинга технического состояния канатно-кресельных дорог в шахтах. Для этого в непрерывном режиме, в течение 3-суток в ряде точек сооружения регистрировались микросейсмические колебания при разных режимах работы двух канатно-кресельных дорог. По результатам спектрально-временного анализа выделены монохроматические колебания, связанные с работой двигателей, и сигналы с частотами собственных колебаний тросового вала. Результаты физического моделирования на металлическом стержне показывают, что при развитии дефекта (пропила, имитирующего трещину в валу) частоты собственных

колебаний уменьшаются на 5-20% в зависимости от глубины пропила. Разработано предложение по системе мониторинга канатно-кресельных дорог в шахтах, основанное на непрерывной регистрации записей микросейсмических колебаний в ряде точек сооружения и определении по ним частот собственных колебаний тросового вала в режиме близком к реальному времени, а также амплитуд и частот работы двигателей, необходимых для контроля за техническим состоянием указанных объектов инфраструктуры.

На основе спектрального анализа записей малоамплитудных сейсмических сигналов (непрерывные данные мониторинга 2001-2021 гг.) с удаленной на 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС одной из станций сейсмологической сети разработана методика определения ежедневных значений частот собственных колебаний сооружений (частоты первых семи мод определяются с погрешностью не более 0.01 Гц) в связи с оценкой их устойчивости. Результаты обработки и анализа уникальных данных, после выборки интервалов, при которых влияние на сооружение сезонных воздействий внешней среды минимально (летне-осенний период, уровень воды в водохранилище близок к максимальному), указывают на интегральный рост значений частот собственных колебаний плотины в пределах 0.02-0.05 Гц за период наблюдений под воздействием или заиливания дна водоема на участке, примыкающем к плотине, или в связи с адаптацией плотины и ее основания с последующим увеличением механической жесткости сооружения. Разработанная методика определения частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам предназначена для оценки их устойчивости и для предупреждения рисков разрушения плотин, промышленных сооружений, объектов инфраструктуры и гражданских зданий с высокой степенью достоверности и экономически выгодна по сравнению с известными решениями.

В рамках реализации электроразведочного мониторинга сейсмоактивной Чуйско-Курайской зоны на юге Алтая выполнены ежегодные мониторинговые измерения методом ЗС на профилях в пределах Чуйской впадины Горного Алтая. Построены детальные геоэлектрические разрезы по профилям и трехмерная геоэлектрическая модель по данным ЗС в долине реки Чаган, в которой выявлена зона пониженных значений удельного электрического сопротивления на участке видимых на поверхности тектонических нарушений, образованных землетрясением 2003 года; проводится анализ полученных электроразведочных данных совместно с многолетними данными предыдущих измерений, что в конечном итоге, позволит обосновать историю и кинематику формирования впадин и провести совместный анализ рядов мониторинговых электроразведочных наблюдений с развитием афтершокового процесса в Чуйско-Курайской зоне. С целью дальнейшего

совершенствования электроразведочных методов для решения практических инженерно-геологических задач на угольных месторождениях и возросшей техногенной сейсмичностью под Новосибирском проведены электроразведочные работы в Горловском прогибе Колывань-Томской складчатой зоны Алтае-Саянской складчатой области. По данным исследований методами электротомографии и зондирования становлением поля на электроразведочных профилях изучены геоэлектрические характеристики в основных блоковых структурах Горловского прогиба с установлением характера глубинного распределения геоэлектрических неоднородностей. По направлениям в крест простирания Горловского прогиба выделены локальные зоны пониженных значений удельного электрического сопротивления (УЭС), проинтерпретированные как тектонические структуры типа разлом и надвиг. Сам Горловский прогиб обусловлен обширной зоной с низкими значениями УЭС, достигающих уровней порядка первых единиц Ом·м за счет каменноугольных угленосных формацией среднего карбона (С2-Р1b1) верхнего палеозоя. Проводится дальнейший детальный анализ полученных электроразведочных данных с тектоникой и геологией месторождений и возросшей техногенной сейсмичностью.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С.852–863.
2. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Гриценко С.А., Данилов И.А., Кузьменко А.П., Сабуров В.С., Татьков Г.И. Пересчёт стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях. // Геология и геофизика. – 2002. – Т.43, № 2. – С.192-207.
3. 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.
4. Байкал-8, технические характеристики [Электронный ресурс]. – URL: <http://expas-sib.com/posts/baykal-8.html> (дата обращения 14.08.2022).
5. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666241, 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021.
6. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Способ организации непрерывного сейсмического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение РФ, №2546056, Бюл. №10, 10.04.2015г.
7. Муравьев О.А., Селезнев В.С., Громыко П.В., Рыбин Д.В. Спектральный анализ пульсаций давления в водопроводящем тракте турбин и вызванных ими вибраций строительных конструкций агрегатных блоков здания Саяно-Шушенской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2019. – № 9. – С. 24-29.
8. Громыко П.В., Селезнев В.С. Воздействие пульсаций давления жидкости на колебания элементов конструкции сооружения СШ ГЭС // Гидроэлектростанции в XXI веке. Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. (Саяногорск; Черемушки, 25-26 апр. 2019 г.). – Саяногорск; Черемушки, 2019. – С. 39-48.
9. Loh C.H., Wu T.C. System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data // Journal of Earthquake Engineering. – 2000. – V. 4 (4). – P. 511-537. DOI: 10.1080/13632460009350381.
10. Mendes P., Oliveira Costa C., Almeida Garrett J., Oliveira S. Development of monitoring system to Cabril dam with operational modal analysis // The Proceedings of the 2nd Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES). – Porto, 2007.
11. Weng J.H., Loh C.H. Structural health monitoring of arch dam from dynamic measurements // 12th Biennial International Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration. (Hawaii, 14-17 March 2010) – Hawaii, 2010. – P. 2518–2534. DOI: 10.1061/41096(366)235.
12. Егоров А.Ю., Костылев В.С., Саранцев М.И. Определение собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС по показаниям сейсмометрической аппаратуры и расчётными методами // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 45-50.
13. Antonovskaya G.N., Kapustian N.K., Danilov A.V., Moshkunov A.I., Moshkunov K.A. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring // Journal of Seismology. – 2017. – V. 21 (5). – P. 1039-1053.
14. Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A. Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – V. 4 (96). – P. 15-26.
15. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание. – Красноярск: Сибирский изд. дом "Суриков", 1999. – 561 с.

16. *Hsu T.Y., Valentino A., Liseikin A., Krechetov D., Seleznev V., Chen C.C., Wang R.Z., Lin T.K., Chang K.C.* Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects // *Measurement Science and Technology*. – 2020. – V. 31(1). – P. 015801.
17. *Саранцев М.И.* Определение собственных частот колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным инженерно-сейсмометрических наблюдений // *Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева*. – 2017. – Т. 283. – С. 72-81.
18. *Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Бах А.А., Кречетов Д.В.* Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища // *Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва*. (Новосибирск, 9-13 дек. 2014 г.) – Новосибирск, 2014. – С. 182-186.
19. *Cai Y., Zhang K., Ye Z., Liu C., Lu K., Wang L.* Influence of Temperature on the Natural Vibration Characteristics of Simply Supported Reinforced Concrete Beam // *Sensors*. – 2021. – V. 21. – P. 4242. <https://doi.org/10.3390/s21124242>
20. *Nguyen V.H., Mahowald J., Schommer S., Maas S., Zuerbes A.* A Study of Temperature and Aging Effects on Eigenfrequencies of Concrete Bridges for Health Monitoring // *Engineering*. – 2017. – V. 9. – P. 396-411. doi:10.4236/eng.2017.95023
21. *Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Дураченко А.А., Корабельщиков Д.Г., Гладышев Е.А.* Алтай и Саяны // В сборнике: *Землетрясения России в 2020 году. Ежегодник*. – Обнинск. – 2022. – С. 38-44.
22. *Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В.* Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидротехническое строительство*. – 2013. – № 7. – С. 2-7.
23. *Pereira S., Magalhães F., Gomes J.P., Cunha Á., Lemos J.V.* Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir // *Engineering Structures*. – 2018. – V. 174(1). – P. 548-560. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.076
24. *Вульфович Н.А., Потехин Л.П.* Динамика изменения необратимых перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС в период эксплуатации при проектных параметрах нагружения (1990-2016 гг.) // *Гидротехническое строительство*. – 2017. – №8. – С. 2-8.
25. *Александров Ю.Н., Юсупов Т.М.* О причинах и длительности периода адаптации в системе «плотина-основание» Саяно-Шушенской ГЭС // *Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Доклады XII научно-технической конференции*. (Санкт-Петербург, 15-16 нояб. 2018 г.) – Санкт-Петербург, 2018. – С. 3-12.
26. *Кальная О.И., Аюнова О.Д.* Особенности функционирования Шагонарского плёса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 12 (7). – С. 1452-1462.
27. *Уломов В.И.* Об инженерно-сейсмологических изысканиях в строительстве // *Инженерные изыскания*. – 2009. – № 9. – С. 28–39.
28. *Earthquake source zones of Northern Eurasia - GSHAP Region 7 / Ed.-in-Chief V.I. Ulomov [Электронный ресурс]. – 2000. – URL: http://static.seismo.ethz.ch/gshap/neurasia/source_zones.ans (дата обращения 01.02.2022 г.)*
29. *База данных активных разломов Евразии. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2019621553 опубл. 03.09.2019 / Д. М. Бачманов, В. Г. Трифонов, А. И. Кожурин, Е. А. Зеленин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук (ГИН РАН).*
30. *Каталог землетрясений Прибайкалья с 01.01.1960 г. [Электронный ресурс]. – URL: <http://seis-bykl.ru/modules.php?name=Data&da=1> (дата обращения 01.02.2022 г.)*

31. *Голенецкий С.И., Демьянович М.Г., Семенов Р.М., Ясько В.Г., Авдеев В.А., Кашкин В.Ф., Мишарина Л.А., Серебренников С.П.* Сейсмичность района Оронгойских впадин и землетрясение 2 октября 1980 г. в Западном Забайкалье // Геология и геофизика. – 1982. – № 9. – С. 45-54.
32. Сейсмическая сотрясаемость территории СССР / Ю.В. Ризниченко, С.С. Сейдузова, Р.С. Пронишин и др.; Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. – М.: Наука, 1979. – 192 с.
33. СП 286.1325800.2016 Свод правил «Объекты строительные повышенной опасности. Правила детального сейсмического районирования». Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – М.: Стандартинформ, 2016. – 29 с.
34. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Ред. Н.В. Кондорская, Н.В. Шебалин. – М.: Наука, 1977. – 535 с.
35. СП 269.1325800.2016 Свод правил «Транспортные сооружения в сейсмических районах. Правила уточнения исходной сейсмичности и сейсмического микрорайонирования». Приложение В. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. – М.: Стандартинформ, 2016. – 71 с.
36. *Бабушкин С.М., Неведрова Н.Н., Селезнев В.С., Лисейкин А.В.* Электромагнитные исследования на территории Алтае-Саянской горной области // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т.3., № 2. – С. 7-19. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.01>
37. *Бабушкин С.М., Рыбушкин А.Ю., Терешкин Д.О., Неведрова Н.Н.* Измерительный модуль для электромагнитных исследований // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 8.
38. *Пономарев П.В., Неведрова Н.Н.* Мониторинг полигона «Бельтир» в юго-западной части Чуйской впадины методами постоянного тока // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 71.
39. Аппаратура Скала 64к15 [Электронный ресурс]. – URL: <https://nemfis.ru/siber-64k15/> (дата обращения 14.12.2022).
40. *Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Шапаренко И.О., Шалагинов А.Е., Санчаа А.М.* Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируемыми источниками // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. – Т. 2. № 2. – С. 272-279. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279.
41. *Emanov A.F., Emanov A.A., Pavlenko O.V., Fateev A.V., Kuprish O.V., Podkorytova V.G.* Kolyvan Earthquake of January 9, 2019, with $ML=4/3$ and induced seismicity features of the Gorlovsky coal basin // Seismic Instruments. – 2020. – V.56, № 3. – pp.254-268.
42. *Хабинов О.Г., Власов А.А., Антонов Е.Ю.* Система интерпретации данных площадных электромагнитных зондирований // ГЕО-Сибирь-2010. Недропользование. Горное дело. Новые направления и технология поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых: материалы VI Междунар. науч. конгр. «ГЕО-Сибирь-2010». – Т. 2, ч.1. – Новосибирск: СГГА, 2010. – С.164-168.
43. Geotomo Software [Электронный ресурс]. – URL: <http://geotomosoft.com/> (дата обращения 14.12.2022).
44. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. – Серия: Алтае-Саянская. – Лист: N-44-Новосибирск. Объяснительная записка. – Санкт-Петербург, ФГБУ «ВСЕГЕИ». – 2015.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2022 году

Сведения о выполнении количественных показателей индикаторов эффективности фундаментальных научных исследований по научным проектам: № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору», № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений», № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» и № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных».

Индикатор	Единица измерения	2022 г.	
		План	Фактическое исполнение
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и (или) Scopus	единиц	1	3
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в ядре РИНЦ	единиц	1	3
Количество докладов на международных конференциях	единиц	3	9
Количество РИД	единиц	0	2

Научные публикации в журналах, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science и Scopus:

1. *Liseikin A.V., Seleznev V.S., Soloviev V.M., Bryksin A.A.* An approach for studying of the Earth's crust structure at full thickness by means of river seismic exploration // *Doklady Earth Sciences.* – 2022. – V. 502(1-2). – P. 46-50.
<https://doi.org/10.1134/S1028334X2202009X>
2. *Ngomayezwe L., Kolesnikov Y.I., Fedin K.V.* Diagnostics of asphalt pavement using elastic standing waves // *Near Surface Geophysics.* – 2022. – V. 20. P. 82-93.
<https://doi.org/10.1002/nsg.12183>
3. *Gromyko P.V., Fedin K.V., Seleznev V.S., Kolesnikov Y.I., Ngomayezwe L.* Monitoring of the hydraulic units operation of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant using remote seismic observations. *Earthquake Engng Struct Dyn.* 2022; 1-15.
<https://doi.org/10.1002/eqe.3762>

Научные публикации в журналах, индексируемых в ядре РИНЦ:

1. *Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Брыксин А.А.* Методика изучения строения земной коры на всю мощность средствами речной сейсморазведки //

- Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2022. – Т. 502. – № 2. – С. 101-106. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020098>
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. Определение устойчивости отвалов угольных разрезов по собственным колебаниям (по данным мониторинга на Колыванском месторождении антрацита, Новосибирская область) // Геология и геофизика. – 2022. – С. 11-19. (Принята к печати)
 3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Брыксин А.А., Севостьянов Д.Б., Кречетов Д.В., Коковкин И.В. Возможности речной сейсморазведки для изучения строения земной коры и верхней мантии территории Сибири // Геология и геофизика. – 2022. – С. 28-35. (Принята к печати)

Доклады на международных конференциях:

1. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Обнаружение опасных процессов при эксплуатации техногенных сооружений по записям малоамплитудных сигналов на сейсмологической сети станций // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. – Обнинск. – 2022. – С. 52.
2. Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Сейсмология - новые направления // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. – Обнинск. – 2022. – С. 83.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Возможность определения глубинного строения земной коры в Восточной Сибири по материалам речного сейсмического профилирования // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 129-136.
4. Громько П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Изменение собственных частот сооружений под влиянием температуры // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2022. – С. 36.
5. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Лисейкин А.В., Шибяев С.В., Чельницкий В.В., Галёва Н.А. Определение глубин землетрясений с использованием данных профильных и площадных глубинных сейсмических исследований в Сибири // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2022. – С. 88.
6. Громько П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Влияние температуры на изменение частот стоячих волн сооружений по данным сейсмических наблюдений // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 172-179.
7. Кречетов Д.В., Лисейкин А.В. Изменения состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по многолетнему мониторингу собственных частот // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2022. – Т. 2, № 2. – С. 188-195.
8. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Обнаружение опасных процессов при эксплуатации техногенных сооружений по малоамплитудным сигналам с удаленных сейсмических станций // В книге: Опасные природные и техногенные процессы в горных регионах: модели, системы, технологии. Тезисы VIII Международной конференции. Владикавказ, 2022.
9. 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.

Дополнительные публикации по теме:

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В. Сейсмология - новые направления и проблемы // В сборнике: Добрецовские чтения: наука из первых рук. Материалы Первой Всероссийской научной конференции, посвященной памяти выдающего ученого и организатора науки академика РАН Николая Леонтьевича Добрецова. Новосибирск, 2022. – С. 273-275.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. Sslicer // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022613238, 12.03.2022. Заявка № 2022613181 от 11.03.2022.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. Geofilters // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022614840, 28.03.2022. Заявка № 2022613160 от 11.03.2022.
4. Лисейкин А.В. Возможности использования данных речной сейсморазведки МОВ-ОГТ на для изучения земной коры на всю мощность за счет удлиненной записи и увеличенной кратности наблюдений // 27-е Рабочее совещание «Состояние работ по созданию Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин на 01.10.2022», 24-25 ноября 2022 г., ФГБУ «ВСЕГЕИ».
5. Селезнев В.С. Перспективы расширения государственной сети опорных геолого-геофизических профилей за счет проведения речной сейсморазведки МОВ-ОГТ-ГСЗ // 27-е Рабочее совещание «Состояние работ по созданию Государственной сети опорных геолого-геофизических профилей, параметрических и сверхглубоких скважин на 01.10.2022», 24-25 ноября 2022 г., ФГБУ «ВСЕГЕИ».