

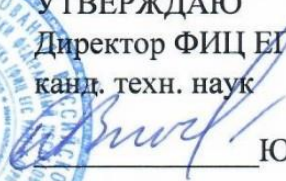
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ФИЛИАЛ (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН)

УДК 550.34



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ ЕГС РАН,
канд. техн. наук

 Ю.А. Виноградов

"24" мая 2022 г.

ОТЧЕТ

о результатах исследований

СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО ФИЛИАЛА

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

за 2021 год

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



 А.В. Лисейкин

Новосибирск 2022

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, 3.4.2, 3.6, заключение)

Зам. директора
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН


31.01.2022
подпись, дата

С.М. Бабушкин
(разделы 1.5, 3.5)

Ст. науч. сотрудник
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН


31.01.2022
подпись, дата

А.А. Брыксин
(нормоконтроль, разделы 1.6, 2.1,
3.4.3)

Науч. сотрудник
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН


31.01.2022
подпись, дата

П.В. Громыко
(разделы 1.1, 1.3, 3.3, 3.4.1, 3.4.4)

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, 3.4.1, 3.5)

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)

РЕФЕРАТ

Отчет 153 с., 130 рис., 19 табл., 22 источн., 1 прил.

СЕЙСМИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ, МАЛОАМПЛИТУДНЫЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СИГНАЛЫ, СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Объектом исследования являются поля малоамплитудных сейсмических 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.

Основные научные результаты следующие:

1) В г. Новосибирске (высотный дом) экспериментально зафиксировано, что при совпадении частоты источника (мощный компрессор) с собственной частотой здания, колебания верхней его части усиливаются более чем в 2 раза. Установлены значительные (до 15%) изменения собственных частот здания под влиянием температурных вариаций.

2) Для плотины Саяно-Шушенской ГЭС, обнаружены долговременные (с 2001 по 2021 гг.) интегральные увеличения значений частот 3-й и 4-й мод до 0.03 Гц, предположительно связанные с консолидацией плотины.

3) На примере Новосибирской ГЭС показана возможность отслеживания изменений режимов работы гидроагрегатов на удалении до 16 км от объекта.

4) Анализ сейсмологических записей со станций вблизи Колыванского месторождения антрацита (Новосибирская область), за период с 2017 г. по настоящее время, позволил доказать предположение о причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале.

5) Разработаны программное обеспечение и аппаратная конфигурация мобильного комплекса, позволяющие проводить удаленную регистрацию сейсмических сигналов, установлено 8 комплектов оборудования в городах Новосибирск и Норильск, п. Каменушка Новосибирской области и г. Междуреченск (шахта «Распадская-Кокосовая»).

6) На Горном Алтае изучены вариации удельных электрических сопротивлений и коэффициентов анизотропии и прослежена их корреляция с сейсмическими событиями.

7) Выполнен профиль в юго-восточном борту Горловского прогиба Колывань-Томской складчатой зоны и сопряженных с ней структурах. Выявлен контакт прибортовой части и самой впадины. Локализованы две структуры типа грабен.

8) Разработана технология электромагнитных зондирований (ЗС) с целью выявления и локализации угольных пластов.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
1. РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕМЕНТА УНУ ФИЦ ЕГС РАН – КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ	11
1.1 ГЭС	11
1.2 Здания и сооружения	16
1.3 Мониторинг собственных колебаний зданий	20
1.4 Изучение строения недр по сейсмическим данным	21
1.5 Изучение строения недр по электроразведочным данным и мониторинг вариаций электромагнитных полей	25
1.6 Мобильный аппаратно-программный комплекс регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных	34
2 ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ЧАСТЬ УНУ	39
2.1 Аппаратный комплекс ЦОД	39
2.2 Программно-алгоритмическая часть	41
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2021 Г	46
3.1 Разработка способа оценки сейсмостойкости зданий и сооружений, основанного на методе когерентного восстановления полей стоячих волн	46
3.2 Проведение мониторинга технического состояния крупных плотин ГЭС, основанного на анализе изменений собственных частот	51
3.3 Разработка методов формирования модели инженерного сооружения по данным метода стоячих волн	60
3.3.1 Обследование сооружений методом стоячих волн	60
3.3.2 Мониторинг стоячих волн зданий	67
3.4 Разработка экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах	76
3.4.1 Анализ колебаний от Новосибирской ГЭС на больших расстояниях	76
3.4.2 Анализ колебаний от Елбашинского отвала на ст. Харино	83
3.4.3 Разработка аппаратуры и программного обеспечения	94

3.4.4 О способе мониторинга состояния вращательных механизмов по данным сейсмических наблюдений.....	101
3.5 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области	119
3.5.1 Электромагнитный мониторинг. Измерения методом ЗС в режимных точках Чуйской впадины Горного Алтая	119
3.5.2 Учет анизотропных свойств геологической среды.....	122
3.5.3 Получены геоэлектрические характеристики разреза методами ВЭЗ в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения.....	128
3.5.4 Результаты исследования Горловской впадины, проведенные в 2021 году	134
3.5.5 Опытнo-методические работы по разработке технологии электромагнитных зондирований (ЗС) и электротомографии с целью выявления и локализации угольных пластов.....	142
3.5.6 Объем полевых работ, выполненных в 2021 г.	144
3.6 Важнейшие результаты СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за 2021 год	145
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	146
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	149
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 году	151

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:

- | | | |
|---------------|---|--|
| 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 |

КПД	– коэффициент полезного действия
КФ ФИЦ ЕГС РАН	– Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук»
НГЭС	– Новосибирская гидроэлектростанция
ОС	– операционная система
ПК	– персональный компьютер; пикет
ПО	– программное обеспечение
ПП	– переходной процесс
РИД	– результат интеллектуальной деятельности
СО РАН	– Сибирское отделение Российской академии наук
Ст.	– станция
СШ ГЭС	– Саяно-Шушенская гидроэлектростанция
УВБ	– уровень верхнего бьефа (уровень наполнения водохранилища)
УНУ	– уникальная научная установка
УЭС	удельное электрическое сопротивление
ЦОД	– центр обработки данных
ЭДС	– электродвижущая сила
ЭТ	– электротомография

ВВЕДЕНИЕ

Отчет содержит информацию о выполнении Государственного задания № 075-01304-20-01/09 на проведение Сейсмологическим филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» исследовательских работ в 2021 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-идущих 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.

Методология работ включает 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 длительноидущих 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 2021 года.

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 2021 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:

Разработка способа оценки сейсмостойкости зданий и сооружений, основанного на методе когерентного восстановления полей стоячих волн.

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

Разработка методов формирования модели инженерного сооружения по данным метода стоячих волн.

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

Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области.

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: № 0152-2019-0011 «Опасные процессы при техногенном воздействии на земную кору» (руководитель д.г.-м.н. В.С. Селезнев), № 0152-2019-0012 «Эволюция сеймотектонических процессов в Сибири по данным мониторинга землетрясений» (руководитель д.т.н. А.Ф. Еманов), № 0152-2019-0005 «Проведение непрерывного сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга...» (руководитель чл.-корр. РАН, д.т.н. А.А. Маловичко) и № 0152-2019-0004 «Разработка и актуализация баз данных сейсмологических, геофизических, геодинамических наблюдений...» (руководитель к.ф.-м.н. Н.В. Петрова).

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.

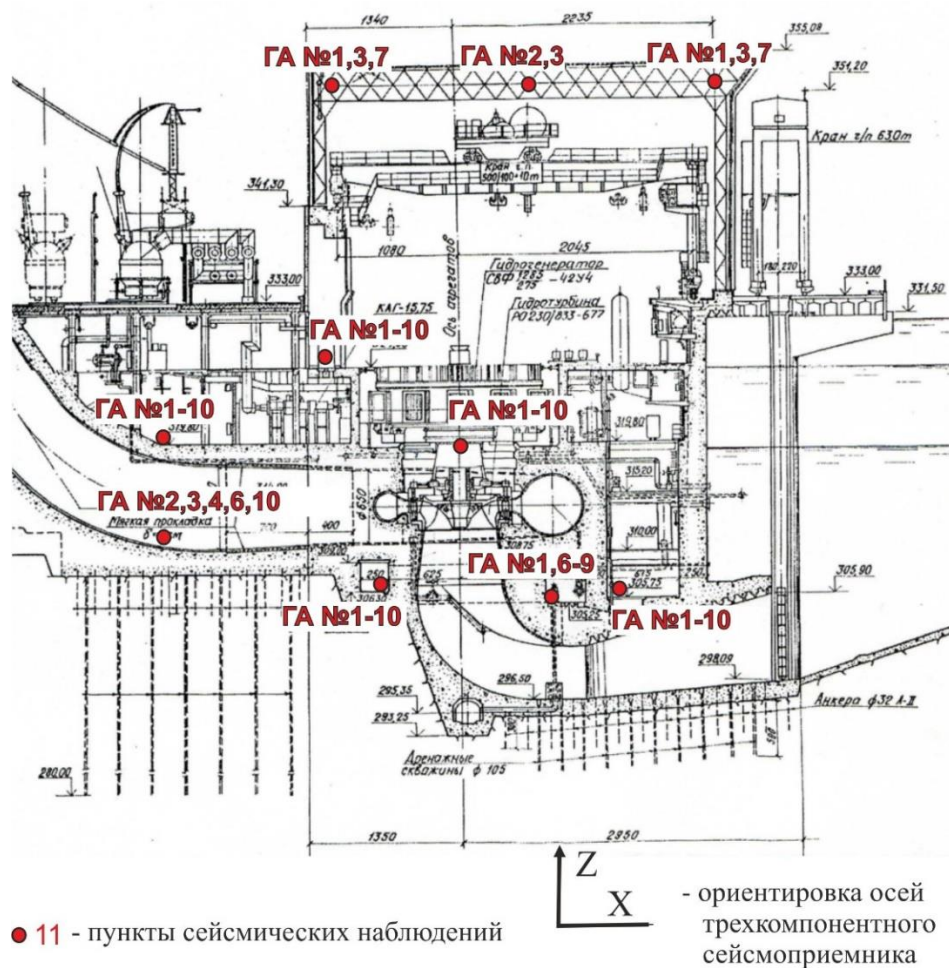


Рисунок 1.2 – Схема сейсмических наблюдений в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС возле каждого из гидроагрегатов



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-5T 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.

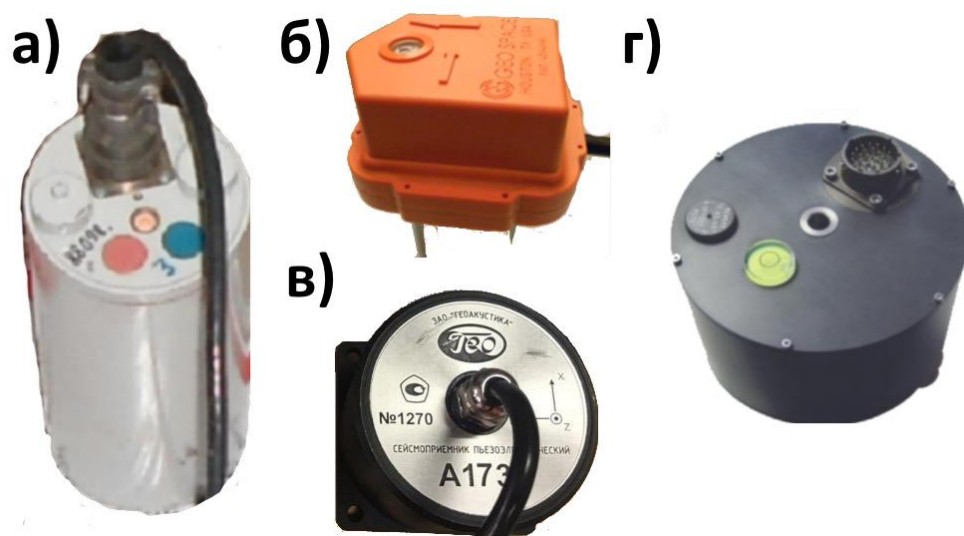


Рисунок 1.4 – Регистрирующая аппаратура: а) сейсмический регистратор Байкал-АСН; б) акселерометр А1738; в) велосиметр GS-20DX; г) акселерометр CMG-5T

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, °C	-30 - +60

Таблица 1.2 - Краткие технические характеристики датчиков–акселерометров

	Техническая характеристика сейсмодатчика	A1738	CMG-5T
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/сек)	< 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.

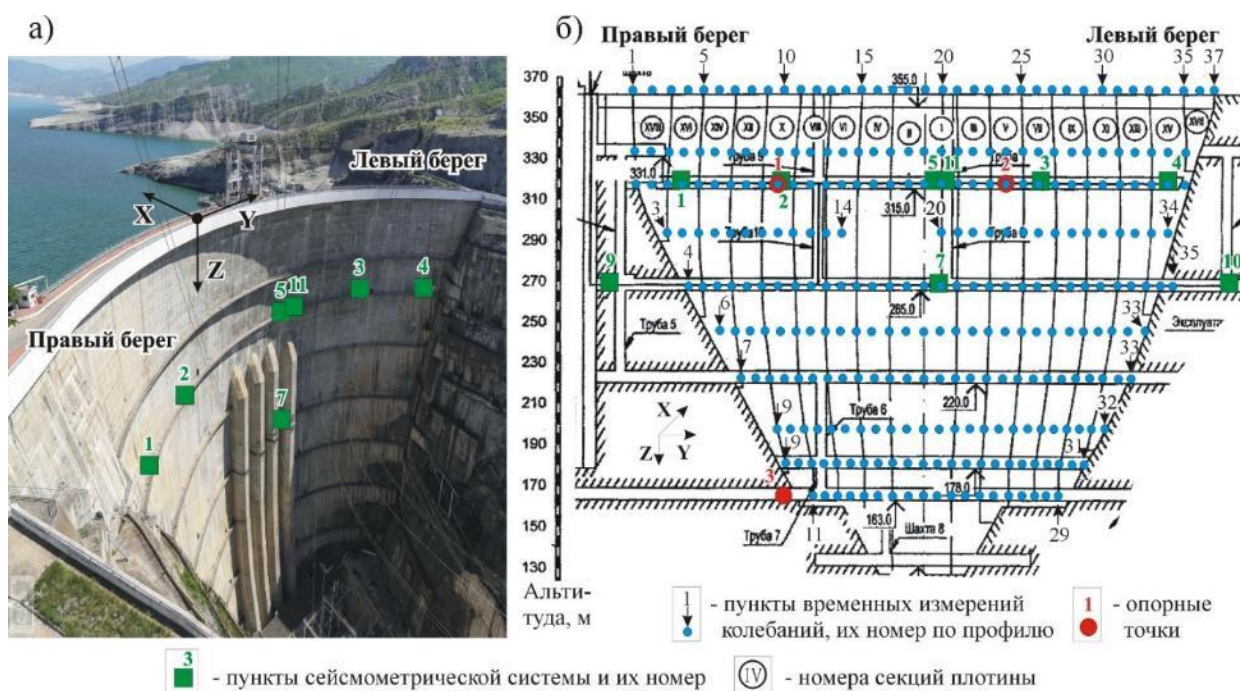


Рисунок 1.6 – Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС с пунктами постоянной сейсмометрической системы (а) и схема временно реализованных сейсмических наблюдений с регистраторами «Байкал-АСН» (б)



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

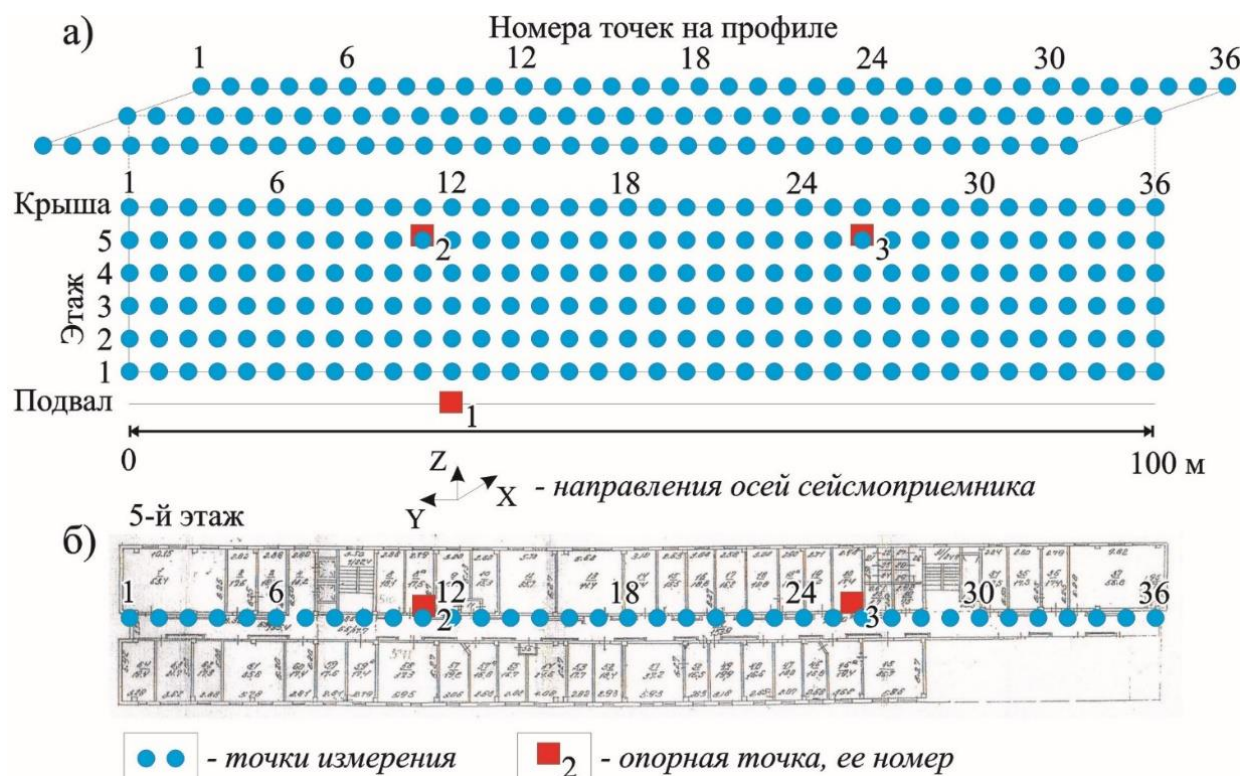


Рисунок 1.8 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний жилого здания. (а) – общая; (б) – по профилю на 5-м этаже

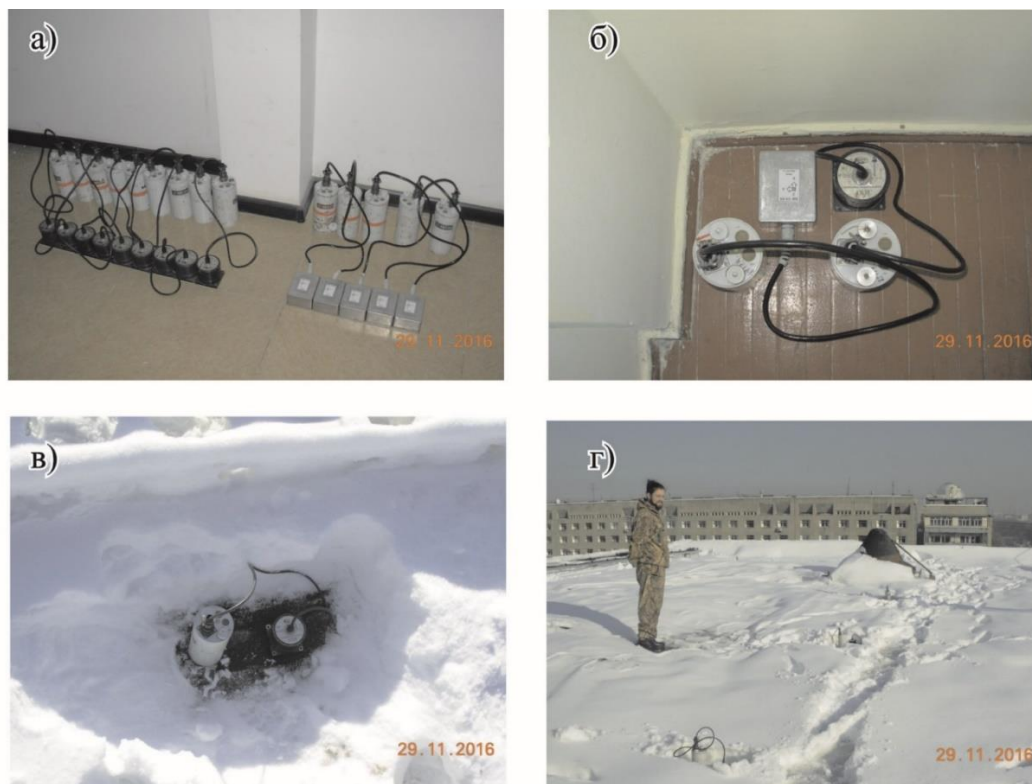


Рисунок 1.9 – Фотографии процесса проведения измерений на здании при помощи регистраторов «Байкал-АСН», датчиков-акселерометров А1638 и велосиметров GD-10: (а) – тест на идентичность; (б) – установка аппаратуры в опорной точке № 3; (в, г) – проведение измерений на крыше здания

1.3 Мониторинг собственных колебаний зданий

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

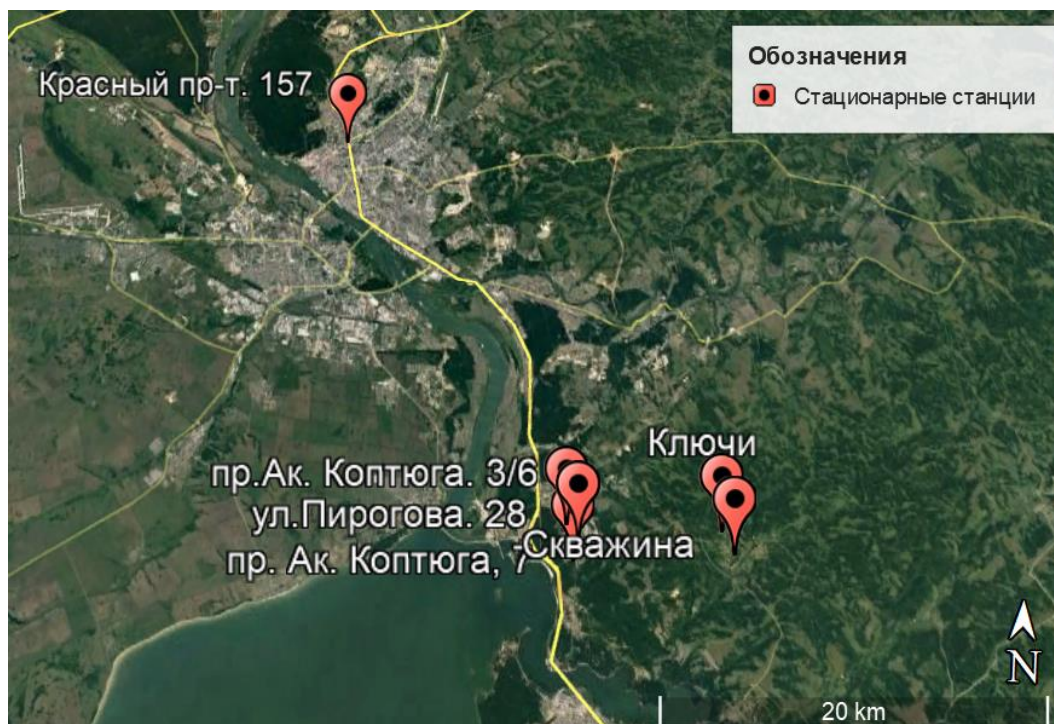


Рисунок 1.10 – Расположение стационарных сеймостанций, установленных в зданиях Новосибирской области

Таблица 1.5 – Сведения о стационарных сейсмических станциях СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 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 сейсмических 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-

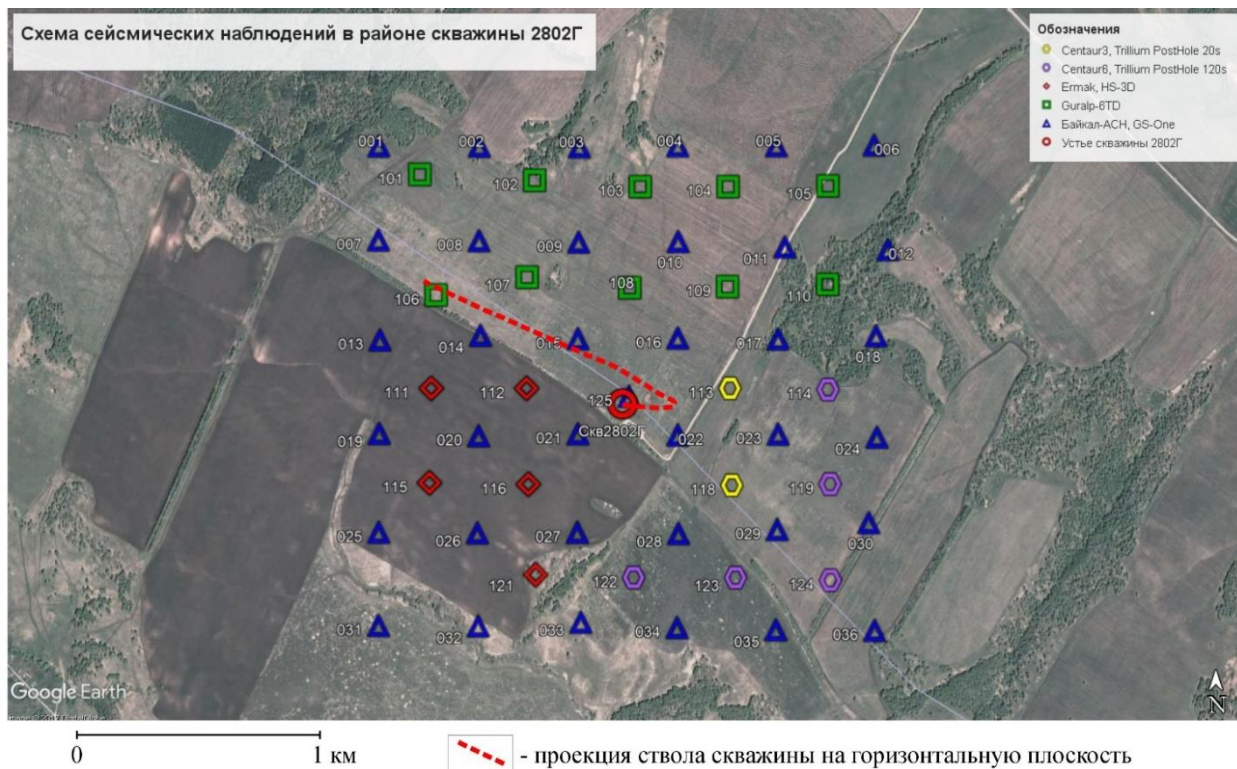
стопном режиме (по таймеру или критериям). Задание программы работы регистратора и считывание записанной информации происходит по порту USB (на компьютере устанавливается специализированное программное обеспечение), стартовая и финишная синхронизации по GPS производятся с использованием внешней («Байкал-АСН») 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)

a)



б)

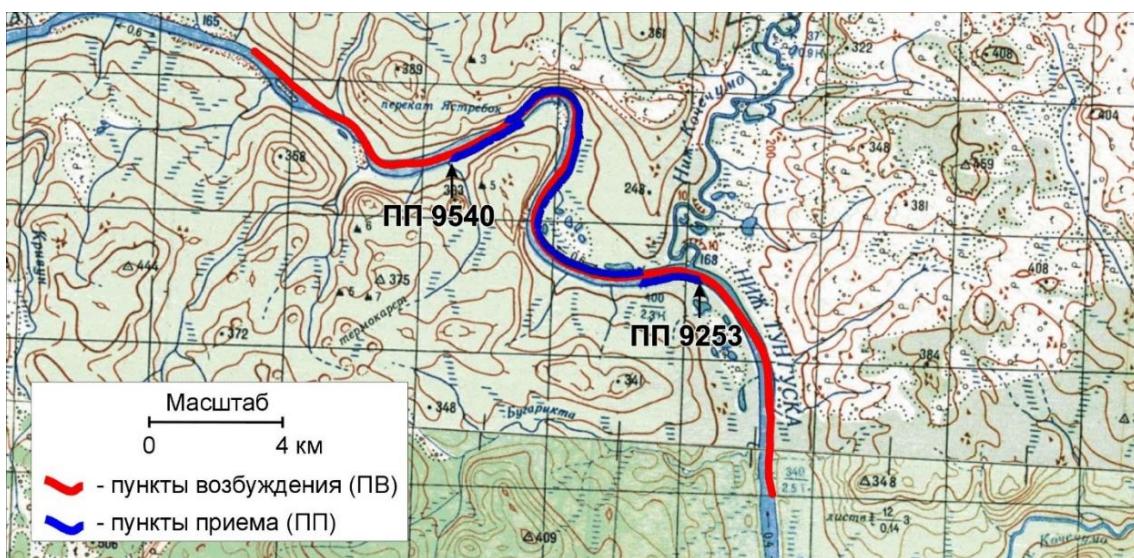


Рисунок 1.13 – Установка сейсмической аппаратуры «Байкал-АСН» с сейсмическими косами и сейсмоприемниками GS-20DX для проведения теста на идентичность (а) и схема опытных работ (б) при речных сейсморазведочных исследованиях (р. Нижняя Тунгуска, 2012 г)

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 4КГц) 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 MN. 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»

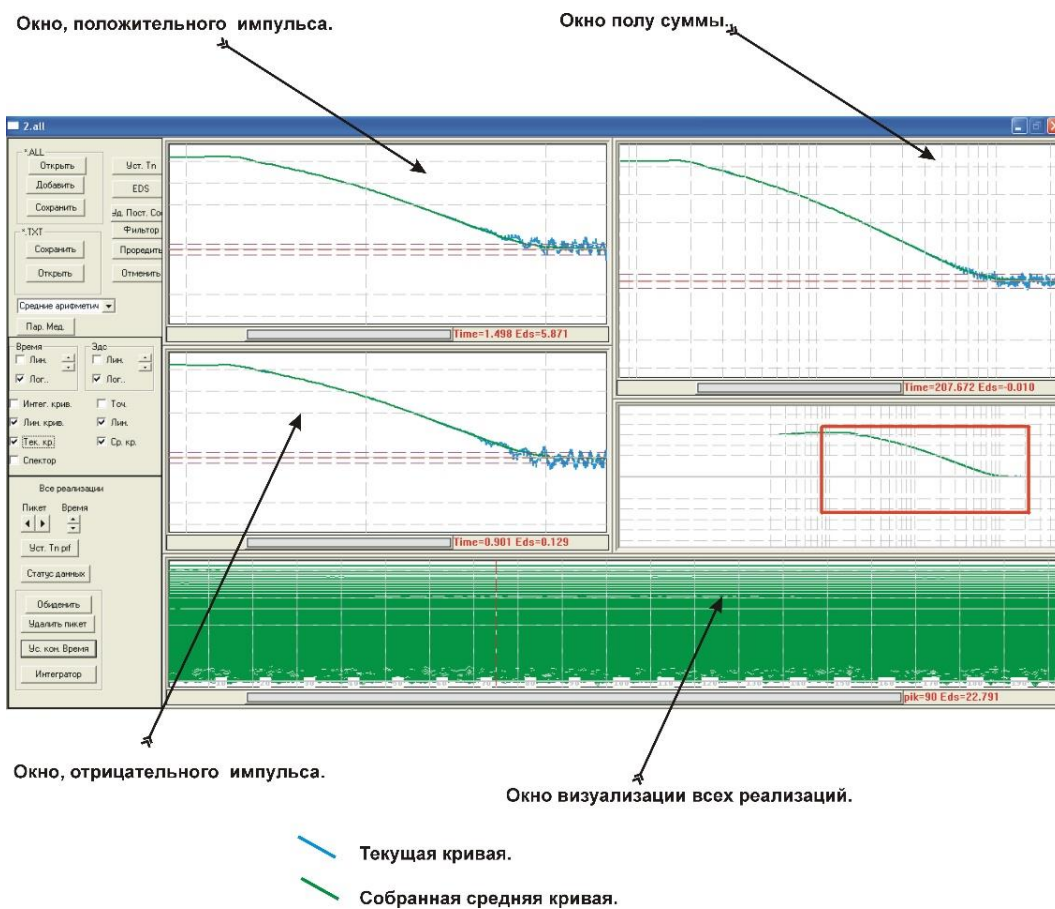


Рисунок 1.15 – Рабочее окно оператора, измеритель «Байкал МЭРС-Т»

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	COM порт PC

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

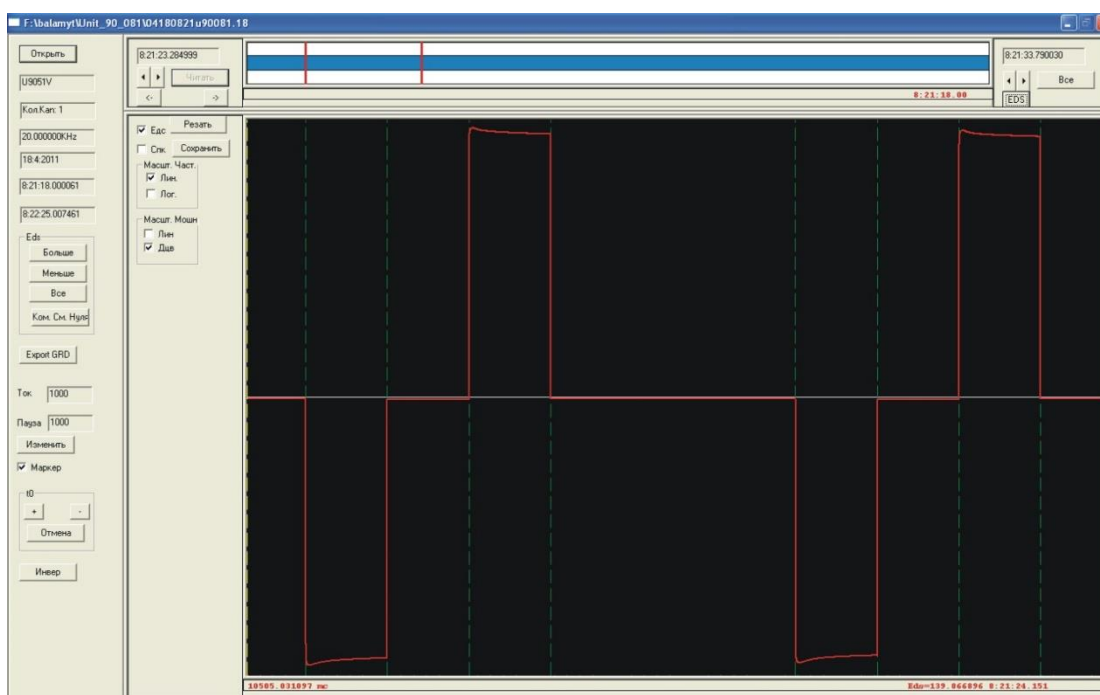


Рисунок 1.17 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись формы токовых импульсов

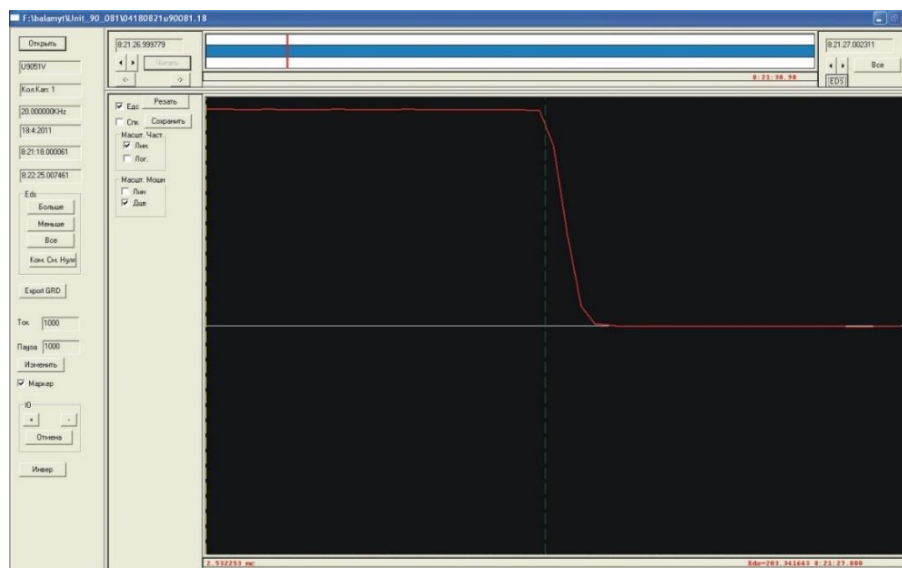


Рисунок 1.18 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись фронта выключения токового импульса

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 м²
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.

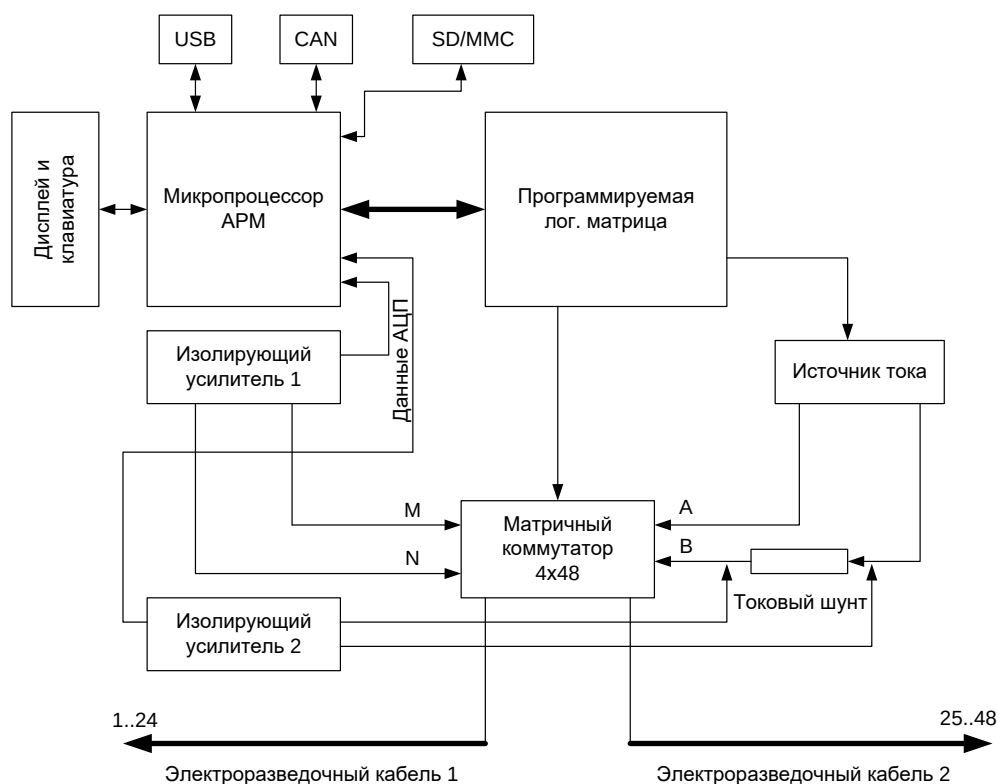


Рисунок 1.21 – Структурная схема аппаратуры «Скала-48»

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 ГПМП (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 2021 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.

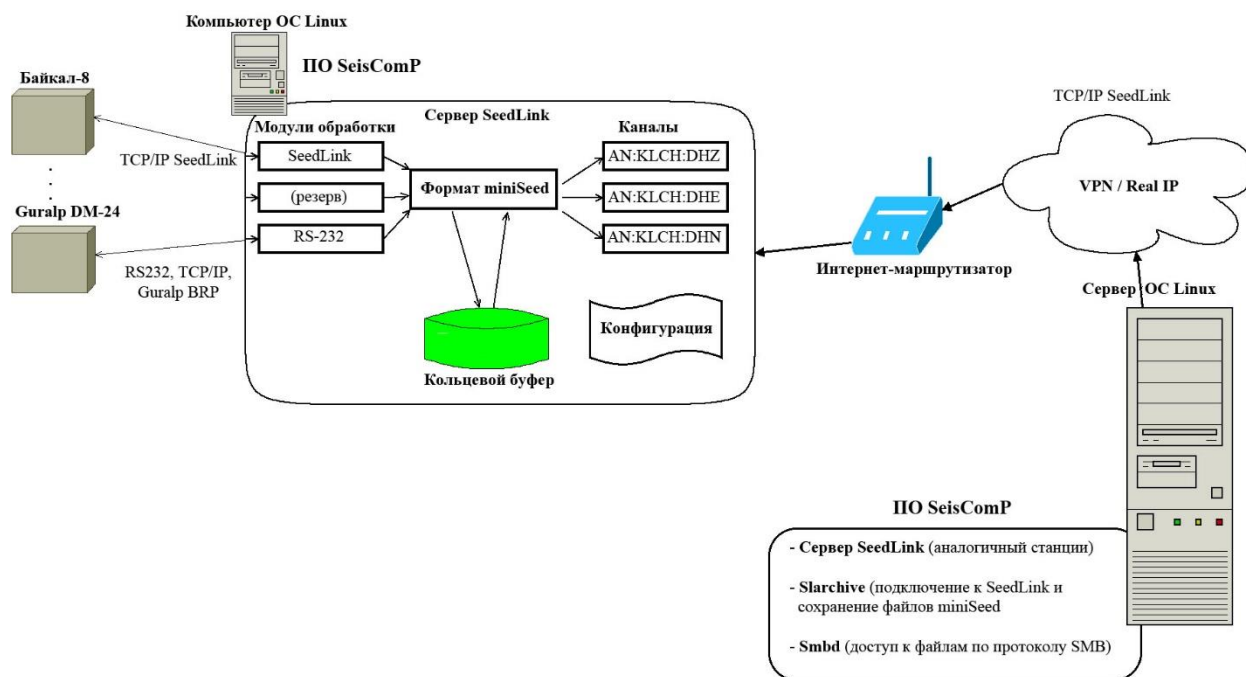


Рисунок 1.22 – Архитектура разработанного Комплекса

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).

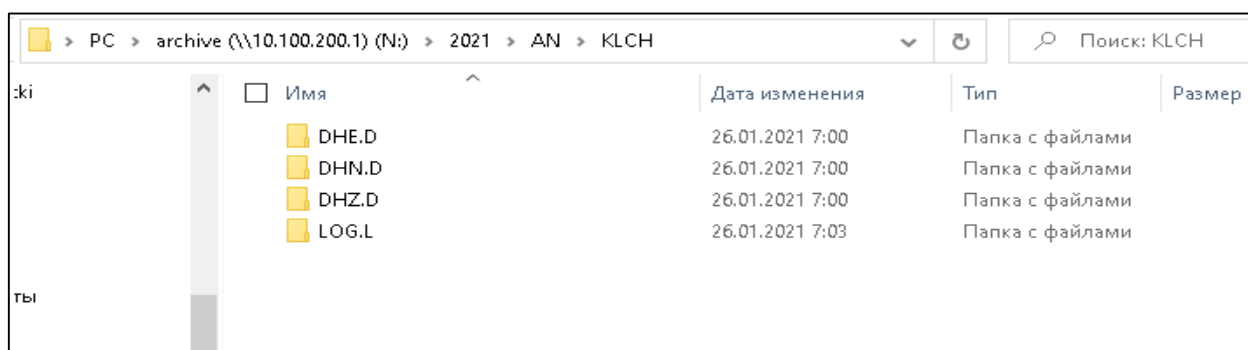


Рисунок 1.24 – Доступ к архиву данных (ОС Windows 10, OpenVPN)

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

"СЭФ 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 MKSB	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:

< 1 m	<30 m	< 1 h	< 2 h	< 6 h	< 1 d	< 2 d	< 3 d	< 4 d	< 5 d	> 5 d
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

"СЭФ 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:

< 1 m	<30 m	< 1 h	< 2 h	< 6 h	< 1 d	< 2 d	< 3 d	< 4 d	< 5 d	> 5 d
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

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.

В течение 2021 года в рамках НИР по теме В.С. Селезнева были установлены 7 мобильных комплексов, в том числе в других городах Сибирского региона.

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).

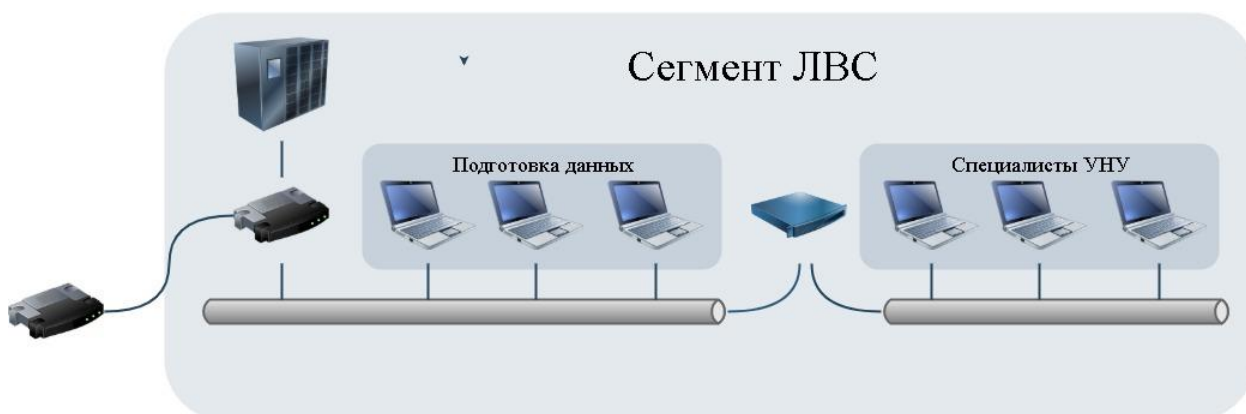


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема построения сегмента ЛВС

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.

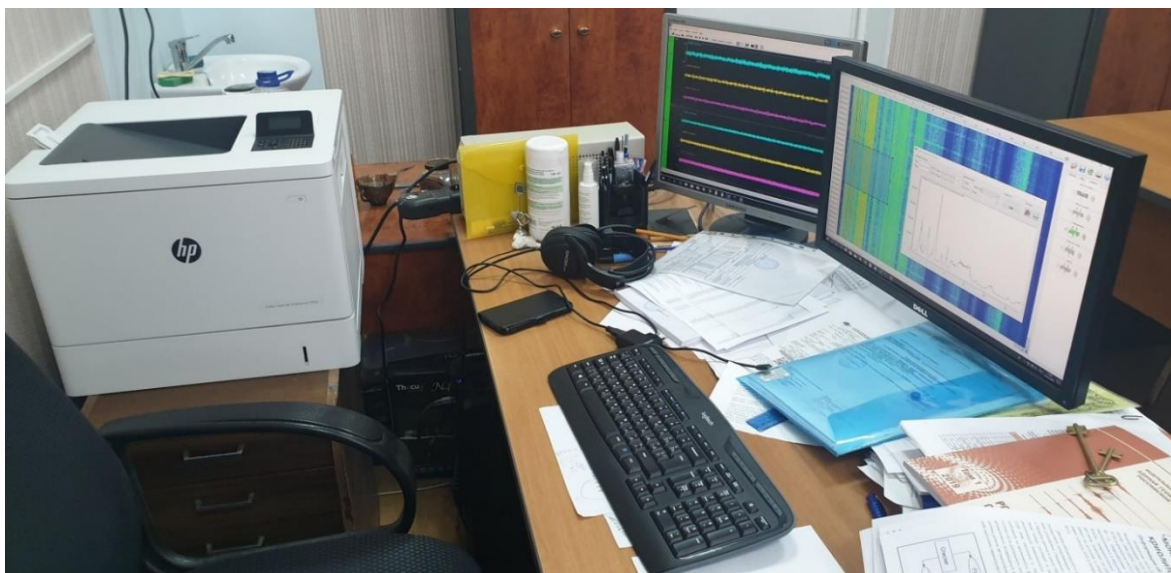


Рисунок 2.2 – Рабочее место специалиста УНУ, анализ и обработка данных

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 рисунок 2.5.

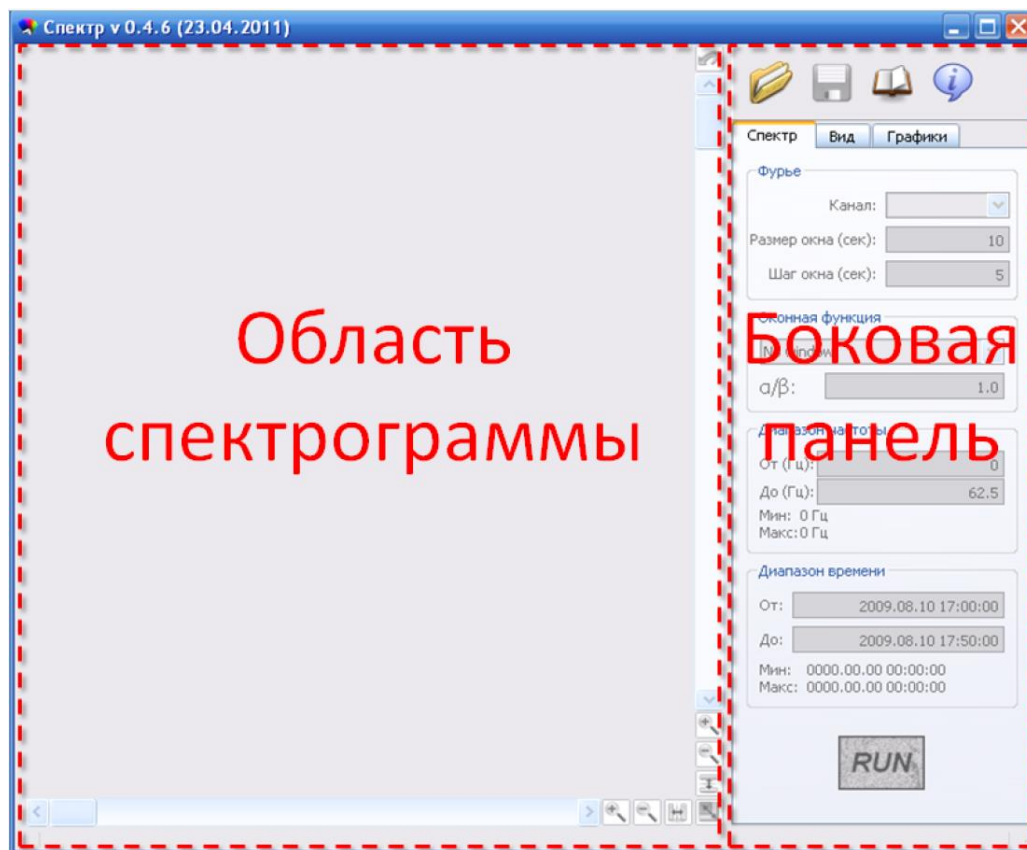


Рисунок 2.5 – Главное окно программы «Spectrum»

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, Posa-A, MiniSeed

Форматы выходных файлов: Vibr2, Байкал-10, Posa-A, 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.

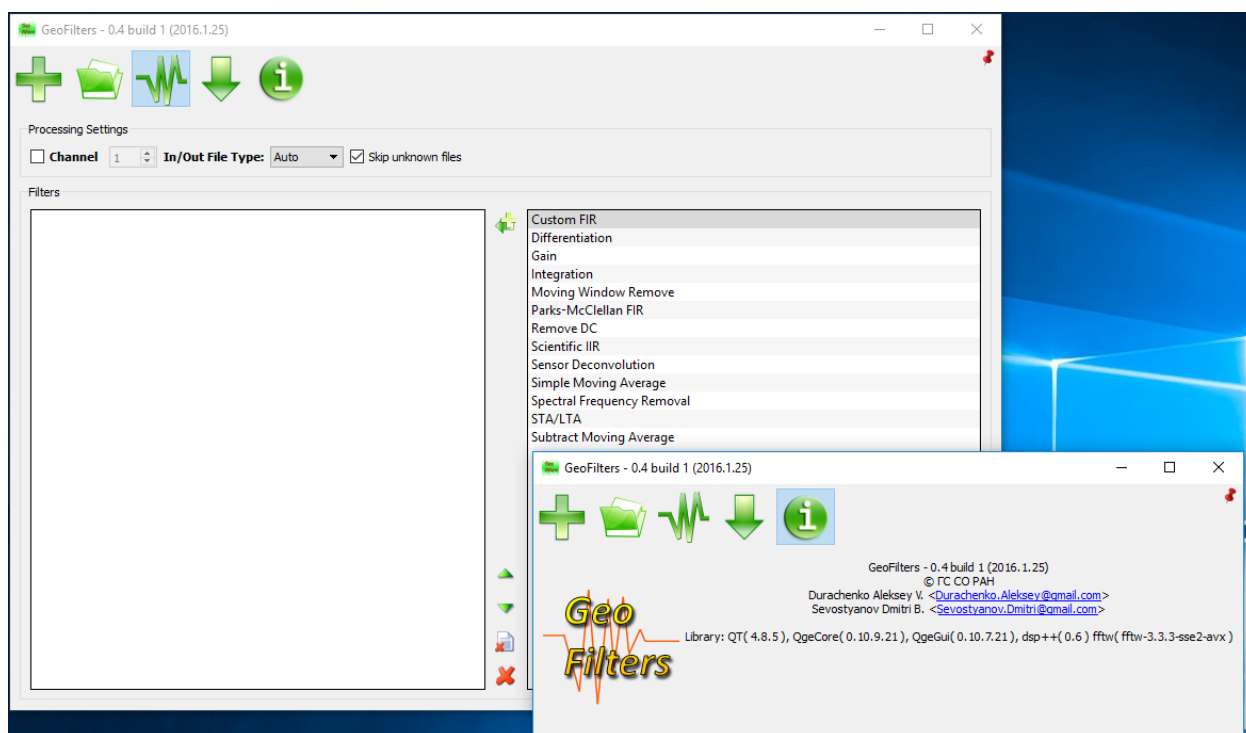


Рисунок 2.6 – Главное окно программы «GeoFilters»

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.

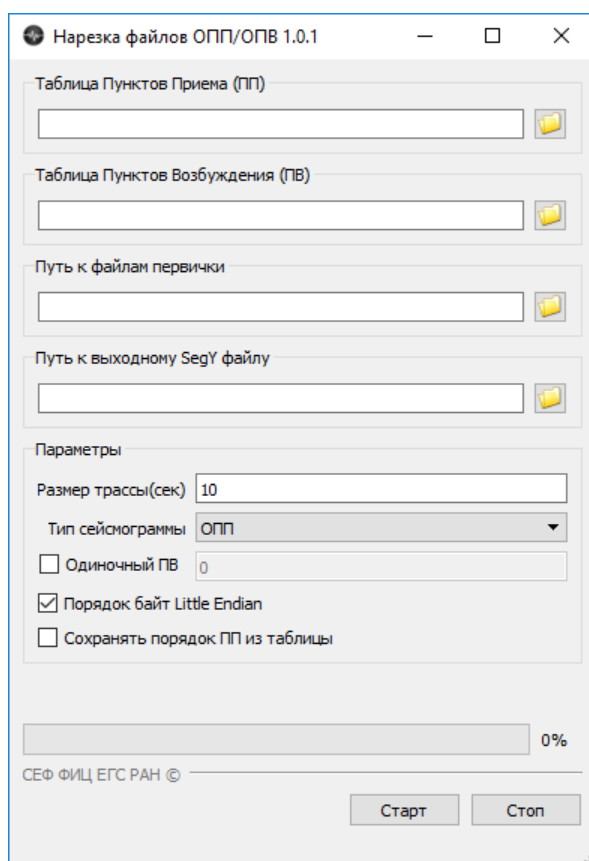


Рисунок 2.7 – Главное окно программы «SSlicer»

Программа «RadExPro»

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

Разработчик: ООО «Деко–геофизика СК»

Назначение: обработка 3D/2D данных сейморазведки, 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.

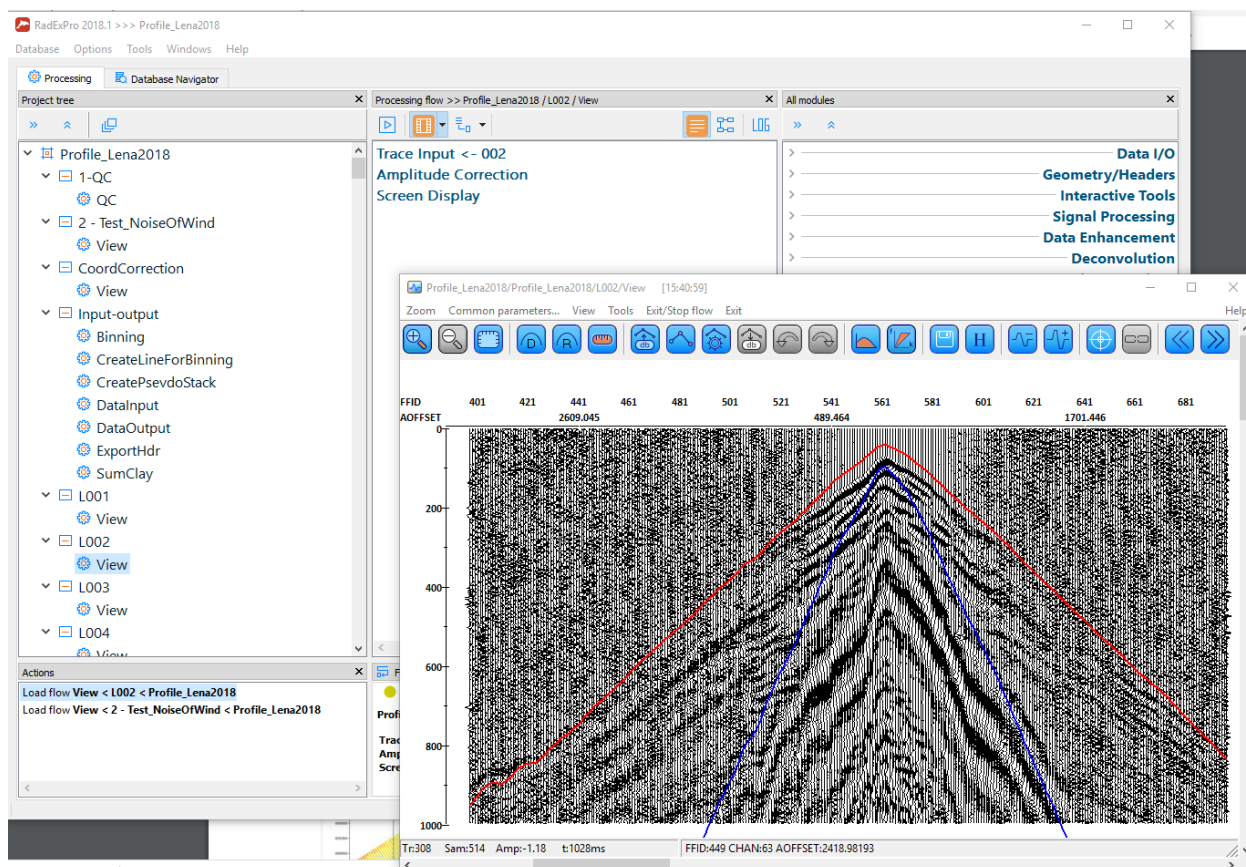


Рисунок 2.8 – Главное окно программы «RadexPro»

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	2	3
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 2021 Г

3.1 Разработка способа оценки сейсмостойкости зданий и сооружений, основанного на методе когерентного восстановления полей стоячих волн

Для долгосрочной эксплуатации инженерных зданий и сооружений необходим их технический контроль, в силу влияния на них различных факторов, как естественных, так и техногенных. Данная работа направлена на возможность контроля состояния жилого здания, путем мониторинга, основанного на изучении его собственных частот.

Предметом исследования является трехподъездный десятиэтажный жилой дом по адресу: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 28, на десятом этаже которого установлен регистратор «Байкал-8» с трехкомпонентным сейсмоприемником GD-4.5. Направление компонент: X – вдоль длинной части сооружения, Y – вдоль узкой части сооружения, Z – вертикально.

Ввиду того, что наверху сооружения максимальные колебания, а у основания здания они практически отсутствуют, то за нижнюю опорную точку возьмем сеймостанцию «Ключи», которая расположена в посёлке Каменушка Новосибирской области, в 9 км от объекта исследования, где находится аналогичная аппаратура, установленная на десятиметровую трубу скважины со следующей ориентацией осей: Z – вертикально, X – север и Y – восток. Расположение станций показано на рисунке 3.3.

Для обработки полученных данных использовалось программное обеспечение SpectrumSeism, разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Это программное обеспечение позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы, позволяя определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

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

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 120$ с, шаг окна 20 с).

Для определения собственных частот изучаемого объекта были построены амплитудно-частотные спектры, по которым определены собственные частоты здания (рисунок 3.1).

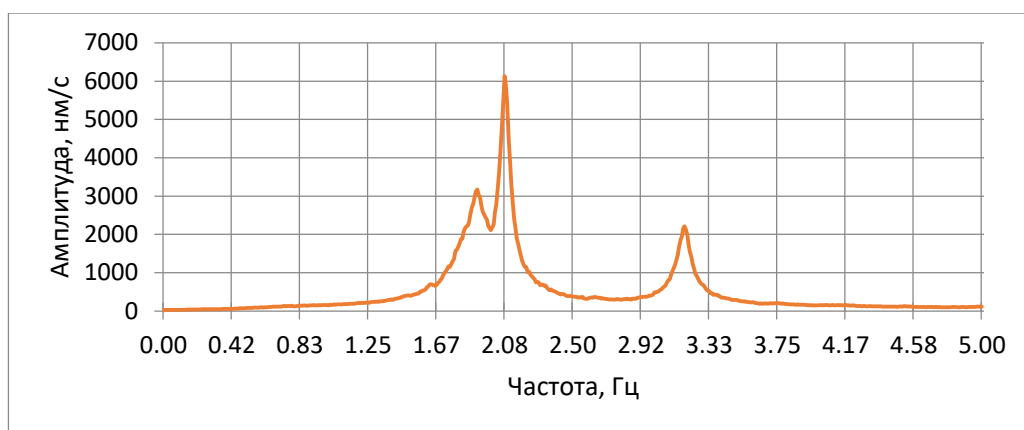


Рисунок 3.1 – Амплитудно-частотный спектр сейсмической записи для дома по ул. Пирогова д. 28, в промежутке от 0 до 5 Гц, Y-компонента

Установлено, что на одну из собственных частот (а именно, 2-ю моду) накладывается сигнал от компрессора, принадлежащего Институту физики полупроводников им. академика А.В. Ржанова СО РАН, который осуществляет накачку ёмкостей сжатым воздухом. Он излучает частоту 2.0833 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 3.2).

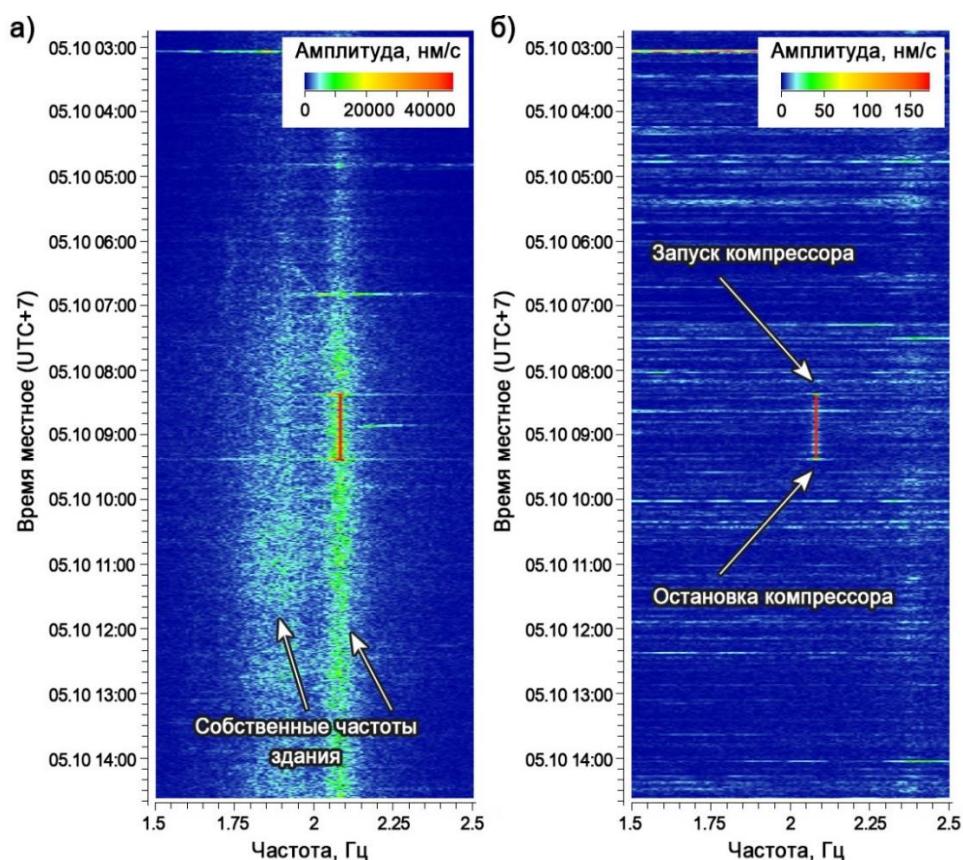


Рисунок 3.2 – Спектрограммы сигналов за 05.10.21, в вырезке от 1.5 до 2.5 Гц. (а) по ул. Пирогова д. 28, Y-компонента (б) сейсмостанция Ключи, X-компонента

На рисунке 3.2а видно две вертикальные полосы в районе 1.9 и 2.08 Гц, прослеживающиеся на всем протяжении спектрограммы, это первая и вторая собственная частота здания, называемые также модами колебаний. Помимо этого, видно, что на записи присутствует часовой сигнал (примерно с 8:22 до 9:22) с очень высокой амплитудой, это и есть момент работы компрессора. Рисунок 3.2б представляет собой спектрограмму со станции Ключи, на которой также хорошо прослеживается данный сигнал.

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.

Расположение всех пунктов наблюдения, приведено на рисунке 3.3.

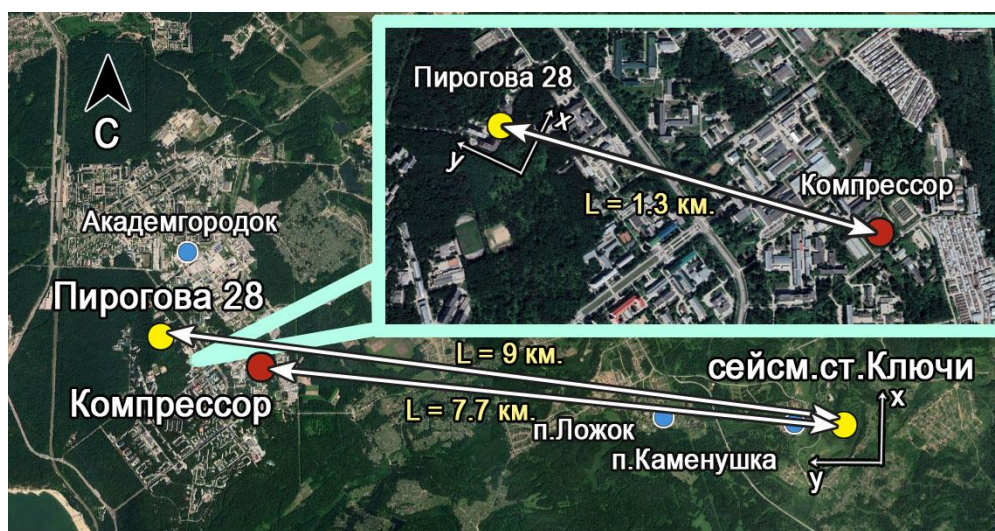


Рисунок 3.3 – Схема расположения объектов наблюдений

Изучив все, имеющиеся по сейсмостанции Ключи, сейсмические записи, было определено, что данный компрессор включается с периодичностью несколько раз в месяц, в среднем около пяти, длительностью в районе часа, всегда в утренние часы. Установлено, что интересная для нас собственная частота дома, а именно, вторая мода, может изменяться в пределах от 2.05 до 2.2 Гц, возможно, это происходит из-за атмосферного влияния (температурных воздействий), поэтому ее совпадение с частотой компрессора происходит не всегда (рисунок 3.4).

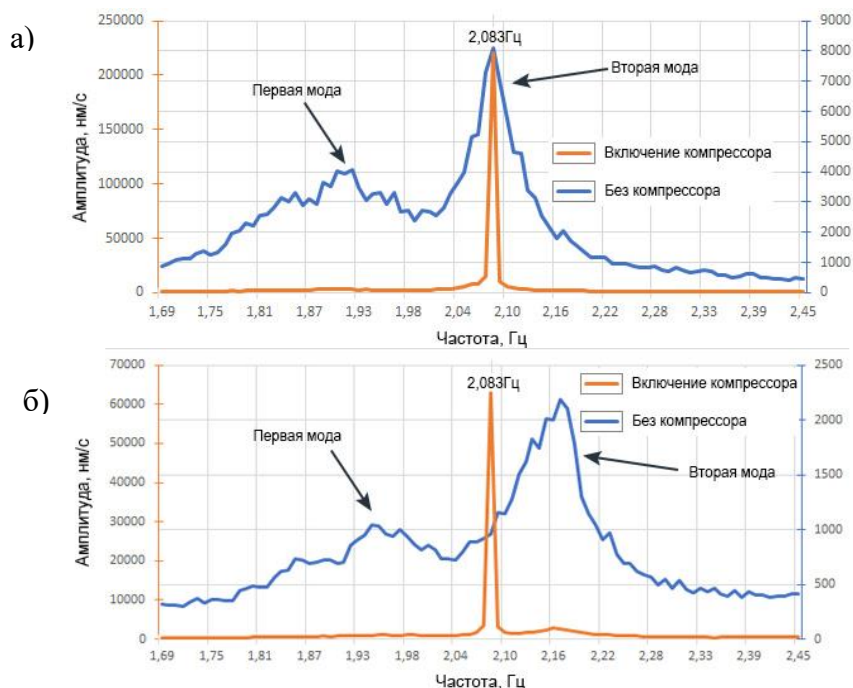


Рисунок 3.4 – Графики изменения амплитуд собственных частот здания в пределах от 1.69 до 2.45 Гц, при включении компрессора (оранжевый) и после выключения (синий) (а) излучаемая компрессором частота совпадает с собственной частотой здания, 05.10.21, Y-компонента (б) не совпадает с собственной частотой здания. 10.02.21, Y-компонента

Из графиков видно, что когда излучаемая компрессором частота совпадает с собственной частотой здания, а именно, второй модой, амплитуда совпавшего сигнала намного больше, чем когда они не совпадают. Чтобы в этом убедиться, произведем численный расчет для двух описанных выше вариантов.

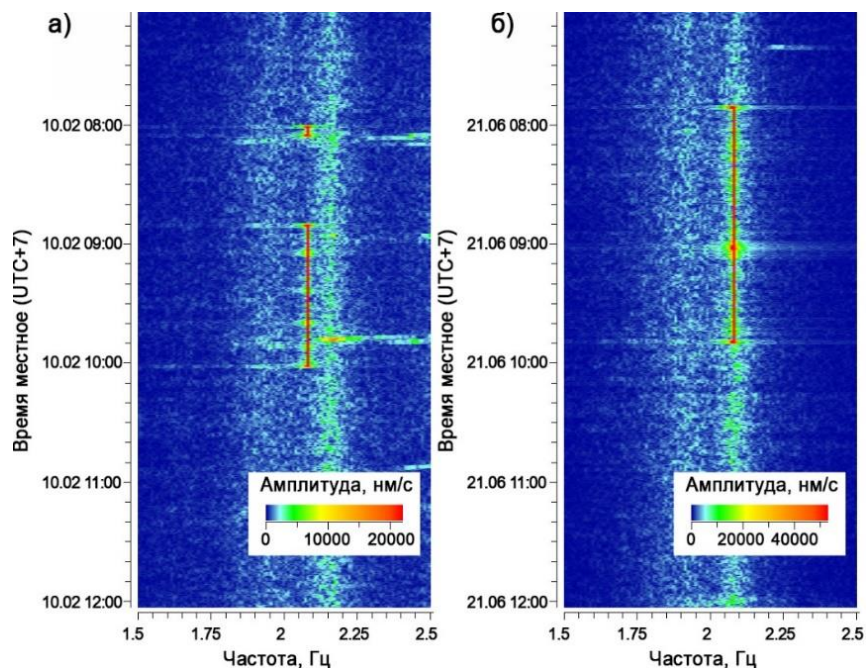


Рисунок 3.5 – Спектрограммы сигналов для здания по ул. Пирогова д. 28, (а) когда излучаемая компрессором частота не совпадает с собственной частотой дома (10.02.21), (б) когда совпадает (21.06.21)

Для того, чтобы не изучать каждую координату отдельно, будем находить модуль вектора координат, по следующей формуле:

$$|xyz| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.2)$$

Таблица 3.1 – Максимальные амплитуды сигнала при работе компрессора

Дата	10.02.2021 (несовпадение частоты)				21.06.2021 (совпадение частоты)			
Координата	X	Y	Z	Модуль	X	Y	Z	Модуль
Амплитуда сигнала на Пирогова	38759	62873	4031	73969.74	52592	198795	2937	205655
Амплитуда сигнала на ст. Ключи	112	66.83	52.57	140.62	150	60.1	25.9	163.65

Данные по координатам получены путем часового усреднения спектра сигнала по каждой компоненте, в момент работы компрессора, и нахождения его максимальной амплитуды.

Из таблицы 3.1 берем отношение модуля числа на верхнем этаже исследуемого здания к нижнему этажу, в роле которого выступает ст. Ключи, так для 10.02.21 г., когда у нас собственная частота дома не совпадает с частотой компрессора:

$$|\text{несовпадение}| = |\text{Пирогова}|/|\text{ст. Ключи}| = |73969.74|/|140.62| = 526$$

для 21.06.21г, где уже происходит совпадение частоты получаем:

$$|\text{совпадение}| = |\text{Пирогова}|/|\text{ст. Ключи}| = |205655|/|163.65| = 1256.6$$

Отсюда следует, что при совпадении частоты компрессора с собственной частотой дома, происходит усиление амплитуды сигнала более, чем в 2 раза.

По итогу проведенных исследований, были выявлены негативные факторы для общего состояния дома, в виде компрессора, принадлежащего Институту физики полупроводников им. академика А.В. Ржанова СО РАН, находящегося на расстоянии 1.3 км от объекта исследования и излучающего монохроматический сигнал частотой 2.083 Гц, который может совпадать с собственной частотой здания, таким образом, вызывая резонансное явление. Конечно, можно полагать, что столь кратковременные воздействия не сильно оказывают влияние на конструкцию дома, к тому же собственная частота не всегда попадает в резонанс, но следить за этим, для дальнейшего определения рисков, необходимо.

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

Для контроля целостности конструкций инженерных сооружений широко распространены способы мониторинга, основанные на анализе изменений во времени различных параметров поля стоячих волн (прежде всего, собственных частот). В то же время, вариации поля стоячих волн могут быть связаны не только с появлением каких-либо дефектов в конструкции, но и с другими факторами. Так, различные исследования на Красноярской, Саяно-Шушенской, Зейской и Чиркейской ГЭС, а также на аналогичных крупных плотинах в других странах установили, что значения собственных частот значительно меняются в зависимости от уровня водохранилища (далее – УВБ). Также в меньшей степени на значения собственных частот влияют другие факторы – температура, образование льда со стороны верхнего бьефа плотины и др. Эти изменения являются сезонными и не связаны с дефектами в теле плотин. Выделить сезонные вариации и разделить их от связанных с дефектами – одна из ключевых задач при разработке методики мониторинга состояния плотин и других инженерных сооружений.

Мониторинг собственных частот проводится либо по данным сейсмических станций, установленных в теле плотины, либо по данным станций глобального сейсмологического мониторинга, расположенных в непосредственной близости от плотины. Последний способ, несмотря худшее качество полезного сигнала (гораздо более высокий уровень внешних шумов), позволяет не ограничивать мониторинг сроком договора с эксплуатирующей плотину компанией, а иметь непрерывный многолетний массив данных.

Так, в данном отчете мониторинг собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС проводится по данным сейсмической станции Черёмушки, расположенной в 4.4 км к северо-востоку от плотины. Наблюдения на этой станции ведутся уже более 20 лет (с 2001 года), что позволило собрать практически непрерывный массив данных частот собственных колебаний плотины ГЭС за этот период.

Отбор частот собственных колебаний плотины ведётся по усреднённым с определённым шагом спектрам. В период с 2001 по 2015 год включительно, спектры усреднялись с интервалом в 5 дней (итого 73 наблюдения в год), а с 1 января 2016 года – интервал усреднения был сокращён до 1 суток, таким образом, резонансные частоты собственных колебаний плотины стали фиксироваться ежедневно, и их изменения можно проследить с гораздо большей точностью. Это стало возможным в результате замены сейсмической станции на более современную, с лучшей разрешающей способностью.

Несмотря на удалённость сейсмической станции от плотины (что неизбежно повысило уровень микросейсм относительно полезного сигнала), по спектрам чётко прослеживаются амплитудные пики, соответствующие частотам собственных колебаний ГЭС с 1-й по 7-ю моду.

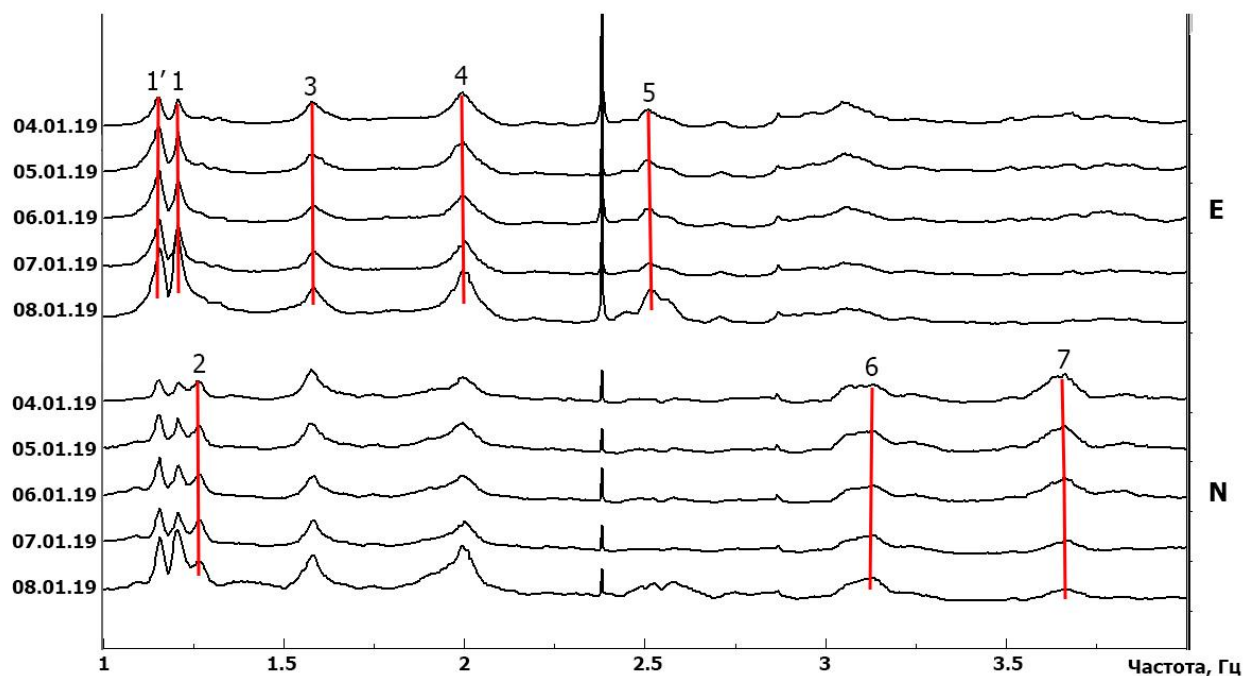


Рисунок 3.6 – Амплитудные пики, соответствующие частотам стоячих волн собственных колебаний ГЭС, на усреднённых спектрах сейсмограмм. Над пиками подписаны номера соответствующих мод

Как уже неоднократно было отмечено в более ранних публикациях, у резонансных частот собственных колебаний плотины ГЭС есть однозначная сезонная изменчивость, связанная, в первую очередь, с уровнем верхнего бьефа плотины (УВБ). В периоды заполнения водохранилища, частоты собственных колебаний снижаются, а в периоды сработки (снижения уровня) водохранилища – растут. Это объясняется влиянием на плотину присоединённой массы водохранилища. При идеальной системе (когда присоединённая масса воды изменяется пропорционально уровню водохранилища и отсутствуют какие-либо иные эффекты), зависимость резонансных частот колебаний плотины от УВБ должна быть линейной, но, в реальных условиях, форма графика зависимости резонансных частот плотины от УВБ значительно более сложная (рисунок 3.7)

Из анализа графиков прежде всего следует, что характер изменения сильно различается у разных мод. На наиболее точно прослеживаемых 3-й, 4-й и, в меньшей степени, 5-й модах, в период заполнения водохранилища, частота изменяется почти линейно, но с небольшим запаздыванием изменений частоты от хода изменений УВБ. Это

придаёт графику эллипсоидальную форму. Причина запаздывания – в инертности тела плотины, которое реагирует на изменения уровня водохранилища не сразу, а с некоторой задержкой. Подобный эффект релаксации наблюдался также и на других ГЭС, в частности – на Чиркейской.

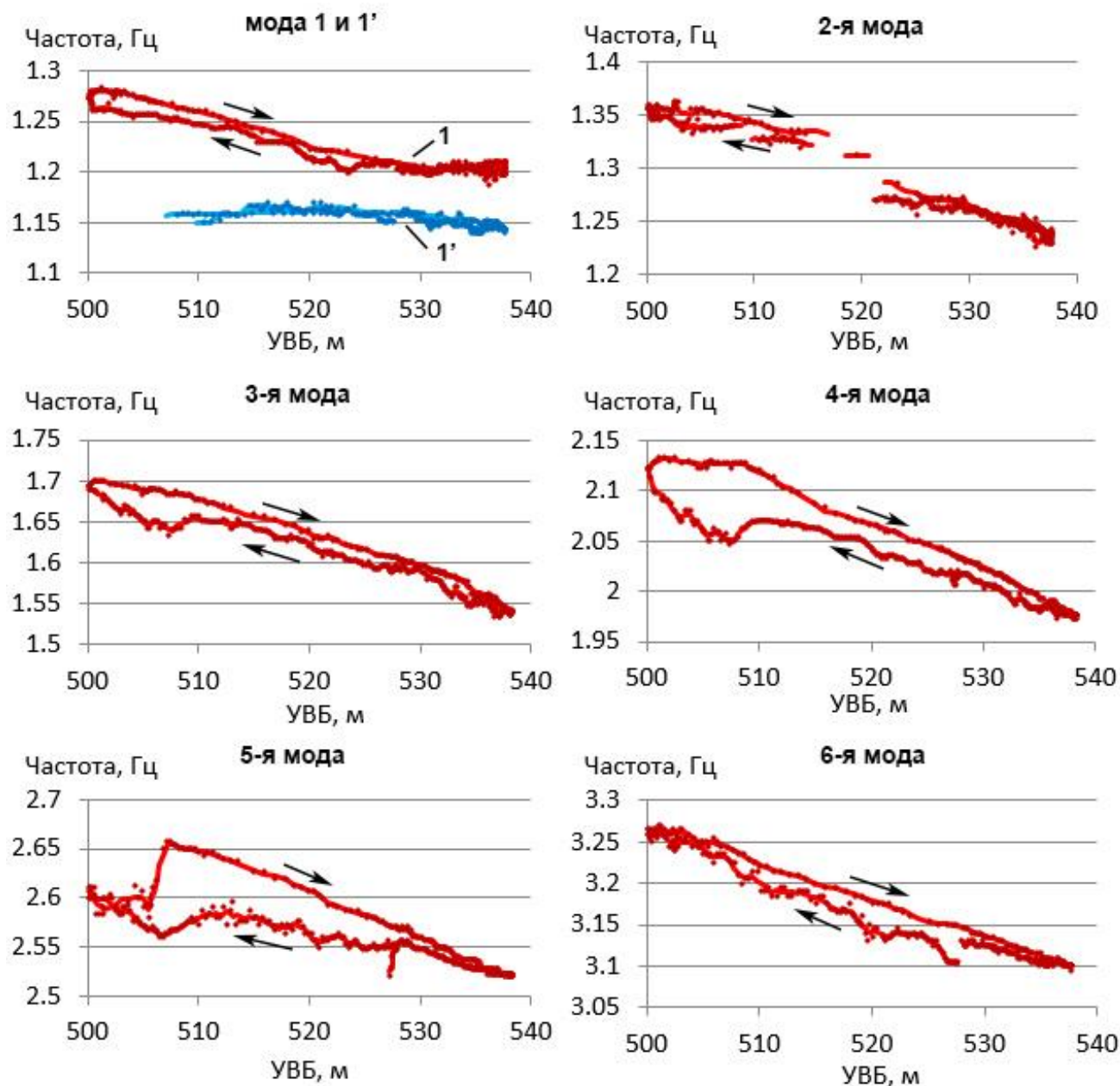


Рисунок 3.7 – Зависимость собственных частот колебаний плотины (1-я – 6-я моды) от УВБ за 2020 год. Точками показаны значения, кривыми – их сглаженная аппроксимация, стрелками – направление изменений с течением времени

Иначе выглядит зависимость частоты от УВБ в периоды сработки водохранилища. Графики гораздо менее «ровные», при снижении УВБ, скорость изменения частоты постоянно меняется: иногда происходит резкий рост, а иногда – небольшое снижение. В диапазоне УВБ от 510 до 500 метров резонансная частота значительно меньше (на 0.05 – 0.08 Гц), чем можно было бы теоретически ожидать, если бы система была идеальной.

Поскольку сработка водохранилища производится в зимний период, то можно предположить, что такое снижение частот собственных колебаний плотины обусловлено образованием льда в верхнем бьефе плотины, что увеличивает её массу. Следует отметить, что кривая принимает эллипсоидальную форму примерно в начале мая, то есть этот момент как раз совпадает со сходом льда в водохранилище. Другим фактором, оказывающим заметное влияние на резонансные частоты плотины ГЭС, возможно, является температура воздуха. Этим можно объяснить небольшие, но резкие и не имеющие корреляции в разные годы изменения резонансной частоты в зимний период. Данное предположение нуждается в дополнительном исследовании и проверке.

Отдельно следует отметить, что характер зависимости 1-й моды от УВБ кардинально отличается от остальных. Во-первых, наблюдается её раздвоение на две (условно названы мода 1 и 1'). Во-вторых, при превышении УВБ отметки примерно 526 – 527 м, значение 1-й моды практически не меняется и держится в пределах 1.2 – 1.21 Гц. На настоящий момент нет полноценного объяснения данному явлению, для этого требуется дополнительное исследование.

Но, помимо сезонных колебаний, в ходе многолетнего мониторинга удалось отследить и многолетние изменения в частотах собственных колебаний плотины. Так, на рисунке 3.8. видно, что за весь период наблюдений с 2001 по 2021 годы резонансные частоты постепенно выросли, примерно на 0.025 – 0.03 Гц. Причём наибольший рост наблюдался в период 2001 – 2010 годов, а затем рост резонансных частот сильно замедлился или практически прекратился. Это свидетельствует о том, что в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС происходят глобальные процессы. Можно предположить, что до, примерно, 2010 года происходил процесс консолидации плотины, который после существенно замедлился.

Для более точного отслеживания именно глобальных многолетних изменений резонансных частот, необходимо отфильтровать регулярные (сезонные) колебания, вызванные описанными выше факторами. Учитывая их многозначность, это очень непростая задача. На первом этапе, было принято решение отследить зависимость резонансной частоты водохранилища от УВБ только в период заполнения водохранилища, когда она изменяется равномерно и синхронно повторяется в разные годы. Так, для 3-й моды резонансные частоты за 2015 – 2020 годы ложатся практически на одну эллипсоидальную кривую (рисунок 3.9).

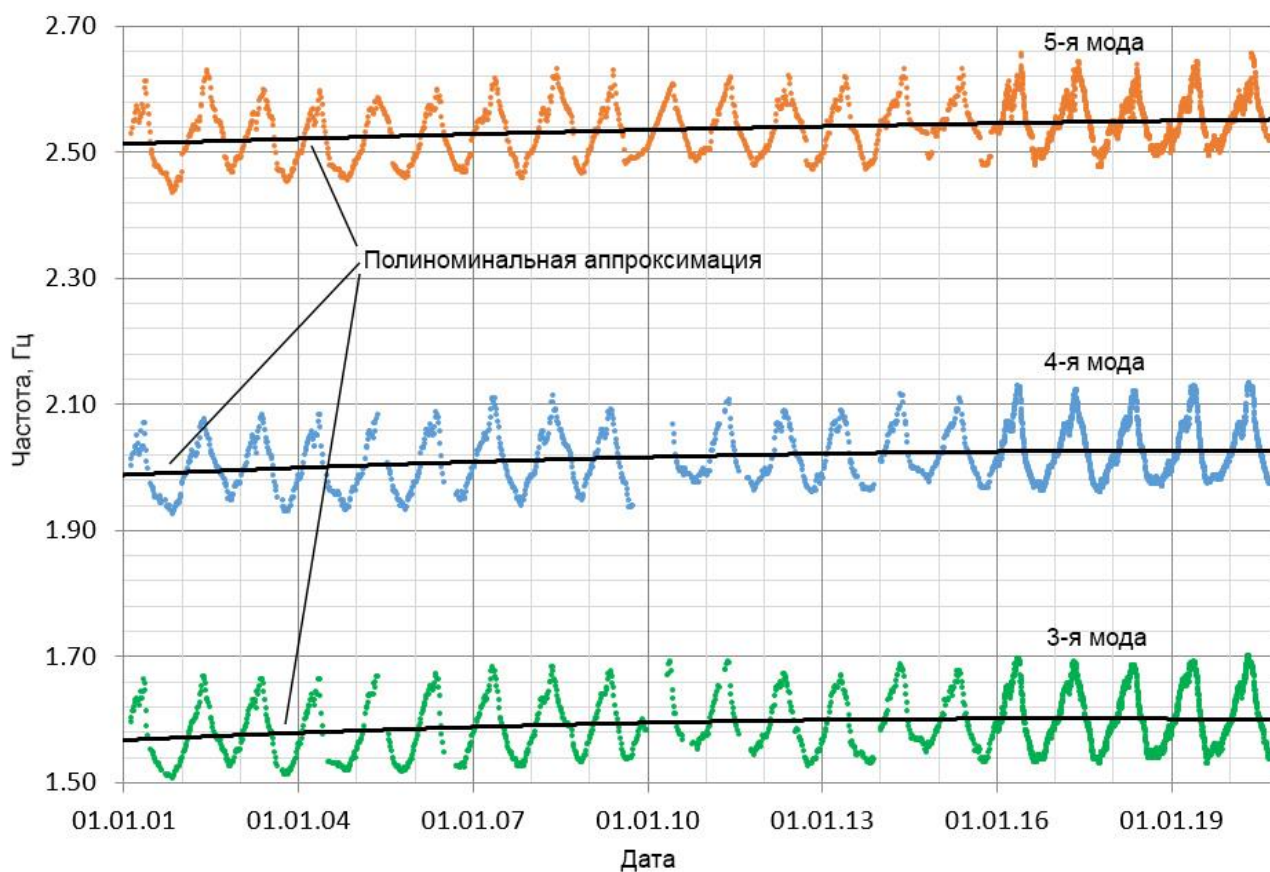


Рисунок 3.8. – Изменения частот собственных колебаний плотины 3-й и 4-й мод и 5-й мод за весь период наблюдений, и их полиномиальная аппроксимация 2-й степени (вида $y=ax^2+bx+c$, где a , b , c – автоматически подобранные коэффициенты)

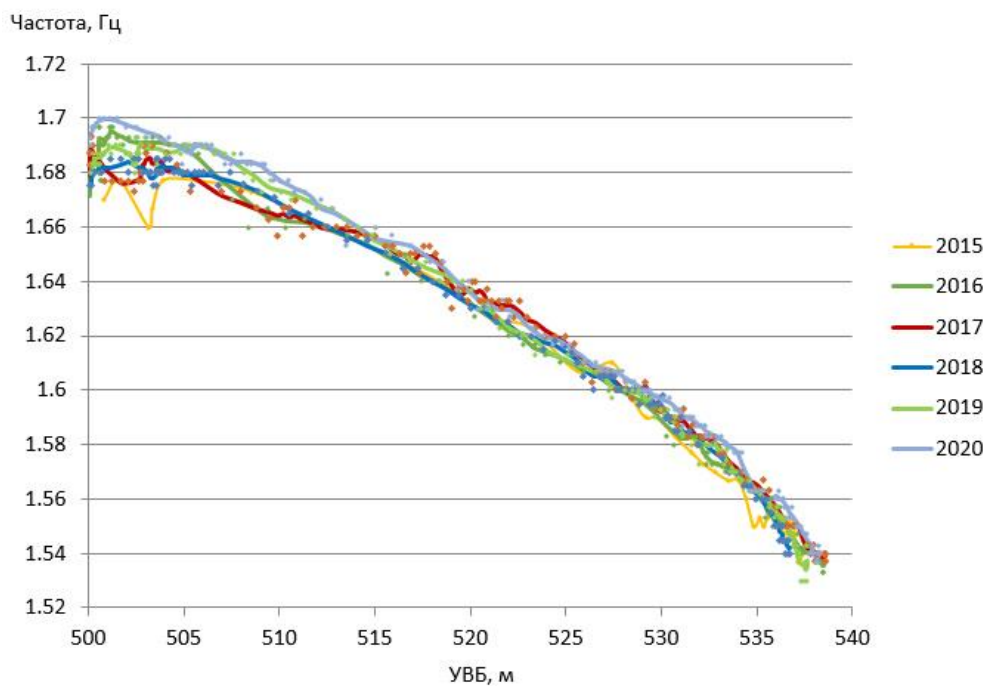


Рисунок 3.9 – Зависимость собственных частот колебаний плотины (3-я мода) от УВБ за 2015 – 2020 годы в периоды наполнения водохранилища

Как уже писали ранее, такая зависимость обусловлена тем, что тело плотины не мгновенно реагирует на изменения уровня водохранилища, а с некоторой задержкой. Если исходить из предположения, что релаксация плотины происходит более-менее равномерно, то введение временного сдвига на определённый период теоретически должно привести к «выполаживанию» кривой. Для проверки данной гипотезы были построены графики зависимости 3-й моды от УВБ со сдвигом 3, 5, 7 и 10 дней, и, в ходе их анализа, было установлено, что наиболее близкими к прямой графики получаются при сдвиге на 3 суток (рисунок 3.10).

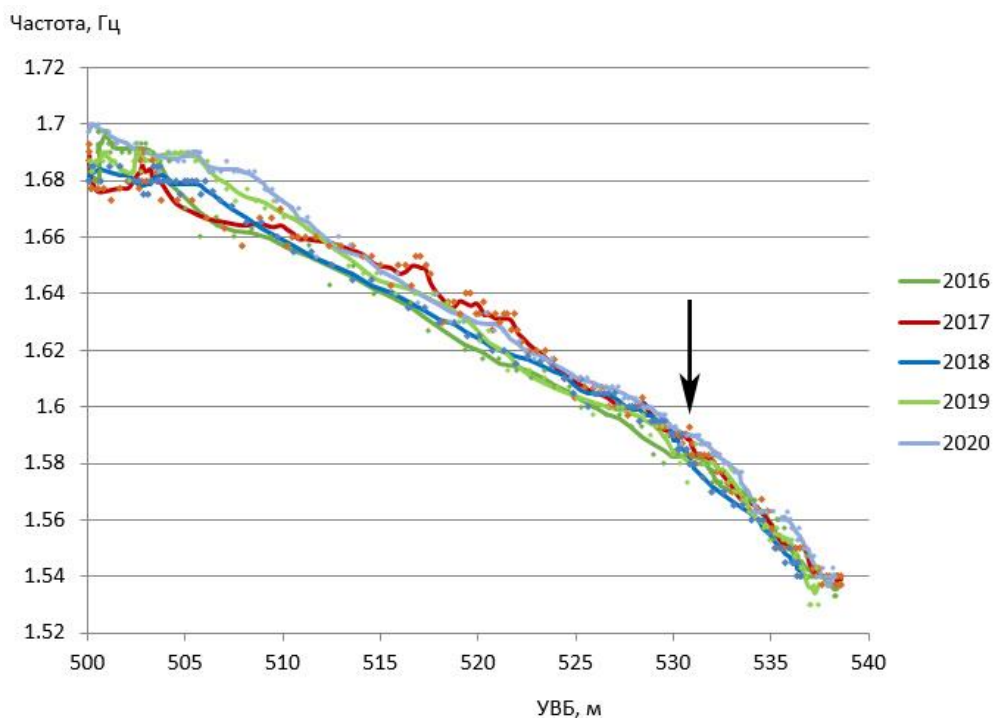


Рисунок 3.10 – Зависимость собственных частот колебаний плотины (на примере 3-й моды) от УВБ за 2016 – 2020 годы в периоды наполнения водохранилища с временным сдвигом 3 суток. Стрелочкой показана точка, где происходит смена линейной зависимости графика на более сложную

Так, в диапазоне УВБ 506 – 530 м, график за каждый год удалось аппроксимировать кривой с коэффициентом детерминации $R^2 > 0.98$ (рисунок 3.11).

При высоком уровне водохранилища (при отметках УВБ свыше 530 – 531 м), данная линейная зависимость нарушается, кривая графика начинает спадать значительно быстрее. Объяснить это можно сложной формой плотины и водохранилища. Плотина в продольном сечении имеет форму обратной трапеции и существенно расширяется в верхней части. Из-за этого, при увеличении УВБ, объём водохранилища (а, следовательно, и оказывающая воздействие на плотину присоединенная масс воды) возрастает непропорционально сильнее, что приводит к более быстрому снижению частоты.

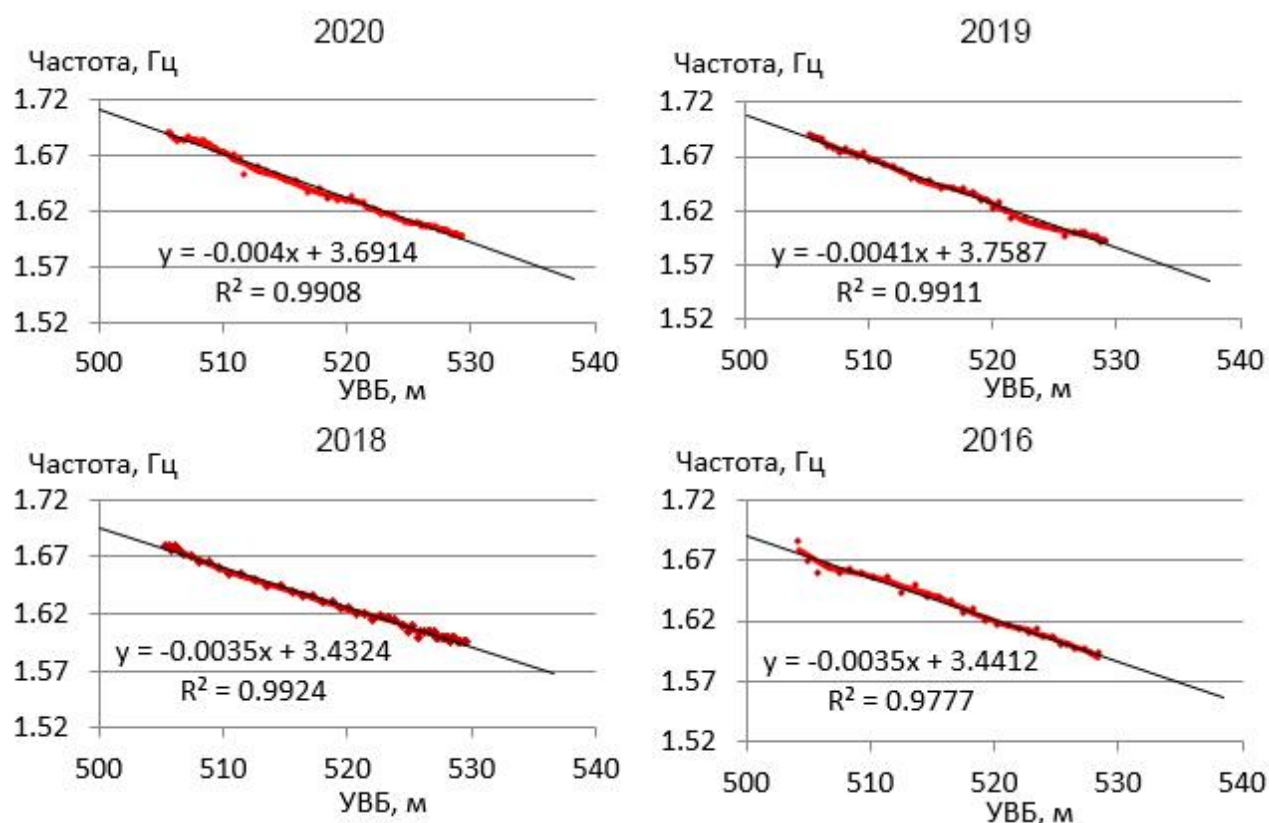


Рисунок 3.11 – Линейная аппроксимация кривой зависимости 3-й моды от УВБ со сдвигом 3 суток в диапазоне УВБ 506 – 530 м за 2020, 2019, 2018 и 2016 годы

Расчёт конкретной аппроксимирующей кривой позволяет более точно отследить характер и форму многолетних изменений резонансных частот плотины. Если из графика зависимости частоты от времени вычесть уравнение аппроксимации, то, в идеальном случае (при отсутствии многолетних изменений и прочих факторов), он должен лечь на прямую, равную 0. Если же имеются многолетние изменения, то они покажут отклонение от нуля.

Для построения такого графика, в качестве эталонной, была взята кривая зависимости резонансной частоты от УВБ за 2020-й год. При временном сдвиге на 3-е суток, её с большой точностью ($R^2 = 0.99$) можно описать линейным уравнением вида:

$$y = -0.0040x + 3.6914,$$

где x – УВБ с временным сдвигом 3 суток, y – аппроксимация 3-й моды. Вводя это уравнение в график изменения резонансной частоты от времени, получаем отклонение 3-й моды от эталонной (рисунок 3.12).

Как видно из графика, в целом глобальные (многолетние) изменения частоты не значительны, и, если брать любые близко расположенные годы, они значительно меньше случайных отклонений, и строгим диагностическим признаком являться не может. Но при этом чётко прослеживается определённый глобальный тренд на постепенное возрастание

резонансной частоты. За 20 лет она выросла примерно на 0.03 Гц: наибольший рост наблюдался в период 2001 – 2010 годов (более 0.02 Гц), а в последующие годы рост замедлился, но сохранился, в т.ч. и наблюдается в последние 5 лет. Возможно, также присутствуют колебания с периодом 3 – 4 года, но точность измерений не позволяет отследить их однозначно.

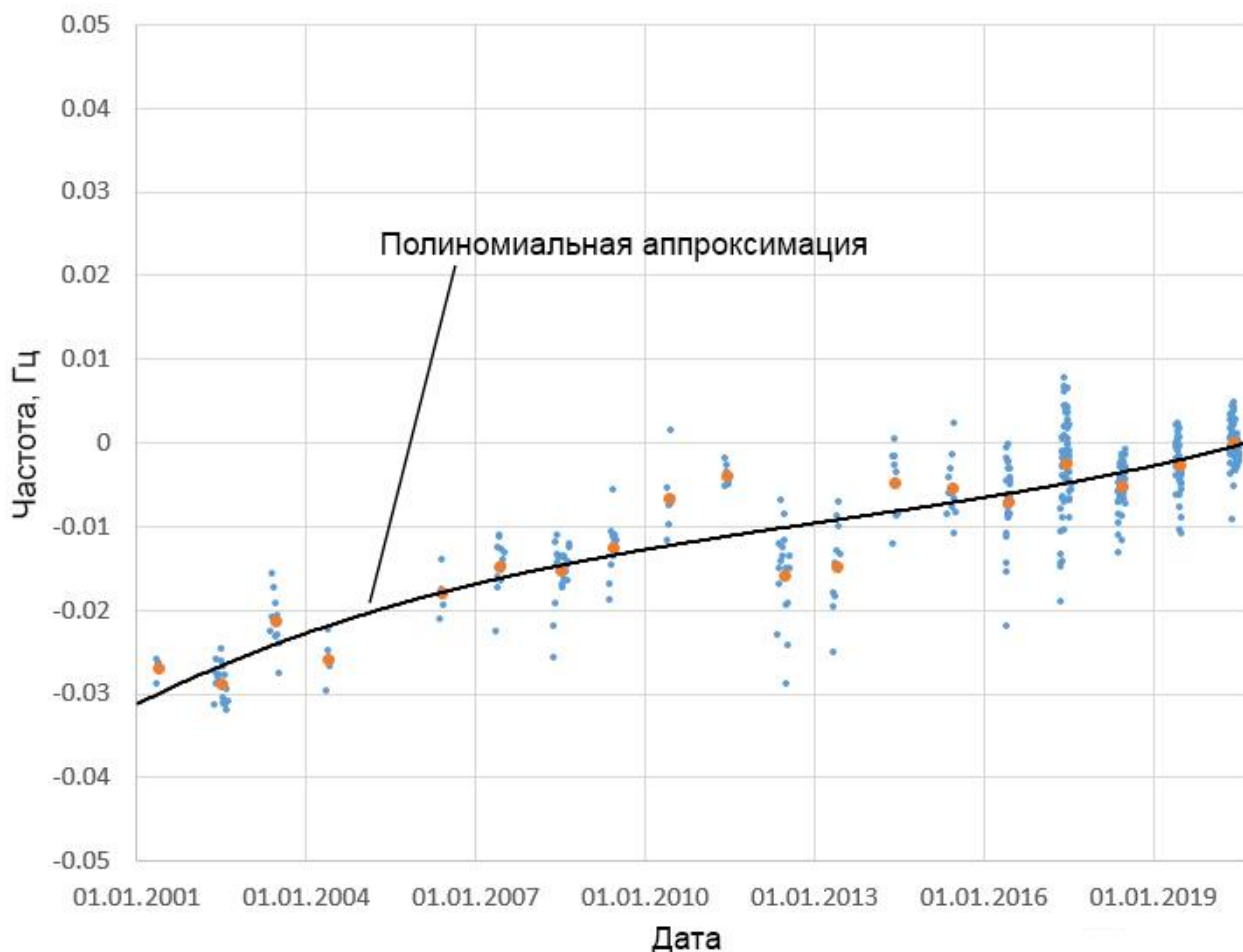


Рисунок 3.12 – Отклонение резонансной частоты от эталонной (2020-й год) за период наблюдений 2001 – 2020 годы. Диапазон УВБ от 506 до 530 м в периоды заполнения водохранилища. Красным показаны средние значения за год, чёрной кривой – полиномиальная аппроксимация 2-й степени

Таким образом, в ходе проведённых исследований получены следующие результаты:

Построен непрерывный диапазон данных резонансных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС, с 2001 года по настоящее время.

Установлено, что изменения частот собственных колебаний плотины ГЭС носят как глобальный (многолетний) характер, так и сезонный. Сезонные колебания определяются, прежде всего, изменениями уровня верхнего бьефа (УВБ) водохранилища, в меньшей степени – образованием льда, температурой воздуха и другими факторами.

Проанализирована зависимость резонансной частоты 3-й моды от УВБ в период заполнения водохранилища. Установлено, что, при введении временного сдвига 3 суток, данную зависимость, в диапазоне УВБ от 506 до 530 м, можно с большой точностью описать линейным уравнением.

С целью разработки методики мониторинга состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС, было вычислено отклонение реальной частоты от эталонной. Последняя получена путём линейной аппроксимации зависимости 3-й моды от УВБ в диапазоне УВБ 506 – 530 м, со сдвигом 3 суток за 2020 год. Было установлено, что глобальные изменения носят очень медленный, но заметный характер. За 20 лет наблюдений резонансная частота увеличилась примерно на 0.03 Гц, при этом рост продолжается и в настоящее время. Это может свидетельствовать о том, что процессы консолидации плотины продолжаются до сих пор.

Для разработки системы мониторинга плотины Саяно-Шушенской ГЭС по резонансным частотам стоячих волн, требуется дальнейший, более детальный, анализ характера изменений частот в зависимости от УВБ и прочих факторов.

3.3 Разработка методов формирования модели инженерного сооружения по данным метода стоячих волн

3.3.1 Обследование сооружений методом стоячих волн

Раздел составлен по материалам исследования, выполненного Сейсмологическим филиалом ФИЦ ЕГС РАН в рамках Государственного задания № 075-00576-21, с использованием данных, полученных на УНУ СИЗК МАК (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>), и направленного на развитие метода инженерно-сейсмического мониторинга целостности сооружений.

Цель исследования:

- Демонстрация технологии обследования сооружений методом стоячих волн, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН.
- Демонстрация технологии мониторинга целостности сооружения по изменению частот собственных колебаний сооружения

Задачи исследования:

- Проведение регистрации микросейсмических колебаний на крыше здания.
- Выполнение обработки и интерпретации полученных данных методом стоячих волн, разработанным в ФИЦ ЕГС РАН.

Методика проведения исследований

Основной задачей исследования являлось определение динамических характеристик собственных колебаний здания, расположенного по адресу: г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 28 (рисунок 3.13). Объект представляет собой 10-этажное здание, шириной 13 м и длиной около 70 м.

При исследовании использовался метод стоячих волн [2], основанный на выделении резонансных частот обследуемого объекта и позволяющий определять основные динамические параметры колебаний здания или сооружения (собственные частоты и формы колебаний). Реализация плотной схемы наблюдений позволяет построить распределение собственных колебаний по выбранным сечениям, определить аномалии собственных форм, тем самым выделить возможные дефекты конструкции.

Суть использованного метода стоячих волн состоит в следующем: регистрация колебаний здания или сооружения под воздействием микросейсм ведется одновременно в опорной и группе перемещаемых точек. Такими наблюдениями исследуемый объект можно детально покрыть с 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.

В качестве регистрирующей аппаратуры использовались комплекты 3-канальных автономных регистраторов «Байкал-7», оснащенных велосиметрами GD-4.5 (разработанных и произведенных в ФИЦ ЕГС РАН).



Рисунок 3.13 – Схема расположения исследуемого здания (а) и его внешний вид (б), (в) – вид с обратной стороны

Для определения динамических характеристик здания была реализована схема наблюдений, приведенная на рисунке 3.14. Измерения проводились 25 июня 2021 г.

1. По крыше здания было отработано 3 профиля по 27 точек регистрации. Длина каждого профиля совпадает с длиной здания и составляла около 70 м. Расстояние между профилями 6 м, при ширине здания 13 м.

Общее число точек измерения составило 81.

Использовалось 3 опорных точки: 1-ая устанавливалась у подвала, по центру здания; 2-ая и 3-ья – на 10-м этаже, вблизи т. 9 и т. 18 первого профиля, соответственно.

Компонента X датчиков всех точек направлялась поперек здания, компонента Y – вдоль здания, Z – вертикально.

Основные параметры регистрации для метода стоячих волн, в соответствии с опытом на аналогичных объектах, были приняты следующими:

1. Частотный диапазон записи – 0.5-50 Гц (частота дискретизации – 200 Гц, параметры фильтров – частота среза 45 Гц).
2. Продолжительность одного сеанса регистрации колебаний – 600 секунд.

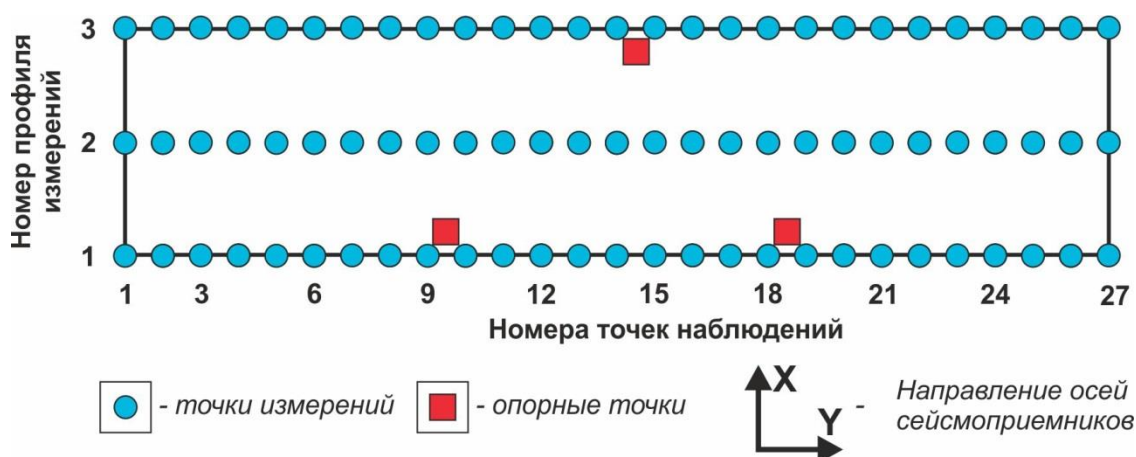


Рисунок 3.14 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний здания

На первоначальном этапе, перед проведением измерений, было проведено тестирование аппаратуры на идентичность (рисунки 3.15 (а,б)). Для этого, все приборы были помещены в одну точку (в окрестности точки № 18 профиль № 1), и проведена одновременная регистрация микросейсмических колебаний, в течение 10 минут. 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.

На последующем этапе, были установлены опорные точки, и произведены измерения в 81 точке, по 10 минут в каждой (рисунок 3.15(в)). Измерения велись одновременно 8-ю регистраторами, общая продолжительность составила около четырех часов (включая технические перерывы).



Рисунок 3.15 – Фотографии процесса проведения измерений: (а) – процесс программирования аппаратуры; (б) – пример проведения теста на идентичность; (в) – проведение измерений на крыше здания

По завершении работы, регистраторы отвозились в лабораторию СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, где производилось считывание данных, проверка качества, архивирование, также дальнейшая углубленная обработка и интерпретация материала.

Результаты обследования здания методом стоячих волн

Как отмечалось, для определения параметров собственных колебаний здания, применялся метод стоячих волн. Первичные записи микросейсмических колебаний были приведены к единому времени регистрации по методике [2;3]. Далее были рассчитаны амплитудные и фазовые спектры микросейсмических колебаний по трем компонентам. По этим спектрам были определены частоты собственных форм колебаний здания, амплитуды ускорений на этих частотах.

На рисунке 3.16 представлено спектрально-пространственное изображение поля стоячих волн по профилю на 10-м этаже здания, по трем компонентам. В Таблице 3.2 приведены частоты выделенных собственных колебаний. Всего выделено шесть собственных частот для X-компоненты и две – для Y-компоненты, в вертикальном направлении стоячие волны не формируются.

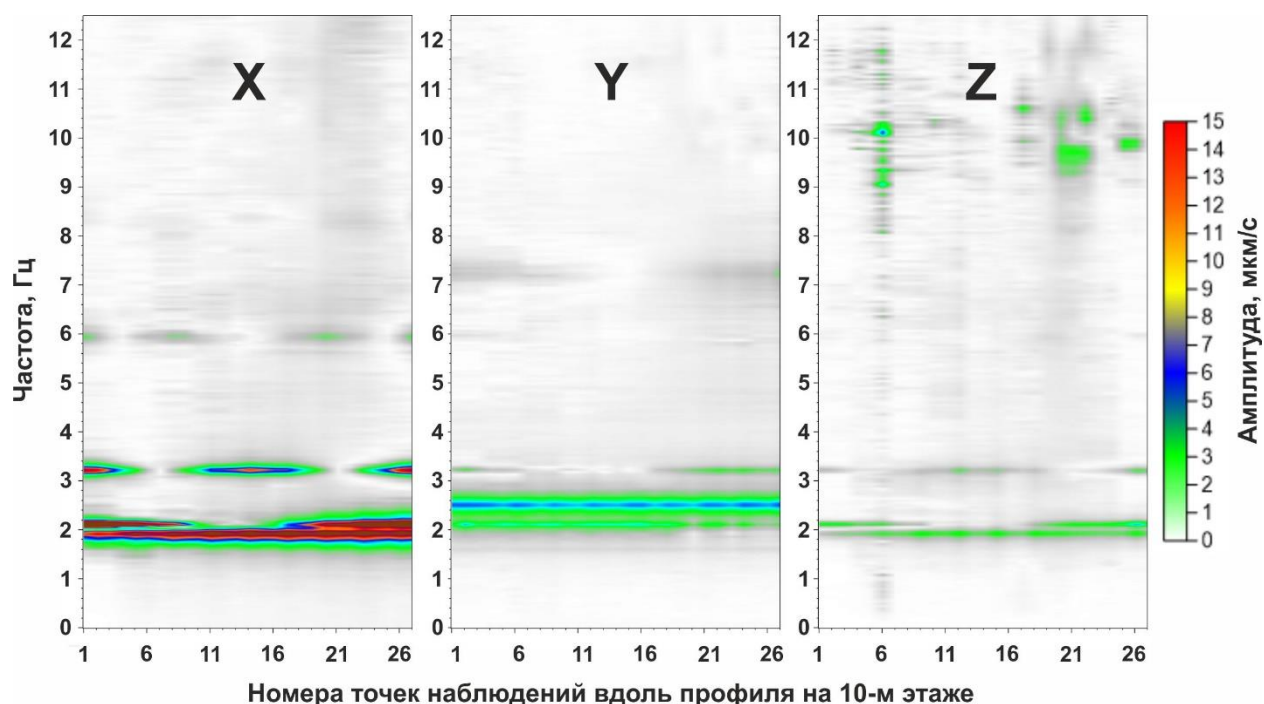


Рисунок 3.16 – Спектральное представление поля стоячих волн вдоль профиля на 10-м этаже здания

Таблица 3.2 – Сведения о значениях собственных частот здания

X (поперек здания)		Y (вдоль здания)	
Номер формы	Частота, Гц	Номер формы	Частота, Гц
1	1.91	1	2.50
2	2.10	2	7.25
3	3.19		
4	5.93		

По амплитудным спектрам были построены карты распределения микросейсмических колебаний на частотах собственных форм. Результаты в виде цветных карт амплитуд ускорений приведены на рисунках 3.17-3.22

При характеристике колебаний здания на той или иной собственной частоте, внимание уделялось следующему:

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

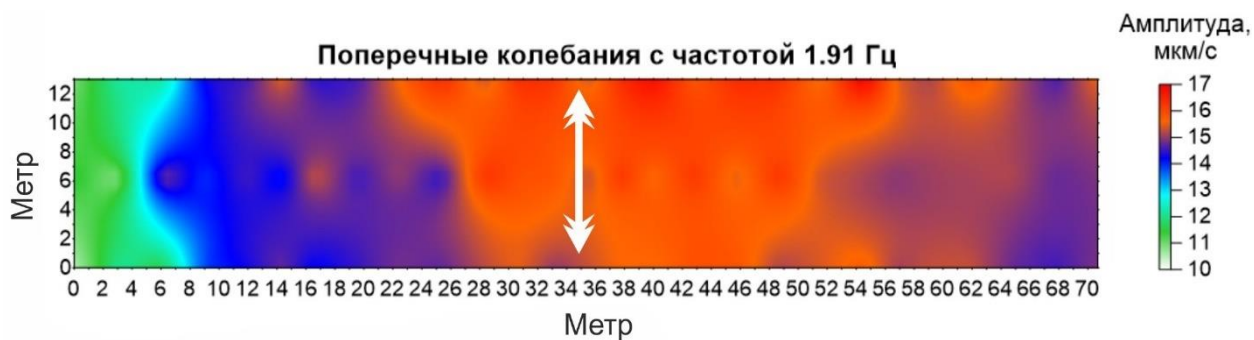


Рисунок 3.17 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 1-й формы

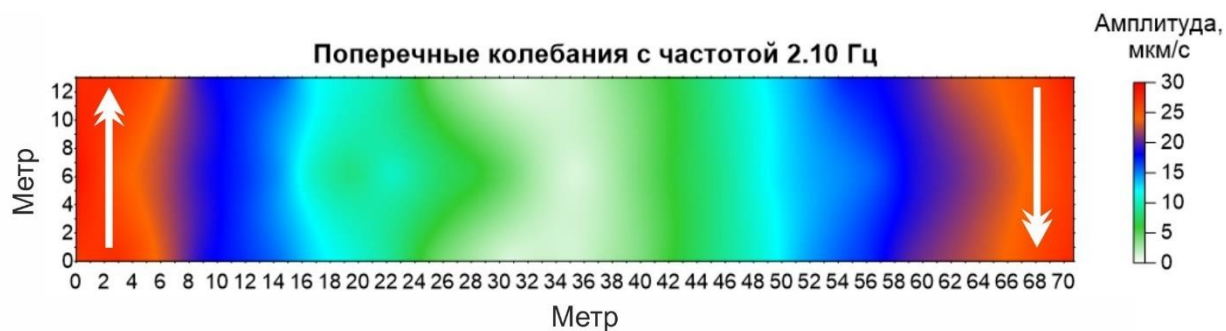


Рисунок 3.18 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 2-й формы

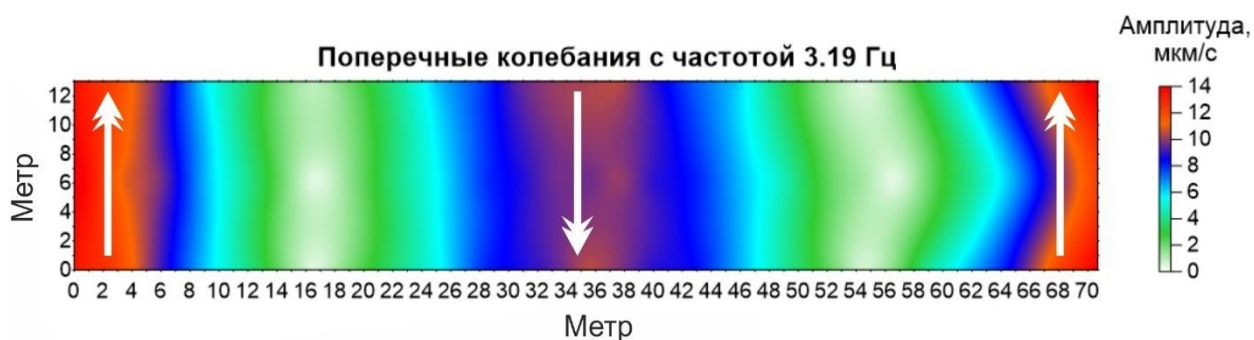


Рисунок 3.19 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 3-й формы

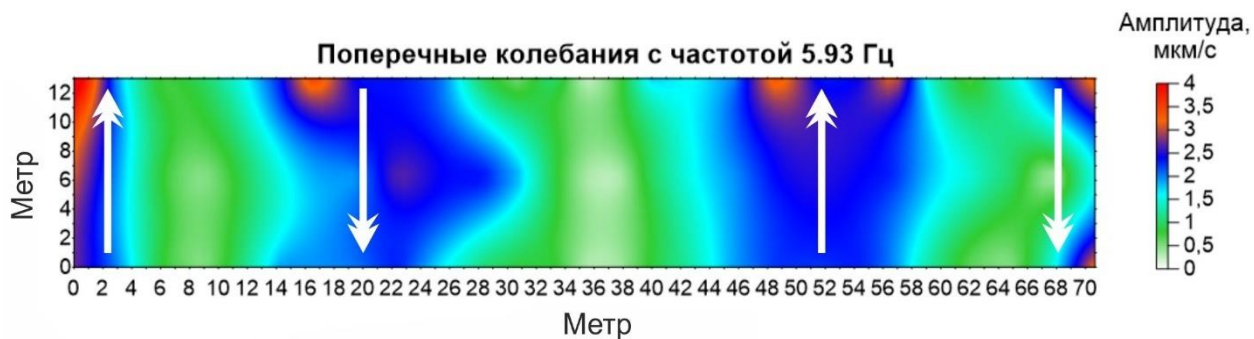


Рисунок 3.20 – Поперечные колебания здания на собственной частоте 4-й формы

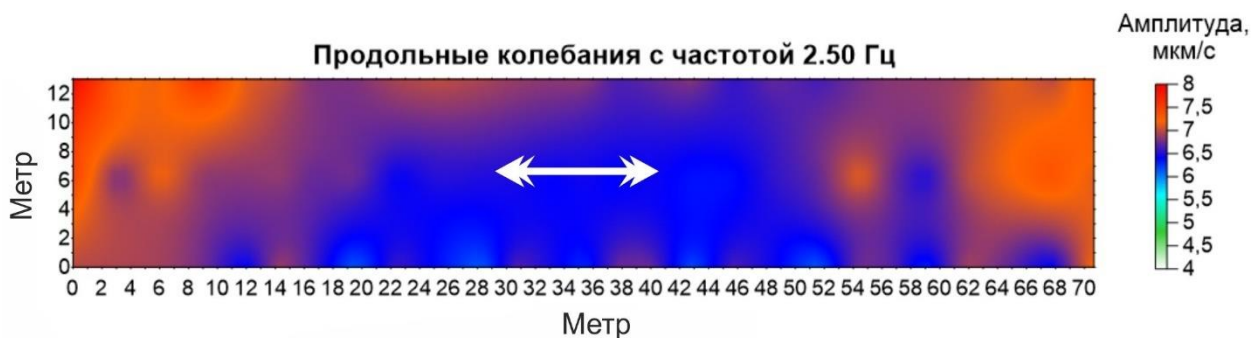


Рисунок 3.21 – Продольные колебания здания на собственной частоте 1-й формы

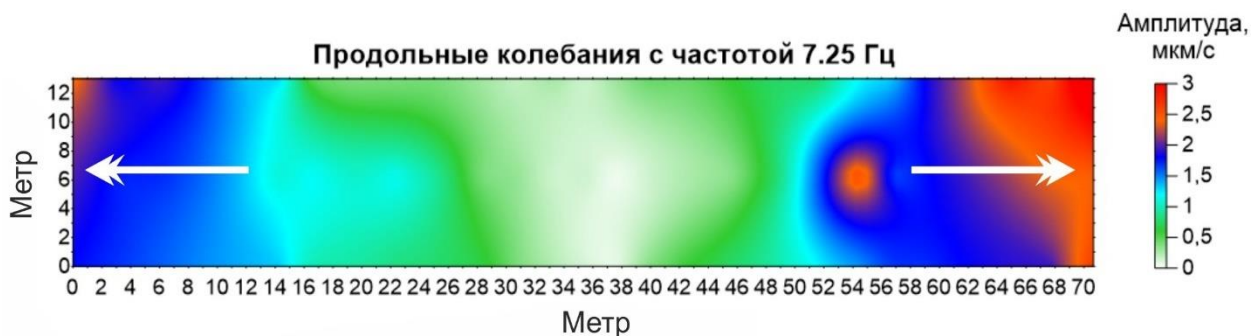


Рисунок 3.22 – Продольные колебания здания на собственной частоте 2-й формы

При обследовании здания методом стоячих волн, были получены следующие результаты:

1. В направлении X (поперек здания), в колебаниях объекта выделяются 4 собственные частоты, отвечающие, по порядку с 1-й по 4-ю, формам колебаний конструкции (Гц): 1.91; 2.10; 3.19; 5.93 (рисунок 3.17-3.20, таблица 3.2), 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 30 мкм/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.

2. В направлении Y (вдоль здания), в колебаниях здания выделяются 2 собственные частоты: 2.50 Гц и 7.25 Гц (рисунок 3.21-3.22, таблица 3.2). Судя по пространственному распределению амплитуд колебаний (рисунок 3.1(6)), 1-я выделенная частота отвечает 1-й форме колебания здания в продольном направлении. На частоте 7.25 Гц (рисунок 3.22) 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.

3.3.2 Мониторинг стоячих волн зданий

Изменения состояния целостности сооружения (появление трещин, ослабленных зон, смена напряженно-деформированного состояния и т.д.), приводят к изменению динамических параметров сооружения, в том числе к изменению значений его собственных частот. В СЕФ ФИЦ ЕГС РАН был разработан способ непрерывного мониторинга физического состояния сооружений [2], в результате применения которого на изучаемых объектах были выделены сезонные изменения частот собственных колебаний Саяно-Шушенской и Бурейской ГЭС [4;5;6]. Данный способ позволяет определять значения собственных частот сооружений, используя записи непрерывно регистрирующей сеймостанции, и, в случае обнаружения значительных отклонений их от первоначальных значений, делать выводы о причинах изменения динамического состояния сооружения.

В данном исследовании будут показаны результаты подобных работ в рамках инфраструктуры города Новосибирска.

Методика проведения исследований

Основной задачей исследования являлся мониторинг и анализ динамических характеристик собственных колебаний зданий, расположенных в городе Новосибирске. Исследуемые объекты представляют собой многоэтажные здания, на верхних этажах которых установлены пункты наблюдения (рисунок 3.23). Каждый пункт наблюдения состоит из трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-4.5, GD-10) и автономного сейсмического регистратора («Байкал-7», «Байкал-8»).

Регистратор «Байкал-7» представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 3х-канальный 24х-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).

Регистратор «Байкал-8» представляет собой портативный герметизированный модуль и включает в себя 6-ти канальный аналого-цифровой преобразователь со специализированным АЦП высокого разрешения, прецизионный кварцевый генератор, накопитель FLASH, управляющий микроконтроллер, контроллер USB, GPS-приемник

(внешняя антенна), питание производится при подключении внешнего аккумулятора. Поддержка Ethernet позволяет использовать стандартные решения при соединении нескольких регистраторов в сейсмическую сеть. Для удаленной передачи данных дополнительно оборудованы микрокомпьютерами Raspberry Pi и роутерами Zyxel. Комплекты аппаратуры устанавливались в специализированных местах с подводом кабеля от сейсмических датчиков. Запись производится в непрерывном режиме с постоянной передачей данных на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН.

Информация о времени регистрации и составе оборудования пунктов наблюдений приведена в таблице 3.3. Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников следующие: X – направлены вдоль узкой части сооружения, Y – вдоль длинной части сооружений, Z - вертикально.



Рисунок 3.23 – Расположение пунктов наблюдений и их ориентация, г. Новосибирск ул. Пирогова д. 22 (а), ул. Пирогова д. 28 (б), проспект академика Коптюга д. 7 (в), проспект академика Коптюга д. 3/6 (г)

Таблица 3.3 – Сведения о времени регистрации и составе оборудования пунктов наблюдения

Адрес расположения пункта наблюдения	Тип регистратора	тип датчика	№ регистратора	Период регистрации (2021 г.)
Ул. Пирогова д. 22	«Байкал-7»	GD-10	120	С 02.09 по 20.09
Ул. Пирогова д. 28	«Байкал-8»	GD-4.5	UNVR-DH	С 02.01 по настоящее время
Пр-т ак. Коптюга д. 7	«Байкал-8»	GD-4.5	SVSH-DE	С 16.07 по настоящее время
Пр-т ак. Коптюга д. 3/6	«Байкал-8»	GD-4.5	ETLN-DH	С 27.06 по настоящее время
Красный проспект, 155	«Байкал-7»	GD-10	120	С 28.09 по настоящее время
П. Каинская Заимка. ул Серебряное Озеро д. 7	«Байкал-7»	GD-10	232	С 28.09 по настоящее время

Для обработки зарегистрированных данных использовано программное обеспечение SpectrumSeism, разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данное программное обеспечение позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы, позволяя определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для получения количественных оценок, строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле (3.3):

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (3.3)$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 100$ с, шаг окна 100 с).

Результаты обследования здания методом стоячих волн

На рисунке 3.24 представлены результаты обработки данных, зарегистрированных в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова, д. 28, в зимний (с 01.02.2021 по 14.02.2021) и летний (с 29.05.2021 по 09.06.2021) периоды. Видно, что, с течением времени, значения собственных частот (определение значений собственных частот методом стоячих волн приведено в пункте 3.3.1) сооружения меняются, причем в летний период данные изменения наиболее заметны. Если изменение частоты в зимний период, как вариант, можно связать с присоединённой массой снега, аналогично [2;4;5], то в летний период этот фактор исключается. Рассмотрим данный период подробнее.

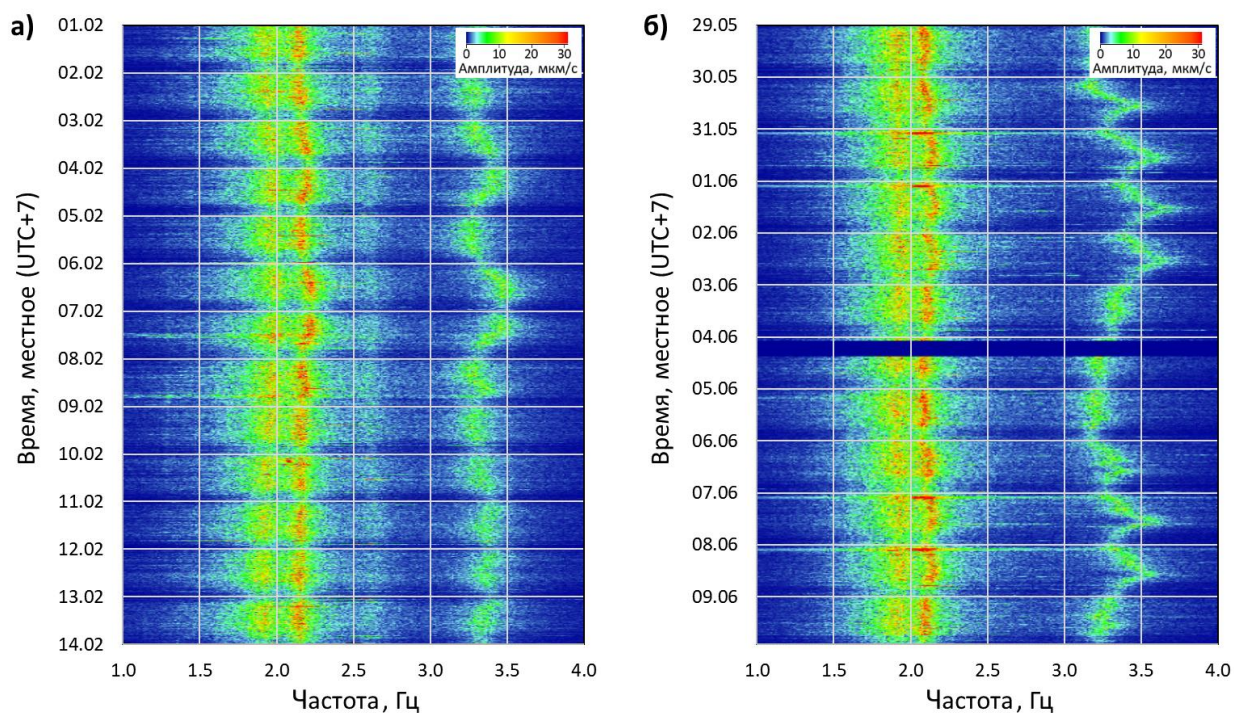


Рисунок 3.24 – Спектрограммы Х-компонент записей, зарегистрированных на пункте наблюдений в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в зимний с 01.02.2021 г. по 14.02.2021 г. (а) и летний с 29.05.2021 по 09.06.2021 (б) периоды

На рисунке 3.25 приведены усредненные спектры Х-компоненты (интервал каждого спектра выбран 100 с) записи на пункте наблюдения, в период с 29.05.2021 по 09.06.2021. Из каждого построенного спектра определялись значения первых 3-х мод с течением времени. Полученные значения частот из усредненных спектров, для наглядности, нанесены на спектрограмму, где видна их полная корреляция (рисунок 3.2(6)).

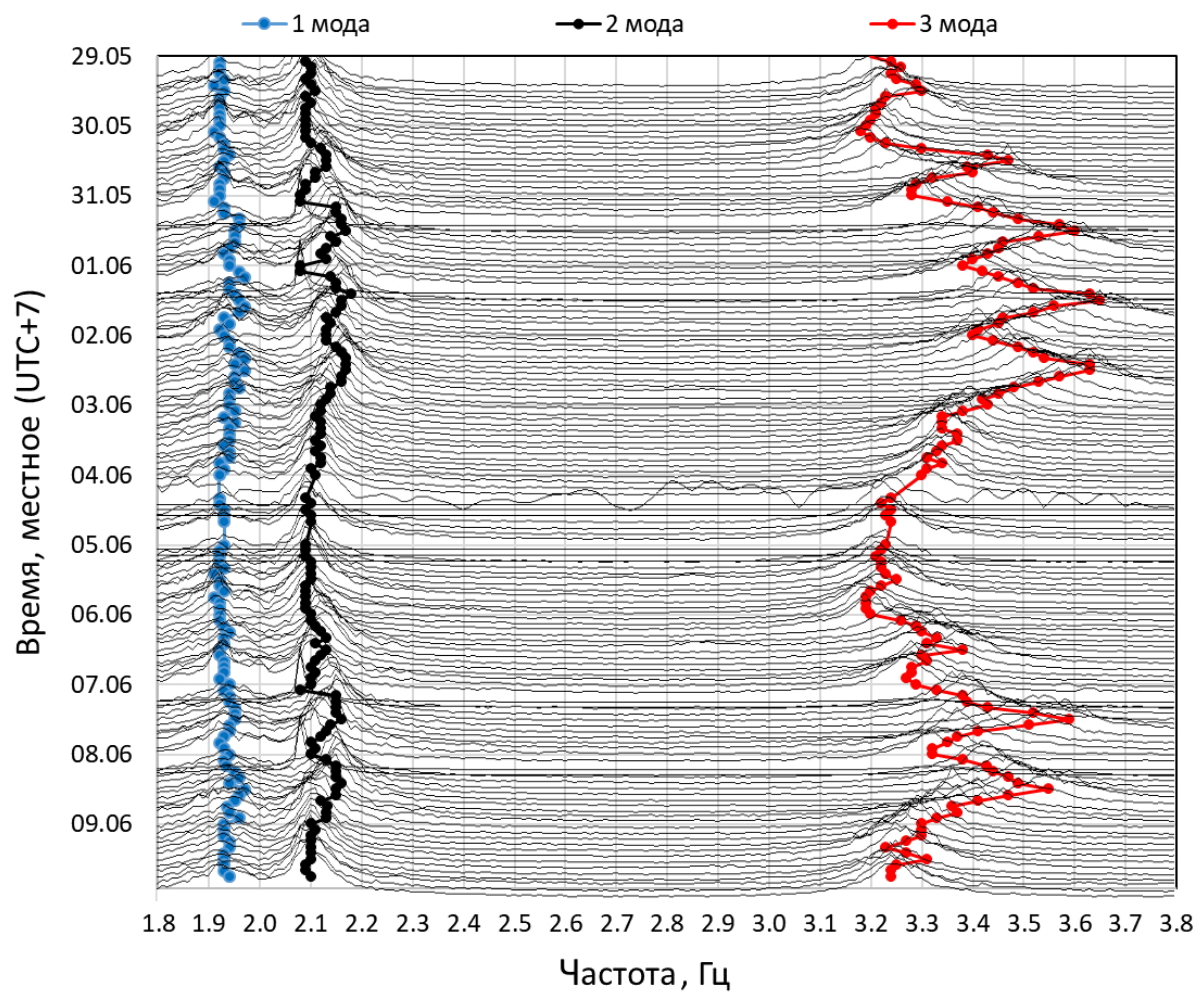


Рисунок 3.25 – Усредненные спектры и изменение собственных частот Х-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период с 29.05.2021 по 09.06.2021

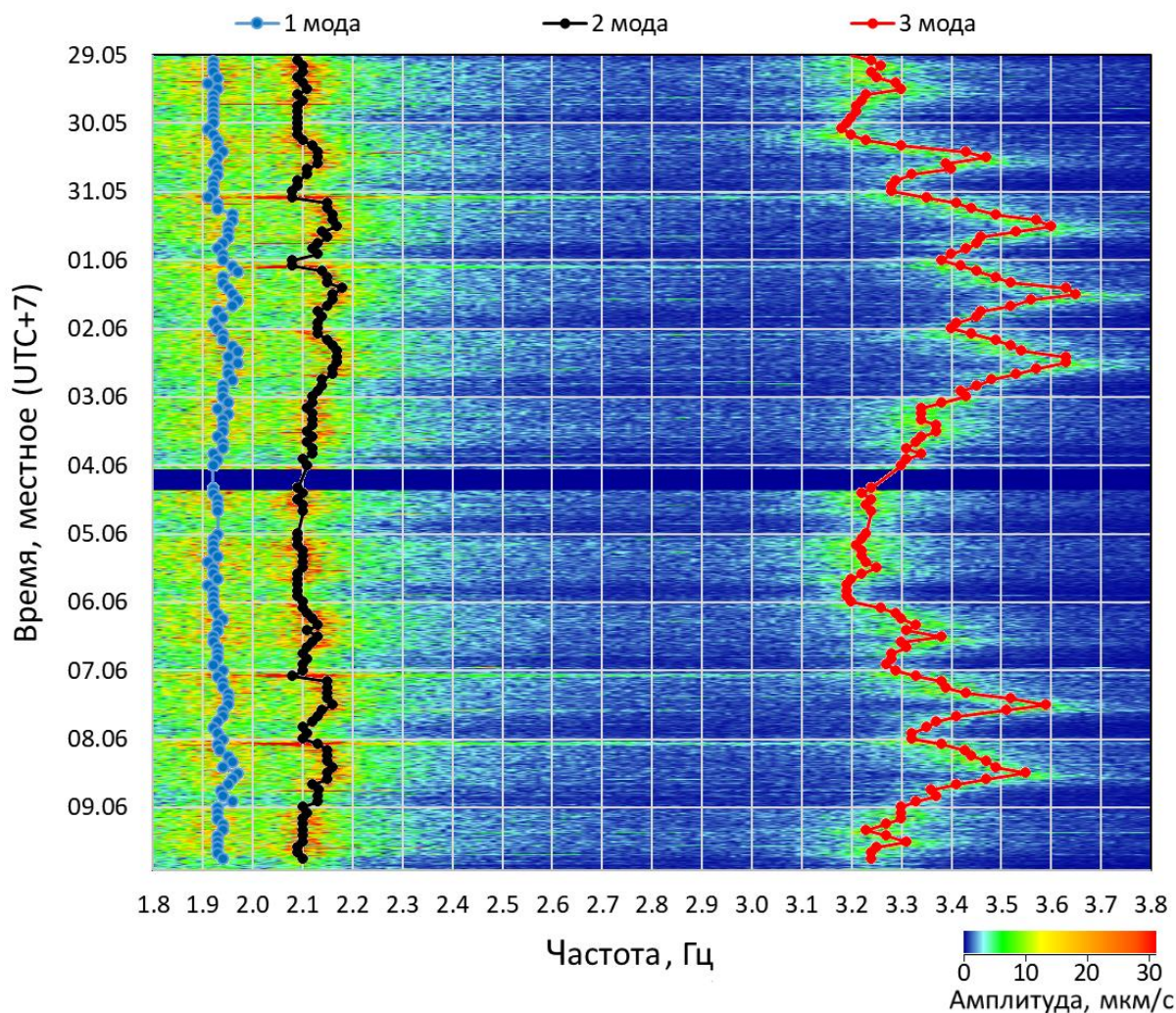


Рисунок 3.26 – Спектрограмма и изменение собственных частот Х-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период с 29.05.2021 по 09.06.2021

Полученные изменения значений собственных частот сравнивались с изменением температуры в данный период времени. В качестве данных о температуре выбраны показания метеостанции, установленной в сооружении Института ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН. Также была проведена оценка схожести полученных собственных колебаний здания и изменений температуры. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона, определяемый следующими параметрами:

Пусть $(X_1, \dots, X_n), (Y_1, \dots, Y_n)$ – набор значений двух факторов на выборке объема n .

Выборочный коэффициент корреляции (т.е. коэффициент корреляции, определяемый по выборке) равен:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (3.4)$$

где $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$.

Применив формулу (3.4) к вышеописанным данным, получаем следующие значения: для 1-й моды колебаний значение $r=0.5873$; для 2-й моды колебаний значение $r=0.7965$; для 3-й моды колебаний значение $r=0.8083$ (рисунок 3.27, 3.28). Вероятно, низкие значения коэффициента связаны с тем, что температура окружающей среды меняется гораздо активнее, чем материал исследуемого сооружения. Но можно однозначно утверждать, что температура среды значительно влияет на изменение значений частот собственных колебаний. Причем рост температуры окружающей среды приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к уменьшению значений.

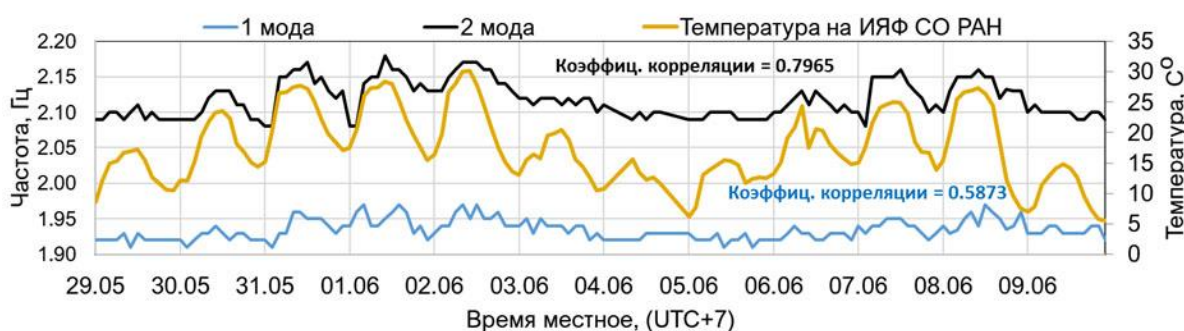


Рисунок 3.27 – Изменение температуры и значений 1 и 2 мод собственных частот X-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений, в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период с 29.05.2021 по 09.06.2021

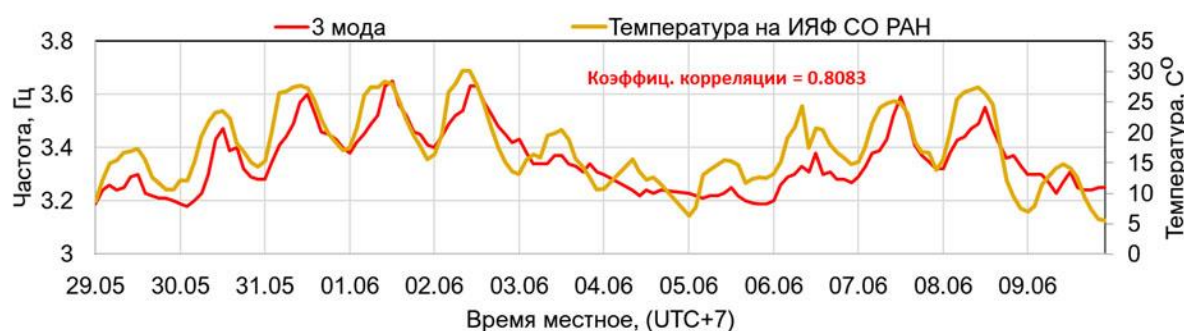


Рисунок 3.28 – Изменение температуры и значений 3 моды собственных частот X-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пункте наблюдений, в верхней части жилого 10-ти этажного дома по адресу ул. Пирогова д. 28 в летний период с 29.05.2021 по 09.06.2021

Следует отметить, что подобные результаты получены для всех сооружений, указанных в таблице 3.3. Ниже будут приведены примеры подобных исследований для пунктов наблюдений, работавших в период с 03.09.2021 по 20.09.2021. В данный период работали только 3 пункта наблюдений (сбой работы регистратора в доме на ул. Пирогова, д. 28), расположенные в 10-ти этажном жилом доме на ул. Пирогова, д. 22, в 16-этажном

жилом доме на пр-те Ак. Коптюга, д. 7, и в 4-х этажном производственном сооружении на пр-те Ак. Коптюга, д. 3/6 (рисунок 3.29).

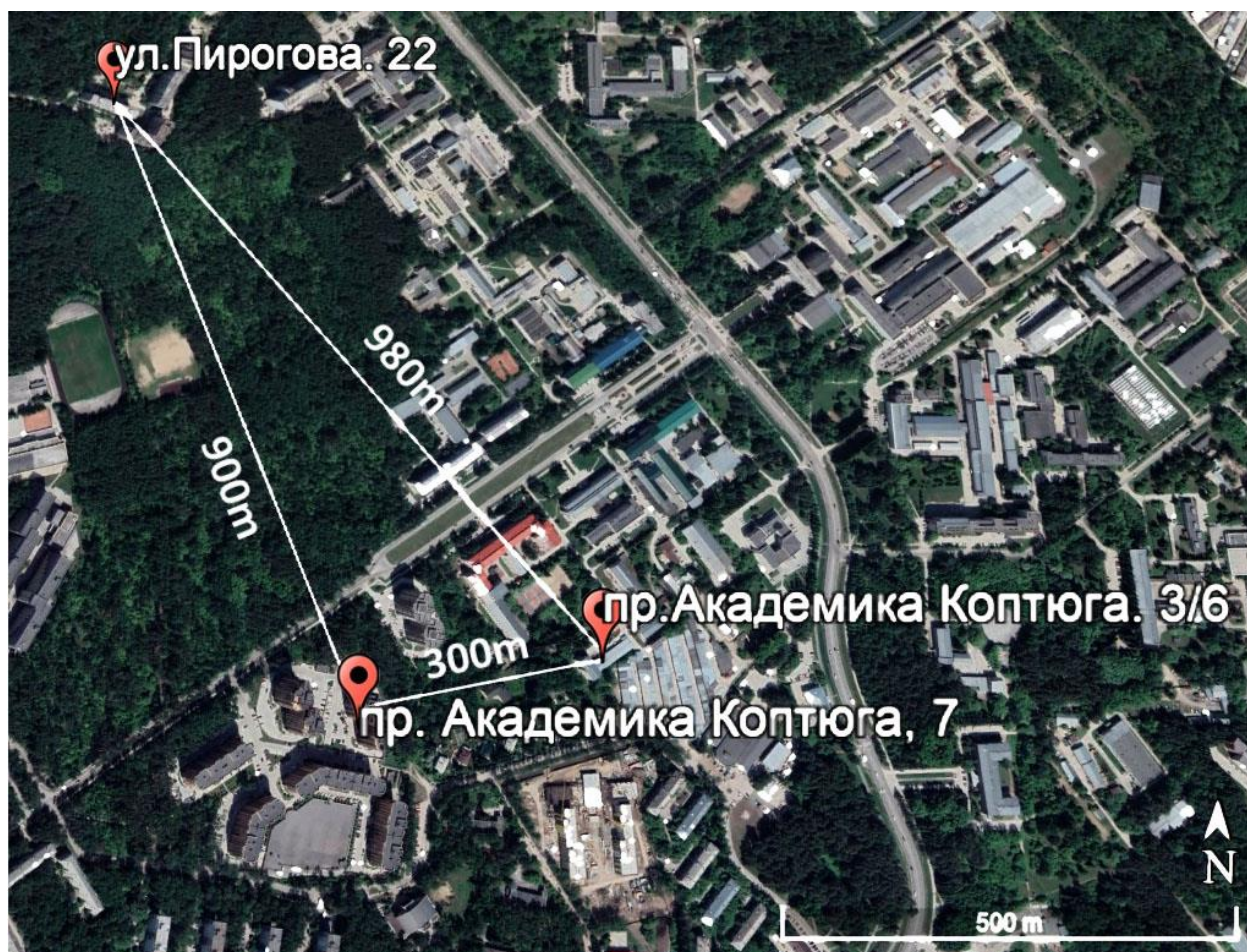


Рисунок 3.29 – Расположение пунктов наблюдений в период с 03.09.2021 по 20.09.2021

На рисунке 3.30 представлены спектрограммы и графики изменения температуры для 3-х пунктов наблюдений. Следует заметить, что для данных объектов обследования методом стоячих волн не проводились. Ввиду этого, трудно сказать, к какому типу собственных колебаний (продольные/поперечные) относятся данные колебания, но предварительно (до проведения обследования методом стоячих волн), мы предполагаем, что данные частоты отвечают 3-м модам собственных колебаний. Тем не менее, на рисунках хорошо видно, что, по показаниям, для всех типов домов прослеживается корреляция изменений значений данных частот собственных колебаний с температурой окружающей среды.

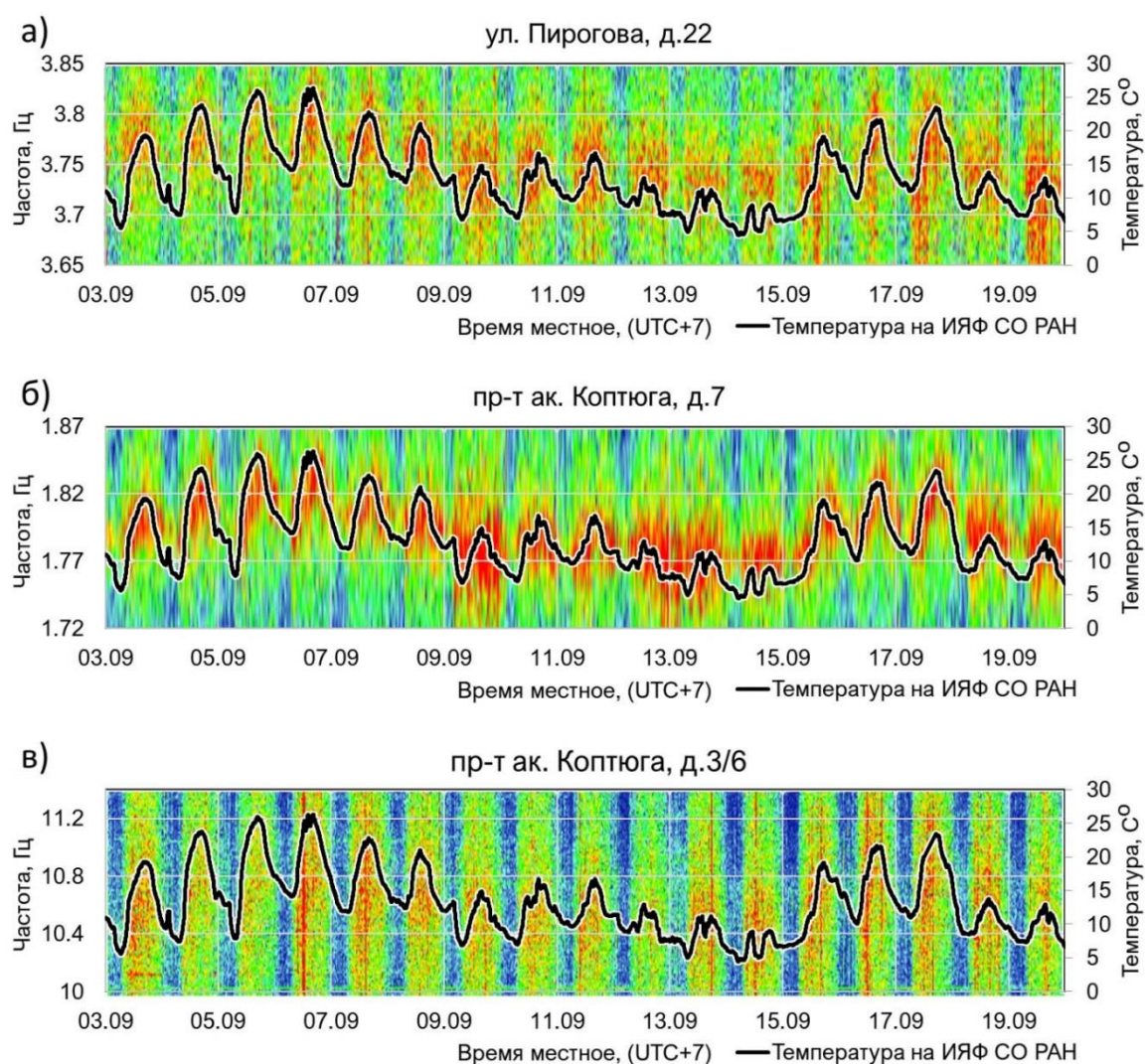


Рисунок 3.30 – Изменение температуры и значений 3 моды собственных частот Х-компонент колебаний с записей, зарегистрированных на пунктах наблюдений в верхней части 10-этажного дома (а), 16-этажного дома (б), 4-этажного сооружения (в) в осенний период с 03.09.2021 по 20.09.2021

В итоге, наиболее хорошая корреляция наблюдается на пункте наблюдений на 16-этажном в жилом доме на пр-те Ак. Коптюга, д. 7, и наиболее плохая в 4-этажном производственном сооружении на пр-те Ак. Коптюга, д. 3/6 (рисунок 3.30). Напрашивается вывод о том, что высотные здания сильнее подвержены влиянию температуры, но данное утверждение требует проведения дополнительных исследований и набора статистики. Тем не менее, по полученным результатам анализа данных с различных типов домов, в различные временные периоды, можно утверждать, что изменение температуры окружающей среды приводит к изменению значения собственных частот колебаний. Причем рост температуры окружающей среды приводит к увеличению значений частоты собственных колебаний, а снижение температуры к уменьшению значений.

3.4 Разработка экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах

3.4.1 Анализ колебаний от Новосибирской ГЭС на больших расстояниях

Инженерные здания и сооружения являются объектами повышенной ответственности. При определенных условиях, здания и сооружения подвержены негативным воздействиям, вызванным влиянием на них различных естественных (активация разломов, землетрясения, размывы, промерзание и т.п.) и техногенных факторов. Ввиду этого, при эксплуатации, необходим как контроль технического состояния объекта, так и действующих на него динамических воздействий, возможно несущих опасность как для конструкции в целом, так и для ее частей. Основой для развития метода контроля являются результаты исследования, посвященного изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В данной работе показаны первые результаты регистрации и анализа полученных сейсмических материалов с сейсмостанций вблизи Новосибирской ГЭС и на удалении от нее порядка 16 км. Из зарегистрированных сейсмических колебаний выделены сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия от работающего оборудования Новосибирской ГЭС. Показана возможность отслеживания изменения режимов работы гидроагрегатов на достаточном удалении от самого объекта. Показано преобразование полученного сигнала методом вычитания помех, для улучшения соотношения сигнал/шум.

Данный отчет посвящен развитию метода инженерно-сейсмического мониторинга, разработанного в ФИЦ ЕГС РАН [2], и основан на результатах исследований по изучению динамических воздействий, возникающих при работе гидроэлектростанций. В ряде работ [4;7-9] показана возможность мониторинга технического состояния сооружения ГЭС, основанная на слежении за изменением его собственных частот, и показан способ осуществления дистанционного контроля над вибрационным состоянием промышленного оборудования по данным, полученным с сейсмических станций, удаленных от гидроэлектростанций на несколько километров.

В данном исследовании показан подход для отслеживания работы промышленного оборудования Новосибирской гидроэлектростанции (далее НГЭС) на гораздо большем удалении.

Для анализа были использованы трехкомпонентные сейсмические записи, полученные на сейсмостанции «Ключи» (далее Ключи), которая расположена в посёлке Каменушка, в 16 км от гидроэлектростанции НГЭС. Для регистрации сигнала использован

регистратор «Байкал-8» и сейсмоприемник GD-4.5, установленный на десятиметровую трубу скважины со следующей ориентацией осей: Z – вертикально, N – север и E – восток. Полученные данные сопоставлялись с результатами регистрации сейсмической станции НГЭС (NHES) Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН, расположенной вблизи Новосибирской ГЭС (500 м). Станция NHES оснащена трехкомпонентным широкополосным высокочувствительным сейсмометром Guralp CMG-3ESPCD. Ориентация осей соответствует станции Ключи. Схема расположения сеймостанций и НГЭС представлена на рисунке 3.31.

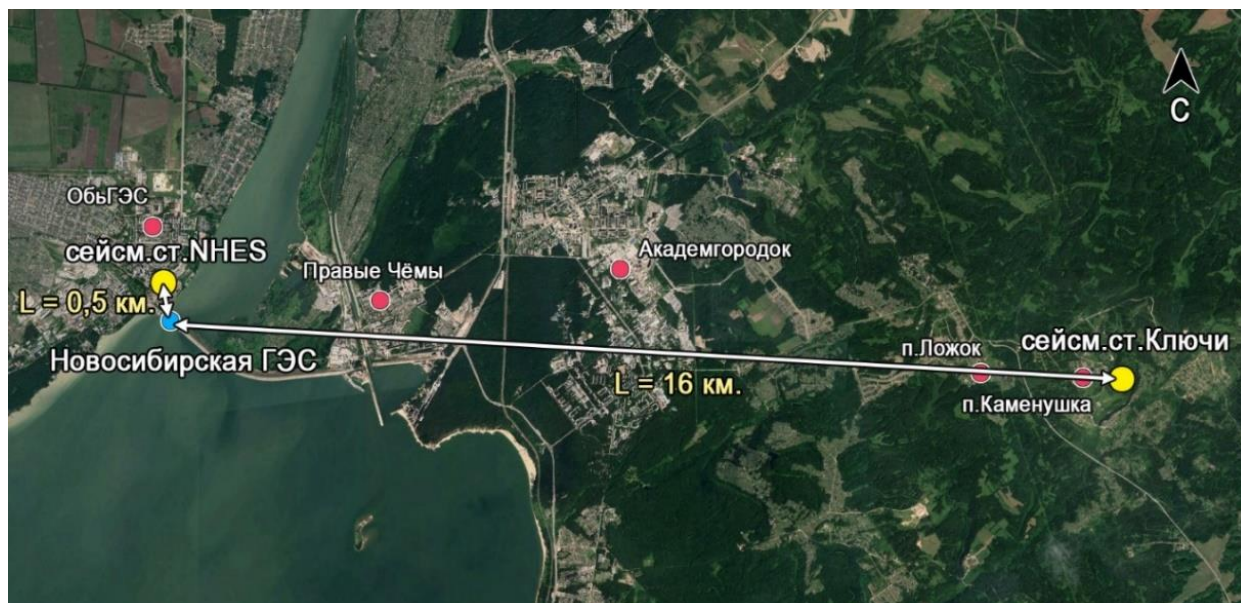


Рисунок 3.31 – Схема расположения сеймостанций

В качестве изучаемого сигнала рассматривались колебания на лопастной частоте семи гидроагрегатов НГЭС мощностью 70 МВт, включающих в себя вертикальные поворотно-лопастные турбины ПЛ 30-В-800 и гидрогенераторы СВ 1343/140-96 УХЛ4. Формально лопастная частота рассчитывается как произведение количества лопастей на рабочем колесе турбины на оборотную частоту вращения ротора. Обратная частота является результатом деления частоты переменного тока в сети (50 Гц) на число полюсов гидрогенератора (48 единиц) и составляет порядка 1.04 Гц. При учете, что турбина включает в себя пять лопастей, лопастная частота равна 5.21 Гц.

Для обработки зарегистрированных данных использовано программное обеспечение SpectrumSeism, разработанное в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данное программное обеспечение позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектры и спектрограммы, позволяя определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи источники определенной частоты. Для

получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A_{\omega}(t) = \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (3.5)$$

где $f(\tau)$ – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно $T = 250$ с, шаг окна 50 с).

На рисунке 3.32 представлены спектры сигналов, зарегистрированных на сейсмостанциях НГЭС и Ключи. Из рисунка видно, что в спектрах присутствует монохроматический сигнал с частотой 5.2 Гц. На станции НГЭС, ввиду её малой удаленности, исследуемый сигнал имеет наиболее высокие значения. Также в спектре видны кратные для обратной (1.04 Гц) частоты.

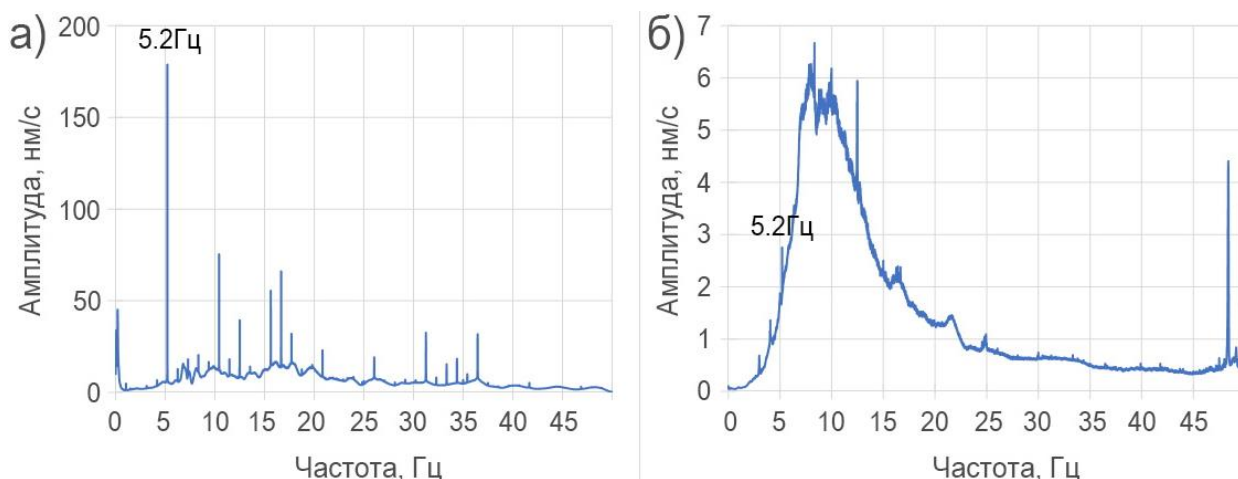


Рисунок. 3.32 – Графики усредненного спектра сейсмической записи зарегистрированной на (а) сейсмостанции НГЭС и на (б) сейсмостанции Ключи. Z-компонента

На текущем спектре, с записи удаленной станции Ключи, исследуемая частота сигнала проявлялась только на вертикальной компоненте и имела сравнительно низкие значения. Для сопоставления данных, зарегистрированных удаленной и приближенной к Новосибирской ГЭС сейсмостанциями, был выбран период с 15 по 22 января 2021 года. В данный период, на текущих спектрограммах записей наблюдались скачкообразные изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, вызванные изменением работы оборудования на НГЭС (рисунок 3.33).

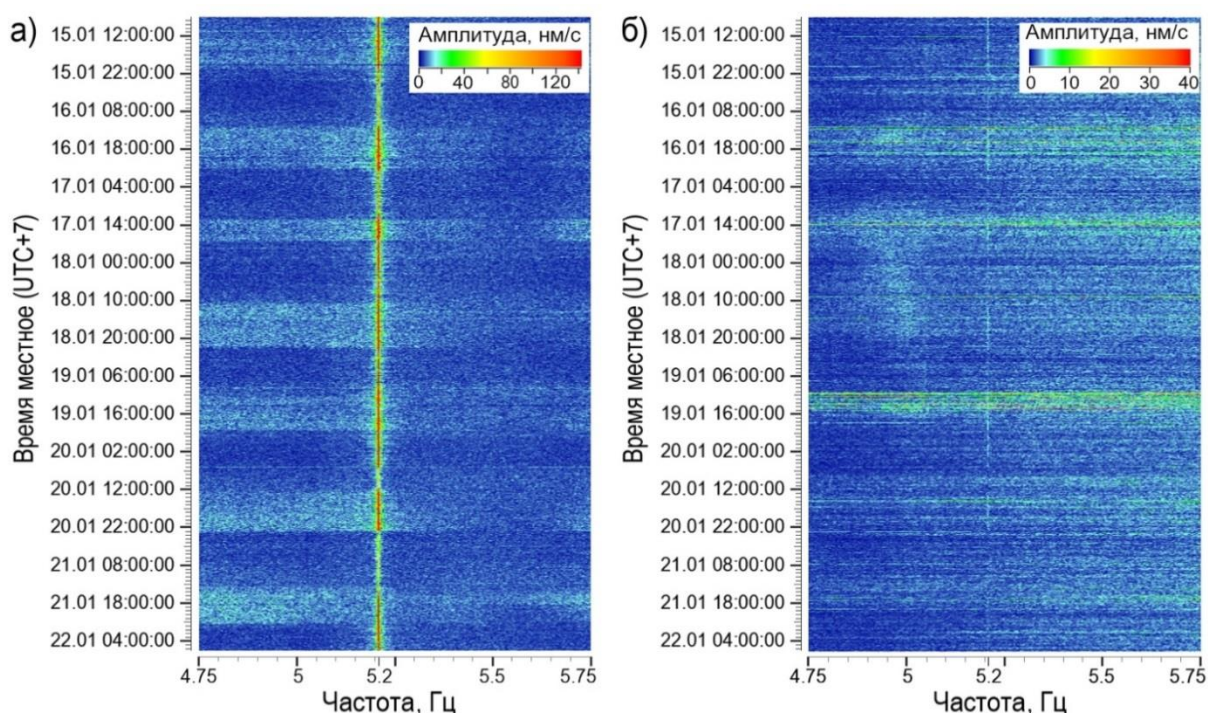


Рисунок 3.33 – Спектрограммы сигналов по сейсмостанции НГЭС (а) и сейсмостанции Ключи (б) с 15 по 22.01.2021 в вырезке с 4.75 до 5.75 Гц. Z-компонента

На рисунке 3.34 представлены графики изменения амплитуд Z-компоненты колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные с записей сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый), в период с 15 по 22 января 2021 г. Наблюдается хорошая корреляция между сигналами с двух станций, несмотря на отличие по амплитуде более чем в 40 раз. Следовательно, можно сделать вывод, что, даже на расстоянии 16 км, возможно отслеживать режимы работы оборудования на ГЭС.



Рисунок 3.34 – Графики изменения амплитуд колебаний на частоте 5.2 Гц, полученные на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

Была проведена оценка схожести полученных сигналов. Для этого использовался коэффициент корреляции Пирсона, определяемый следующими параметрами:

Пусть $(X_1, \dots, X_n), (Y_1, \dots, Y_n)$ – набор значений двух факторов на выборке объёма n .

Выборочный коэффициент корреляции (т.е. коэффициент корреляции, определяемый по выборке) равен:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{j=1}^n (Y_j - \bar{Y})^2}}, \quad (3.6)$$

где $\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}$, $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i}{n}$.

Применив формулу (3.6) к данным, отображенным на рисунке 3.34, было получено значение $r=0.7859$. Результат не дает однозначной связи между двумя рядами данных. Это может быть связано как с неоднородностью среды между двумя точками наблюдения, так и с возникающими помехами техногенного и естественного происхождения.

Следующим шагом была предпринята попытка отфильтровать основной сигнал от существующих фоновых помех.

Известно, что колебания, несущие информацию о работе оборудования, имеют высокую добротность и сосредоточены в области частоты 5.2 Гц. Исходя из этого, было сделано следующее предположение: если вычесть из амплитуды колебаний на частоте исследуемого сигнала (4.2 Гц), амплитуду соседнего фона (например, амплитуду колебаний на частоте 5.1 Гц, которая содержит информацию только о локальных микросейсмах), возможно улучшить соотношение сигнал/помеха.

На рисунке 3.35 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц с 15 по 22 января 2021 г. Синим цветом представлены графики изменения значения колебаний, зарегистрированных на станции НГЭС, оранжевым – на станции Ключи. Полученное значение коэффициента корреляции (4.2) возросло до значения $r=0.83846$. Получен результат, подкрепляющий вышеописанную гипотезу.



Рисунок 3.35 – График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) с 15 по 22 января 2021 г. Z-компонента

С другой стороны, если рассматривать не весь временной интервал, а в среднем сутки, то коэффициенты меняются. На рисунке 3.36 показаны графики разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц за 16 и 17 января 2021 г. Видно, что полученные значения коэффициентов несколько различаются: в период за 16 января 2021 г. значение $r=0.92091$, а за 17 января 2021 г. значение $r=0.82336$.

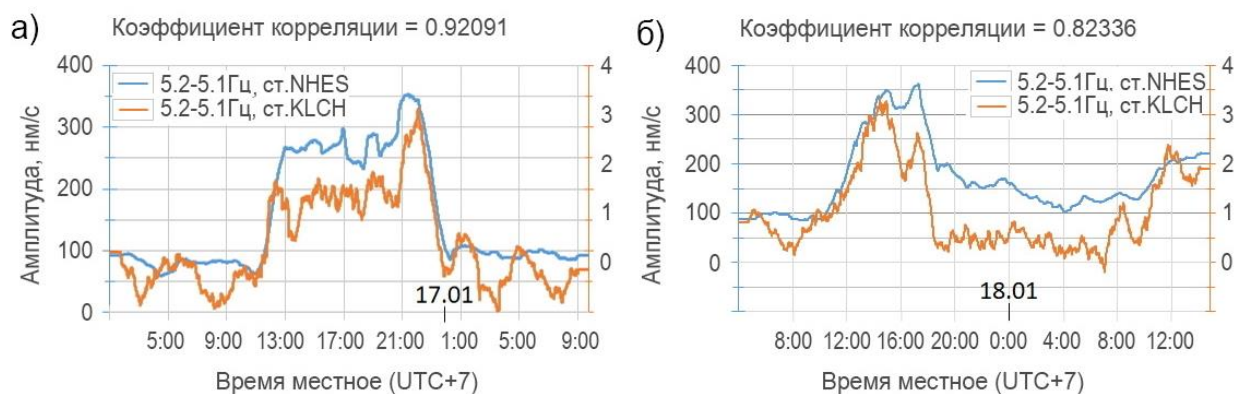


Рисунок 3.36 – График разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на частоте 5.2 Гц с фоном на частоте 5.1 Гц, полученных на сейсмостанции НГЭС (синий) и Ключи (оранжевый) 16(а) и 17(б) января 2021 г. Z-компонента

Возможно, что полученные коэффициенты корреляции зависят от колебаний на оборотной частоте 1.04 Гц, которая ведет себя нелинейно относительно колебаний на лопастной частоте. На рисунке 3.37 изображены графики изменения амплитуд колебаний на лопастной (а) и оборотной частоте (б). На графиках хорошо видно, что максимальное значение коэффициента $r=0.92091$ было получено в то время, когда колебания на оборотной частоте почти не менялись (интервал 1). А более низкие значения $r=0.82336$ отвечают моменту резкого роста амплитуд на оборотной частоте (интервал 2).

Заключение. В результате проведенного исследования, показана возможность отслеживания режимов работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС на удалении 16 км от источника, несмотря на достаточный уровень помех.

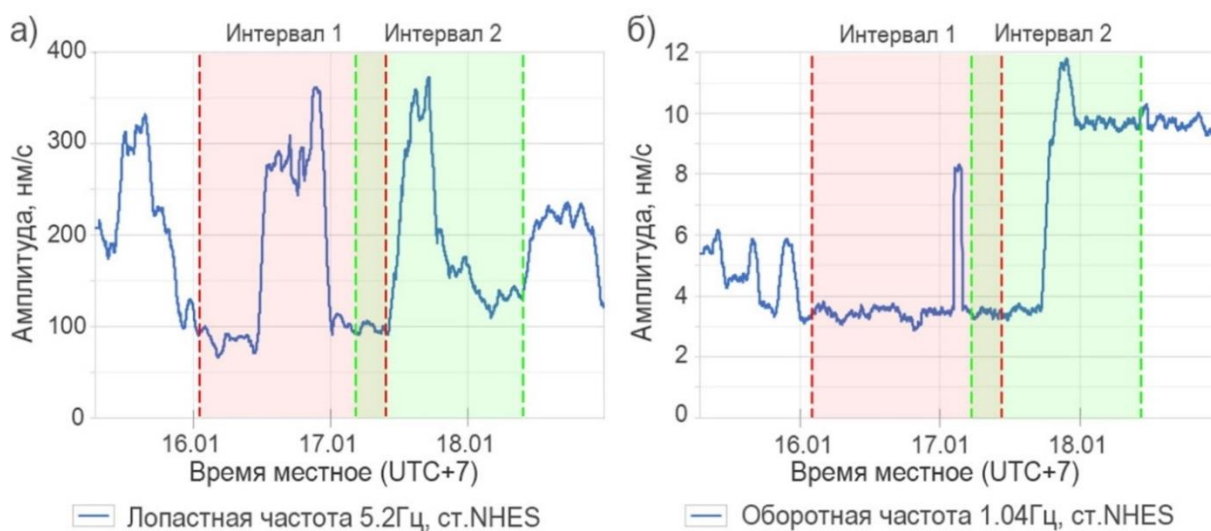


Рисунок 3.37 – График изменения амплитуд колебаний на лопастной 5.2 Гц (а) и оборотной частоте 1.04 Гц (б), полученные на сейсмостанции НГЭС. Z-компонента

Показан способ математического преобразования сейсмической записи для улучшения соотношения сигнал/помеха, основанный на разности амплитуд колебаний исследуемого сигнала на выделенной частоте относительно фона. Данный способ требует как доработки, так и дополнительной апробации, ввиду полученных различных значений коэффициентов корреляции в различные временные промежутки.

Для дальнейшего анализа необходима информация о работе оборудования с гидроэлектростанции.

3.4.2 Анализ колебаний от Елбашинского отвала на ст. Харино

В настоящее время естественная сейсмичность на территории России контролируется сейсмологическими станциями ФИЦ ЕГС РАН и учитывается, при принятии различных решений, федеральными и местными органами управления, опираясь на карту сейсмического районирования. В последние годы происходит значительное увеличение техногенной составляющей, при наблюдениях за сейсмическими процессами в районах угольных разрезов, но кто должен следить за этими явлениями, какие системы наблюдений должны при этом использоваться, кто и какие действия должен предпринимать, получив данные по техногенной сейсмичности, четко не определено. Выделяется два типа техногенных сейсмических воздействий от угольных разрезов, регистрируемых станциями сейсмологической сети. Первый – это импульсные или кратковременные сейсмические воздействия, весьма схожие с естественными землетрясениями, связанные разработкой больших карьеров. Второй – регистрируемые сейсмографами длительные и достаточно устойчивые во времени малоамплитудные колебания, как правило характеризующиеся определенной частотой (или полосой частот).

Если первый тип техногенных воздействий (хоть и недостаточно) изучается с использованием информации, получаемой сейчас в России, в основном, с временных сейсмологических станций (например, Бачатское техногенное землетрясение с $M > 6$ [10]), то второй тип исследован весьма слабо, и специальных систем наблюдений для его изучения в России практически нет. Как правило, лишь после аварии выясняются ее причины [11].

Следует отметить, что техногенные шумы – это не только «вред», но и, если их грамотно использовать, большая «польза». Если у нас есть регистрирующие станции, расположенные на каком-то расстоянии от источника техногенных шумов, то на полученных этими станциями сейсмических записях есть информация об объектах, которые излучают колебания, изменениях их свойств во времени, о техническом состоянии агрегатов, работающих в этих объектах и изменениях, происходящих в среде. И эту информацию можно с успехом использовать. Как правило, большинство техногенных шумов, регистрируемых удаленными сеймостанциями, являются малоамплитудными, длительными по времени и изменяются по каким-то определенным законам, как по интенсивности, так и по частоте. Такие сигналы можно накапливать, особенно хорошо, если известны законы их изменений.

В отчете, на примере сейсмологических наблюдений в окрестности Колыванского месторождения антрацита (рисунок 3.38), показывается, как накапливать малоамплитудные сигналы и какую информацию можно извлечь из техногенных шумов.

18 июля 2020 г., примерно в 21:15 местного времени, на северо-западном склоне Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита произошел оползень, с предварительно оцененным объемом около 10% от массы отвала [12]. Отмечено, что деформация отвала сопровождалась мощным селевым потоком. Это также видно из фотографий, сделанных после происшествия (рисунок 3.39). Создана комиссия по расследованию причин инцидента, которые на настоящий момент не выяснены.

АСФ ФИЦ ЕГС РАН занимается изучением сейсмической обстановки в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях. Одна из станций сейсмологической сети – «Харино» (международный код KNAR) расположена в 7 км южнее Елбашинского отвала. Используя записи этой станции, будем разбираться в причинах, которые привели к образованию оползня. Мы уже давно занимается проблемами дистанционного контроля процессов, приводящих к техногенным авариям [11;13], имеем в этом направлении определенный опыт и успехи, и данный отчет – еще один шаг в этом направлении.



Рисунок 3.38 – Схема сейсмологических наблюдений на карте угольных месторождений Новосибирской области [14]



Рисунок 3.39 – Стоп-кадры видеосъемки после схода оползня
[<https://youtu.be/KhXGpzuzPCU>]

Методика и данные

Чтобы понять окружающую обстановку вокруг отвала, на рисунке 3.40 приведены спутниковые снимки, сделанные в разное время, с обозначенными отметками высот над уровнем моря для нетронутой земной поверхности. На снимке 2002 года, изображающем естественный ландшафт, видно, что на месте будущего отвала существовал временный водоток, направленный на северо-восток. К северо-западу от него находится еще один водоток, отделенный от первого водоразделом с высотой над уровнем моря в 209-223 м. На снимках 2013-2015 годов видно, что формирующийся отвал препятствовал естественному стоку вод, и в его западной части происходило обводнение. Отмечено, что в мае 2015 года, на месте временного водотока, сформировался пруд длиной около 1 км, уровень воды в котором достигал примерно 220 м, что уже тогда превышало среднюю высоту водораздела. Из снимка 2019 года видно, что временный водоток уже полностью был засыпан отвалами горных пород. К 2020 году обводненная часть отвала могла составлять первые десятки метров по высоте и около квадратного километра по площади.

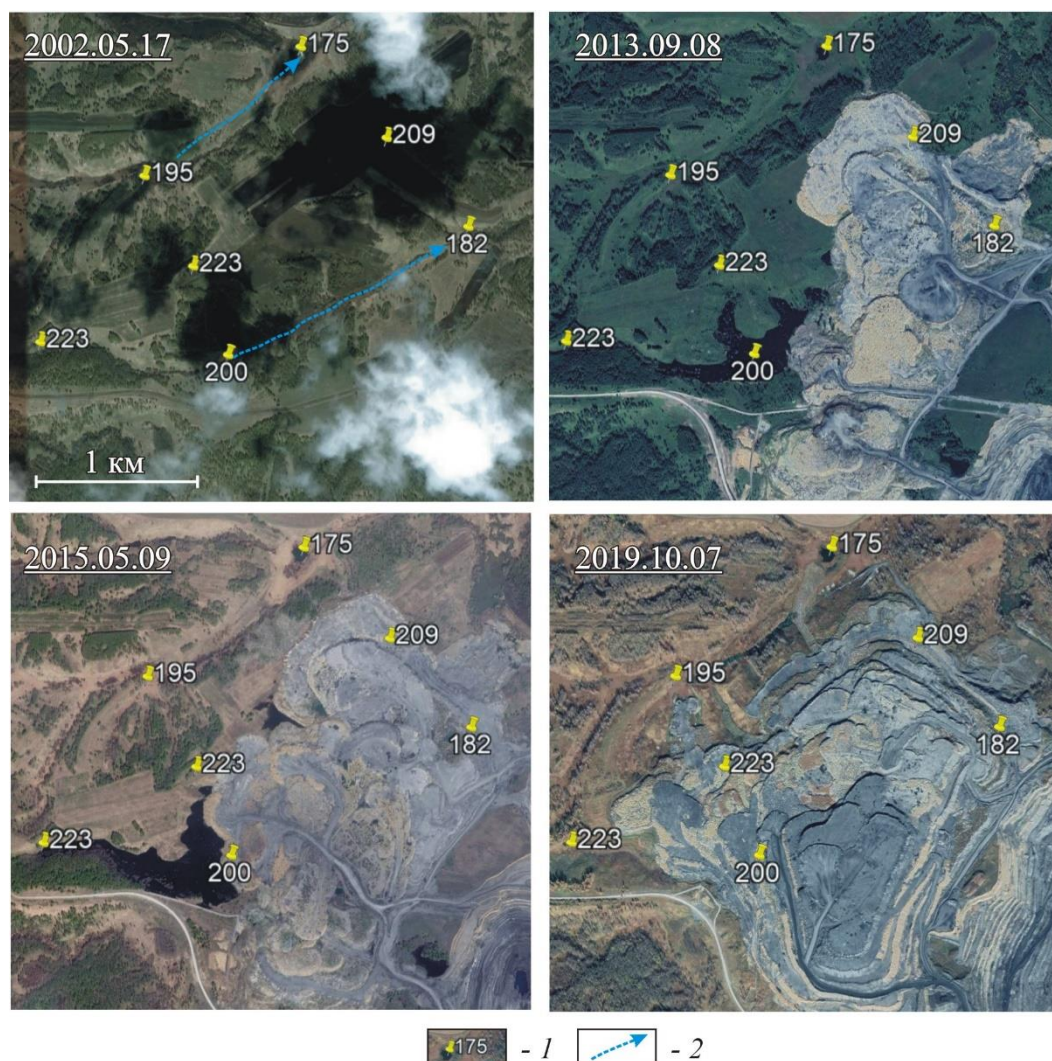


Рисунок 3.40 – Спутниковые снимки Елбашинского отвала [Google Earth Pro]. 1 – отметки высот нетронутой земной поверхности; 2 – направления временных естественных водотоков

Для того чтобы оползень начал движение, нужен был лишь толчок. При анализе записей, полученных за период, охватывающий время до и после деформации отвала, не было выявлено каких-либо значимых сейсмических воздействий, которые могли бы быть достоверной ее причиной. Также не было выявлено и колебаний, вызванных движением оползня (рисунок 3.41). Возможно, какие-то воздействия и были, но, из-за удаленности станции от отвала (7 км), их амплитуда была меньше уровня сейсмического шума. Вместе с тем, в сейсмическом шуме станции «Харино» обнаружены малоамплитудные сигналы, которые, с высокой вероятностью, могут быть связаны с колебаниями Елбашинского отвала, и интерпретация которых позволяет объяснить процессы, происходящие до и после схода оползня.

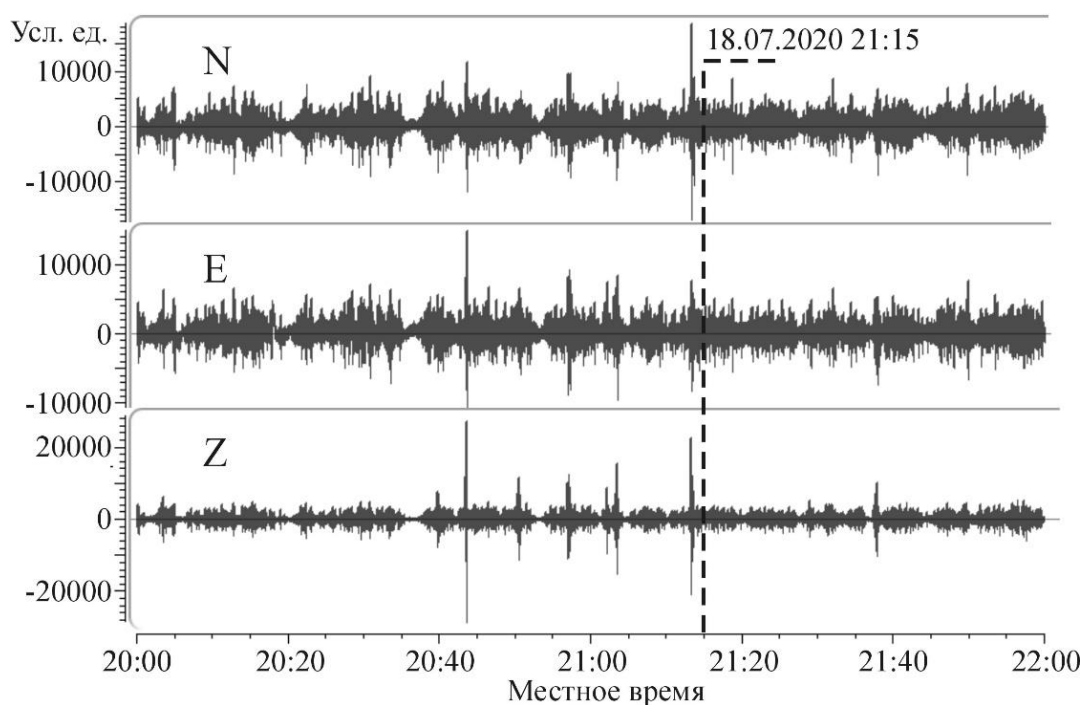


Рисунок 3.41 – Исходная запись сейсмостанции «Харино» до и после деформации

В первую очередь, был проведен качественный анализ изменений во времени амплитудно-частотных характеристик зарегистрированных сейсмических колебаний. Для этого строились спектрограммы в виде двумерных функций, по вертикальной оси которых представлено время, по горизонтальной – частота; третье измерение является амплитудой на определенной паре частота-время и представлено цветовой шкалой (рисунок 3.42).

Можно отметить нетипичную для станций сейсмологической сети картину шумов на низких частотах (до 0.1 Гц) – видно, что в дневное время их уровень значительно выше, чем в ночное. Вероятно, это связано с режимом техники, работающей на карьерах и перевозящей уголь. Можно предположить, что большегрузные машины создают такой уровень сейсмических колебаний, что формируются стоячие волны в объеме Горловской впадины. К сожалению, нам не удалось определить собственную частоту этих колебаний, но, по оценкам, она меньше нижнего предела технических возможностей аппаратуры (0.0083 Гц, что соответствует периоду 120 с).

Колебания в интервале частот 0.1-0.35 Гц практически не меняются по амплитуде с течением времени, известны в сейсмологии и интерпретируются как отклик колебаний волн в морях и океанах.

Наиболее интересны колебания с частотой около 0.6 Гц, которые прослеживались длительное время и непрерывно на всех компонентах записи и прерывались единовременно со сходом оползня. Это вполне могут быть собственные колебания Елбашинского отвала, если для оценки значений частот руководствоваться методикой [15]. Так, линейные размеры объекта, имеющего первую собственную частоту $f=0.6$ Гц, могут составлять

$L=V/2f$, где при скорости $V=2.6$ км/с, $L\approx 2.2$ км; эта величина хорошо совпадает с размерами отвала. Кроме этого, можно заметить, что на Е-компоненте отмеченные колебания изменились: понизилась амплитуда и незначительно увеличилась частота. Вероятно, последние сигналы также связаны с колебаниями отвала, физические параметры которого поменялись после деформации.

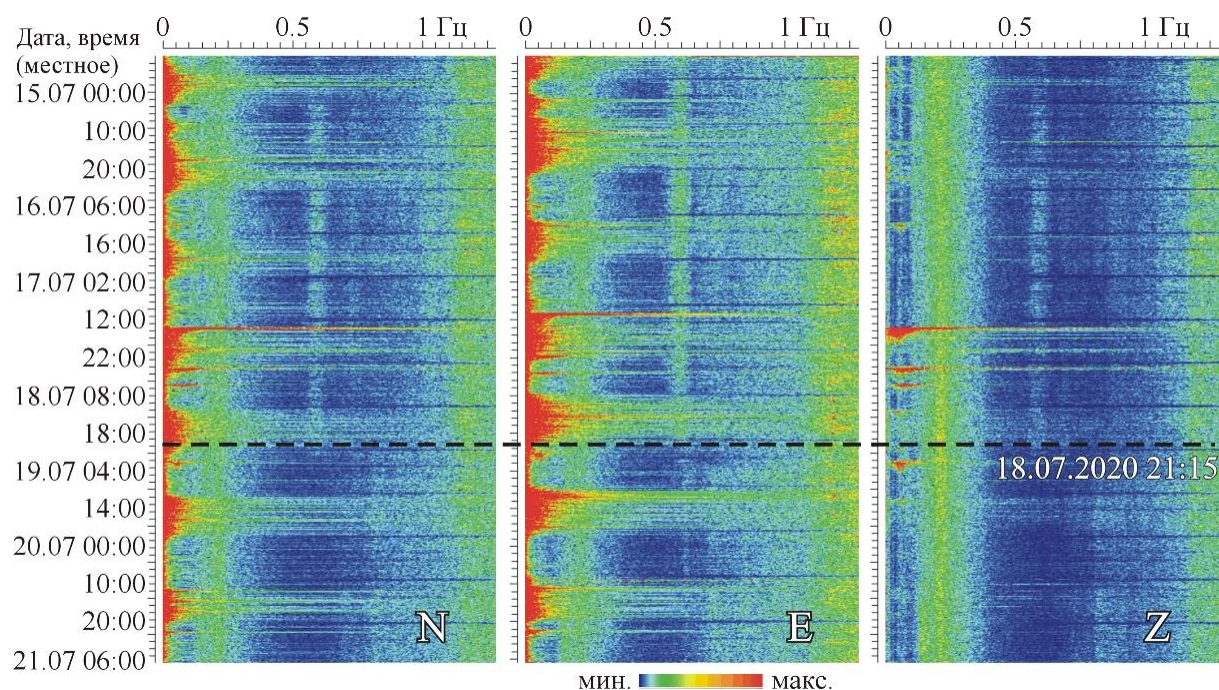


Рисунок 3.42 – Спектрограмма сейсмических данных станции «Харино»

Предыдущими исследованиями установлено, что в записях сейсмических станций, установленных на расстояниях в несколько километров от крупных промышленных объектов (например, плотины ГЭС), содержатся сигналы, источником которых является сам объект, колеблющийся на собственных частотах. В качестве примера приведем рисунок 3.43, на котором демонстрируется способ дистанционного мониторинга собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Видно, что локальные максимумы спектров колебаний верхней части плотины, отражающие собственные частоты сооружения, что подтверждено в работе [13], прослеживаются и на усредненном спектре сеймостанции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от ГЭС (рисунок 3.43б). Таким образом, вычисляя усредненные спектры в разное время, можно отслеживать изменения собственных частот объекта, используя данные с удаленной сейсмической станции (рисунок 3.43в).

Необходимо отметить, что амплитуды зарегистрированных сеймостанцией колебаний, источником которых является удаленный от нее объект, как правило имеют очень низкие значения по сравнению с фоном помех. Так, в рассмотренном выше примере, они составляют первые десятки нм/с, что на два и более порядка ниже по

интенсивности, чем при регистрации на плотине. Поэтому, для выделения таких слабых сигналов необходимо применять процедуры, повышающие соотношение сигнал/шум. В ФИЦ ЕГС РАН разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющее проводить анализ изменений амплитудно-частотных характеристик сейсмических записей с течением времени [16]. Одна из заложенных в нем функций позволяет рассчитывать усредненные амплитудные спектры в выбранном частотно-временном окне. Алгоритм их вычисления состоит в расчете наборов амплитудных спектров для заданных временных интервалов, на которые разделяется сейсмическая запись, с их последующем усреднением. Это позволяет, при условии достаточной длины записи, выделить из сейсмического шума полезные сигналы, имеющие квазистабильные спектры, по амплитуде на порядки ниже уровня шума. Так, для уверенного выделения сигналов, изображенных на рисунок 3.43в, необходимо усреднять записи длительностью около суток.

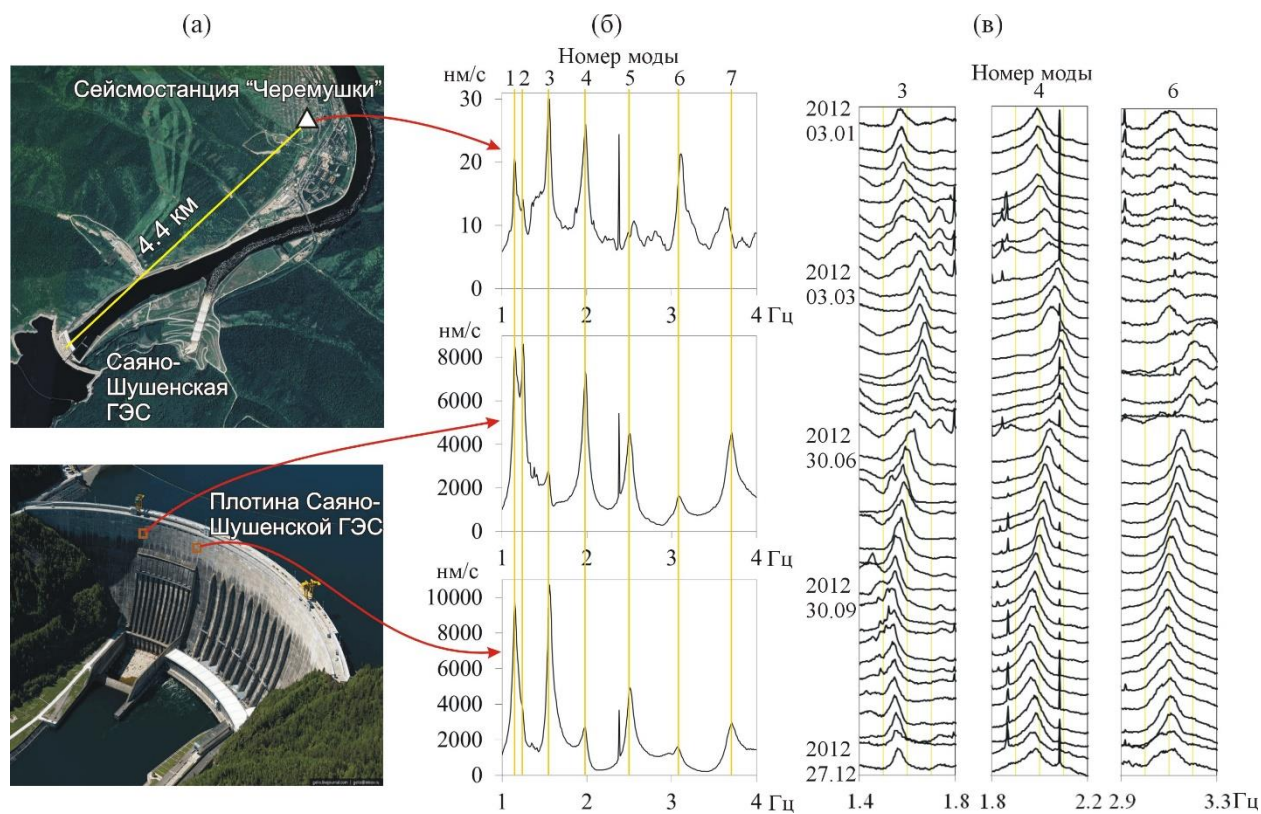


Рисунок 3.43 – К способу дистанционного мониторинга собственных частот сооружения.
 (а) – схемы сейсмических наблюдений в окрестности и в плотине Саяно-Шушенской ГЭС;
 (б) – усредненные спектры одновременных записей; (в) – фрагменты усредненных спектров суточных записей сейсмостанции «Черемушки» за 2012 г.

На рисунке 3.44 показаны фрагменты усредненных спектров, вычисленных по сейсмическим записям длиной в 5 суток до и после момента схода оползня. Видно, что после события 18.07.2020 21:15 выделенные колебания с частотой около 0.6 Гц исчезают, что позволяет связать их с колебаниями отвала. Наличие сигналов на удаленных станциях

обусловлено распространением совокупности сейсмических волн от источника колебаний. Так как источник поверхностный, то большая часть энергии переносится за счет поверхностных волн Лява и Релея. Из рисунка 3.44 видно, что амплитуда колебаний на Z-компоненте заметно ниже, чем на E- и N-, поэтому наибольшая часть энергии может быть связана с распространением волны Лява, колебания которой перпендикулярны направлению на источник. Это видно из рисунка – у станции «Харино» (KHAR), расположенной с юга от отвала, наибольшая энергия колебаний сосредоточена на перпендикулярной E-компоненте, а у станций NVS и BSTK, расположенных с северо-запада и юго-запада соответственно, амплитуды колебаний на горизонтальных компонентах имеют близкие значения. Таким образом, наблюдаемые особенности волнового поля на сейсмостанциях не противоречат известным представлениям о распространении сейсмических волн, а описанный прием может быть использован в дальнейшем при идентификации источников колебаний, записанных на сейсмостанциях.

Так как наибольшие по амплитуде колебания сосредоточены на E-компоненте ближайшей к отвалу станции «Харино», а значит меньше подвержены негативному влиянию помех, дальнейшие построения и интерпретация будет производиться с использованием указанных записей.

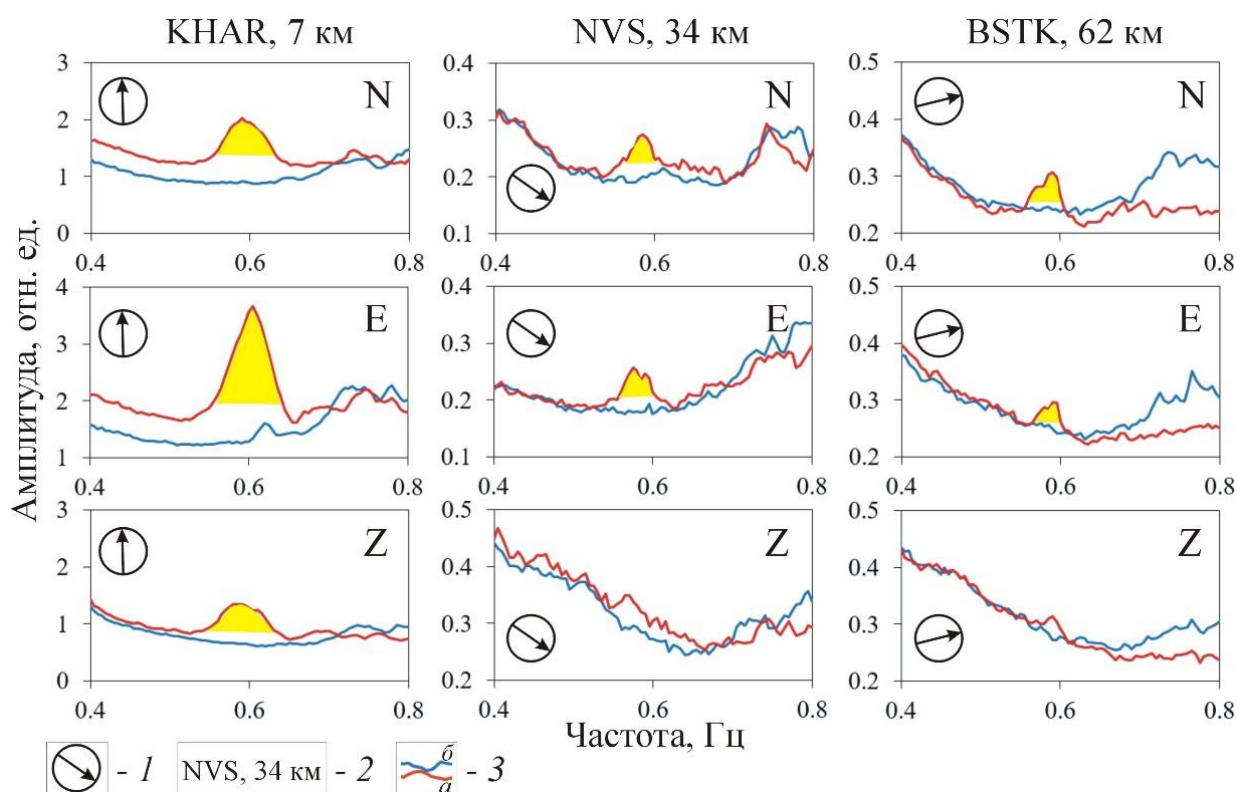


Рисунок 3.44 – Проявление в записях сейсмостанций колебаний Елбашинского отвала Колыванского месторождения. 1 – направление на месторождение; 2 – код сейсмостанции, расстояние до отвала; 3 – усредненные амплитудные спектры пятисуточных записей до (а) и после (б) события 18.07.2020 21:15

Результаты и обсуждения

Для повышения достоверности выявленной связи колебания с частотой 0.6 Гц с Елбашинским отвалом, проанализированы архивные записи сейсмической станции за 4.5-годовой период – с 01.01.2017 по 31.07.2021 (рисунок 3.45-3.46). Отвал формировали не один год, и поэтому колебания, связанные с ним, должны были прослеживаться длительное время. На рисунке 3.45а показаны изменения фрагментов (в интервале частот 0.4-1.0 Гц) усредненных спектров десятисуточной сейсмической записи, а на рисунке 3.46а – соответствующие определения частот. Здесь и далее длина записи для вычисления единичного спектра составляла 200 с, что определило разрешенность спектра – 0.005 Гц. Выбрана для анализа Е-компонента, как наиболее интенсивная по амплитуде, а результат усреднения соотнесен с серединой соответствующего временного интервала. Из рисунка видно, что на записях, начиная с конца 2018 г. – начала 2019 г., вплоть до момента деформации, присутствуют колебания f1 с частотами, меняющимися в пределах 0.60-0.64 Гц, которые исчезают после схода оползня. Наблюдается плавное и монотонное уменьшение частоты с течением времени. Из рисунка 3.45б и 3.46б, где представлены усредненные спектры пятисуточных записей за более короткий период наблюдений и соответствующие им определения частот, видно, что, с начала 2020 г. и до момента схода оползня, колебания f1 наблюдаются с частотами 0.60-0.61 Гц, которые затем сменяются колебаниями f2 с меньшей в несколько раз амплитудой и с частотой, повышенной до 0.620-0.625 Гц. Колебания f2 после 30.08.2020 становятся практически неразличимыми, вероятно, из-за снижения их амплитуд. Для более подробного рассмотрения изменений характеристик исследуемых колебаний были построены наборы усредненных спектров за односуточные интервалы записей и определены частоты (рисунок 3.45в, 3.46в). Видно, что, примерно за 20 дней до деформации, происходил постепенный рост амплитуд колебаний f1, а за 2 дня до оползня – их снижение. Амплитуда сменивших их колебаний f2 примерно в 5-6 раз ниже.

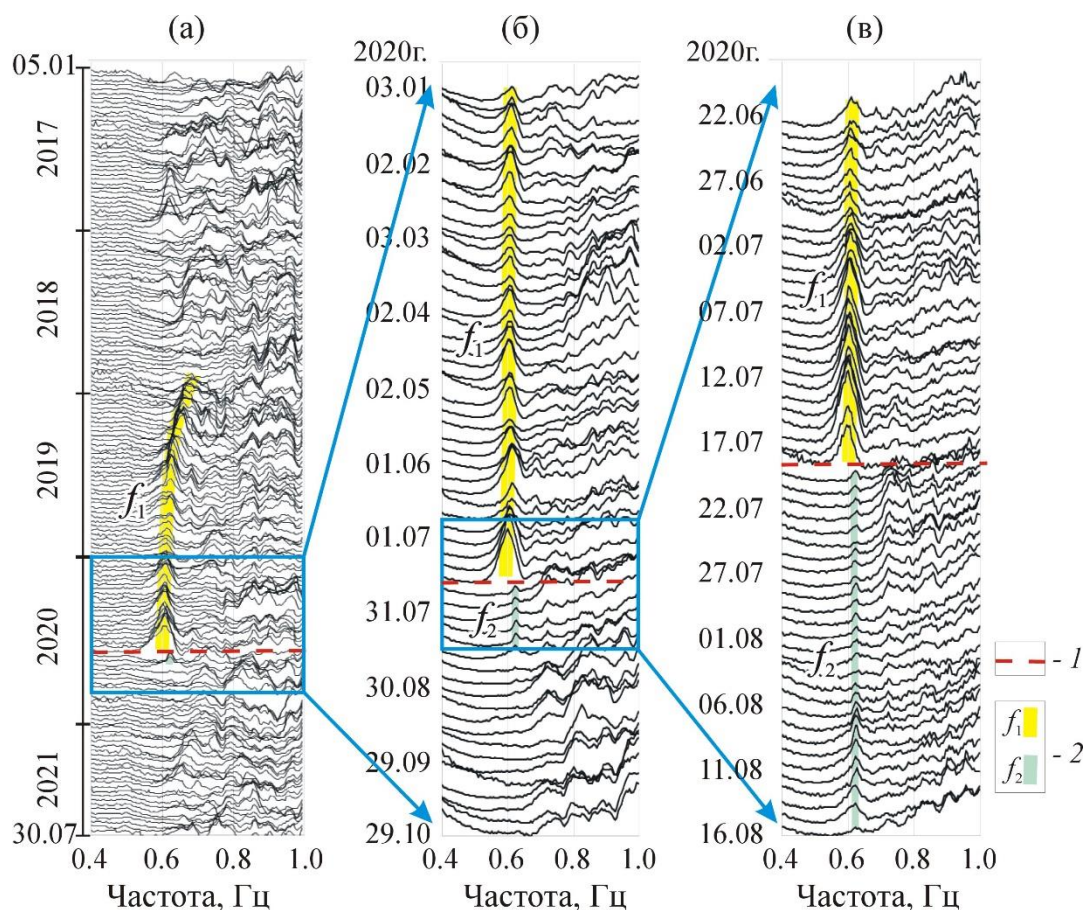


Рисунок 3.45 – Эволюция колебаний отвала по данным Е-компоненты сейсмостанции «Харино». (а, б, в) – ряды усредненных амплитудных спектров десяти, пяти и односуточных записей, соответственно. 1 – отметка времени оползня (18.07.2020 21:15); 2 – выделенные колебания отвала

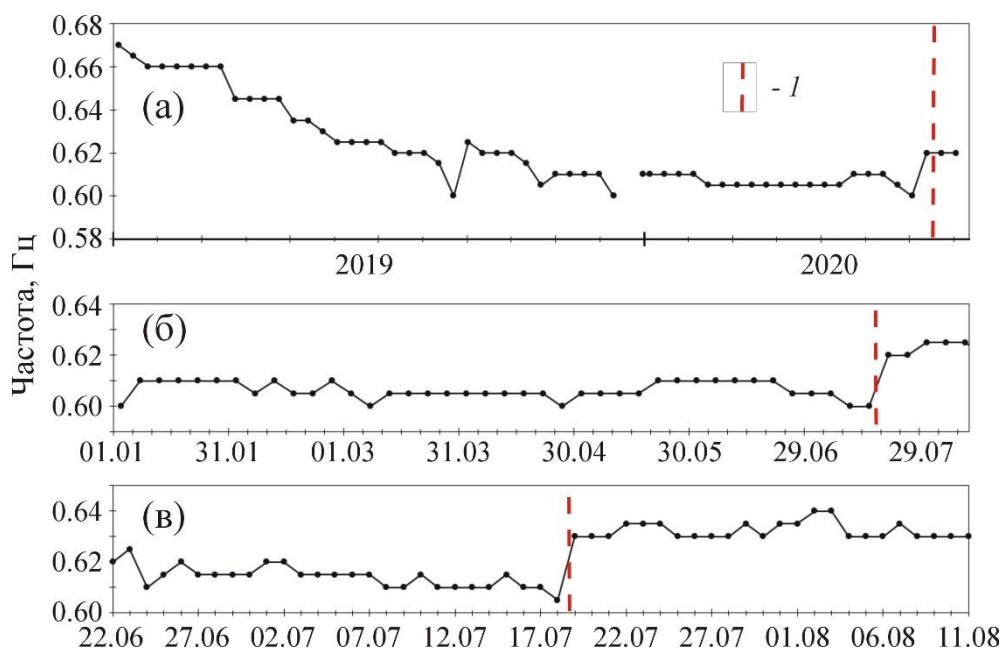


Рисунок 3.46 – Изменения частоты колебаний отвала, определенные по усредненным амплитудным спектрам десяти (а), пяти (б) и односуточных (в) записей. 1 – отметка времени оползня (18.07.2020 21:15)

Процессы, происходящие на Елбашинском отвале до и после деформации, с учетом анализа спутниковых снимков и записей сейсмической станции «Харино», объясняются следующим образом. По фотографии оползня видно, что он распространился, подобно грязевому потоку, на расстояние, существенно превышающее высоту отвала. Такое могло произойти только при условии, что породы были сильно обводнены. Как следует из спутниковых снимков, уровень воды в образовавшейся при отсыпке отвала запруде превышал основание отвала на несколько десятков метров. Площадь отвала более 2 км², отсюда можно оценить, что в нем находилась вода объемом, не менее 7 млн. м³ (при среднем водонасыщении 10 %), которая и вытекла из тела отвала вместе с породой. Обводнение отвала являлось причиной его неустойчивости, что выражалось в его многомесячных колебаниях с частотой 0.60-0.67 Гц, характеристики которых менялись как в процессе формирования отвала, так и после деформации. Отсыпка горных пород приводила к постепенному росту массы и размеров отвала, что проявилось в постепенном уменьшении частоты колебаний с 0.67 Гц до 0.60-0.61 Гц. Сход оползня привел к уменьшению массы отвала, и этим объясняется увеличение частоты колебаний, которое составило около 3%. На столько же должна была измениться масса отвала, если на колебания не повлияли другие факторы. После деформации, огромные массы воды вместе с породой вытекли из тела отвала, и это привело к увеличению жесткости основания, что проявилось в резком уменьшении амплитуд колебаний. Вероятно, уже после оползня, какая-то часть воды постепенно продолжала выходить из отвала. Этим можно объяснить, что колебания f₂ затихли примерно через месяц после события. Обводнение отвала и является основной причиной возникновения оползня. А что же явилось спусковым крючком? Какие явления способствовали его возникновению? Как отмечалось, анализ записей сейсмологической сети, окружающей месторождение, не выявил значимых сейсмических воздействий, которые могли бы спровоцировать сход оползня. Это позволяет полагать, что данная деформация возникала по сценарию «последней капли».

Заключение

Анализ данных спутниковых снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположение о причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита, как формирование значительных горизонтальных колебаний в теле отвала, которые при сильном обводнении последнего спровоцировали сход оползня. Выделенные в отчете собственные колебания отвала позволяют теперь ставить целенаправленные работы по регистрации сейсмических шумов на подобных объектах и разбираться в связях обводненности пород с изменениями амплитудно-частотных характеристик собственных колебаний таких крупных объектов.

3.4.3 Разработка аппаратуры и программного обеспечения

Исследование состояния зданий, сооружений, промышленных конструкций в целом и их частей в настоящее время, в том числе, предполагает обработку информации, полученной с помощью сейсмических датчиков, расположенных как в непосредственной близости от изучаемых объектов, так и на существенных (до 20 км) удалениях. Методика изучения амплитудных спектров развивается в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в течение последнего десятилетия. За этот период времени были получены и проанализированы сейсмические данные мониторинга Саяно-Шушенской и Новосибирской ГЭС.

Современные технологии развития цифровых сетей связи и сейсмических регистраторов (в качестве примера рассматривается «Байкал-8») дают возможность реализовать передачу сейсмических данных с места их записи на сервер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в режиме реального времени. Специалистами филиала разработаны программное обеспечение и аппаратная конфигурация мобильного комплекса (далее – Комплекс), позволяющего получать на удаленном 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 Комплекса приведена на рисунке 3.47

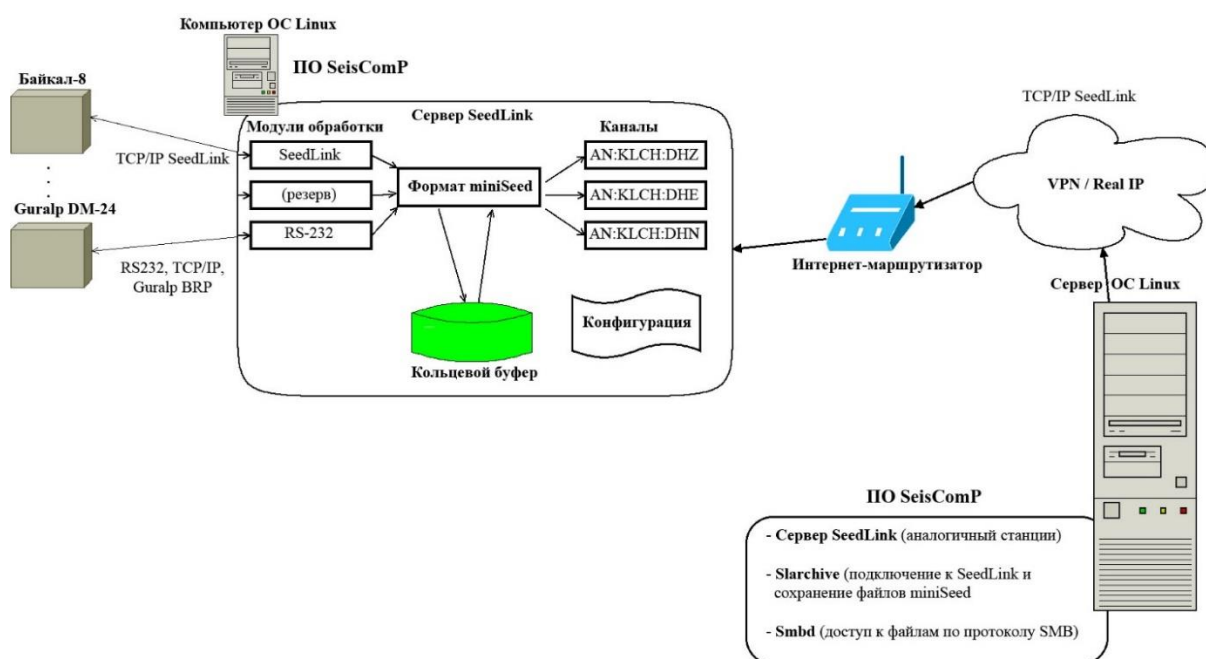


Рисунок 3.47 – Архитектура разработанного Комплекса

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

- сейсмического датчика (используется GD-4.5, или GD-10);
- 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 3.48) работает под управлением ОС Seismobian, разработанной на базе стандартного дистрибутива Linux (Raspbian). 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 3.48 – Микрокомпьютер Raspberry Pi

Использование стандартного решения позволяет, в случае необходимости, осуществить быструю замену вышедшего из строя оборудования.

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 3.49).

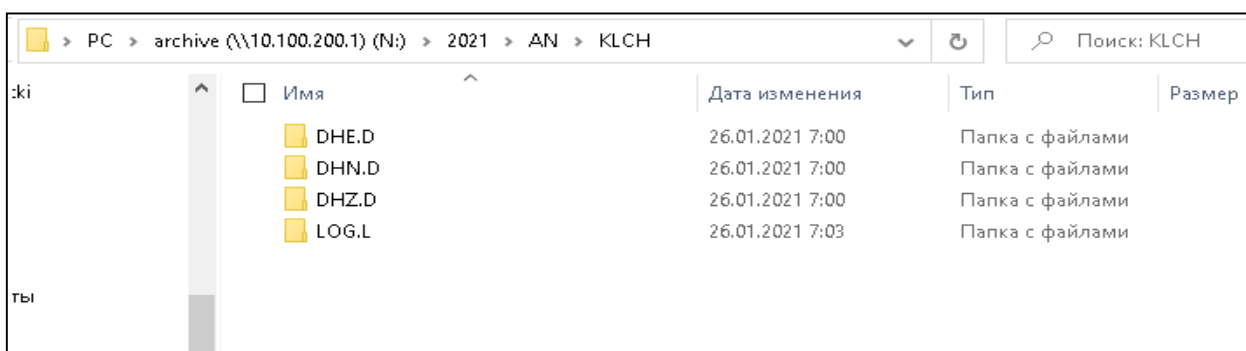


Рисунок 3.49 – Доступ к архиву данных (ОС Windows 10, OpenVPN)

Следует отметить, что доступ к данным разрешен только авторизованным пользователям, в рамках протокола OpenVPN, что позволяет обеспечить необходимый уровень безопасности при удаленной работе специалистов организации.

На сервере организован специальный web-сервис, который позволяет отслеживать поступление данных (задержки буферизации и актуальность информации) в режиме реального времени (рисунок 3.50).

"СЕФ ФИЦ ЕГС РАН"

Real-time stations

Station	Latencies		
	Data	Feed	Diff.
AN BSTK	2.3 s	0.1 s	2.1 s
AN ETLN	0.9 s	0.3 s	0.6 s
AN IMVG	1.0 s	0.2 s	0.9 s
AN KLCH	1.5 s	0.4 s	1.1 s
AN KZBS	1.2 s	0.0 s	1.2 s
AN MKSB	1.0 s	0.3 s	0.7 s
AN RSPD	1.1 s	0.4 s	0.7 s
AN SFGS	1.2 s	0.5 s	0.7 s
AN SVSH	0.8 s	0.1 s	0.8 s
AN UNVR	0.8 s	0.1 s	0.7 s
D0 AD355	7.7 s	0.8 s	6.8 s
D0 ADM	5.9 s	0.2 s	5.7 s
D0 AX355	5.7 s	0.8 s	4.9 s
D0 AY355	6.1 s	0.8 s	5.3 s
D0 AZ355	5.0 s	0.8 s	4.2 s
D0 IVS	8.3 s	2.7 s	5.6 s

Latencies:

< 1 m	<30 m	< 1 h	< 2 h	< 6 h	< 1 d	< 2 d	< 3 d	< 4 d	< 5 d	> 5 d
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Last updated 2021/10/24 07:28:06 UTC

[GS SB RAS Homepage](#)

Рисунок 3.50 – Монитор слежения доступности подключенных станций

В течение отчетного 2021 года СЕФ ФИЦ ЕГС РАН осуществил закупку восьми новых комплектов оборудования для мобильных Комплексов, интегрировал на сервер сбора информации станции из Камчатского филиала, приступил к сотрудничеству с ИВМиМГ СО РАН для регистрации данных со скважины этой организации (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Описание сейсмических станций на сервере сбора информации

№ п/п	Название	Место установки, принадлежность и назначение
1	BSTK	НСО, полигон «Быстровка», АСФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг НГЭС
2	ETLN	г. Новосибирск, СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
3	IMVG	г. Норильск, Дворец культуры ПАО «Норникель», СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
4	KLCH	НСО, сейсмостанция «Ключи», СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг сооружения
5	KZBS	г. Междуреченск, ВГП шахты «Распадская-Коксовая», СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг оборудования
6	MKSB	г. Новосибирск, скважина ИВМиМГ СО РАН, ИВМиМГ СО РАН, наблюдение
7	RSPD	г. Междуреченск, ВГП шахты «Распадская-Коксовая», СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг оборудования
8	SFGS	г. Междуреченск, ВГП шахты «Распадская-Коксовая», СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг оборудования
9	SVSH	г. Новосибирск, СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания

10	UNVR	г. Новосибирск, СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
11	AD355	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
12	ADM	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
13	AX355	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
14	AY355	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
15	AZ355	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания
16	IVS	г. Петропавловск-Камчатский, КФ ФИЦ ЕГС РАН, мониторинг здания

Особенностью Комплекса является возможность удаленно проводить настройки микрокомпьютера (рисунок 3.51).

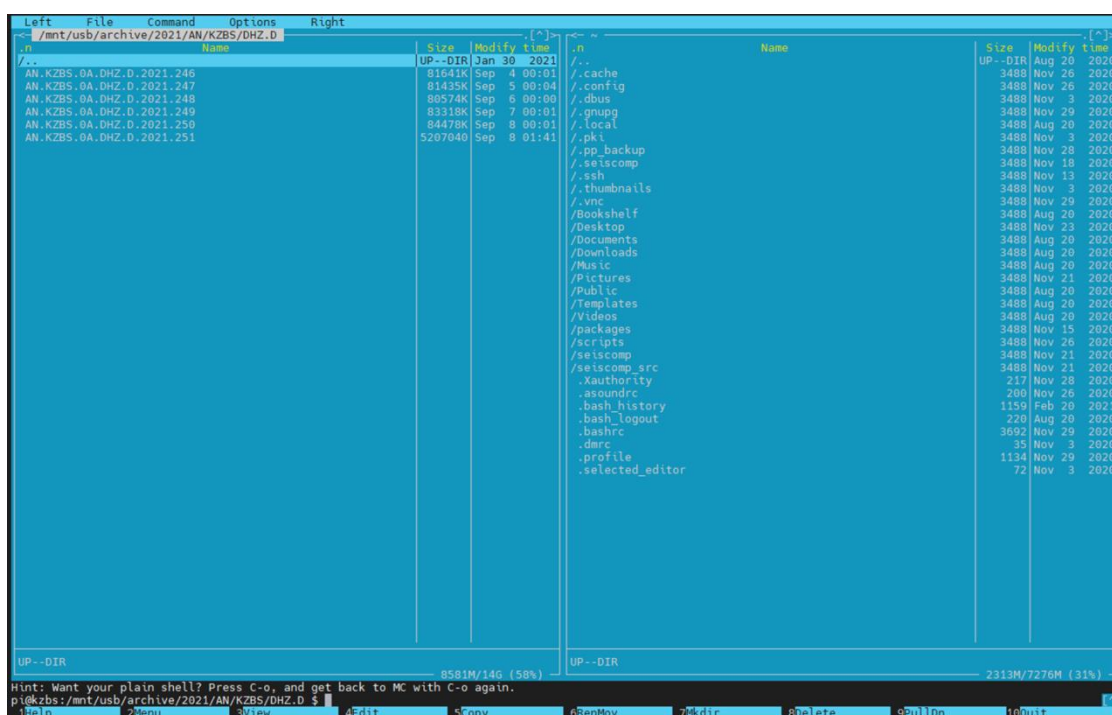


Рисунок 3.51 – Окно удаленного доступа к микрокомпьютеру

Администрирование настроек регистратора аналогично осуществляется с помощью удаленного доступа (рисунок 3.52).

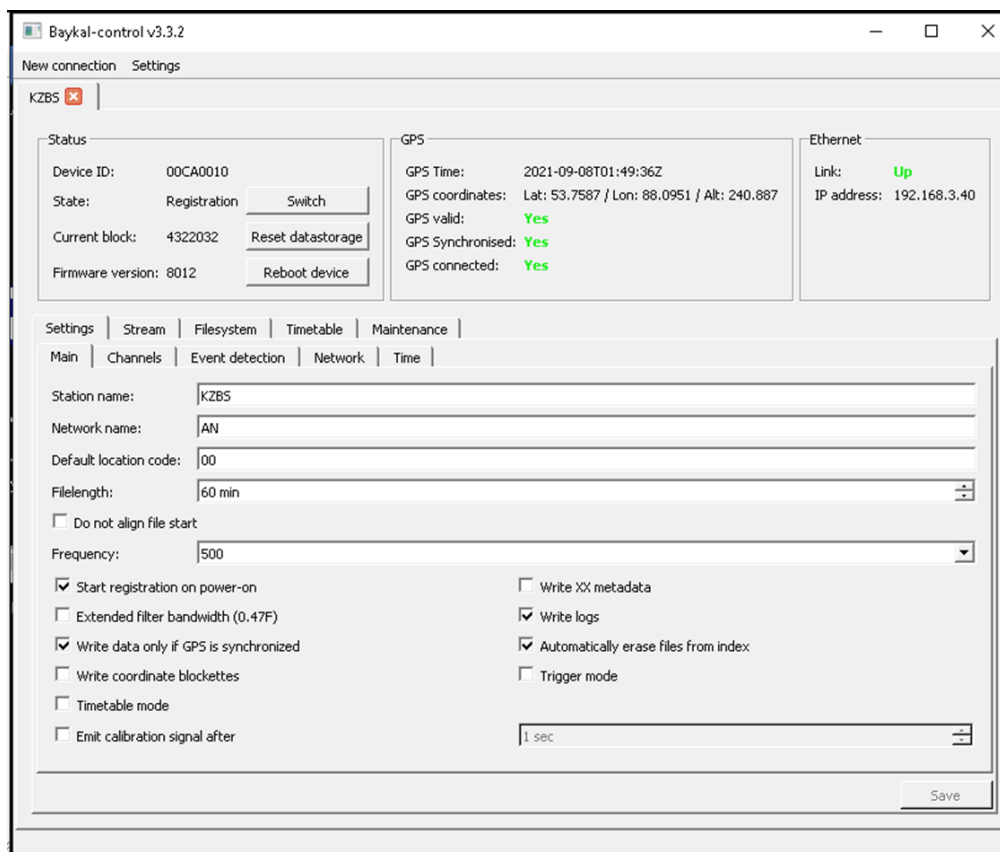


Рисунок 3.52 – Настройка параметров регистратора «Байкал-8» в удаленном режиме

Завершена регистрация РИД: программы SpectrumSeism, которая предназначена для анализа спектров сейсмических данных. Возможно создание 2D-спектрограмм, а также спектров на указанной трассе. Для пользователя доступен набор инструментов для изучения спектральных особенностей данных, включая расширенные режимы визуализации и экспорта для дальнейшей работы со сторонним программным обеспечением. Поддерживаются следующие форматы данных: miniSeed, vibr2, «Роса» и «Байкал».

Благодаря использованию современных алгоритмов, реализована возможность быстрого анализа зависимости амплитуды частоты от времени, с любой заданной точностью. Программа характеризуется удобным интерфейсом пользователя, позволяющим обрабатывать большие объемы данных в режиме реального времени

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (РИД) приведено на рисунке 3.53.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021666241

SpectrumSeism

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (RU)*

Авторы: *Селезнев Виктор Сергеевич (RU), Лисейкин Алексей Владимирович (RU), Севостьянов Дмитрий Борисович (RU), Брыксин Алексей Александрович (RU)*



Заявка № 2021665611

Дата поступления 11 октября 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 11 октября 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

документ подписан электронной подписью
Сертификат 8a2245c5f8c087a5c1509a4a42f03092e5a118
Владелец **Иванов Григорий Петрович**
Действителен с 10.10.2021 по 10.01.2035

Г.П. Ивлиев

Рисунок 3.53 – Свидетельство о регистрации SpectrumSeism

3.4.4 О способе мониторинга состояния вращательных механизмов по данным сейсмических наблюдений

Исследование посвящено развитию разрабатываемых в ФИЦ ЕГС РАН методов неразрушающего контроля состояния сооружений и оборудования и основано на результатах анализа сейсмических данных, полученных при мониторинге работы главной нагнетательной вентиляционной установки шахты «Распадская – Коксовая».

Работа основана на материалах исследований, выполненных в рамках договора оказания услуг проведения опытно-методических работ по разработке технологии сейсмического мониторинга вентиляционной установки шахты «Распадская-Коксовая» в 2021 г. Объектом исследования является вентиляционная установка, представляющая собой два попеременно работающих шахтных вентилятора, выполненных в виде одноступенчатого осевого вентилятора с высоким КПД. Приведение в действие осуществляется расположенным перед вентилятором синхронным двигателем. Двигатель работает с фиксированной частотой вращения. Рабочее колесо динамически уравновешено и для вентиляции имеет 8 лопастей, регулируемых гидравликой, для подачи оптимального количества воздуха в шахту, при этом регулировка осуществляется автоматически.

Цель исследования состоит в изучении причинно-следственных связей между изменениями режимов работы вентиляционной установки и регистрируемыми колебаниями в надшахтном сооружении. Определение возможности применения технологии, разработанной в ФИЦ ЕГС РАН, позволяющей комплексно отслеживать и контролировать параметры стационарного вращающегося оборудования.

Метод исследования и фактический материал

Для решения поставленных задач осуществлялась регистрация сейсмических колебаний в различных пунктах наблюдения в помещении машинного зала надшахтного сооружения. На рисунке 3.54 представлена схема наблюдения и расположение вентиляционной установки (вентиляторы ВУ-1 и ВУ-2). Каждый пункт наблюдения состоял из трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-4.5, GD-10) и автономного сейсмического регистратора («Байкал-7», «Байкал-8»). Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников, следующие: X – направлены вдоль оси вентиляционной установки, Y – поперек, Z - вертикально.

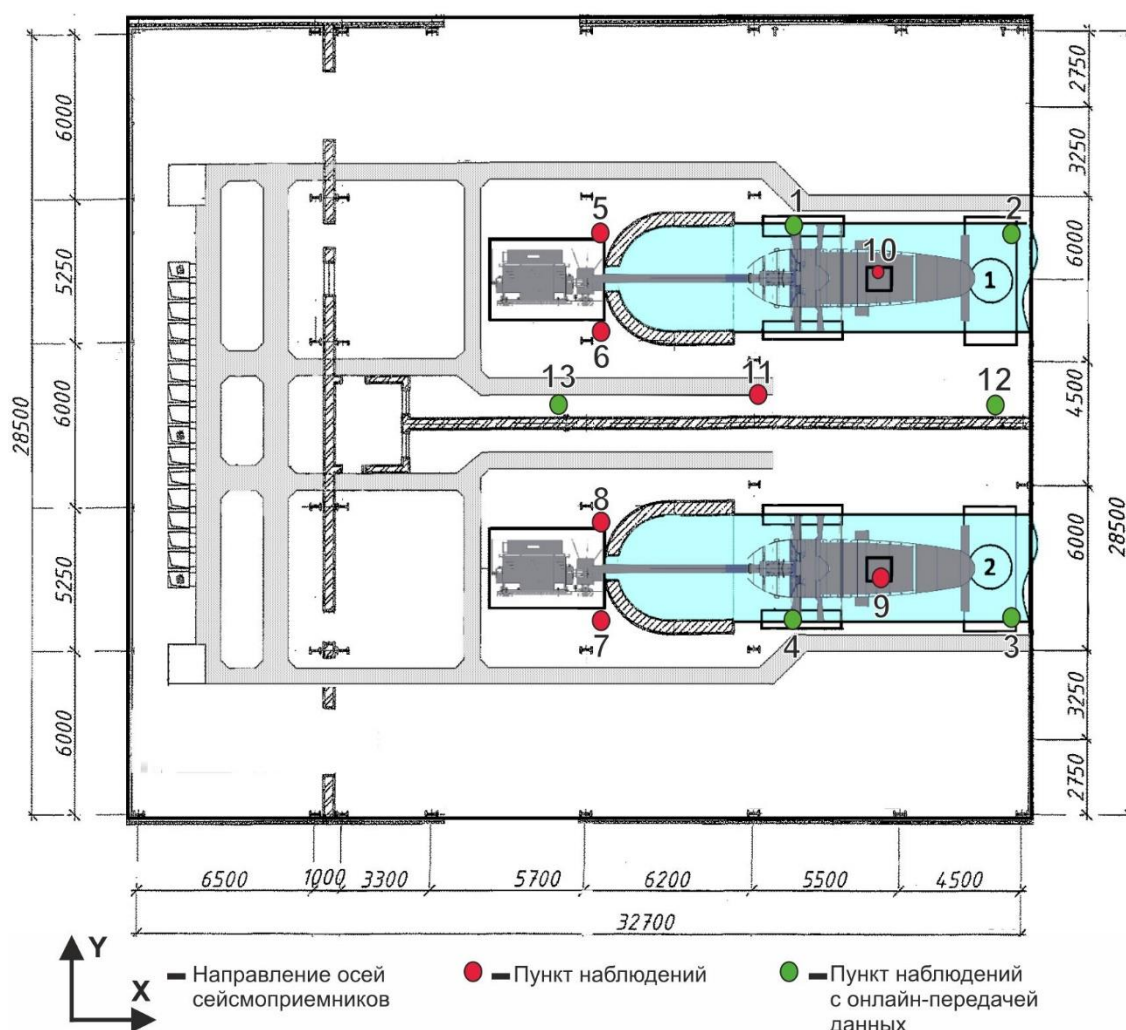


Рисунок 3.54 – Схема сейсмических наблюдений в надшахтном сооружении

Для обработки использованы разработанные и запатентованные ФИЦ ЕГС РАН способы обработки сейсмических данных [2;3]. 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:

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (3.7)$$

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

Для количественных оценок строились графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах (связанных с работой данного источника). Графики вычислялись по формуле:

$$A_{\omega}(t) = \frac{1}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \right|, \quad (3.8)$$

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

Результаты исследования

На первоначальном этапе обработки данных был определен набор частот, связанных с работой вентиляционных установок. На рисунках 3.55 и 3.56 представлены примеры спектрограммы и амплитудных спектров Z-компоненты записей, полученных при регистрации колебаний в машинном зале в т.1, во время работы вентиляционной установки № 1, при остановке № 2. Для наглядности происходящих процессов в сейсмическом поле колебаний на спектрограмму нанесены графики изменения оборотов двигателей ВУ-2 и ВУ-1. На спектрограмме хорошо видны понижение уровня колебаний, связанное с моментом отключения двигателя ВУ-2, и рост уровня колебаний в момент включения ВУ-1.

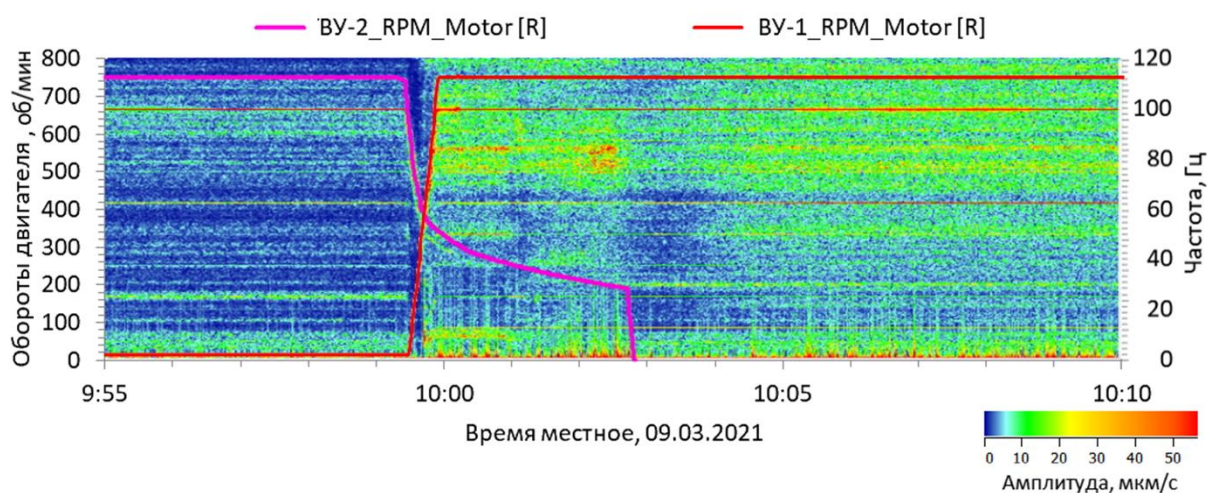


Рисунок 3.55 – Спектрограмма сейсмической записи, полученной при переключении работы вентиляционных установок с ВУ-2 на ВУ-1 (09.03.2021) в точке наблюдений возле ВУ-1

На рисунке 3.56 видно, что в составе записей присутствуют монохроматические сигналы, частоты которых кратны оборотной частоте вращения установки, т. е. весь набор частот описывается соотношением $f = N \cdot 12.5$ Гц, где f – частота монохрома, N – целое число (значение кратности частоте вращения), 12.5 Гц – оборотная частота установки.

При этом, абсолютные значения амплитуд этих монохромов различались. Анализ спектров записей со всех пунктов регистрации показал, что наибольшая амплитуда (при работе установок) наблюдалась для монохрома с частотой 100 Гц, который соответствует кратности $N=8$ и является «лопастной» частотой. Наибольшие значения (до 460 мкм/с) наблюдались в спектрах записей т.1, установленной возле ВУ-1. Наибольшие значения этих же колебаний для ВУ-2 составляли 105 мкм/с. В целом, при запусках, происходящих 09.03.2021 и 09.04.2021, амплитуды колебаний, зарегистрированные в точках возле ВУ-1 во время её работы, имели повышенные значения относительно точек возле ВУ-2, при аналогичных условиях.

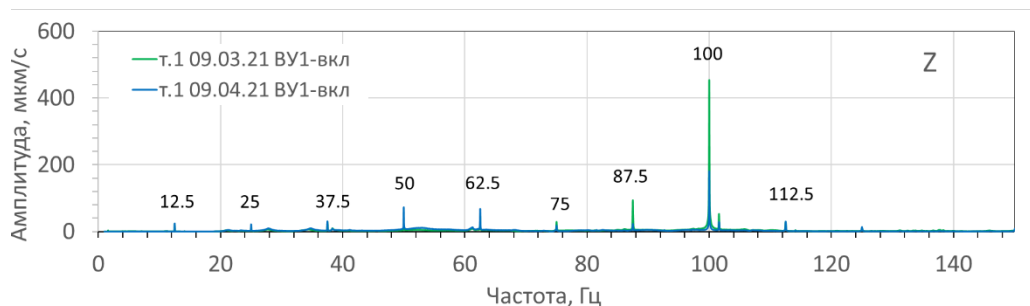


Рисунок 3.56 – Спектры записи в точке наблюдения возле ВУ-1, в период её работы

На рисунке 3.57 представлен пример графиков изменений амплитуды колебаний на выделенных частотах, при смене работы вентиляционных установок. На рисунках видно, что колебания всего набора частот фиксируют момент включения и отключения агрегатов, но явной корреляции сигналов системы контроля и зарегистрированных колебаний не наблюдается. Аналогичные результаты были получены для показаний со всех точек наблюдений.

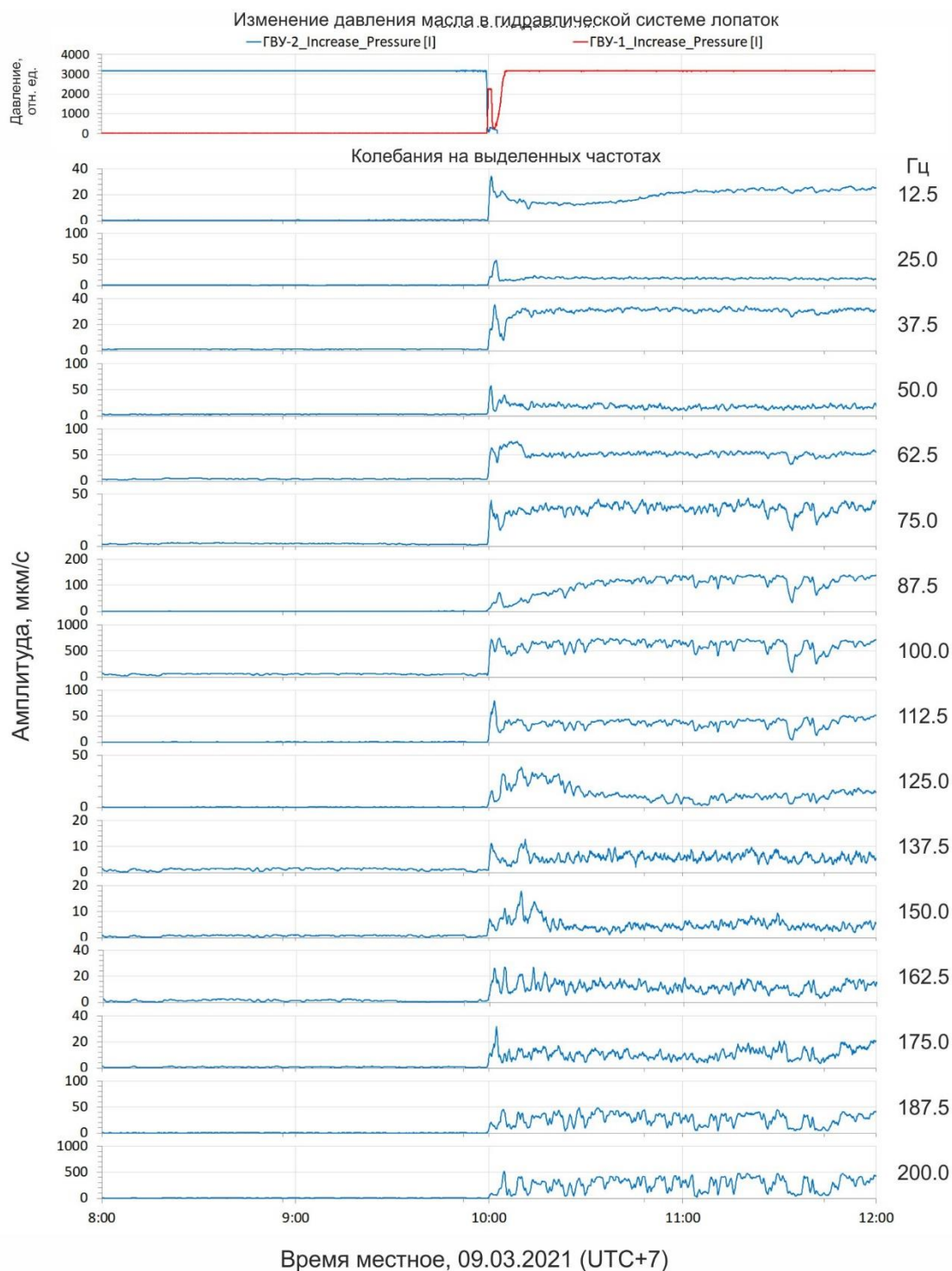


Рисунок 3.57 – Графики изменения амплитуд колебаний на частотах, кратных оборотной частоте вентиляционной установки, зарегистрированных в т.1, Z-компонента

С другой стороны, известно, что основные составляющие вентиляционной установки – вращательные элементы, такие как: вал, двигатель, лопасти и т.д. При правильной настройке и регулировке оборудования основным источником колебаний, излучаемых установкой, будут аэродинамические процессы и пульсации потока воздуха в воздуховоде. При неправильной регулировке или поломке, нарушающих симметрию вращающихся деталей, неизбежно возникновение дополнительных сил, создающих

прецессионное движение. Происходит смещение вектора излучаемых колебаний в область поперечных осей вращающейся установки (Y и Z компонент). Схематично это представлено на рисунке 3.58, на примере вращающегося гироскопа.

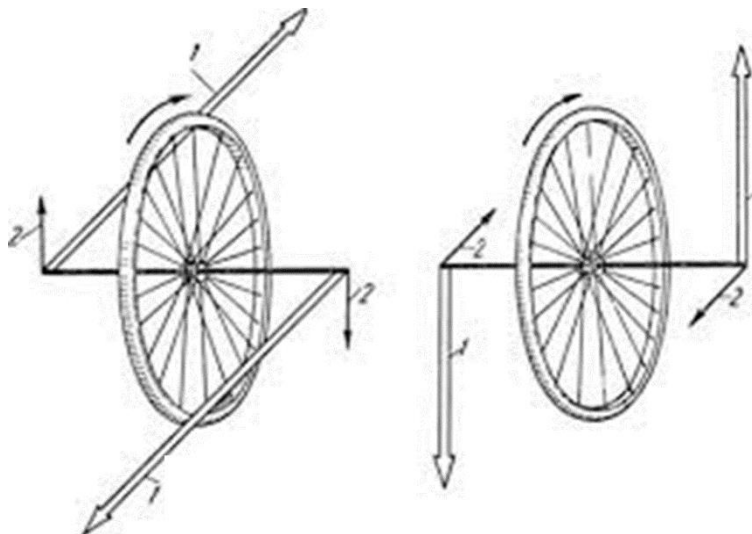


Рисунок 3.58 – Вращение гироскопа и направление сил прецессии (1), возникающих под влиянием усилий, стремящихся повернуть ротор гироскопа (2)

Чтобы отследить вышеописанные эффекты, предлагается рассматривать зарегистрированные сигналы в сферических координатах. Изменение значения углов в сферической системе характеризует изменение вектора излучаемых колебаний, что может свидетельствовать о прецессионном движении.

Для этого использовано математическое преобразование изучаемых сигналов из декартовых в сферические координаты с помощью формул:

$$\begin{cases} R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \\ \theta = \arccos \frac{Z}{R} \\ \varphi = \arctg \frac{Y}{X} \end{cases}, \quad (3.9)$$

где R – расстояние до начала координат, θ – угол, прилегающий к оси Z, φ – угол, прилегающий к оси X (в плоскости XY).

Согласно вышеописанному, графики колебаний на выделенных частотах были преобразованы в сферические координаты. На рисунках 3.59 и 3.60 представлены графики колебаний на оборотной частоте, во время переходных процессов (ПП), зарегистрированных 09.03.2021 с 9:59 по 10:05 и 09.04.2021 9:58 по 10:03 в т.1. Следует отметить, что значения амплитуды R отнормированы относительно друг друга, и на графиках представлены в относительных единицах. Углы φ и θ , прилегающие к осям Y и Z, соответственно, рассчитаны по формуле (3.9). На рисунках видно, что с течением времени колебания смещаются в определенные зоны в пространстве, наиболее хорошо это

проявляется в плоскости φ - θ , как в моменты включения, так и при отключении. Для показаний с т.1 колебания концентрируются в пределах $\theta \sim 55-85^\circ$, $\varphi \sim 1-17^\circ$

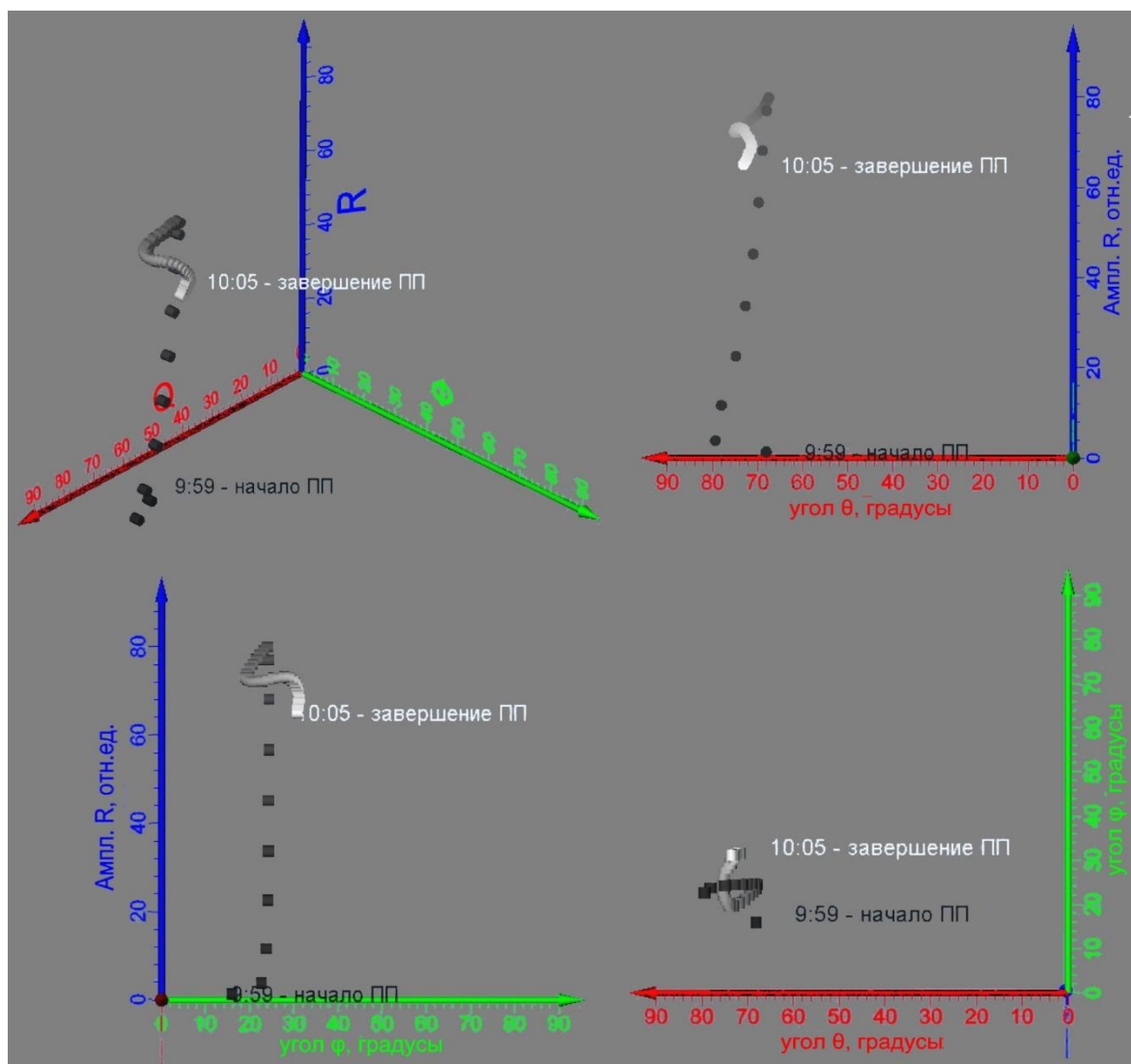


Рисунок 3.59 – Результат обработки сейсмических записей, полученных в т.1: колебания на оборотной частоте 12.5 Гц. Черными маркерами показаны колебания, зарегистрированные во время переходного процесса (ПП), возникшего при отключении ВУ-2 и включении ВУ-1. Яркие тона соответствуют началу, а блеклые окончанию записи. Шаг маркеров 20 секунд. 09.03.2021, время местное

Для определения расположения данных зон и дальнейшего понимания закономерности изменения объёма данных «зон» с течением времени, были построены графики за более длительный период - 3 дня. На рисунке 3.60 показан пример графика колебаний на оборотной частоте, зарегистрированных в т.1 во время переходных процессов включения-отключения вентиляционных установок. Из графиков видно, что со временем происходит процесс стабилизации в плоскости θ - φ , где колебания фокусируются в определенные зоны. Колебания стабилизируются через, примерно, 6 часов в областях $\theta \sim 60-90^\circ$, $\varphi \sim 5-20^\circ$.

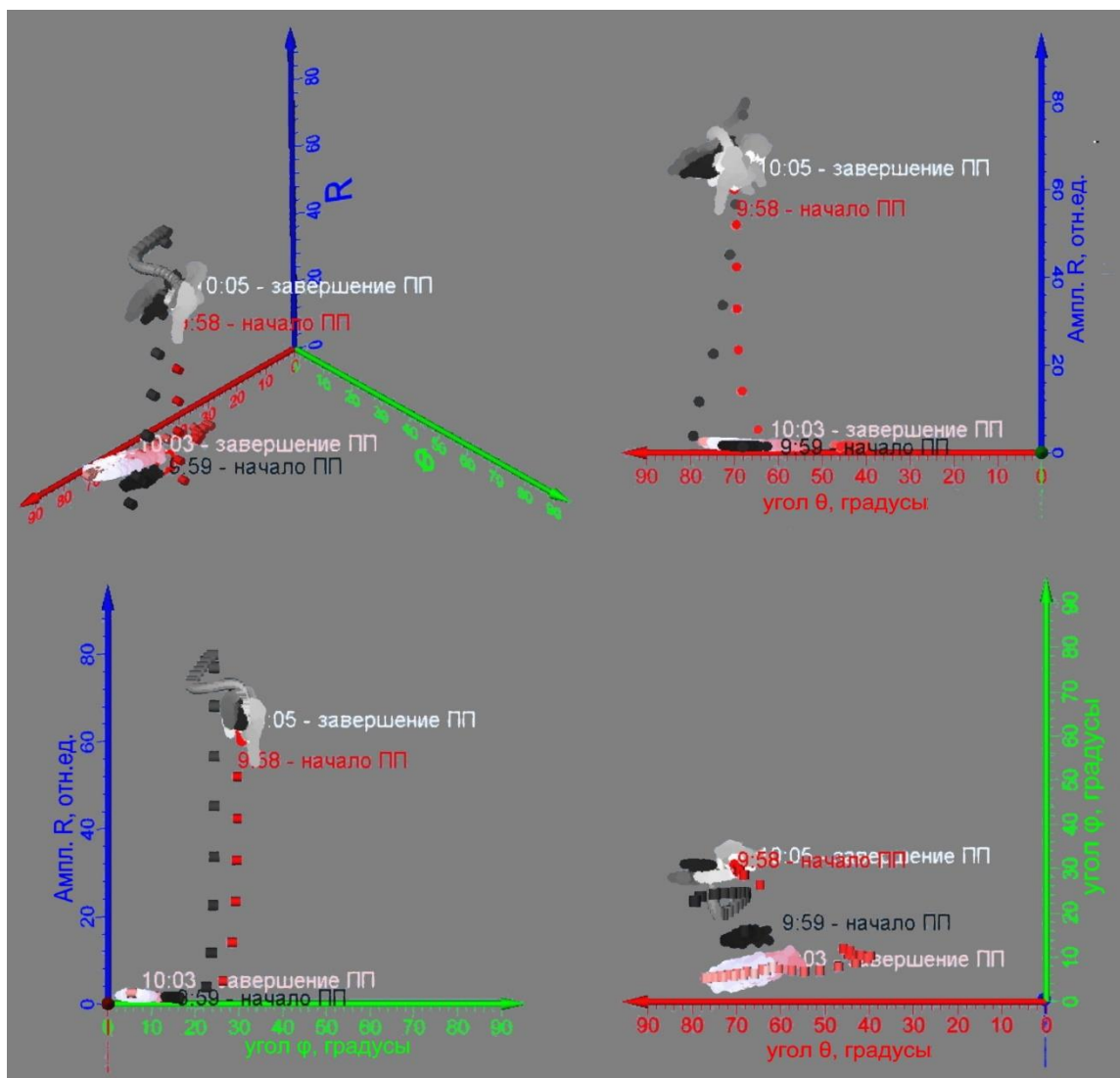


Рисунок 3.60 – Результат обработки сейсмических записей, полученных в т.1: черные маркеры – переходной процесс отключения ВУ-2 и включения ВУ-1, время записи с 08.03.2021 8:00 по 11.03.2021 6:00; красные маркеры – показан переходной процесс отключения ВУ-1 и включения ВУ-2. Время записи с 08.04.2021 8:00 по 11.04.2021 6:00. Яркие тона соответствуют началу, а блеклые окончанию записи. Шаг маркеров 20 секунд

Если полагать, что чем выше полученный угол, тем лучше мы отслеживаем образование прецессионных сил (согласно гипотезе, выдвинутой выше), то наиболее подходящей для мониторинга состояния вентиляционной установки являлась т.9, где наблюдаемые изменения углов, при процессе стабилизации, были максимальны, стабилизация происходила в области $\theta \sim 50-70^\circ$, $\varphi \sim 80-90^\circ$.

На рисунке 3.61 показан пример графиков колебаний на лопастной частоте, зарегистрированных в различных точках наблюдения во время переходных процессов включения-отключения вентиляционных установок. На графиках видно, что со временем происходит процесс стабилизации в плоскости $\theta-\varphi$ (блеклые оттенки гаммы), где колебания фокусируются, колебания стабилизируются через, примерно, 6 часов в областях $\theta \sim 75-85^\circ$, $\varphi \sim 20-40^\circ$.

Набрав вышеописанным способом статистические данные, характеризующие стабильную работу вентиляционных установок, можно выдвинуть критерии для прогнозирования неисправностей в механизмах или потенциально опасных для работающего оборудования ситуаций.

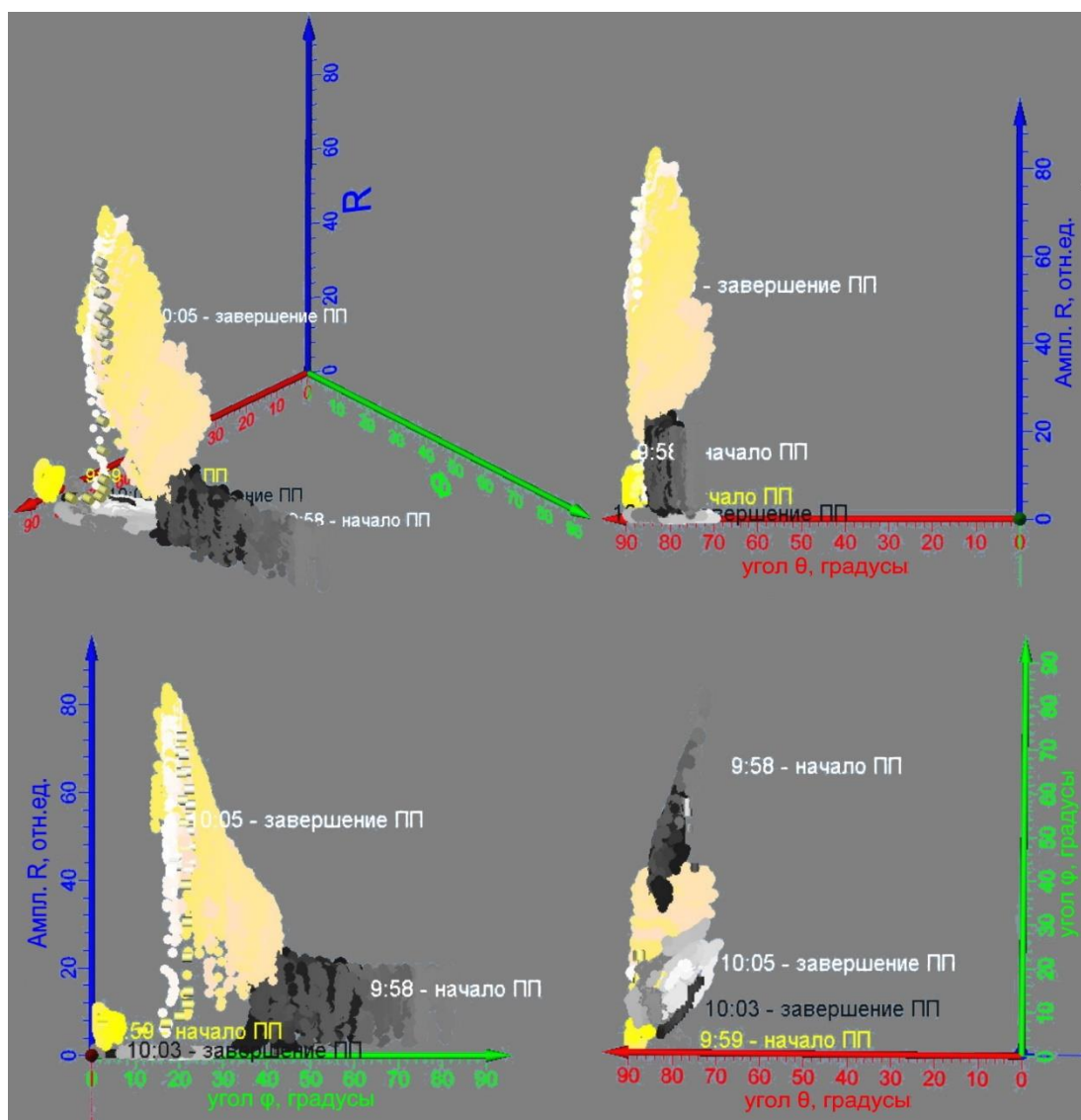


Рисунок 3.61 – Представлен результат обработки сейсмических записей, полученных в т.1: желтые маркеры – переходный процесс отключения ВУ-1 и включения ВУ-2, время записи с 08.03.2021 8:00 по 11.03.2021 6:00; черные маркеры – переходный процесс отключения ВУ-2 и включения ВУ-1, время записи с 08.04.2021 8:00 по 11.04.2021 6:00. Яркие тона соответствуют началу, а блеклые – окончанию записи. Шаг маркеров 20 секунд

Физическое моделирование

Для понимания процессов, происходящих в вентиляционной установке и определения причин их возникновения, была создана физическая модель вентиляционной установки. Она состоит из вентилятора канального осевого Ballu Machine Eco 200, кожуха,

затвора для перекрытия воздуха. Модель устанавливалась на стол лабораторного помещения и закреплялась хомутами. Для уменьшения вибраций сверху устанавливался пригруз (аккумулятор).

Регистрация сейсмических колебаний велась в 3-х точках наблюдения: у всасывающей трубы модели, напротив лопастей, напротив затвора. Каждый пункт наблюдения состоял из трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-4.5) и автономного сейсмического регистратора («Байкал-7»). Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников следующие: X – направлены вдоль оси модели вентиляционной установки, Y – поперек, Z – вертикально. Модель вентиляционной установки, её элементы и схема регистрации колебаний показаны на рисунке 3.62.



Рисунок 3.62 – Модель вентиляционной установки и схема сейсмической регистрации

На рисунке 3.63 изображены спектр и спектрограмма сейсмической записи в т. 3, полученные во время экспериментов (эксперимент № 1 - пробный, не учитывался):

Эксперимент № 2 - Работа в стандартном режиме.

Эксперимент № 3 - Модель установлена на поролон и фанеру. Работа в стандартном режиме.

Эксперимент № 4 - Модель установлена на поролон и фанеру. Работа производится с изменением частоты вращения вентилятора каждую минуту.

Эксперимент № 5 - К лопасти модели прикручен болт. Модель установлена на поролон и фанеру. Работа в стандартном режиме.

Эксперимент № 6 - К лопасти модели прикручен мелкий болт. Модель установлена на поролон и фанеру. Работа в стандартном режиме.

Эксперимент № 7 - К лопасти модели прикручен мелкий болт. Модель установлена на фанеру, поролон убран. Работа в стандартном режиме.

Эксперимент № 8 - Убран груз с лопастей, стандартная работа модели. Через 2 минуты труба воздуховода перекрывается, вначале наполовину, далее - полностью. Работа в стандартном режиме.

На рисунке хорошо видно, что, при различных экспериментах, амплитудно-частотный состав записи сильно меняется. Рассмотрим это подробнее при экспериментах № 6-8.

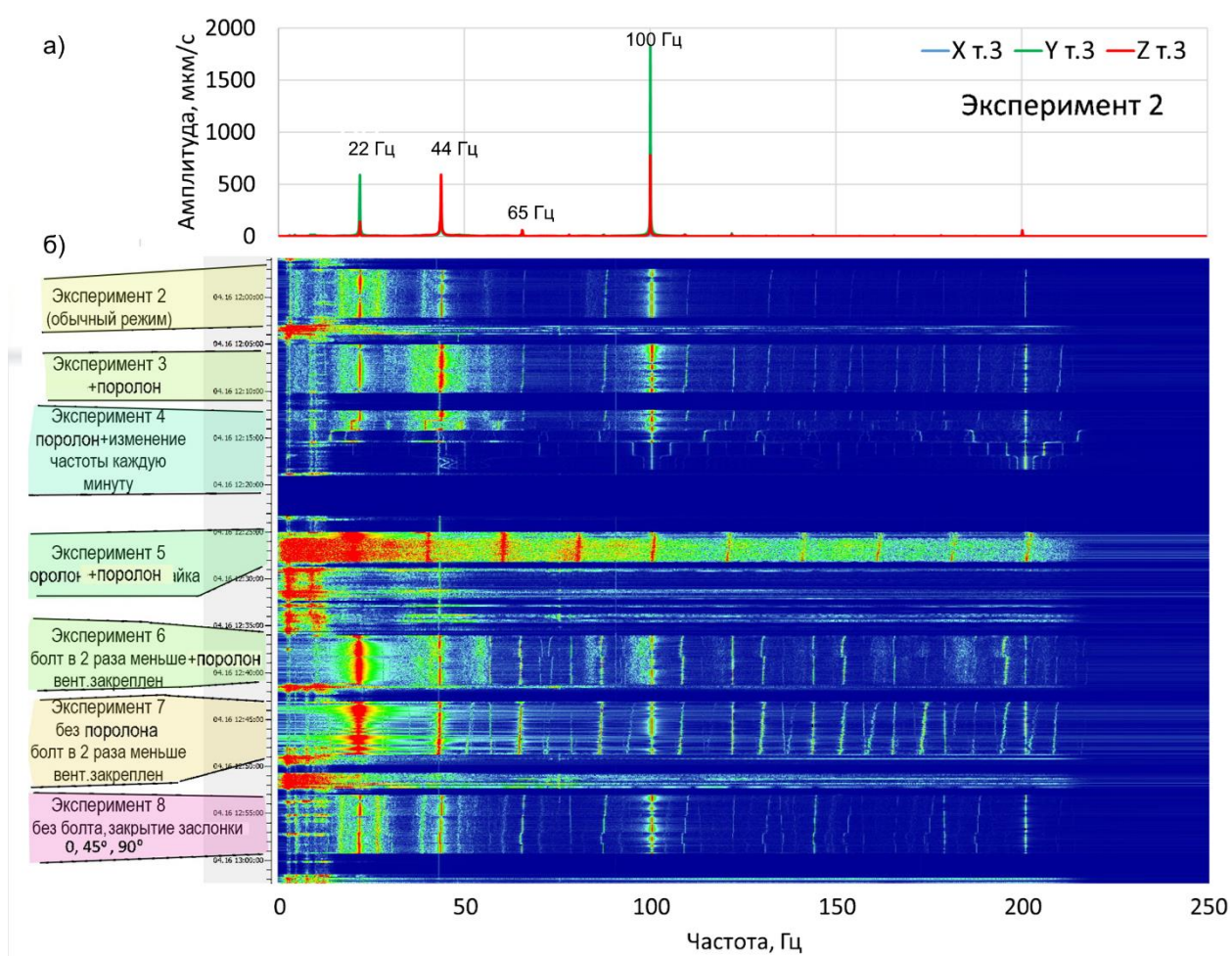


Рисунок 3.63 – Спектр и спектрограмма Z-компоненты записи в т. 3, 16.04.2021, время местное

На рисунке 3.64 представлен пример обработки сейсмической записи 16.04.2021 с т. 3, во время экспериментов № 6,7. Синие маркеры отображают колебания установки в период с 12:36 по 12:41 (эксперимент № 6: к лопасти модели прикручен мелкий болт, модель установлена на поролон и фанерный лист). Оранжевые маркеры отображают колебания установки в период с 12:43 по 12:47 (эксперимент № 7: к лопасти модели также

прикручен мелкий болт, модель установлена на фанерный лист без поролон). На графиках видно, что, при изменении условий (убран поролон), параметры колебаний в сферической системе координат (R , θ , φ) меняют свои значения. Изменения следующие: на обратной частоте (22 Гц) значения R повысились на 40%, θ изменились с $\sim 72^\circ$ до 70° , φ с $\sim 28^\circ$ до 45° . Аналогично были получены данные значения для колебаний на частоте 44 Гц: R повысились на 40%, θ изменились с $\sim 32^\circ$ до 15° , φ с $\sim 5^\circ$ до 30° ; и для колебаний на частоте 65 Гц: значения R повысились на 80%, θ изменились с $\sim 40^\circ$ до 18° , φ с $\sim 45^\circ$ до 35° .

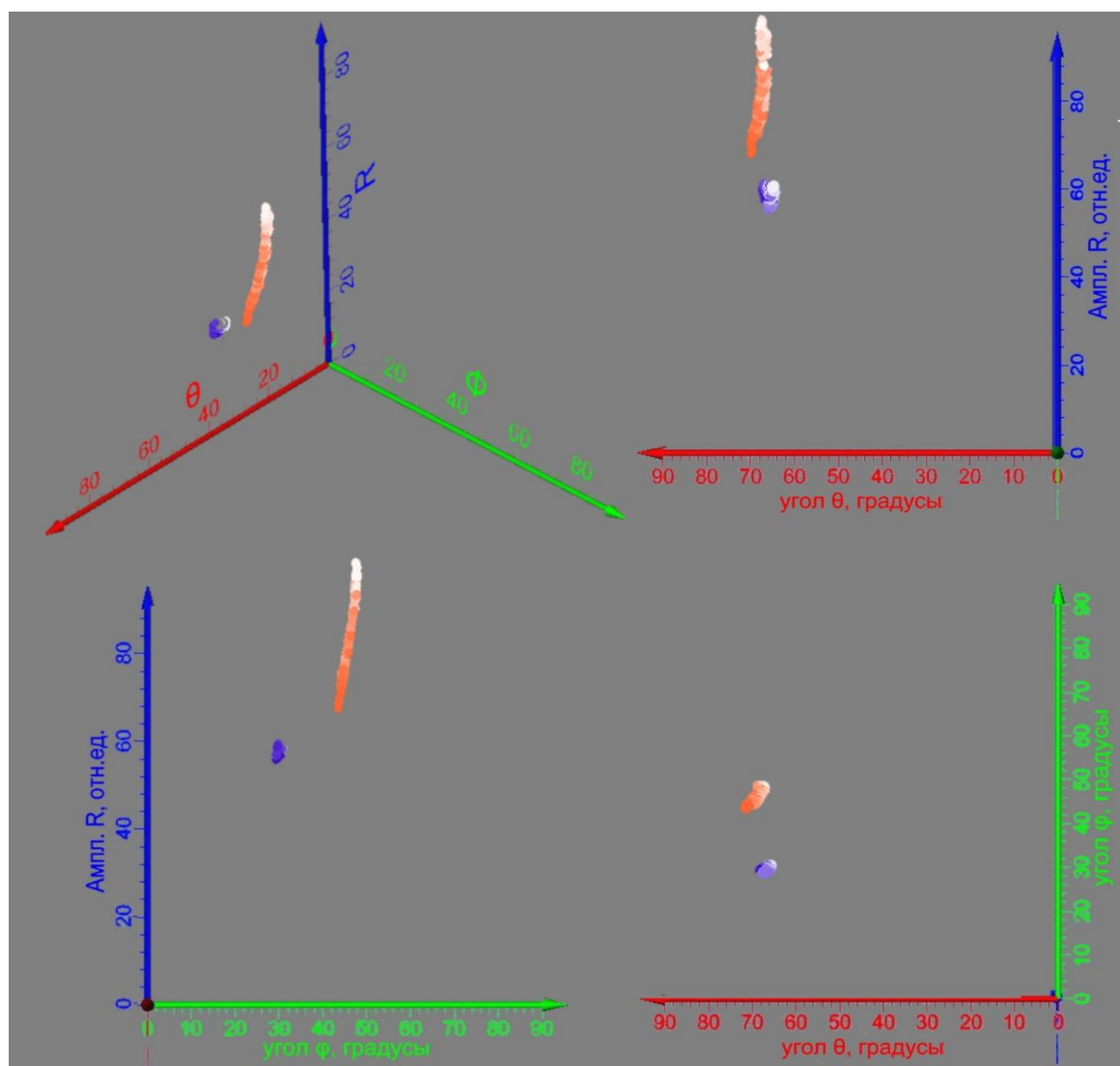


Рисунок 3.64 – Результат обработки сейсмических колебаний на обратной частоте в т.3, во время проведения экспериментов № 6 (синие маркеры) и № 7 (оранжевые маркеры). Яркие тона соответствуют началу, а блеклые окончанию записи. Шаг маркеров 1 секунда

На рисунке 3.65 представлен пример обработки сейсмической записи в т.3, полученной во время эксперимента № 8 (убран груз с лопастей и производится стандартная работа модели вентиляционной установки). Синие маркеры отображают колебания установки в период с 12:53 по 12:55, воздуховод открыт. Оранжевые маркеры отображают колебания в период с 12:55 по 12:56, воздуховод перекрыт заслонкой на 45

градусов. Зеленые маркеры отображают колебания в период с 12:56 по 12:58, воздуховод полностью перекрыт. Видно, что каждый режим приводит к смене положения зон параметров колебания R , θ и φ в пространстве. Причем, для колебаний на всех частотах значение θ возрастает на несколько градусов по мере закрытия заслонки, на φ , напротив, никакой закономерности не прослеживается. То есть, можно сделать вывод, что θ отвечает за поток воздуха, проходящего через установку, и за связанные с ним параметрами, такие как давление, аэродинамические эффекты и т.п.

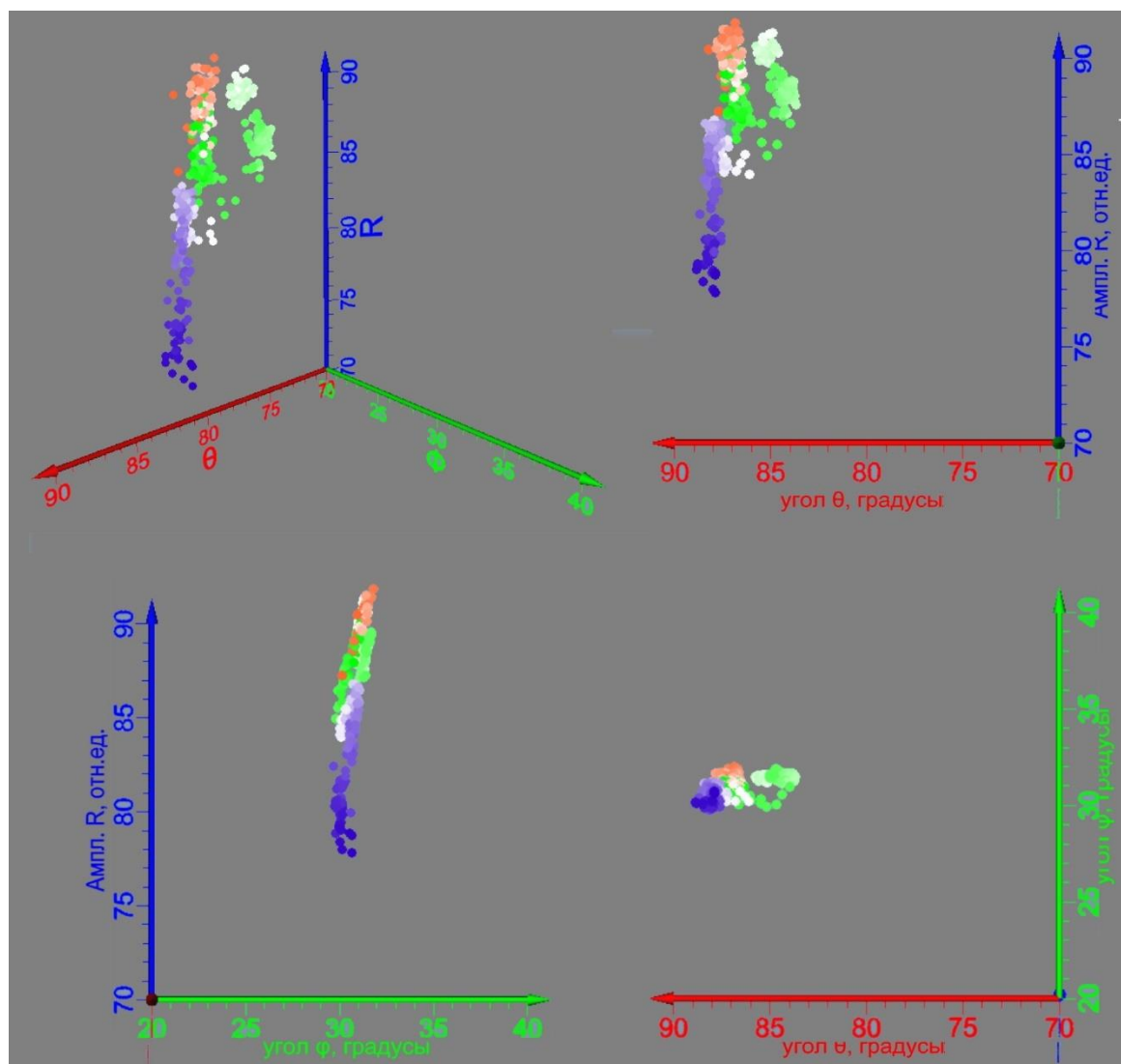


Рисунок 3.65 – Результат обработки сейсмических колебаний на оборотной частоте в т.3, полученных при открытом (синие маркеры), перекрытом заслонкой на 45 градусов (оранжевые маркеры) и полностью перекрытом воздуховоде (зеленые маркеры). Яркие тона соответствуют началу, а блеклые окончанию записи. Шаг маркеров 1 секунда

Влияние детонации в шахте на регистрируемые колебания

Подобные результаты были получены при анализе данных при детонации, произошедшей в шахте 27.02.2021. На рисунке 3.66 представлена спектрограмма и трасса в период сейсмического события, произошедшего в шахтах (детонационный взрыв, по

информации сотрудников АО «Распадская-Коксовая»). Видно, что воздействие охватывает практически все частоты. После него меняется амплитудно-частотный состав записи, особенно шум в полосе 23-27 Гц, который заметно увеличился. Какие-то колебания исчезли (например, шум в районе 22 Гц). Рассмотрим подробнее, как изменились колебания на лопастной и оборотной частоте за этот период.

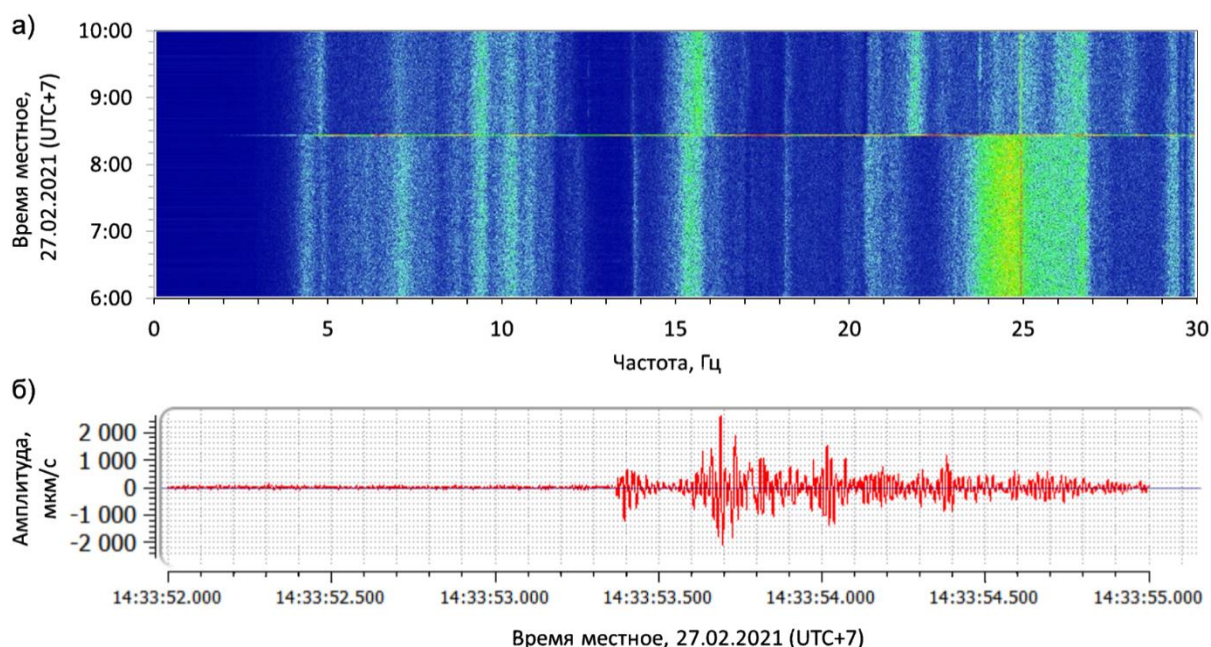


Рисунок 3.66 – Спектрограмма (а) и трасса (б) в период сейсмического события, произошедшего в шахте 27.02.2021, Z-компонента

На рисунке 3.67 представлен результат обработки сейсмических записей, полученных в т.2 27.02.2021 с 13:00 по 16:00 (время местное), при работе ВУ-2, зеленые маркеры отображают изменения параметров колебаний на оборотной частоте (12.5 Гц), красные маркеры – на лопастной частоте (100 Гц). Черный маркер отображает параметры колебаний в момент детонации (произошедшей в 14:33:53). Яркие тона соответствуют периоду времени до детонации, блеклые – после.

На рисунках хорошо видно, что изменения значений параметров для колебаний на оборотной частоте (12.5 Гц) довольно низкие: θ изменилась с $\sim 82^\circ$ до 84° , φ с $\sim 72^\circ$ до 68° . Для колебаний на лопастной частоте (100 Гц) изменения параметров более существенные: θ изменилась с $\sim 33^\circ$ до 35° , φ с $\sim 25^\circ$ до 50° . Причиной данных изменений может служить изменение давления и/или объема воздуха внутри шахты, вызванное детонацией.

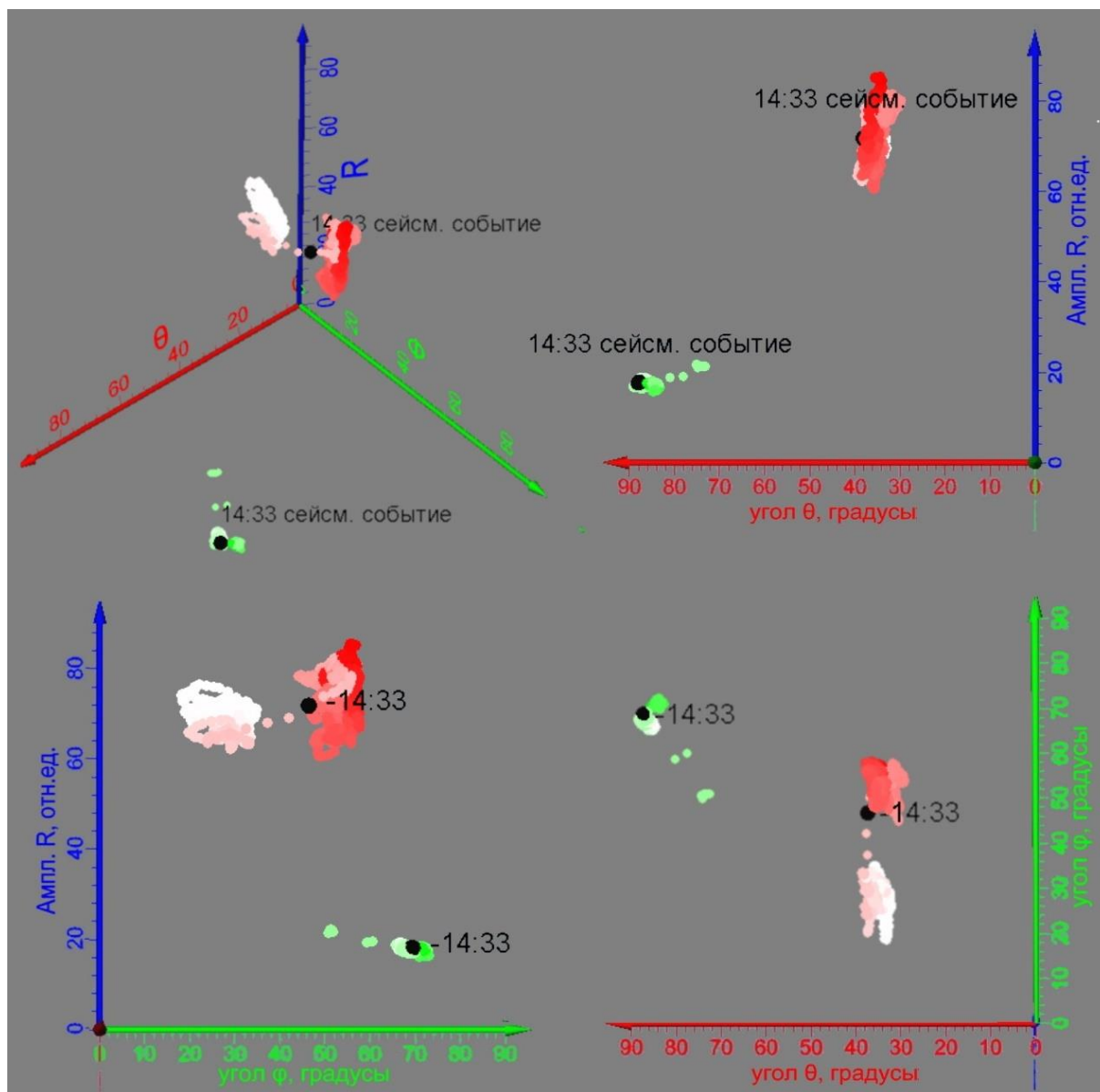


Рисунок 3.67 – Результат обработки сейсмических записей, полученных в т.2 27.02.2021 с 13:00 по 16:00 во время работы ВУ-2: представлены параметры колебаний на оборотной (зеленые маркеры) и лопастной (красные маркеры) частотах. Яркие тона соответствуют началу, блеклые – окончанию записи. Шаг маркеров 5 секунд

Применение метода к сейсмическим данным, полученным во время тестовых испытаний гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС

В настоящее время описанный метод применяется к сейсмическим данным, полученным ранее, при исследовании гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (далее СШ ГЭС) [17;18]. Следует отметить, что, на данный момент, работа только начата, и здесь приведены только первые результаты производимого анализа.

Для примера был выбран период тестового запуска гидроагрегата № 3 старого типа в 2010 году. В период наблюдений влияние на излучаемые колебания ГА-3 от работы сторонних гидроагрегатов № 4, 5 и 6 было минимально, так как они функционировали на

постоянной максимальной нагрузке 640 МВт [19]. На рисунке 3.68 показано расположение точки наблюдения в машинном зале, состоящей из трехкомпонентного сейсмоприемника А1638 (датчика ускорения) и автономного сейсмического регистратора «Байкал-АС», установленных в павильоне на отм.305м, напротив оси гидроагрегата № 3 старого типа. Запись сейсмических сигналов проводилась в непрерывном режиме. Направления осей трехкомпонентных сейсмоприемников следующие: X – направлены по течению реки, Y – поперек, Z - вертикально.

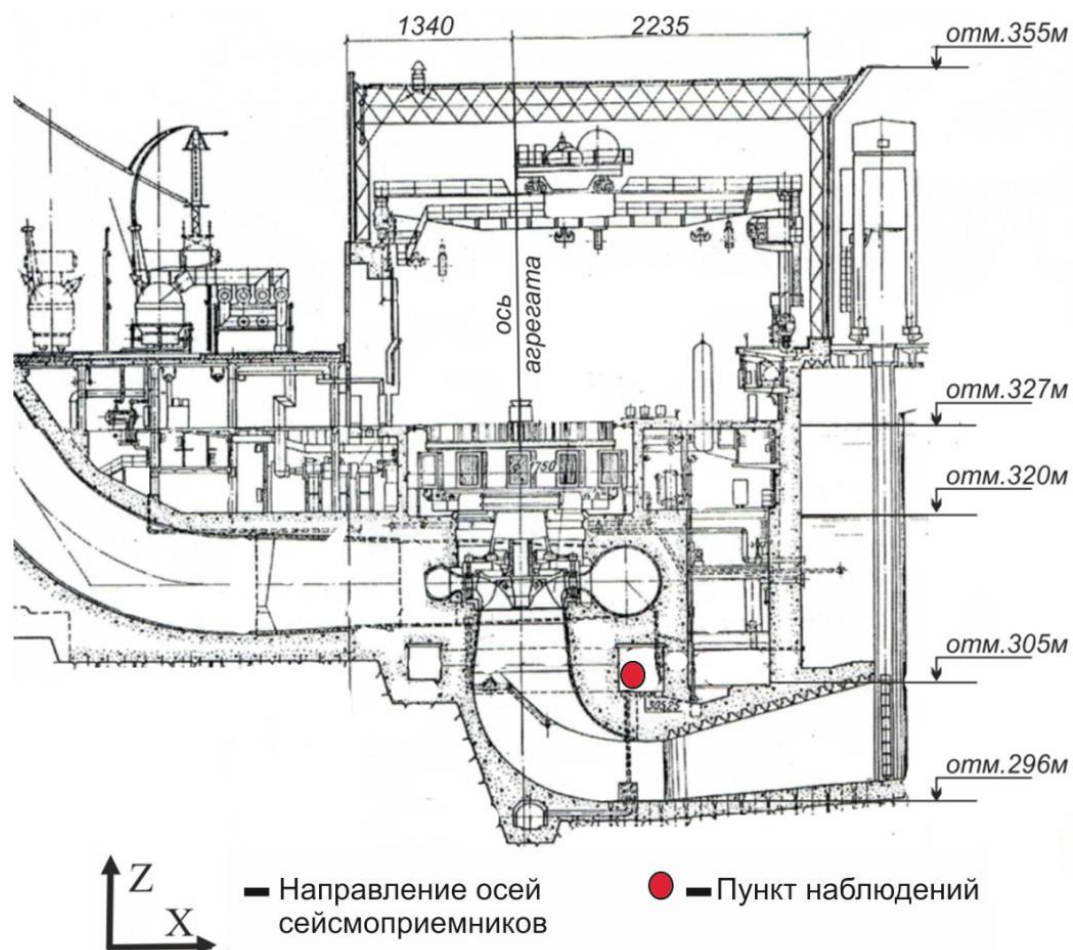


Рисунок 3.68 – Схема сейсмических наблюдений в машинном зале СШ ГЭС

На рисунке 3.69 представлен результат обработки сейсмических записей, полученных в точке наблюдения на отм. 305 м 23.12.2010 с 13:00 по 16:00 (время местное), при смене режимов работы ГА-3. Режимы и соответствующая цветовая гамма приведены в таблице 3.5. Из рисунков хорошо видно, что, при изменении режимов поданной нагрузки на гидроагрегат, происходит переходный процесс с дальнейшей стабилизацией в определенных зонах параметров R , θ , φ . Изменения R , θ , φ приведены в таблице 3.6. Причем хорошо видно, что каждому событию соответствует своя зона стабилизации.

Таблица 3.5 – Время и режимы работы ГА-3 при испытаниях 23.12.2010, параметры

Номер события	Время (местное) 23.12.2010	Режим работы ГА-3	Палитра, цвет
1	13:00	Переход с холостого хода на 0 МВт	Белый
2	14:01	Переход с 0 на 105 МВт	Зеленый
3	14:17	Переход на 205 МВт	Желтый
4	14:35	Переход на 600 МВт	Красный
5	14:52	Переход на 632 МВт	Синий
6	14:57	Переход на 643 МВт	Серый
7	15:22	Переход на 0 МВт	Черный

Таблица 3.6 – Номер события и соответствующие ему параметры R , θ , φ

Номер события	R , отн.ед.	θ , градусы	φ , градусы
1	40	78	5
2	38	75	7
3	45	75	8
4	100	28	20
5	80	30	18
6	75	38	22
7	38	75	7

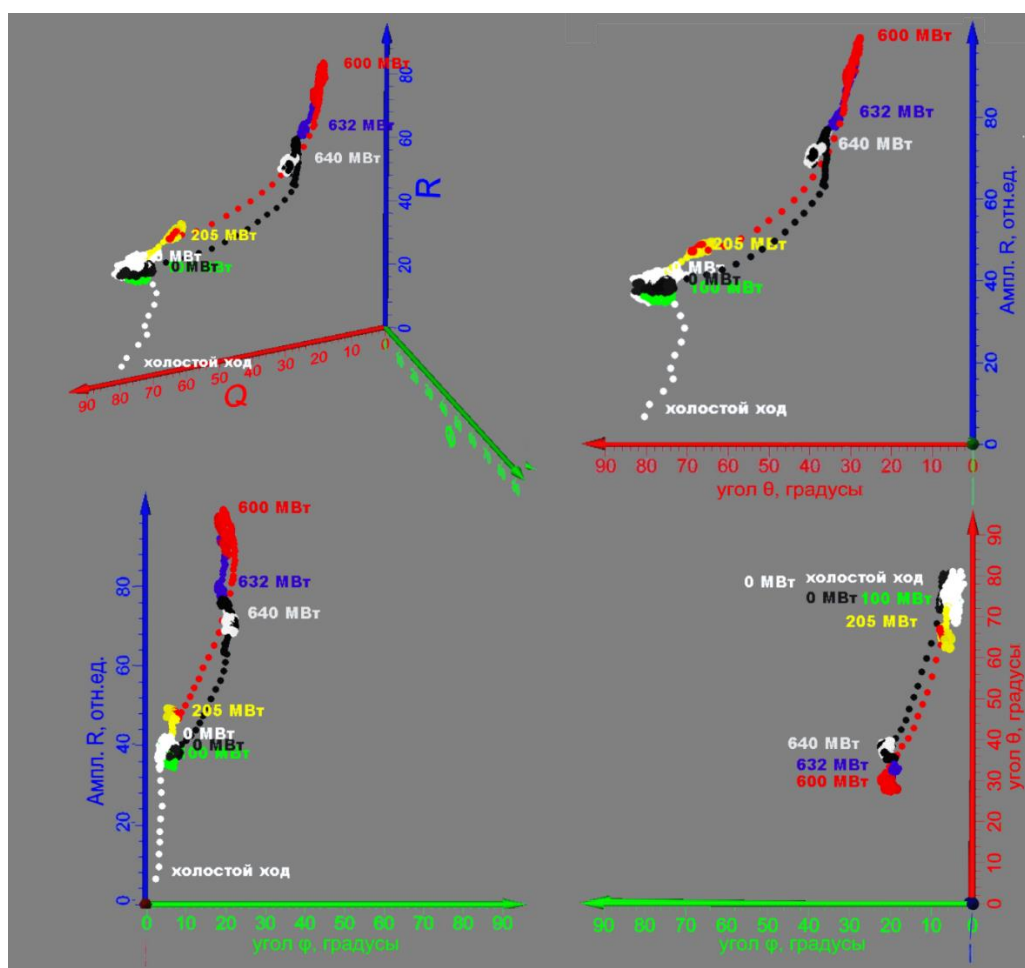


Рисунок 3.69 – Результат обработки сейсмических записей, полученных на отм.305м с 13:00 по 16:00 23.12.2010: представлены параметры колебаний на лопастной частоте, зарегистрированные при различных режимах работы ГА-3. Шаг маркеров 10 секунд

В итоге, при спектральном анализе данных, зарегистрированных сейсмической аппаратурой во время работы вентиляционных установок, определены основные характеристики колебаний, связанных с их работой. Колебания имеют вид монохроматических колебаний с постоянными частотами, кратными оборотной частоте вращения установки, у которых абсолютные значения амплитуд различаются. Анализ спектров записей со всех пунктов регистрации показал, что наибольшая амплитуда (при работе установок) наблюдается для монохрома с частотой 100 Гц («лопастная» частота).

Создана новая методика обработки и анализа регистрируемых трехкомпонентных колебаний, основанная на интерпретации пересчитанных в сферическую систему координат параметров R , θ и φ . Показано, что с изменениями различных факторов, влияющих на работу вентиляционной установки (давление, режимы работ, поток воздуха и т.д.), происходит изменение данных параметров и их стабилизация на определенном уровне, что дает возможность, набрав статистику, создать систему контроля состояния любого вращающегося оборудования.

Для проверки предложенной технологии, было выполнено физическое моделирование. Была создана модель, состоящая из вентилятора, кожуха, воздухопроводов и заслонки, и проведена серия экспериментов, включающих: различные условия контакта с подстилающей поверхностью, различное положение перекрывающей поток воздуха заслонки, деформация одной из лопастей вентилятора. Результаты показали, что, как и при работе шахтной вентиляционной установки, при снижении потока воздуха, происходит смещение параметров колебаний R , θ и φ в пространстве сферических координат.

Предварительные результаты обработки данных, полученных при исследовании гидроагрегатов СШ ГЭС, также показывают смещение параметров колебаний R , θ и φ и их дальнейшую стабилизацию на фиксированных значениях при изменении нагрузок на гидроагрегате.

3.5 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 2021 году продолжены изучения Горловского прогиба Колывань-Томской складчатой зоны с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами.

В 2021 году в рамках Договора № ДГРК7-002596 «Проведение опытно-методических работ по разработке технологии электромагнитных зондирований (ЗС) и электротомографии с целью выявления и локализации угольных пластов». Целью работ является построение геоэлектрических моделей в широком диапазоне глубин для выявления наличия или отсутствия угольных пластов.

3.5.1 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 (500 x 500 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 году после Чуйского землетрясения и продолжаются в настоящее время. Анализ данных мониторинга осуществлялся с учётом особенностей геоэлектрического строения участка измерений.

В 2021 году в западной части Чуйской впадины проведены мониторинговые измерения в девяти регулярных пунктах (рисунок 3.70) квадратными совмещенными

центральными петлями (Q, q). Размеры генераторной петли составляют 500 x 500 м. Размеры приемной петли: 200 x 200 м. Ток в генераторном контуре достигает 25 А.

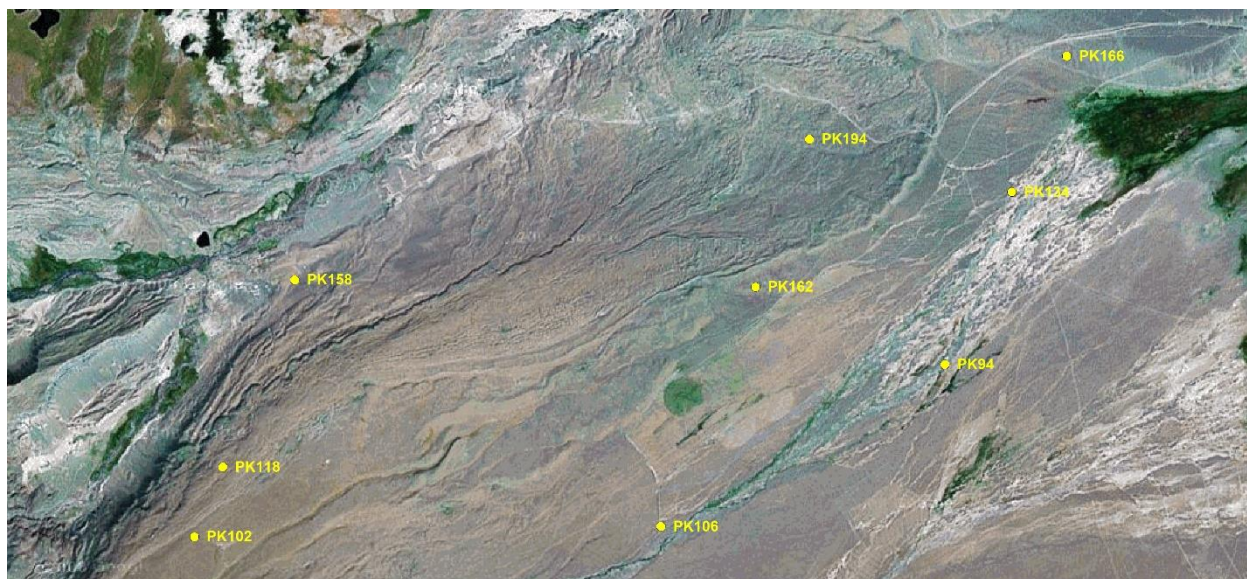


Рисунок 3.70 – Схема размещения режимных пунктов в Чуйской впадине Горного Алтая

В ходе проведения работ выполнен запланированный объем полевых наблюдений в девяти режимных пунктах. В каждом из них осуществлялось по шесть циклов измерений, что позволило достичь уровня выделения сигнала порядка $1.0 \cdot 10^{-8}$ В. Кривые ЭДС становления поля, полученные в режимных точках, приведены на рисунке 3.71.

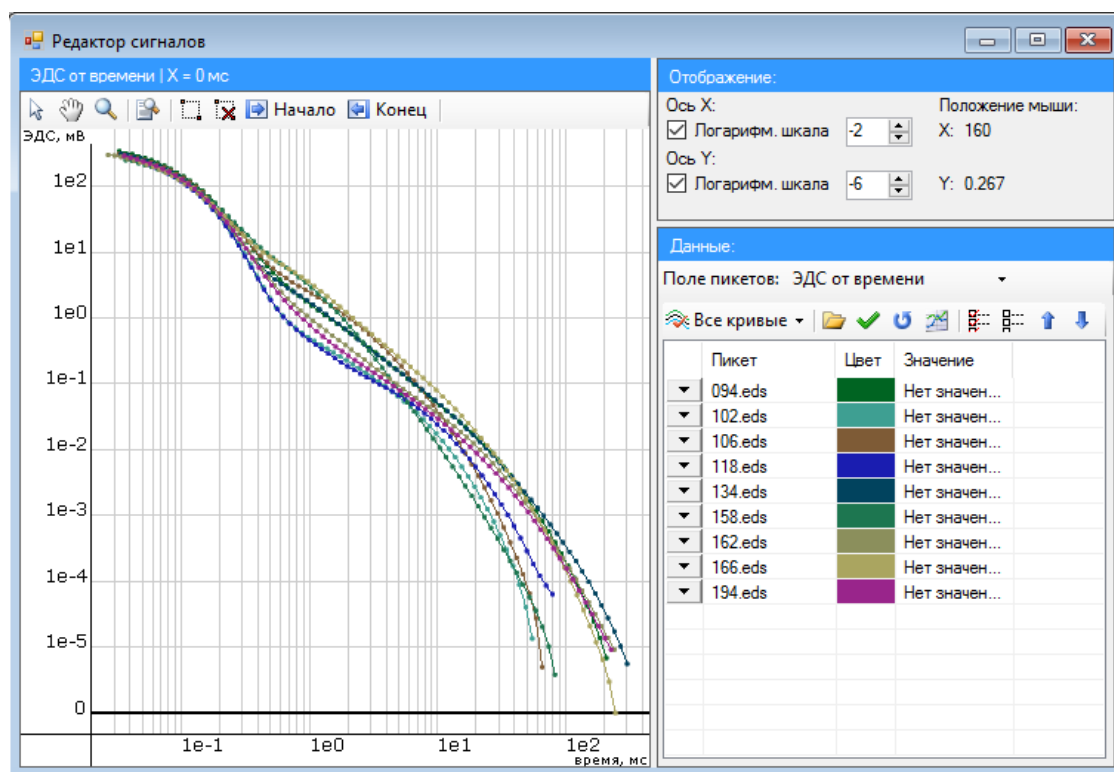


Рисунок 3.71 – Кривые ЭДС становления поля в режимных точках

Обработка полевых данных за 2004-2021 годы подтвердила сделанные ранее выводы о происходящих процессах консолидации среды. На рисунке 3.72 в качестве примера показаны данные, полученные в пункте ЗС 106, за весь интервал измерений. Этот пункт расположен в пределах приподнятого блока фундамента в зоне основного разрыва Чуйского землетрясения. В течение 2011-2021 годов наблюдаются вариации, отражающие афтершоковый процесс (рисунок 3.72).

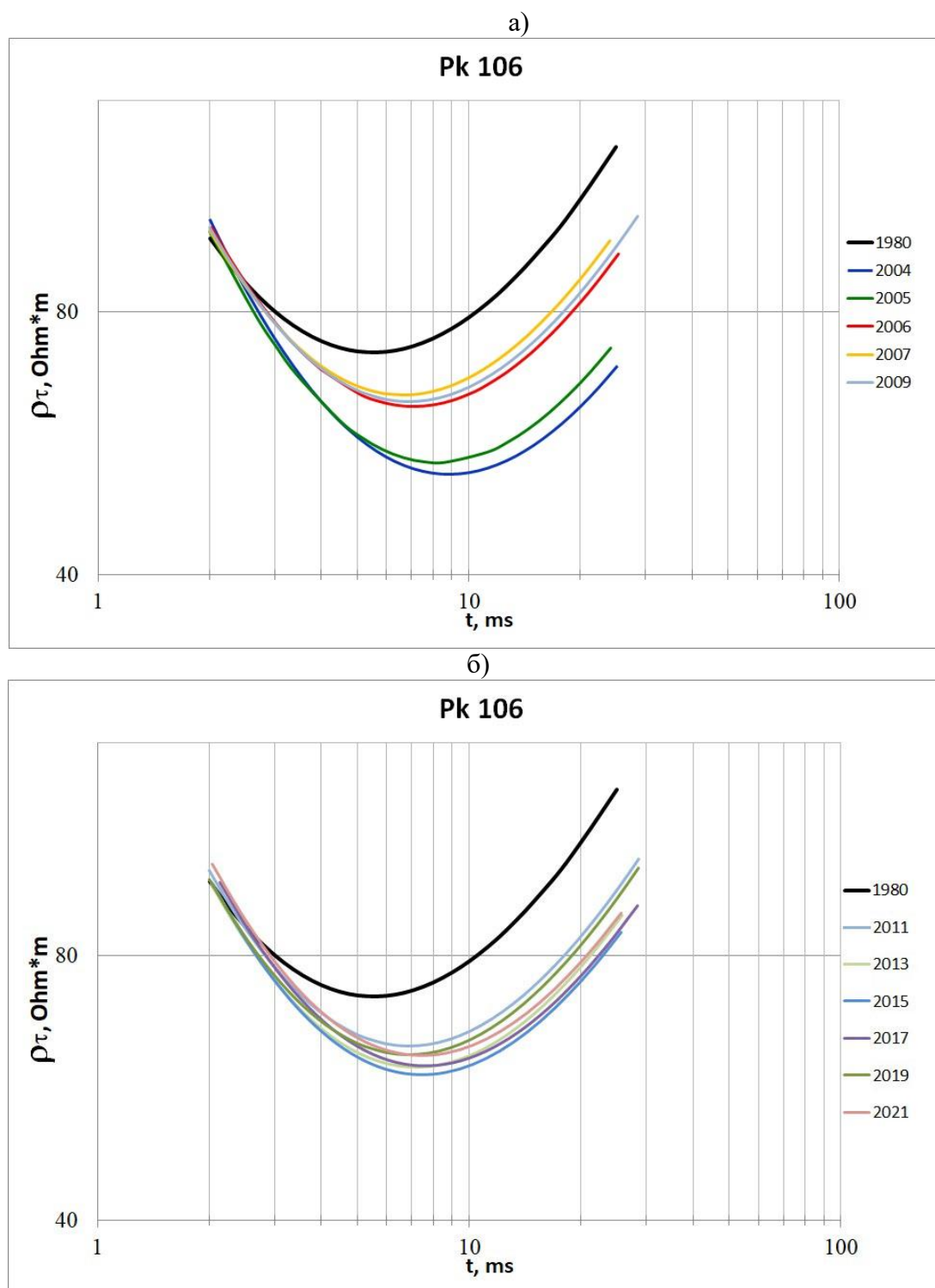


Рисунок 3.72 – Кривые кажущегося удельного сопротивления для ЗС 106 за весь временной интервал измерений

3.5.2 Учет анизотропных свойств геологической среды

В центральной части Чуйской впадины на участке Мухор-Тархата в 2021 году 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 2021 года – получение вариаций электрофизических параметров горных пород (УЭС, коэффициента электрической анизотропии) по данным регулярных измерений методом ЗС на участке Мухор-Тархата для их анализа за весь период измерений (2007-2021 гг.) и оценке влияния происходящих сейсмических событий. На рисунке 3.73 приведена схема размещения пунктов мониторинга ЗС на участке исследования. Измерения повторяются ежегодно с 2007 года.

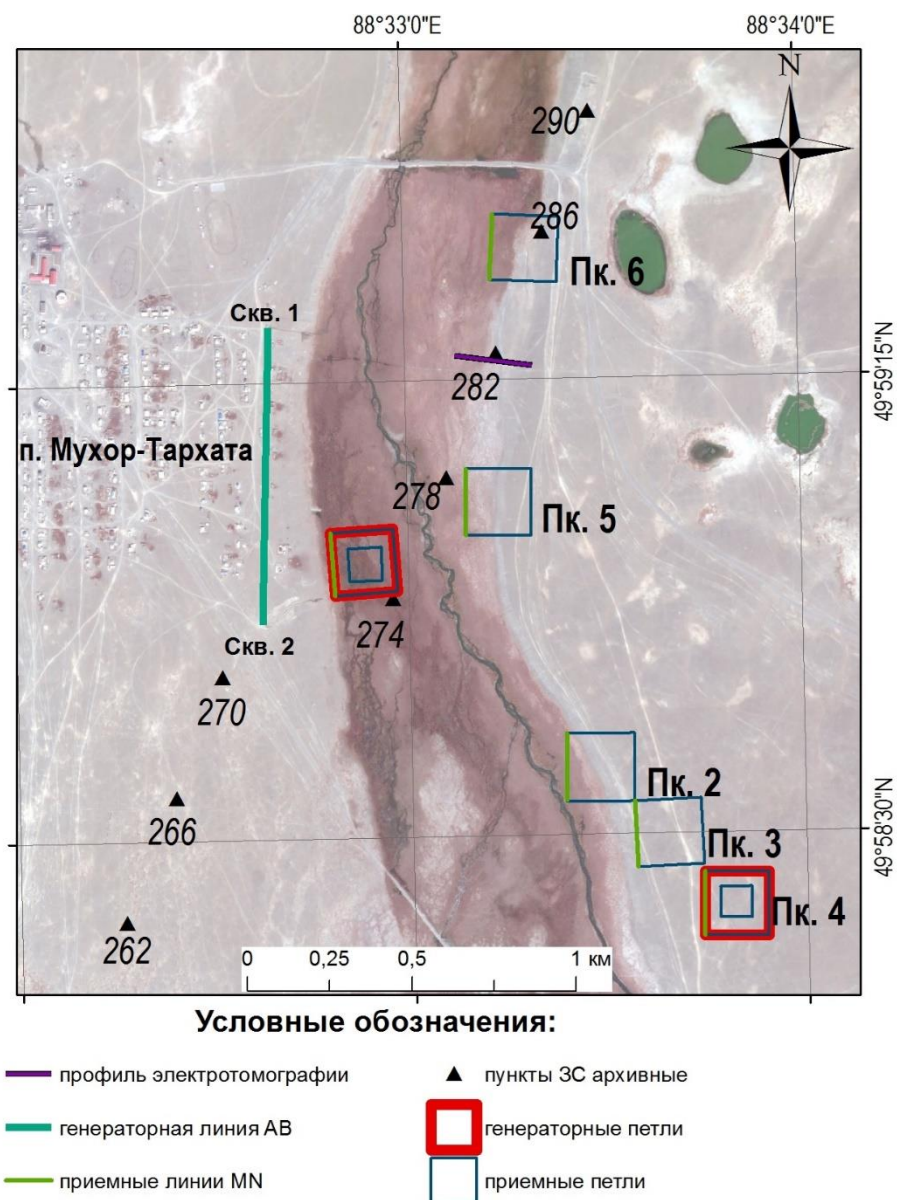


Рисунок 3.73 – Схема размещения режимных пунктов ЗС в районе пос. Мухор-Тархата

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 (скважины 1 и 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 3.74 и 3.75 приведены полевые кривые ЭДС 2021 года установки АВ-q и АВ-MN, которые характеризуют геоэлектрическую модель в каждом пункте ЗС.

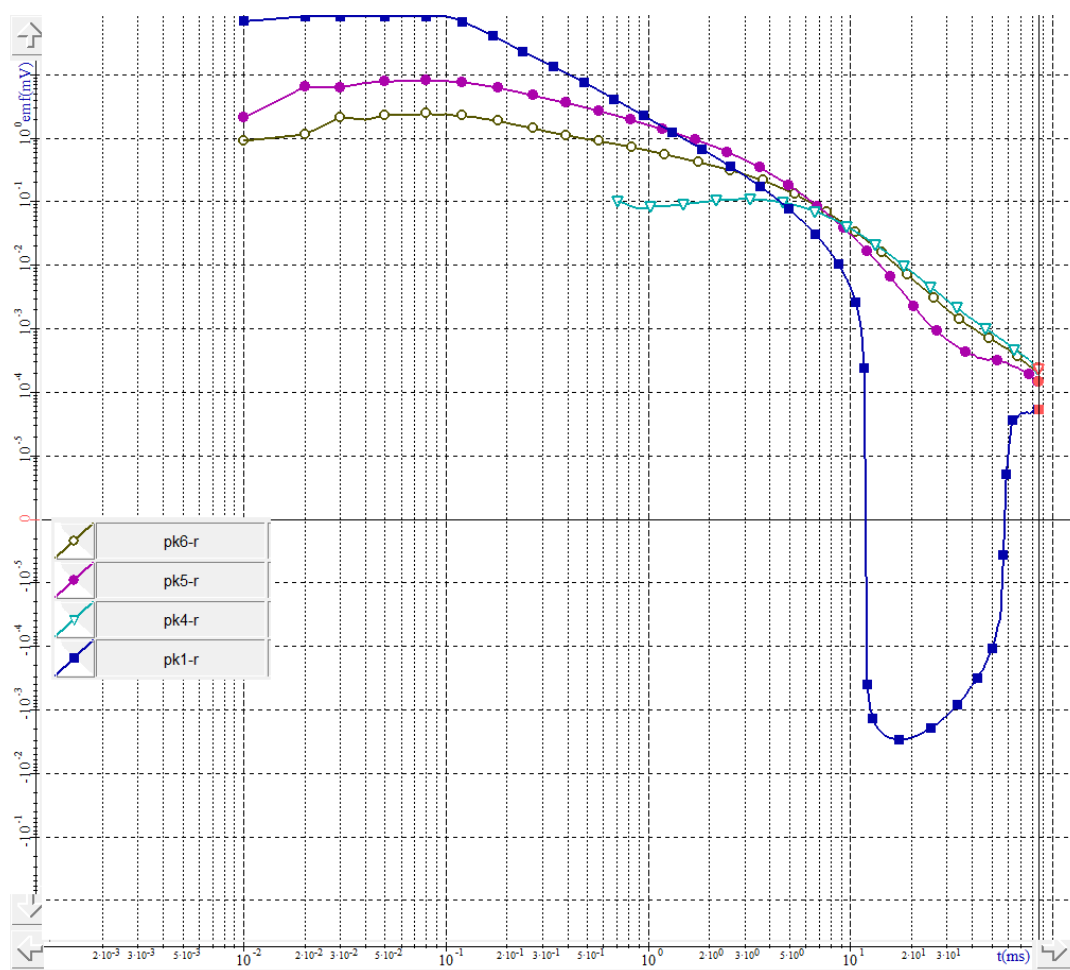


Рисунок 3.74 – Полевые кривые ЭДС 2021 г., установка АВ-q

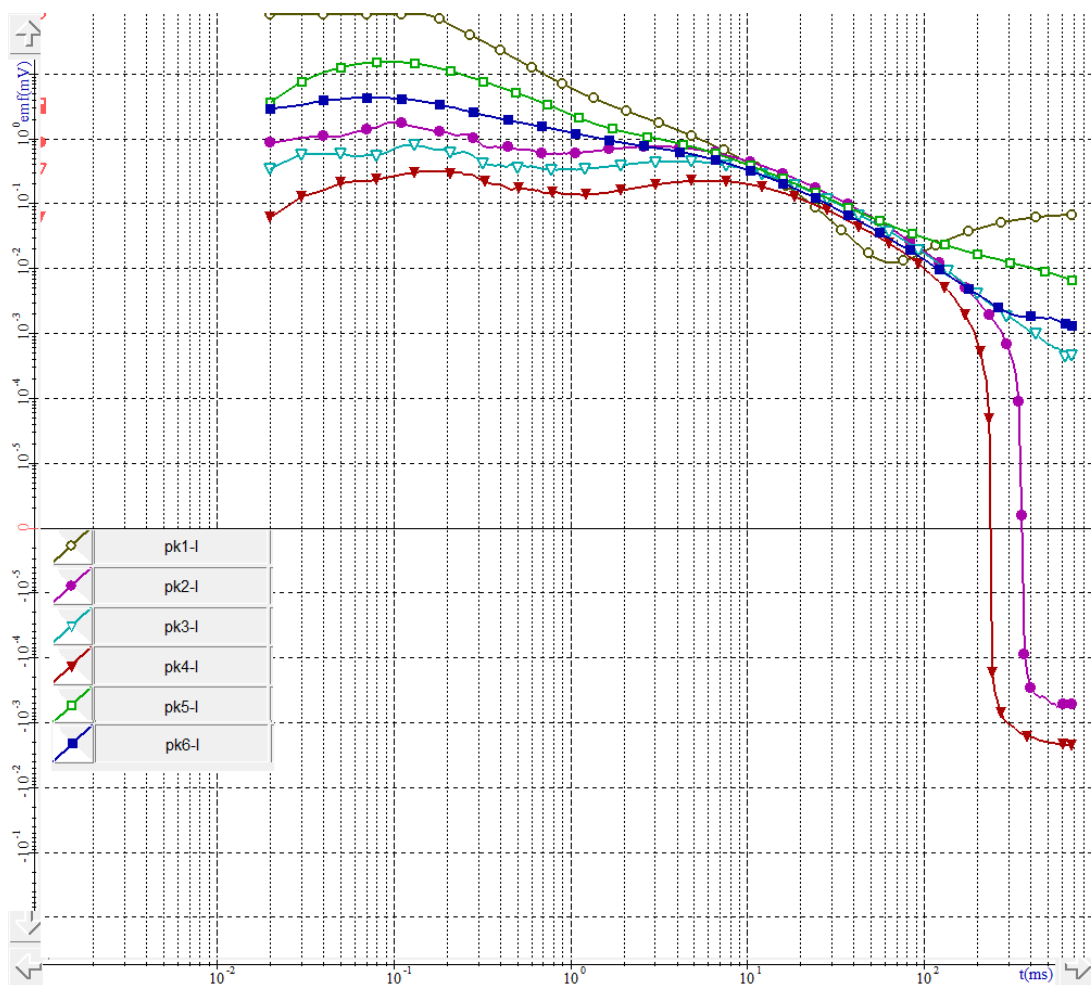


Рисунок 3.75 – Полевые кривые ЭДС 2021 г., установка АВ-MN

Выполнена обработка и интерпретация данных ЗС. На рисунке 3.76 представлен пример интерпретации данных ЗС1 с соосной установкой, а на рисунках 3.77 и 3.78 результат интерпретации ЗС 1 и 4 с установкой АВ-MN.

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.

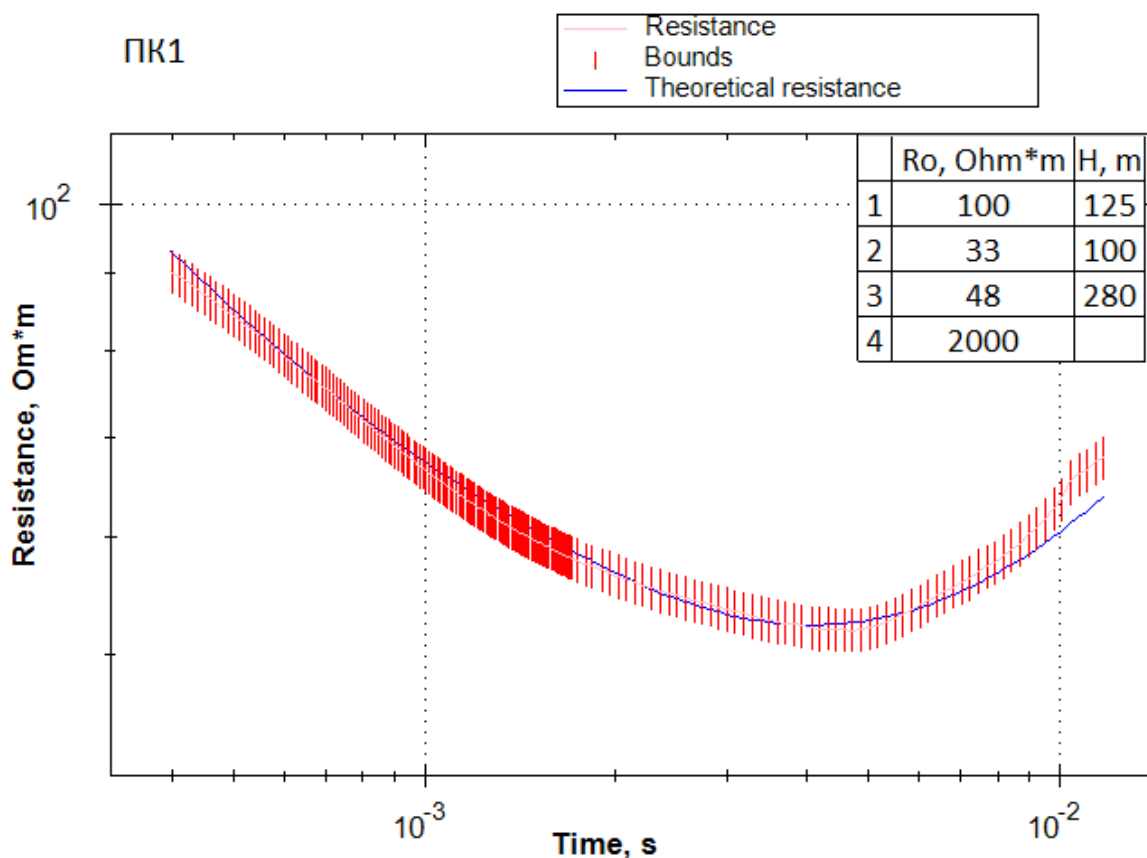


Рисунок 3.76 – Пример интерпретации данных ЗС1 с соосной установкой

В результате интерпретация данных ЗС с установкой АВ-MN в шести пунктах (ЗС 1, 2, 3, 4, 5, 6) определены значения коэффициента электрической анизотропии для каждого слоя геоэлектрической модели. По результатам интерпретации данных 2007-2021 гг. выделена область (пункты ЗС 1, 2, 5, 6) с максимальными значениями коэффициента электрической анизотропии (λ). Эта область приурочена к зоне разлома, выявленной ранее по результатам площадных измерений методом ЗС с соосной установкой. В 2021 г. значения коэффициента электрической анизотропии в выявленной области в среднем сопоставимы со значениями 2020 г., однако меньше на 10-12%, по сравнению со значениями 2019 года.

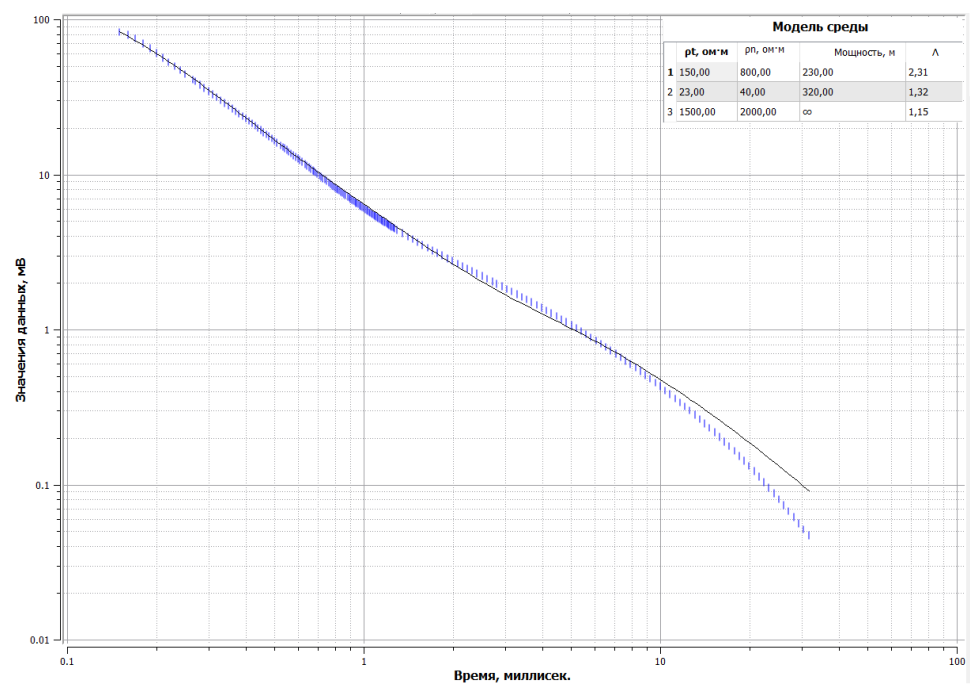


Рисунок 3.77 – Пример интерпретации данных ЗС1 с установкой АВ-MN

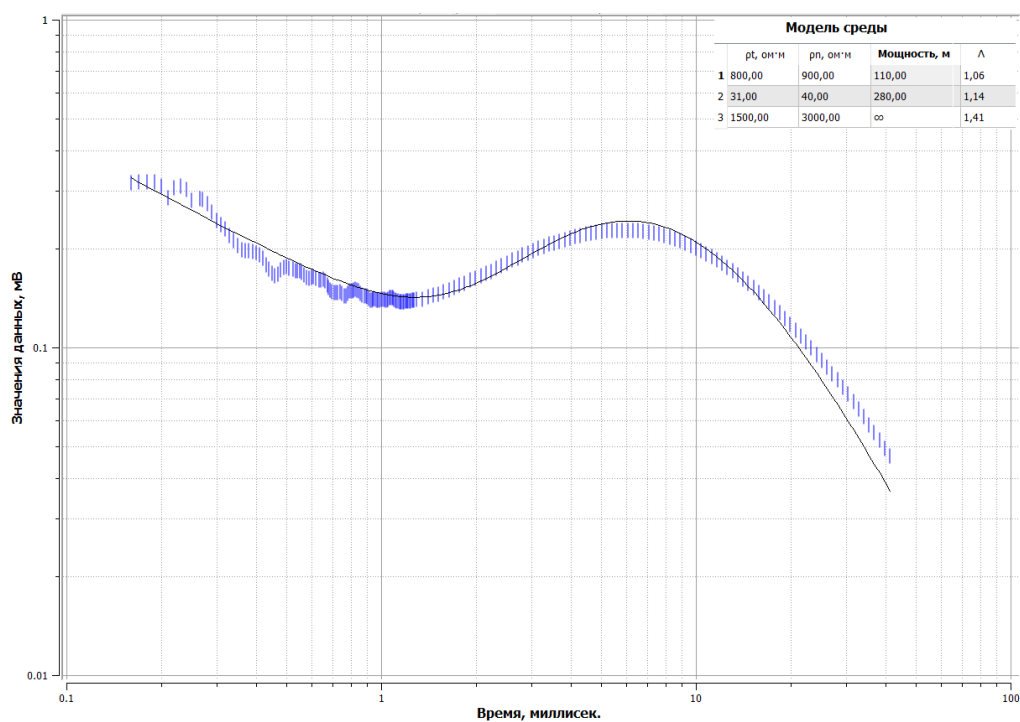


Рисунок 3.78 – Пример интерпретации данных ЗС4 с установкой АВ-MN

Из сопоставления значений коэффициента анизотропии для выделенной области с показателями сейсмической активности (количество сейсмической энергии и число землетрясений) за период 2014-2019 гг. выявлена их хорошая корреляция (рисунок 3.79).

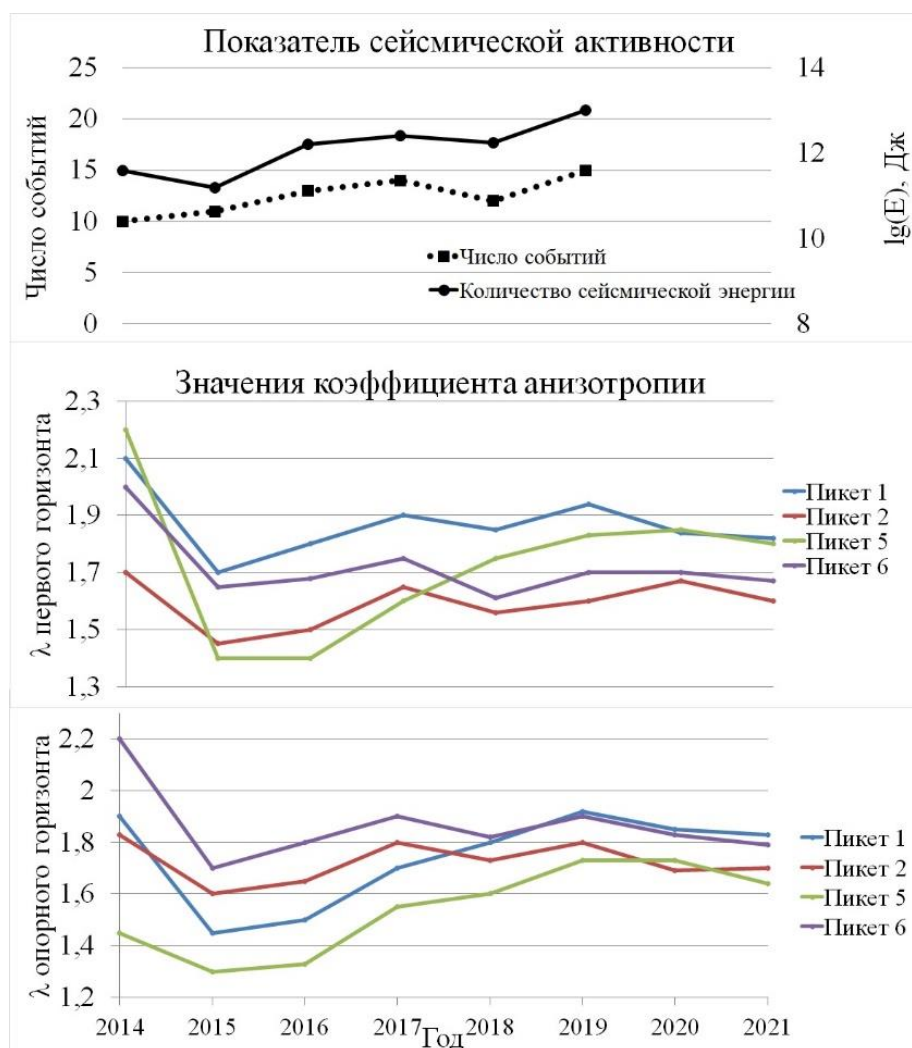


Рисунок 3.79 – Сопоставление значений коэффициента электрической анизотропии с показателями сейсмической активности

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 2014-2021 гг. на участке Мухор-Тархата, а также геологических и сейсмологических данных следует, что временные изменения (вариации) анизотропии λ на участке исследования в период 2014-2021 гг. указывают на продолжающийся афтершоковый процесс Чуйского землетрясения 2003 года. Установлено, что вариации коэффициента электрической анизотропии на порядок 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.

3.5.3 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 2021 года в очередной раз были проведены измерения методом вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ) и электротомографии (ЭТ) в районе западной части Чуйской впадины (геодинамический полигон «Бельтир»).

На рисунке 3.80 приведена схема размещения пунктов ВЭЗ и профилей ЭТ на местности. В 2021 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. Методом ЭТ выполнены повторные измерения по профилям № 1-3, а также новый профиль № 14

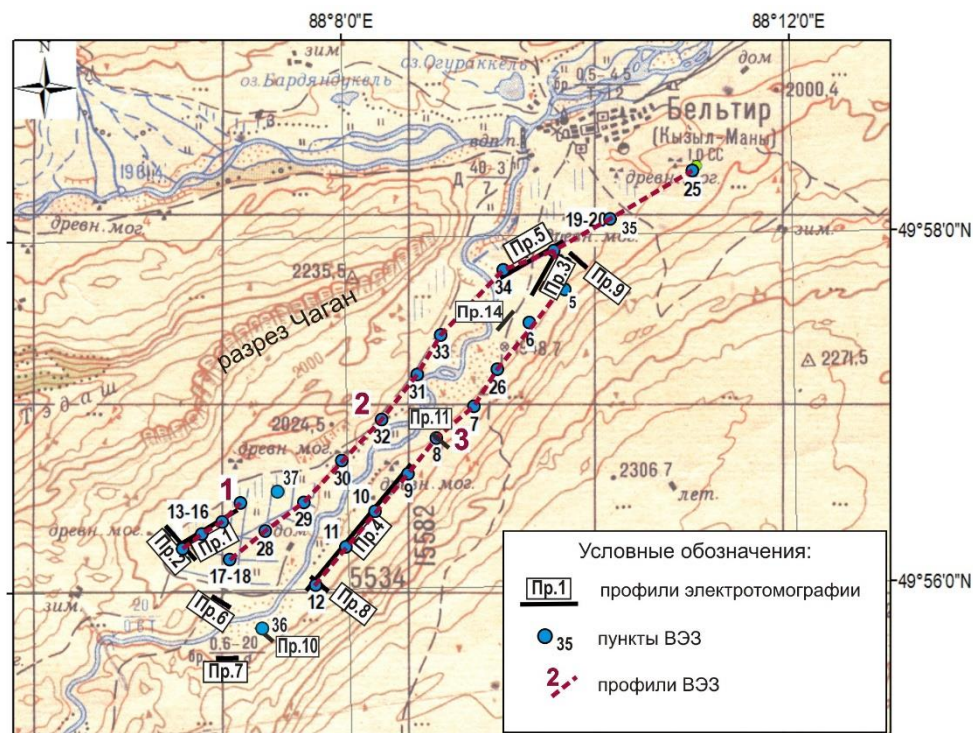


Рисунок 3.80 – Схема размещения пунктов ВЭЗ и профилей ЭТ в районе села Бельтир

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 (УЭС более 3000 Ом·м), прослеживаемый практически на всех кривых ВЭЗ участка, эти породы в соответствии с априорной информацией отнесены к многолетнемерзлым. На опорном геоэлектрическом горизонте (УЭС более 4500 Ом·м)

залегает мощный слой низкоомных пород, скорее всего более тонкослоистых и обводненных.

На рисунке 3.81 приведен пример полевой кривой ВЭЗ за 2021 год и геоэлектрические модели, полученные по результатам решения обратной задачи в комплексе ZondIP.

На рисунке 3.82 приведена вариация кривых ВЭЗ (ПК 13) за весь период наблюдений, начиная с 2004 года.

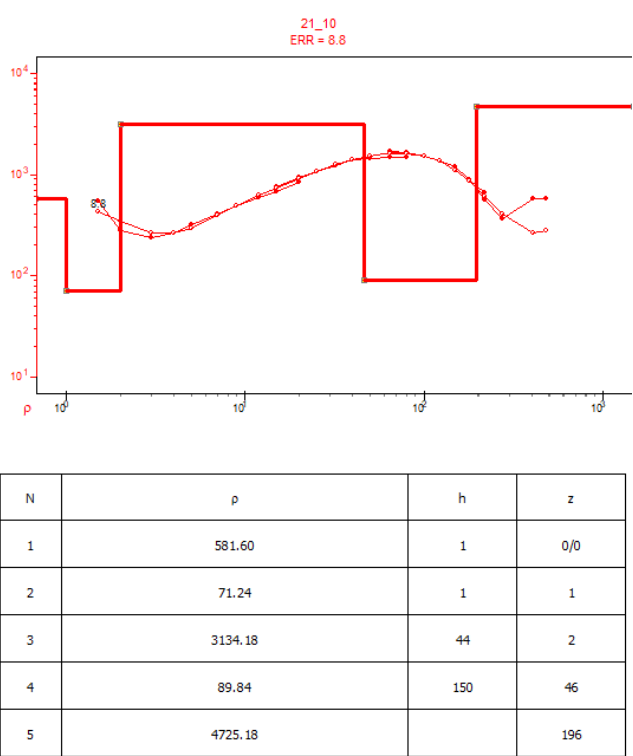


Рисунок 3.81 – Кривая ВЭЗ номер 10

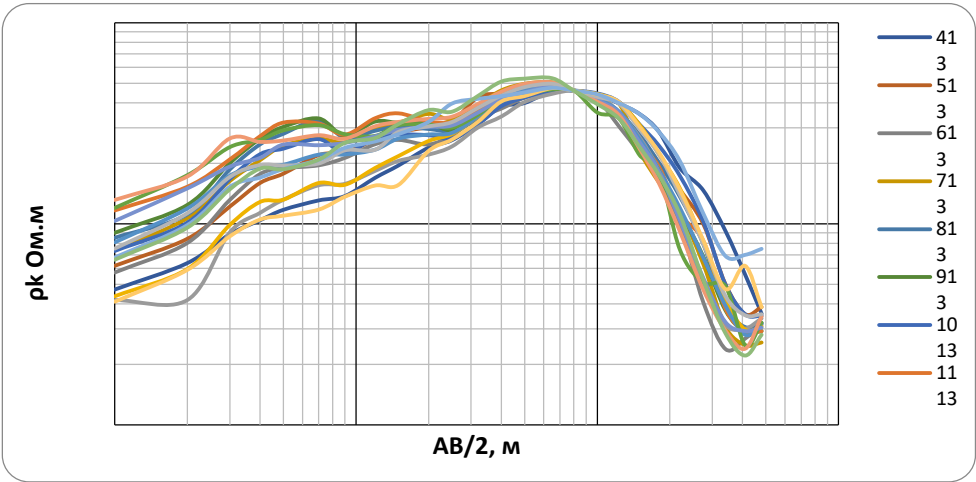


Рисунок 3.82 – Кривые ВЭЗ № 13 за все годы измерений

По итогам интерпретации данных ВЭЗ за 2017-2021 гг. была построена трехмерная модель с использованием пакета Zond (рисунок 3.83).

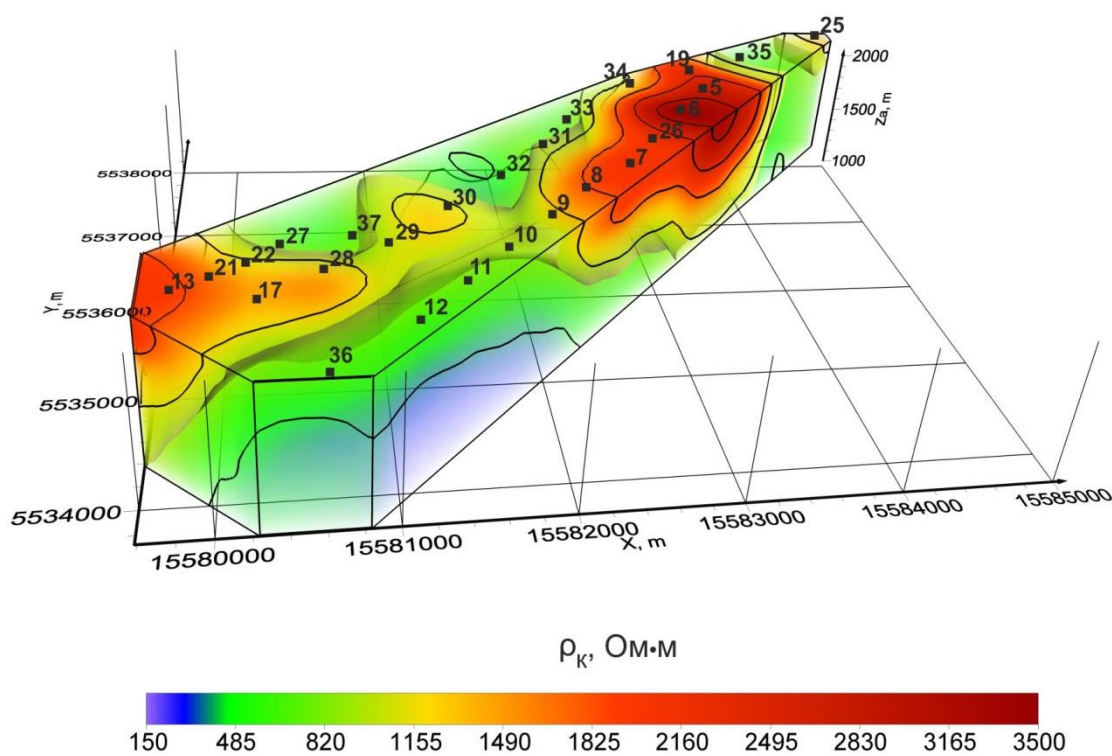


Рисунок 3.83 – Трехмерная геоэлектрическая модель по данным ВЭЗ в долине р. Чаган

На рисунке 3.83 показана трехмерная геоэлектрическая модель, линии профилей и пункты ВЭЗ. Модель характеризует общее строение участка исследования. Верхняя часть разреза неоднородна, хорошо видны зоны распространения многолетнемерзлых пород с УЭС выше 3500 Ом·м (красная цветовая гамма) и мощный низкоомный горизонт, распространенный по всей площади (оттенки синего и зеленого).

Таким образом, по комплексу данных метода постоянного тока (ВЭЗ) с учетом разломной тектоники в западном замыкании Чуйской впадины, построена трехмерная модель участка исследования (использована адаптированная программа моделирования, инверсии, визуализации Zond). Получены геоэлектрические параметры крупной разломной зоны, разделяющей тектонические блоки. Пополнена база данных.

Уточнено и наглядно представлено строение долины реки Чаган в западном замыкании Чуйской впадины. По данным электротомографии построен геоэлектрический разрез верхней части осадочного чехла до глубин в 75-80 м. На глубинных геоэлектрических разрезах по данным ВЭЗ по резкому изменению мощности осадков в двух соседних пунктах выделено разломное нарушение типа сброса, по которому северо-

западный блок был приподнят на 80-100 м относительно юго-восточного. В распределении электропроводности по данным электротомографии это же разломное нарушение соответствует относительно низкоомной зоне, разделяющей более высокоомные участки разреза; оценена ширина разломной зоны, составляющая ~ 110 м.

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

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

Таблица 3.8 – Коэффициенты анизотропии для крестового ВЭЗ 17-18 в зоне трещин

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Λ_{17-18}	1.84	1.36	1.20	1.62	1.50	1.36	1.40	1.35	1.33
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Λ_{17-18}	1.27	1.18	0.93	0.99	1.04	0.81	-	0.74	-

Таблица 3.9 – Коэффициенты анизотропии для крестового ВЭЗ 19-20 вне зоны трещин

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Λ_{19-20}	0.99	1	1.02	1.02	1.05	1.01	1.02	1.04	1.03
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Λ_{19-20}	1.02	1.07	0.94	0.97	1.05	0.92	-	0.84	-

В таблицах 3.7-3.9 приведены значения Λ за все годы измерений. Анализ данных (таблица 3.7) свидетельствует о том, что в районе пункта ВЭЗ 13-16, расположенного в зоне развития трещин, со временем происходит уменьшение коэффициента электрической анизотропии. Вне зоны трещин (таблица 3.9) коэффициент анизотропии имеет стабильное значение близкое к единице, таким образом, анизотропия и её вариации здесь фактически отсутствуют. На рисунке 3.84 приведены графики значений коэффициентов анизотропии за весь период инструментальных наблюдений.

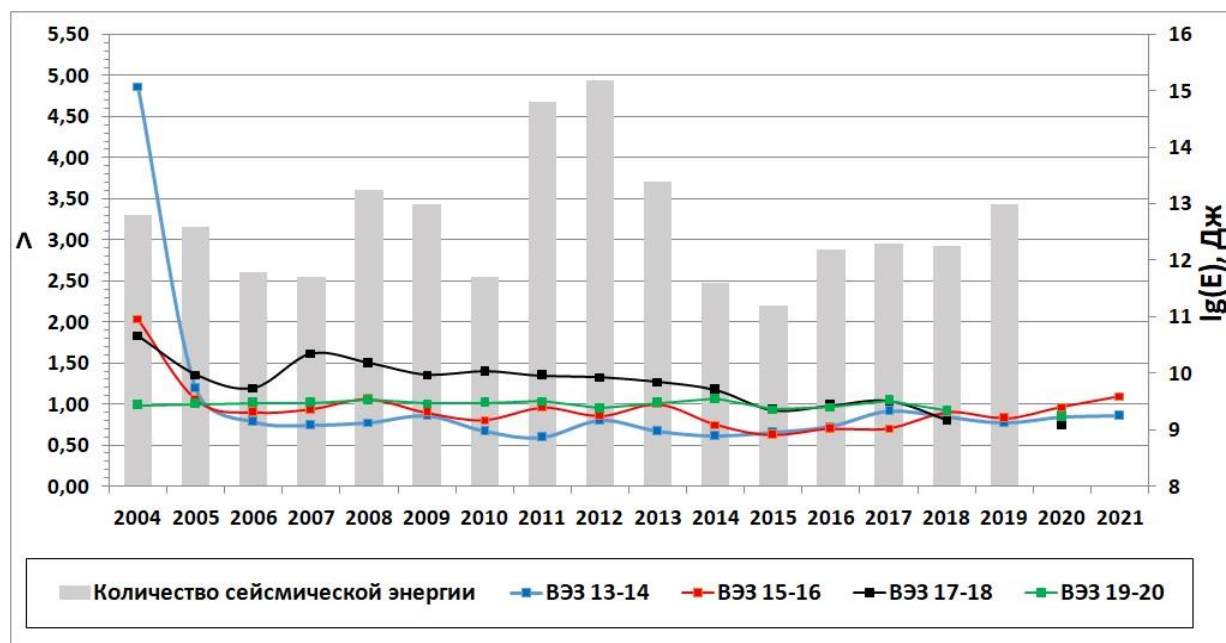


Рисунок 3.84 – Графики значений Λ за все годы измерений

По данным многолетних измерений методом ВЭЗ построены контурные диаграммы распределения ρ_k для кругового ВЭЗ № 13-16. На рисунке 3.85 приведены диаграммы за 2004 – 2021 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.

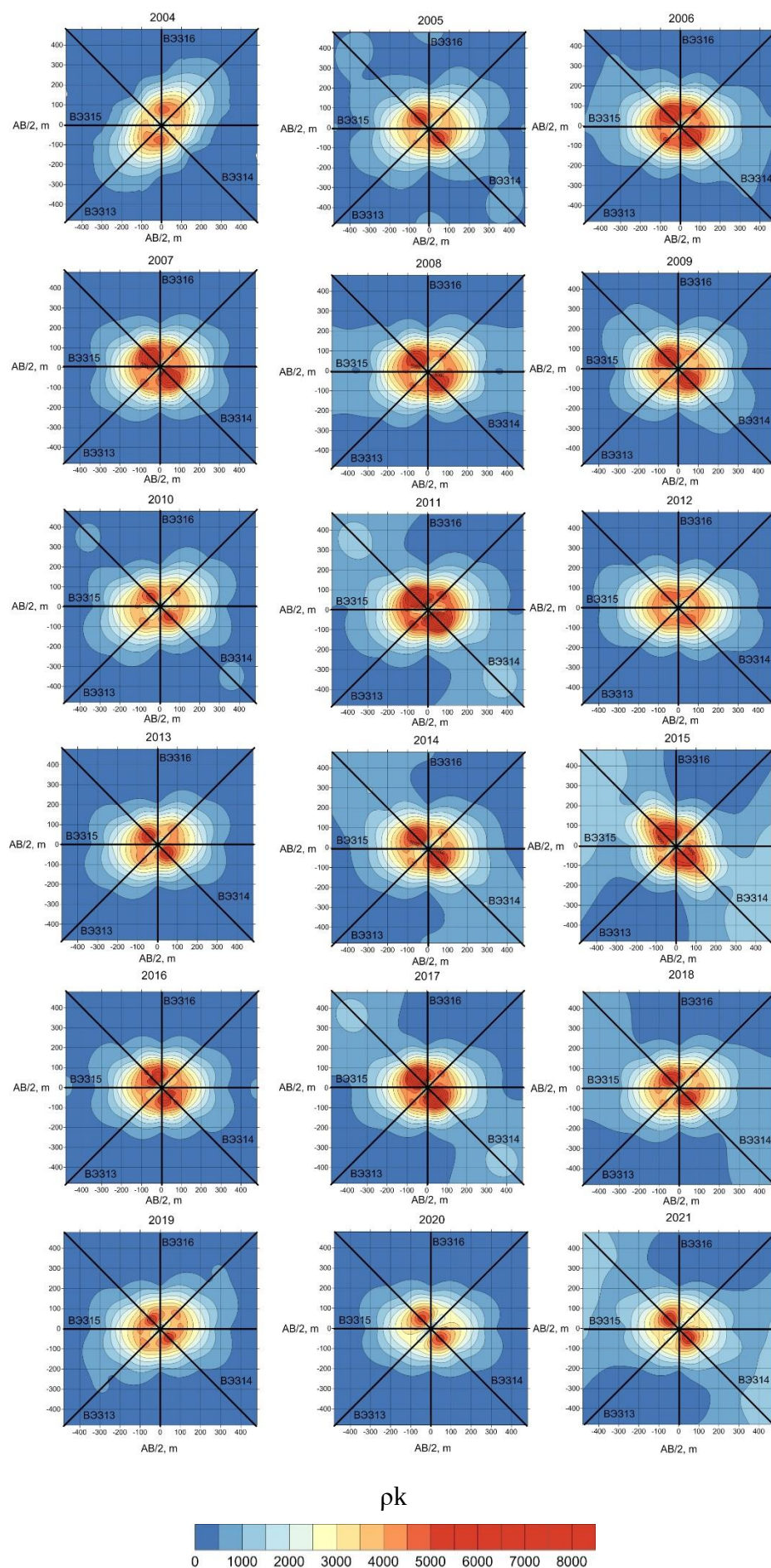


Рисунок 3.85 – Контурные диаграммы для кругового ВЭЗ в зоне видимых трещин

3.5.4 Результаты исследования Горловской впадины, проведенные в 2021 году

В районе угольных месторождений Новосибирской области методами наземной электроразведки с использованием зондирования становлением поля получены глубинные геоэлектрические характеристики осадочного заполнения впадины и юго-восточного разломного ограничения.

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 [20].

В 2021 году сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН проведены работы по изучению геоэлектрического строения Горловского прогиба с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами.

Для исследований выбран участок в Горловской впадине вблизи п. Харино (рисунок 3.86). Восточнее этого посёлка по данным АСФ ФИЦ ЕГС РАН наблюдается наибольшее число эпицентров землетрясений, происходящих в настоящее время.

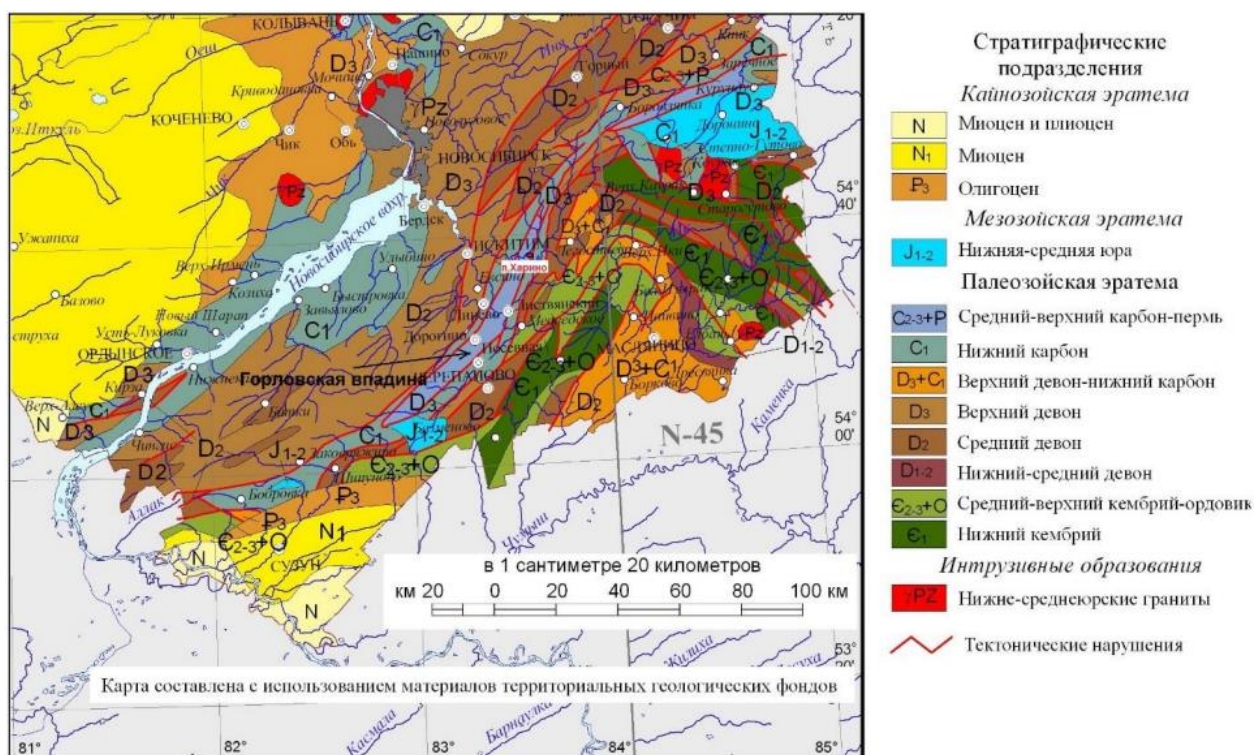


Рисунок 3.86 – Фрагмент геологической карты участка работ, Горловский прогиб
Колывань-Томская складчатая зона

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 [21].

Система измерений

В 2021 году на участке работ были проведены измерения методами наземной электроразведки (рисунок 3.87). Для восстановления глубинного строения был выбран метод зондирования становлением поля (ЗСБ).

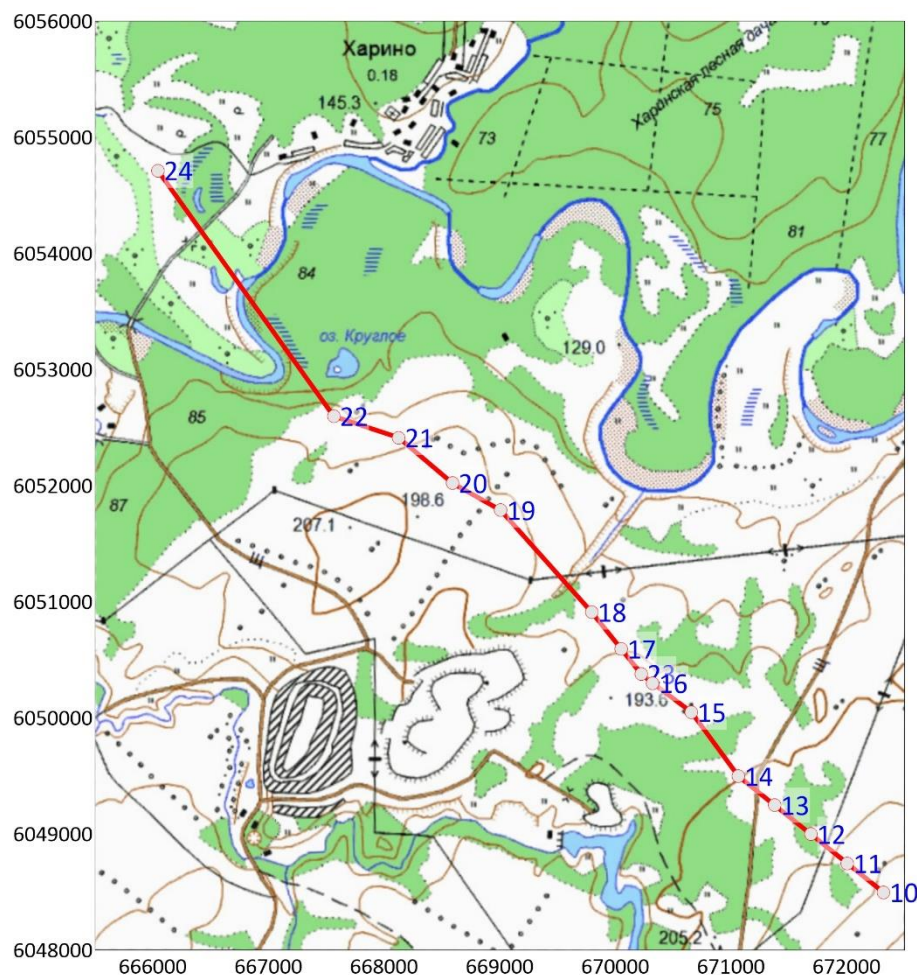


Рисунок 3.87 – Схема участка работ 2021 г.

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 глубины исследования в несколько сотен метров. Всего было выполнено 15 зондирований по профилю длиной ~ 8 км, по направлению с юго-востока на северо-запад от восточного борта впадины к её центральной части. Обработка и интерпретация данных осуществлялась с помощью программного комплекса моделирования и инверсии EMS [22].

На рисунке 3.88 приведены результаты регистрации процессов становления поля по пикетам.

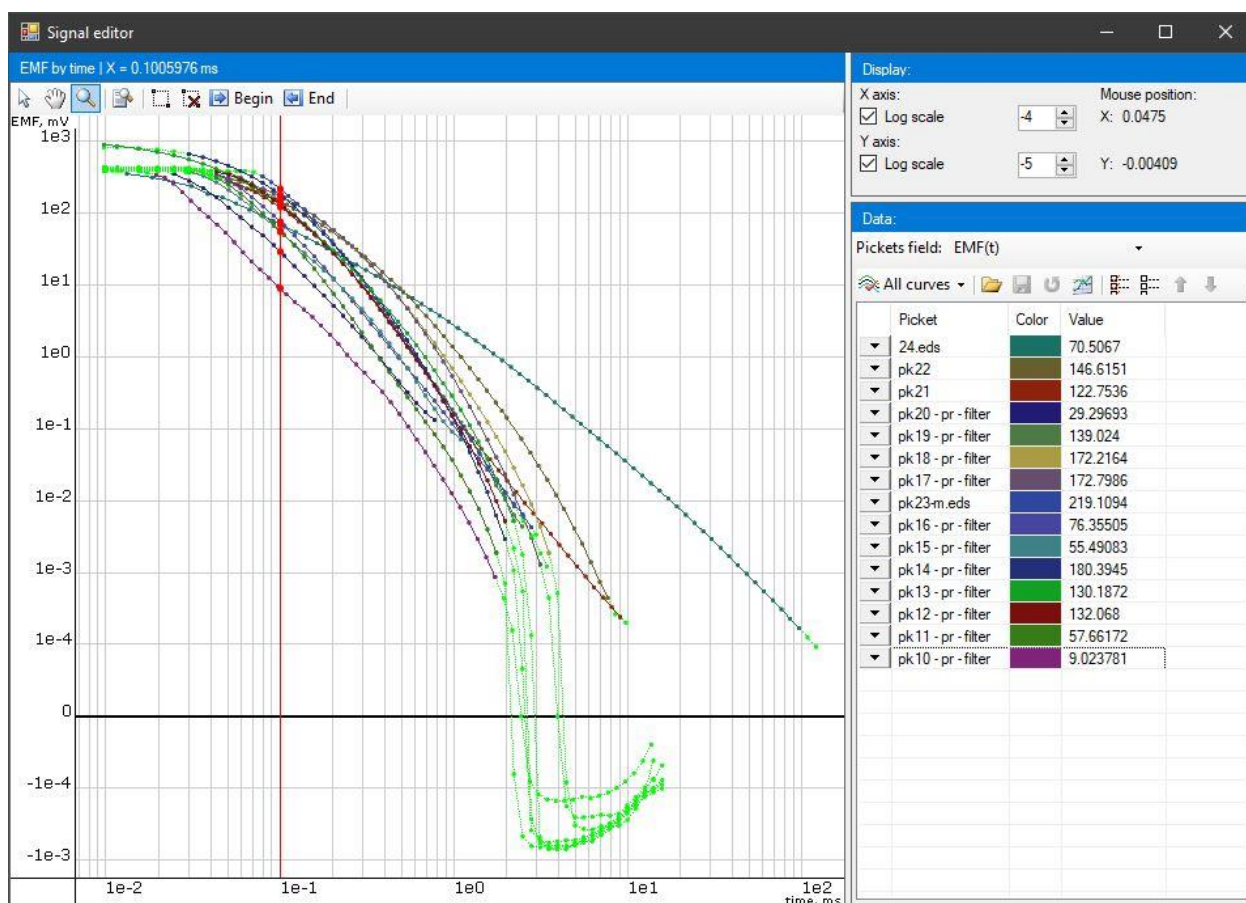


Рисунок 3.88 – Процессы становления электромагнитного поля, регистрация установкой ГК -200 x 200м, ИК -100 x 100м. Индекс кривой - номер пикета

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 500–700 мс.

После предварительной обработки результатов полевых наблюдений проведен расчет трансформант $\rho_{\tau}(t)$ (рисунок 3.89).

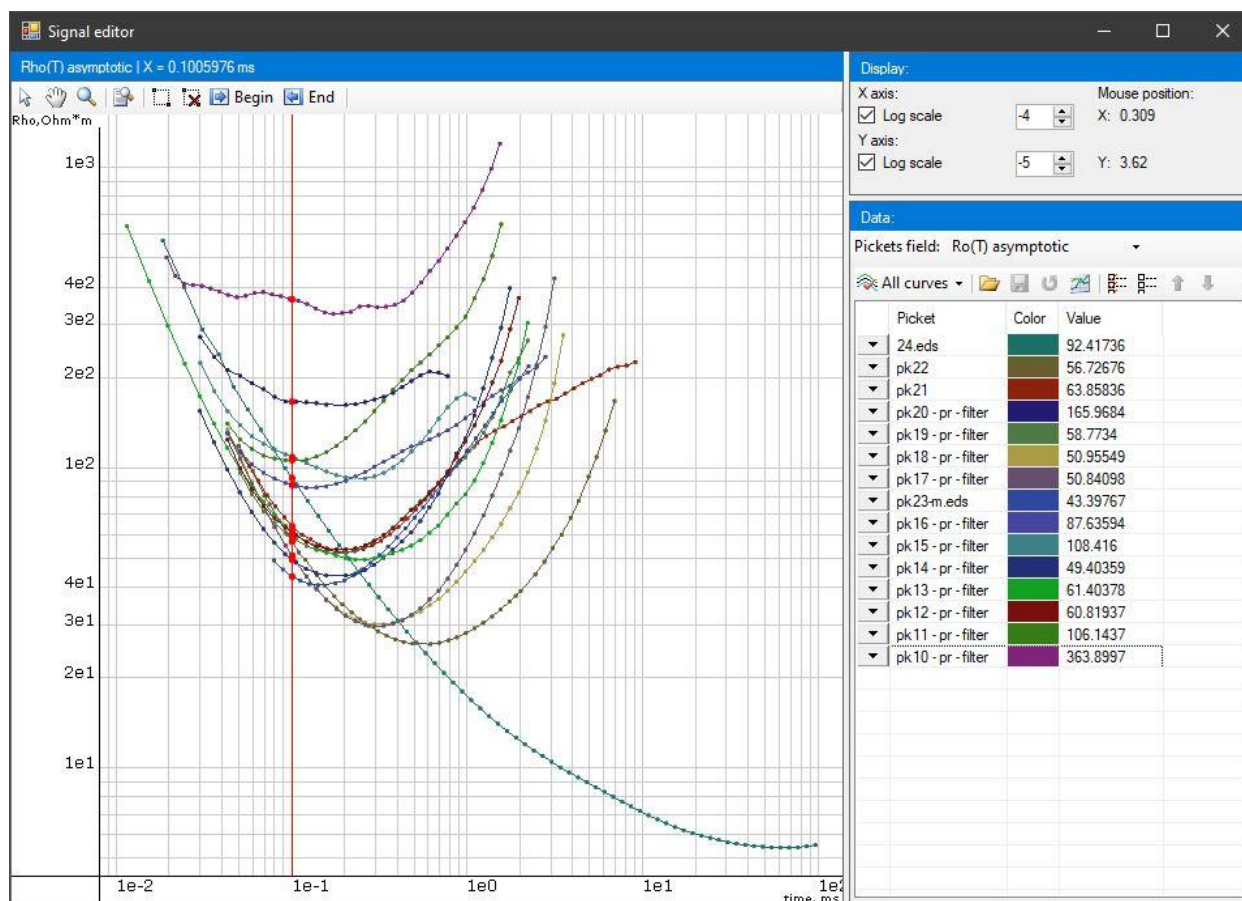


Рисунок 3.89 – Трансформанты сигнала - $\rho_{\tau}(t)$, регистрация установкой ГК - 200x200м, ИК -100x100 м. Индекс кривой - номер пикета

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 пикетов ПК 10 – ПК 23 имеют явно выраженную правую восходящую ветвь с устойчивым выходом на опорный горизонт. Трансформанта $\rho_{\tau}(t)$ пикета ПК 24 не имеет восходящей правой части, что говорит о низкоомных уровнях УЭС глубинных горизонтов разреза

Построение геоэлектрических моделей

По всем пикетам бы проведен расчет геоэлектрических параметров, построены геоэлектрические модели.

Геоэлектрические модели для приборовой ПК 10 (рисунок 3.90) и центральной ПК 24 (рисунок 3.91) частей впадины принципиально различаются.

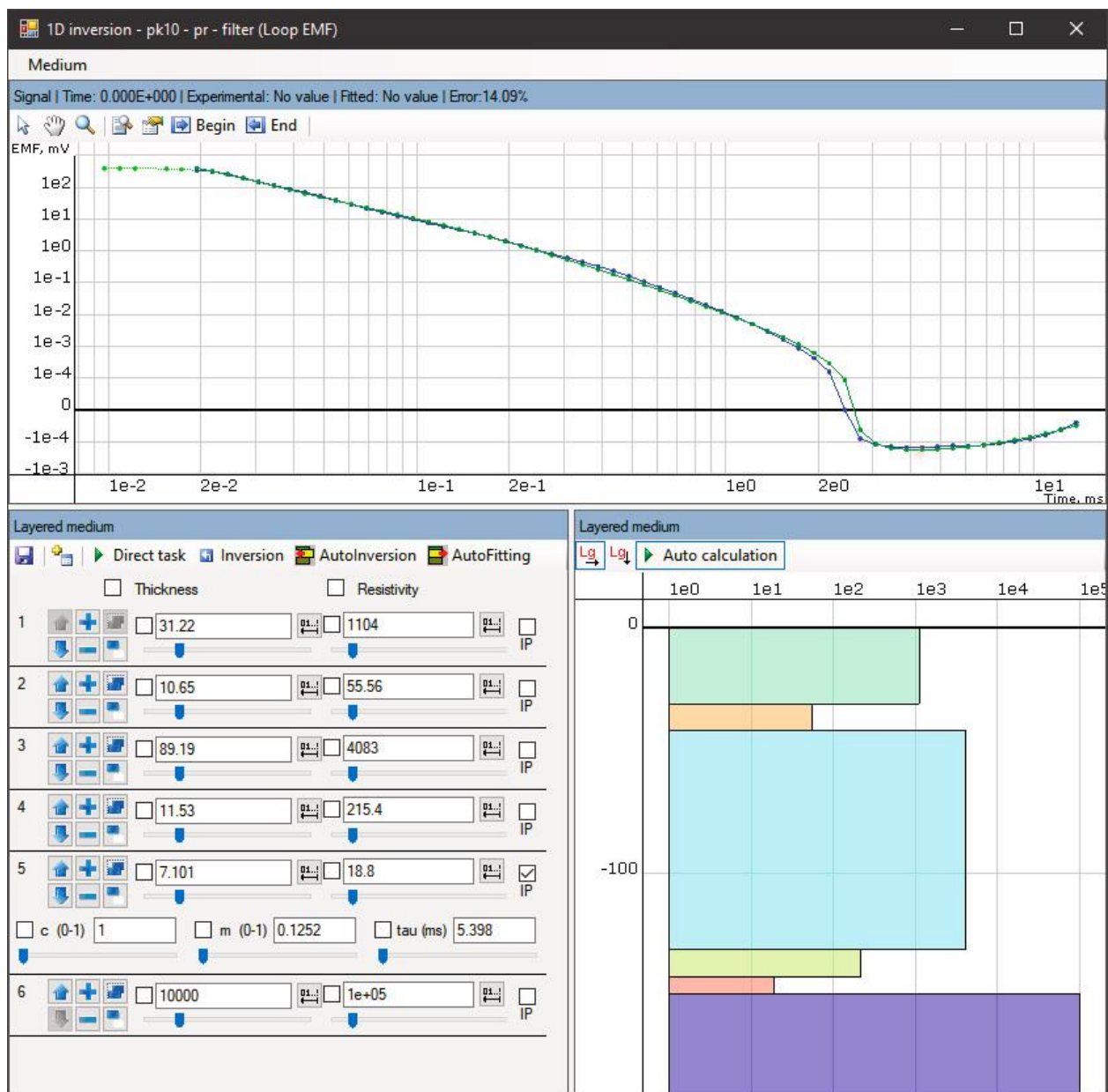


Рисунок 3.90 – Подбор слоистой среды по данным ПК 10

Юго-восток профиля.

По данным ЗСБ (ПК 10, рисунок 3.90), разрез в целом является высокоомным. На самых ранних временах кривая искажена, для верхнего маломощного слоя получено УЭС в 1104 Ом·м, что скорее всего, соответствует современным осадкам, глубже можно видеть

чередование слоев с УЭС от 55.5 Ом·м до 4000 Ом·м. Кровля высокоомного опорного горизонта со значениями УЭС 10000 Ом·м залегает на глубинной отметке порядка 150 метров. Данный опорный горизонт, по всей видимости выполнен породами среднего и верхнего отделов девонского возраста (D₂, D₃).

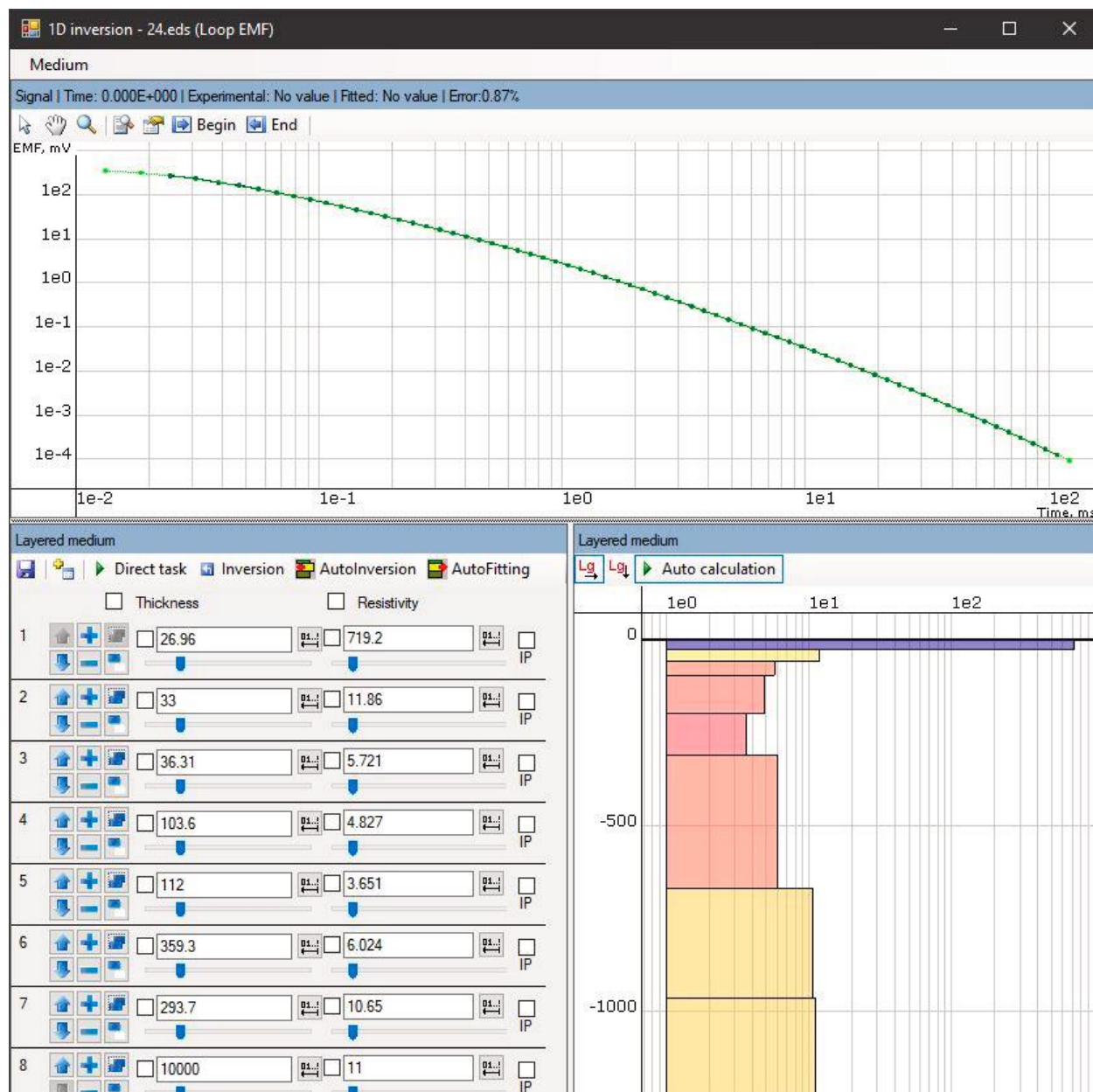


Рисунок 3.91 – Подбор слоистой среды по данным ПК 24

Северо-запад профиля.

Данные ЗСБ (ПК 24, рисунок 3.91) характеризуют низкоомный разрез до глубин более 670 м соответствуют горизонтально-слоистой модели с двумя верхними слоями: интервал глубин 0 – 27 метров, УЭС 710 Ом·м; и интервал глубин 28 – 66 метров, УЭС 11 Ом·м. Глубже наблюдается пачка слоев с аномально низкими сопротивлениями от 3.6 до

11.0 Ом·м с общей мощностью более 600 м. Опорный высокоомный горизонт на данном пикете не выявлен. Основные параметры моделей получены с погрешностью менее 5%.

По результатам инверсии с использованием горизонтально-слоистой модели построен геоэлектрический разрез, отражающий строение впадины и ее прибортовой части до глубин более 600 м (рисунок 3.92). Профиль пересекает юго-восточный борт Горловской впадины, в крест её простираения. В северо-западной части, пикетов ПК 24 начиная с глубин порядка 60 метров прослеживается мощный шестисотметровый горизонт со значениями УЭС от 3.6 до 6.0 Ом·м, по геологическим данным, скорее всего, соответствующий залежам каменноугольной системы (C_2) с присутствием антрацита. В интервале профиля пикеты ПК 10 – ПК 22 геоэлектрические параметры разреза отличаются от параметров пикета ПК 24. В районе пикета ПК 22 УЭС повышаются на 2 порядка и далее на юго-восток по профилю в пикетах ПК 21 – ПК 10 сопротивление палеозойских горных пород начинают превышать 2000 Ом·м. Судя по разрезу, можно предполагать, что между ПК 22 и ПК 24 локальная зона (разлом) сочленений прибортовой зоны прогиба и самой впадины. Предположительная разломная зона как бы надвинута на проводящие отложения. Непосредственно зона разлома хорошо выделяется по изолинии УЭС в 100 Ом·м.

Особо стоит отметить два интервала профиля, первый на пикетах ПК 15 – ПК 16, второй на пикетах ПК 20 – ПК 21. Данные низкоомные образования со значениями УЭС в интервалах 100 Ом м – 1000 Ом м можно проинтерпретировать как структуры типа грабен в более высокоомных породах палеозоя.

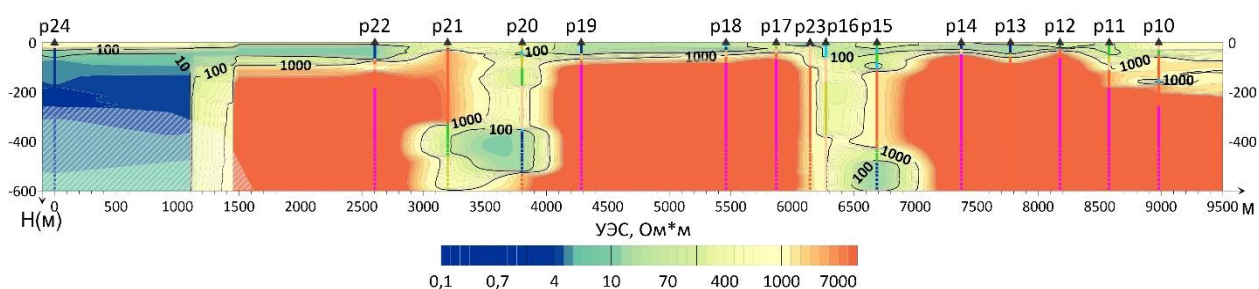


Рисунок 3.92 – Разрез по данным ЗСБ

Выводы

Размеры генераторно-приёмной установки метода ЗСБ, геоэлектрические характеристики Горловской впадины не позволили достигнуть глубины до опорного горизонта (фундамента), но первое представление о разрезе непосредственно впадины получены. В районе пикета 24 ЗСБ выделена низкоомная аномалия с понижением

сопротивлений до единиц Ом·м. Коллектив будет продолжать работы методами электроразведки, в Горловской впадине, скорректировав параметры установки.

3.5.5 Опытно-методические работы по разработке технологии электромагнитных зондирований (ЗС) и электротомографии с целью выявления и локализации угольных пластов

В 2021 году в рамках Договора № ДГРК7-002596 «Проведение опытно-методических работ по разработке технологии электромагнитных зондирований (ЗС) и электротомографии с целью выявления и локализации угольных пластов» были выполнены измерения двумя электроразведочными методами:

- электротомография;
- электромагнитное зондирование становлением поля.

Целью работ является построение геоэлектрических моделей в широком диапазоне глубин для выявления наличия или отсутствия угольных пластов.

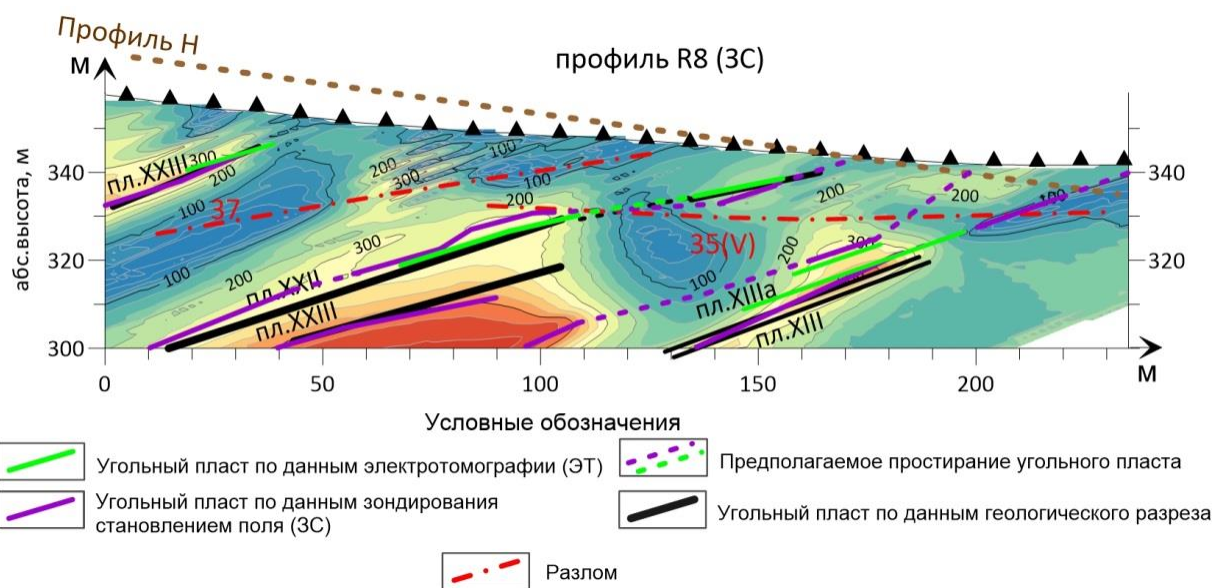


Рисунок 3.93 – 2D инверсия профильных данных. Совместная интерпретация результатов зондирования становлением поля (ЗС) и электротомографии (ЭТ)

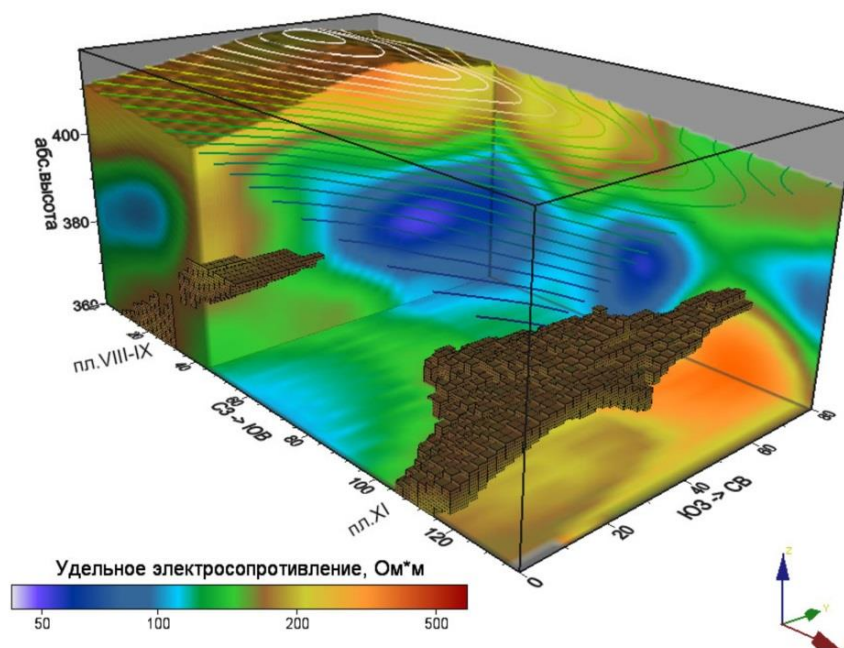


Рисунок 3.94 – 3D визуализация геоэлектрической модели участка площадных работ

На основании проведённого исследования, включающего полевые работы методами электротомографии и зондирования становлением поля, первичную обработку и интерпретацию результатов измерений, включающую 2D (рисунок 3.93) инверсию профильных данных, и 3D (рисунок 3.94) визуализацию геоэлектрической модели участка по площадным измерениям, сопоставлению и совместному анализу геоэлектрических и геологических данных можно сделать следующие основные выводы.

Электроразведочные работы на участках угольного разреза «Поле шахты № 1» позволили определить зоны тектонических нарушений, а также оценить глубину залегания угольного пласта.

Комплексные электроразведочные работы показали высокую информативность методов при изучении угольных пластов, залегающих под техногенными и четвертичными отложениями. Интерпретация полевых данных позволяет не только определить наличие/отсутствие угольных пластов, но также оценить их угол падения.

Выводы

В 2021 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.

Выполнен профиль в юго-восточном борту Горловского прогиба Колывань-Томской складчатой зоны и сопряжённых с ней структурах. Выявлен контакт прибортовой части и самой впадины. Локализованы две структуры типа грабен.

Разработана технология электромагнитных зондирований (ЗС) с целью выявления и локализации угольных пластов.

Работа на угольном месторождении Кузбасса показали высокую эффективность комплекса электроразведочных методов на постоянных и переменных электрических полях. Локализация глубин и углов падения угольных пластов комплексом методов электроразведки подтверждается геологическими данными бурения.

3.5.6 Объем полевых работ, выполненных в 2021 г.

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

- Западная часть Чуйской впадины:
 - Мониторинг ЗС с соосными петлями. Девять физических точек, в каждой ф.т. было выполнено по три физических наблюдения.

Объем работ: 27 физических наблюдений.

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

Шесть физических точек.

Выполнено 18 физических наблюдений.

- Мониторинг ВЭЗ.

Участок поселка Бельтир.

Объем работ: 13 физических наблюдений.

- Высокоразрешающие электроразведочные работы (электротомография).

Чуйская впадина: - 1535 погонных метров профилей.

Район работ: Кемеровская область, Междуреченский район.

- Участок «Поле шахты № 1» АО «Распадская Коксовая»
 - Высокоразрешающие электроразведочные работы (электротомография)

Объем работ: 3040 погонных метров профилей

- Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Объем работ 414 физических наблюдений.

- Колывань-Томская складчатая зона, Горловский прогиб.

- Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Объем работ 15 физических наблюдений.

3.6 Важнейшие результаты СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за 2021 год

Проект «Опасные процессы при техногенном воздействии на земную кору» (№ 0152-2019-0011) руководитель д.г.-м.н. В.С.Селезнёв.

Проведение мониторинга технического состояния крупных плотин ГЭС, основанного на анализе изменений собственных частот

Исследования зданий и сооружений по мониторингу собственных частот, выявили значительные изменения последних от факторов, не связанных с нарушением целостности конструкций. Такие явления, как температурные вариации, промерзание грунта, изменение уровня водохранилища, обмерзание конструкций, снеговая нагрузка, приводят к сезонным или суточным квазипериодическим изменениям частот, достигающих десятых долей герц. Для исключения неверной интерпретации о техническом состоянии зданий и сооружений разработаны подходы, позволяющие учесть влияние указанных факторов путем построения корректирующих функций и определения относительных изменений значений собственных частот. Так, за 20-летний период значения собственных частот 3-й и 4-й мод плотины Саяно-Шушенской ГЭС увеличились на 0.03 Гц (при сезонных вариациях в 0.2 Гц), что связано с ее консолидацией после ремонтных работ. Результаты текущей работы приведены на рисунке 3.95.

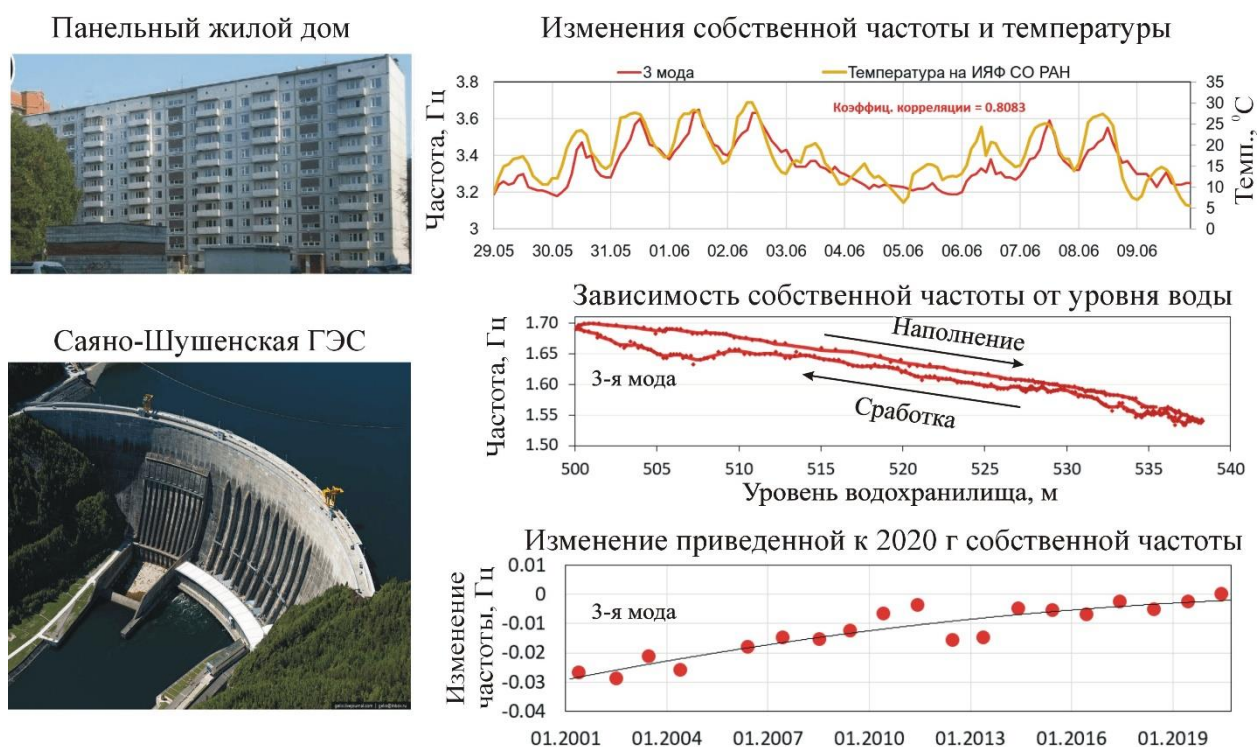


Рисунок 3.95 – Мониторинг собственных частот зданий и сооружений

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Громыко П.В., Коковкин И.В., Кречетов Д.В. Влияние изменений внешней среды на качество мониторинга собственных частот зданий и сооружений (планируется к печати)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчете приведены результаты исследований Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН за 2021 год, выполненных по научным проектам: № 0152-2019-0011 «Опасные процессы при техногенном воздействии на земную кору», № 0152-2019-0012 «Эволюция сеймотектонических процессов в Сибири по данным мониторинга землетрясений», № 0152-2019-0005 «Проведение непрерывного сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга...» и № 0152-2019-0004 «Разработка и актуализация баз данных сейсмологических, геофизических, геодинамических наблюдений...» Основными результатами являются следующие:

Продолжено развитие способа оценки реакции зданий и инженерных сооружений на сейсмические воздействия, основанного на пересчете колебаний основания в верхние точки объекта, с использованием результатов детального обследования методом когерентного восстановления полей стоячих волн. Рассмотрен эффект совпадения и несовпадения частоты источника колебаний с одной из собственных частот здания. Последние меняются при вариациях температуры окружающей среды. На примере реакции жилого десятиэтажного дома на сейсмическое воздействие от мощного компрессора, работающего с частотой 2.083 Гц и расположенного на удалении в 1.3 км, показано, что резонансное усиление колебаний здания увеличивается в более, чем 2 раза, при совпадении собственной частоты 2-й моды с частотой источника, по сравнению с ситуацией, когда частоты отличаются. Подобные явления необходимо учитывать для более корректной оценки сейсмостойкости зданий и сооружений.

Продолжены исследования по мониторингу собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС, с использованием записей сейсмостанции «Черемушки»: построены непрерывные ряды данных с 2001 года по настоящее время. Детально проанализирована зависимость частоты 3-й моды от уровня верхнего бьефа (УВБ), в периоды заполнения водохранилища, исключая зимние месяцы, когда поверхность водоема покрыта льдом, и интерпретация затруднена. Установлено, что при введении временного сдвига между рядами, а также при ограничении диапазона УВБ, данную зависимость можно с большой точностью описать линейным уравнением. Это позволяет исключить из исходной последовательности данных сезонные вариации, связанные с изменениями УВБ, а также с изменениями температуры и, возможно, других факторов, путем введения поправки с вычислением приведенной частоты. С целью мониторинга, вычислялись отклонения частоты, определенной в каждый момент времени от приведенной к 2020 году частоты. Установлено, что, кроме сезонных изменений собственных частот, существуют и многолетние их изменения: за 20 лет наблюдений частоты 3-й и 4-й мод увеличилась на

0.03 Гц, при этом незначительный рост продолжается и в настоящее время. Это может свидетельствовать о том, что процессы консолидации плотины продолжаются до сих пор.

Выполнено детальное обследование методом когерентного восстановления полей стоячих волн жилого трехподъездного десятиэтажного панельного дома, выбранного в качестве тестового объекта для формирования модели сооружения. В верхней части здания, начиная с февраля 2021 года, установлена и в непрерывном режиме функционирует сейсмическая станция, по которой детально отслеживаются изменения собственных частот. Установлено значительное влияние температурных изменений на вариации значений собственных частот здания. Так, при различных температурах, отклонение значений собственных частот сооружения составляет до 5%, для частот 1-й и 2-й поперечных мод (~1.9, 2.1 Гц, соответственно), и до 15%, для частоты 3-й поперечной моды (~3.5 Гц). Влияние температурного фактора подтверждено также на 3-х других зданиях: отмечены изменения частот в несколько десятых долей герц, которые также коррелируют с вариациями температуры окружающей среды. Температурные эффекты необходимо исследовать и учитывать при мониторинге собственных частот зданий, для исключения неверных выводов об их техническом состоянии.

Приведены первые результаты регистрации и анализа полученных сейсмических материалов с сейсмостанций вблизи Новосибирской ГЭС и на удалении от нее порядка 16 км. Выделены сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия от работающих гидроагрегатов. Показана возможность отслеживания изменения режимов их работы на удалении в 16 км от объекта. Улучшение соотношения сигнал/шум достигается за счет преобразования графика изменения амплитуд колебаний на частоте работы гидроагрегата, путем вычитания помех на частоте, отличающейся на 0.1 Гц от полезной частоты.

Детальный анализ сейсмологических записей со станций вблизи Колыванского месторождения антрацита, за период с 2017 г. по настоящее время, позволил доказать предположение о причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале, как формирование значительных горизонтальных колебаний в теле отвала, которые при сильном обводнении последнего спровоцировали сход оползня. Результаты исследований позволяют теперь ставить целенаправленные работы по регистрации сейсмических шумов на подобных объектах, с целью контроля над опасными процессами, связанными с обводненностью отвалов горных пород.

Разработаны программное обеспечение и аппаратная конфигурация мобильного комплекса, позволяющего получать на удаленном 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, как проводное, или через стандартный модем оператора связи. Изготовлено 8 комплектов оборудования, осуществляющих непрерывную трехкомпонентную регистрацию колебаний в зданиях в городах Новосибирск и Норильск, п. Каменушка Новосибирской области, а также на вентиляторе главного проветривания (ВГП) шахты «Распадская-Кокосовая» вблизи г. Междуреченск.

По результатам исследования трехкомпонентных (X, Y, Z) записей сейсмических шумов, зарегистрированных на ВГП, создана новая методика обработки и анализа, основанная на интерпретации пересчитанных в сферическую систему координат параметров R , θ и φ . Показано, что с изменениями различных факторов, влияющих на работу вентиляционной установки (давление, режимы работ, поток воздуха и т.д.), происходит изменение данных параметров и их стабилизация на определенном уровне, что дает возможность, набрав статистику, создать систему контроля состояния любого вращающегося оборудования. Методика опробована на данных физмоделирования, а также на данных, полученных ранее, при регистрации сейсмических шумов вблизи гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС.

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.

Выполнен профиль в юго-восточном борту Горловского прогиба Колывань-Томской складчатой зоны и сопряженных с ней структурах. Выявлен контакт прибортовой части и самой впадины. Локализованы две структуры типа грабен.

Разработана технология электромагнитных зондирований (ЗС) с целью выявления и локализации угольных пластов. Работы на угольном месторождении Кузбасса показали высокую эффективность комплекса электроразведочных методов на постоянных и переменных электрических полях. Локализация глубин и углов падения угольных пластов комплексом методов электроразведки подтверждается геологическими данными бурения.

По результатам исследований сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 г. было опубликовано 22 работы, из них в рецензируемых научных изданиях - 10 (в т.ч. 3 статьи – в журналах Web of Science и Scopus), 15 докладов на международных конференциях (ПРИЛОЖЕНИЕ 1).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С.852–863.
2. 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.
3. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Бах А.А., Грищенко 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.
4. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Кречетов Д.В. О мониторинге технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по изменениям ее собственных частот // Гидроэнергетика. Гидротехника. Новые разработки и технологии. Десятая научно-техническая конференция. Приложение на CD-диске: доклады и выступления на секциях конференции. (Санкт-Петербург, 20-22 окт. 2016 г.). – Санкт-Петербург, 2017. – С.55-60.
5. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Адюлов З.А., Кречетов Д.В. Мониторинг состояния плотин гидроэлектростанций на основе анализа изменений собственных частот // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Седьмой научно-технической конференции. (Петропавловск-Камчатский, 29 сент.-5 окт. 2019 г.). – Обнинск, 2019. – С.480-484.
6. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адюлов З.А., Ting-Yu H., Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы (Республика Молдова, 9-13 сент. 2019 г.). – Обнинск, 2019. – С. 60.
7. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адюлов З.А., Ting-Yu H., Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т.1, № 1. – С. 23-34.
8. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. Методика дистанционного контроля над состоянием оборудования и сооружений гидроэлектростанций по данным сейсмических наблюдений // Гидроэлектростанции в XXI веке. Сборник материалов III Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов. (Саяногорск, Черемушки, 26-27 мая 2016 г.) – Саяногорск, Черемушки, 2016. – С.80-87.
9. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В., Кречетов Д.В. О мониторинге оборудования и сооружений крупных ГЭС на основе данных сейсмических наблюдений // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XI Международной сейсмологической школы. (Чолпон-Ата, Кыргызстан, 12-16 сент. 2016 г.) – Обнинск, 2016. – С.181-185.
10. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 48-61. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
11. Seleznev V.S., Liseikin A.V., Bryksin A.A., Gromyko P.V. What caused the accident at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant (SSHPP): a seismologist's point of view // Seismological Research Letters. – 2014. – Т.85, № 4. – С.817-824.
12. Интервью с исполнительным директором АО “Сибирский Антрацит” Сергеем Коломниковым. [Электронный ресурс]. URL: <https://ksonline.ru/380333/sergej-kolomnikov-my-dejstvovali-otkryto-i-operativno>.
13. 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. – Т.31, № 1. – С. 015801.

14. Карта месторождений полезных ископаемых, увязанная с государственным балансом запасов РФ. Горючие ископаемые. Новосибирская область. Сибирский федеральный округ. 2020. ФГБУ «ВСЕГЕИ» [Электронный ресурс]. URL: <http://atlaspacket.vsegei.ru/#23927122f784997b6>

15. *Бат Маркус*. Спектральный анализ в геофизике. Пер. с англ. – М: Недра, 1980 г. – 535 с.

16. *Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А.* SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666241, 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021

17. *Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Громыко П.В.* Принципы инженерно-сейсмического мониторинга крупных промышленных объектов (на примере Саяно-Шушенской ГЭС) // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «50 лет сейсмологического мониторинга Сибири» (Новосибирск, 21-25 окт. 2013 г.). – Новосибирск, 2013. – С.156-160.

18. *Громыко П.В., Селезнев В.С., Лисейкин А.В.* Оценка временной эксплуатационной характеристики гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС с помощью анализа динамических воздействий, возникающих в гидротехнических сооружениях Саяно-Шушенской ГЭС на время тестовых испытаний гидроагрегата № 10 // Тезисы докладов Всероссийской конференции с международным участием «50 лет сейсмологического мониторинга Сибири» (Новосибирск, 21-25 окт. 2013 г.). – Новосибирск, 2013. – С.137-140.

19. *Громыко П.В., Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Курзин В.Б.* Изменения собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при работе старых и новых гидроагрегатов // Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева «Геофизические методы исследования земной коры». (Новосибирск, 8-13 дек. 2014 г.) – Новосибирск, 2014. – С.125-128.

20. *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 $M_L=4/3$ and induced seismicity features of the Gor-lovsky coal basin // Seismic Instruments. – 2020. – V.56, № 3. – pp.254-268.

21. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. – Серия: Алтае-Саянская. – Лист: N-44-Новосибирск. Объяснительная записка. – Санкт-Петербург, ФГБУ «ВСЕГЕИ». – 2015.

22. *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.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2021 году

Сведения о выполнении количественных показателей индикаторов эффективности фундаментальных научных исследований, реализуемых Программой в 2020–2021 гг. (Темы 0152-2019-0011 «Опасные процессы при техногенном воздействии на земную кору» и № 0152-2019-0012 «Эволюция сейсмотектонических процессов в Сибири по данным мониторинга землетрясений»)

Индикатор	Единица измерения	2021 г.	
		План	Фактическое исполнение
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в базе данных Web of Science и Scopus	единиц	1	3
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в ядре РИНЦ	единиц	3	4
Количество докладов на международных конференциях	единиц	3	15

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

1. Yu.I. Kolesnikov, K.V. Fedin, L. Ngomayezwe, On the influence of seasonal changes in the resonant properties of surface soils on seismic safety of structures, Journal of Applied Geophysics, Volume 193, 2021, 104412, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104412>.

2. Seleznnev V.S., Liseikin A.V., Emanov A.F., Solov'ev V.M. Seismological observations during a landslide on the dump at the Kolyvan anthracite deposit (Novosibirsk region) // Doklady Earth Sciences. – 2021. – V. 499, N 1. – P. 585-589. DOI: 10.1134/S1028334X21070126

Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Еманов А.Ф., Соловьев В.М. Сейсмологические наблюдения во время оползня на отвале Колыванского месторождения антрацита (Новосибирская область) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 499, № 1. – С.65-70. DOI: 10.31857/S2686739721070124.

3. Nevedrova N.N., Sanchaa A.M., Shaparenko I.O. Geoelectrical structure and monitoring in fault zones of Uimon depression in Gorny Altai region using electromagnetic methods // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, "VIII International Symposium "Problems of Geodynamics and Geoecology of Intracontinental Orogens"". – 2021. – С. 012025. DOI: 10.1088/1755-1315/929/1/012025.

4. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Штабель Н.В. Глубинное строение разломной зоны на участке Мухор-Тархата Чуйской впадины по данным нестационарных электромагнитных зондирований с использованием трехмерного моделирования // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 2 (46). – С. 67-73. DOI: 10.20403/2078-0575-2021-2-67-73.

Доклады на международных конференциях:

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Соловьев В.М. Современные системы контроля работы нефтяных и газовых месторождений сейсмологическими методами // Материалы международной научно-практической конференции «Решение Европейского союза о декарбонизации и новая парадигма развития топливно-энергетического комплекса России». – 2021. – С. 59-62.
2. Коковкин И.В., Громыко П.В., Брыксин А.А., Селезнев В.С. О возможности удаленного мониторинга работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС по данным сейсмологических наблюдений // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2, № 2. – С. 81-89.
3. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Соловьев В.М., Громыко П.В. Использование техногенных шумов в сейсмологии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 86.

Дополнительные публикации по теме:

1. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021666241, 11.10.2021. Заявка № 2021665611 от 11.10.2021.
2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Важнейшие результаты научной деятельности Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН в 2016-2020 гг. (сейсмические исследования) // Российский сейсмологический журнал. 2021. – Т. 3, № 1. – С. 54-74. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.04>.
3. 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>
4. Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М., Шапаренко И.О., Шалагинов А.Е., Санчаа А.М. Первые результаты исследований Горловской впадины наземными методами электроразведки с контролируруемыми источниками // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2021. – Т. 2. № 2. – С. 272-279. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-272-279.
5. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. О возможности изучения глубинного строения земной коры технологией речной сейсморазведки // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. Тезисы докладов VIII Международного симпозиума. г. Бишкек. 2021. – С. 33.
6. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Брыксин А.А., Кречетов Д.В., Коковкин И.В. Возможности речной сейсморазведки для изучения глубинного строения земной коры // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 54.
7. 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.
8. Громыко П.В. О способе мониторинга состояния вращательных механизмов по данным сейсмических наблюдений // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 31.
9. Коковкин И.В. О возможности удаленного мониторинга работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 46.

10. Кречетов Д.В. Мониторинг состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по изменениям её собственных частот по данным сейсмической станции «Черёмушки» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 50.
11. 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.
12. Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Кашубина Т.В., Галёва Н.А. Особенности сейсмического строения верхней коры Селенгино-Становой и Амурской складчатых областей по данным разнополяризованных Р- и S-волн (в створе опорного профиля 8-ДВ) // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – С. 289-297.
13. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Чечельницкий В.В., Сальников А.С., Галёва Н.А. К обоснованию высоких скоростей Р- и S-волн в верхней мантии Забайкалья // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (Новосибирск, 6-10 сент. 2021 г.) – Обнинск, 2021. – С. 92.
14. Лисейкин А.В., Селезнев В.С. Мониторинг собственных частот крупных плотин ГЭС // Доклад на Евразийском форуме по инженерной сейсмологии, геотехнике и динамике сооружений SEISMO-SIBGEOTEC-2021. 30 ноября – 2 декабря 2021 г. <https://www.youtube.com/watch?v=-7sEo7I0wFM>
15. Seleznov V.S., Liseikin A.V., Bryksin A.A., Gromyko P.V. Monitoring the physical condition of buildings, structures and operating equipment by seismic methods to reduce the risk of sudden collapse // India - Russia Scientific Webinar on Disaster Management Technologies 1 – 2 December 2021. <https://www.youtube.com/watch?v=aXkHgd0oel0>