

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  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2021 г.

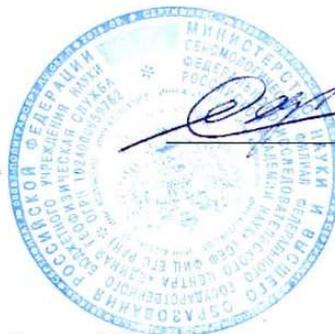
ОТЧЕТ

о результатах исследований

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

за 2020 год

Ответственный исполнитель,  
директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН,  
д-р геол.-мин. наук

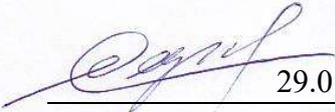


В.С. Селезнев

Новосибирск 2021

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы,  
Директор  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН,  
д-р геол.-мин. наук



29.01.2021  
подпись, дата

В.С. Селезнев  
(введение, разделы 1-3, заключение)

### Исполнители:

Зам. директора  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН



29.01.2021  
подпись, дата

С.М. Бабушкин  
(разделы 1.5, 3.2, 3.6)

Зам. директора  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН



29.01.2021  
подпись, дата

А.А. Брыксин  
(нормоконтроль, разделы 1.6, 2.1, 3.5)

Вед. науч. сотр., зав.  
лабораторией  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН,  
канд. геол.-мин. наук



29.01.2021  
подпись, дата

А.В. Лисейкин  
(реферат, введение, разделы 1.2, 1.4, 2.2, 3.4, 3.5, заключение)

Науч. сотрудник  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН



29.01.2021  
подпись, дата

П.В. Громыко  
(разделы 1.1, 1.3, 3.2)

Науч. сотрудник  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН



29.01.2021  
подпись, дата

Д.В. Кречетов  
(раздел 3.3)

Мл. науч. сотрудник  
СЕФ ФИЦ ЕГС РАН



29.01.2021  
подпись, дата

А.А. Морозова  
(раздел 3.2)

## РЕФЕРАТ

Отчет содержит 169 с., 163 рис., 21 табл., 17 источн., 1 прил.

Ключевые слова: СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МОНИТОРИНГ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ СТАНЦИЯ, ЭЛЕКТРОРАЗВЕДОЧНАЯ СТАНЦИЯ, СЕЙСМИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫЕ СИГНАЛЫ, ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ, ПРОМЫШЛЕННЫЕ ШУМЫ ГОРОДОВ, СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В ЗДАНИЯХ И СООРУЖЕНИЯХ, СТРОЕНИЕ НЕДР ЗЕМЛИ.

В отчете приведены результаты исследований Сейсмологического филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН) за 2020 год в соответствии с плановым заданием на проведение работ с помощью элемента уникальной научной установки ФИЦ ЕГС РАН (Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира) – Комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов (далее – КОМЭСК МС, Комплекс).

Комплекс 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.

Новизна исследований состоит в разработке и внедрении методик и технологий, позволяющих исследовать опасные процессы, возникающие при техногенном воздействии на геологическую среду, изучать строение недр Земли, контролировать работу крупных промышленных предприятий, выполнять мониторинг технического состояния зданий и сооружений.

Область применения результатов – системы сейсмического и электромагнитного мониторинга недр Земли; здания и сооружения, расположенные в сейсмически опасных районах Российской Федерации; гидроэлектростанции, атомные электростанции и другие крупные промышленные объекты; изучение строения недр Земли.

Коды ГРНТИ: 37.31 "Физика Земли". Технологическая платформа: "Технологии экологического развития". Научные задачи, решаемые с задействованием возможностей ЦКП: "9. Разработка технологий интегральной оценки экологической безопасности регионов и городов России".

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
<b>ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>1 РЕГИСТРИРУЮЩАЯ ЧАСТЬ ЭЛЕМЕНТА УНУ ФИЦ ЕГС РАН – КОМПЛЕКСА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ.....</b>	<b>7</b>
1.1 ГЭС .....	7
1.2 Здания и сооружения.....	12
1.3 Промышленные шумы городов .....	16
1.4 Изучение строения недр по сейсмическим данным.....	17
1.5 Изучение строения недр по электроразведочным данным и мониторинг вариаций электромагнитных полей.....	21
1.6 Мобильный аппаратно-программный комплекс регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных.....	30
<b>2 ОБРАБАТЫВАЮЩАЯ ЧАСТЬ УНУ .....</b>	<b>35</b>
2.1 Аппаратный комплекс ЦОД .....	35
2.2 Программно-алгоритмическая часть .....	37
<b>3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ В 2020 Г .....</b>	<b>42</b>
3.1 Разработка концепции системы мониторинга сейсмических шумов в городах и крупных промышленных объектах.....	42
3.2 Создание и развитие сейсмической антенны на полигоне «Ключи» для решения инженерно-сейсмологических задач.....	71
3.2.1 Работы с целью оптимизации параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных .....	71
3.2.2 Работы по изучению поверхностных условий в районе установки сейсмической антенны сейсмическими методами.....	82
3.2.3 Работы по изучению поверхностных условий в районе установки сейсмической антенны электромагнитными методами.....	91
3.3 Мониторинг собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС .....	97
3.4 Сейсмологические наблюдения во время оползня на отвале Колыванского месторождения антрацита .....	105
3.5 Изучение глубинного строения Земной коры по данным речной сейсморазведки .....	111
3.6 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской горной области	124
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>163</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>166</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 году .....</b>	<b>168</b>

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете о НИР 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                                   |
| 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:

- |           |   |   |
|-----------|---|---|
| УНУ       | – | уникальная научная установка  |
| ЦОД       | – | центр обработки данных  |
| КОМЭСК МС | – | комплекс мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов |
| ГЭС       | – | гидроэлектростанция   |
| ГА        | – | гидроагрегат  |
| НИР       | – | научно-исследовательская работа   |
| УВБ       | – | уровень верхнего бьефа (уровень наполнения водохранилища)                     |
| УНБ       | – | уровень нижнего бьефа   |
| СШ ГЭС    | – | Саяно-Шушенская гидроэлектростанция   |
| ЧГЭС      | – | Чиркейская гидроэлектростанция  |

## 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 2020 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 разра-

ботками 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 2020 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 2020 г.

В **приложении 1** к отчету приводится список публикаций сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 году и сведения о показателях, характеризующих качество работы.

# **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.



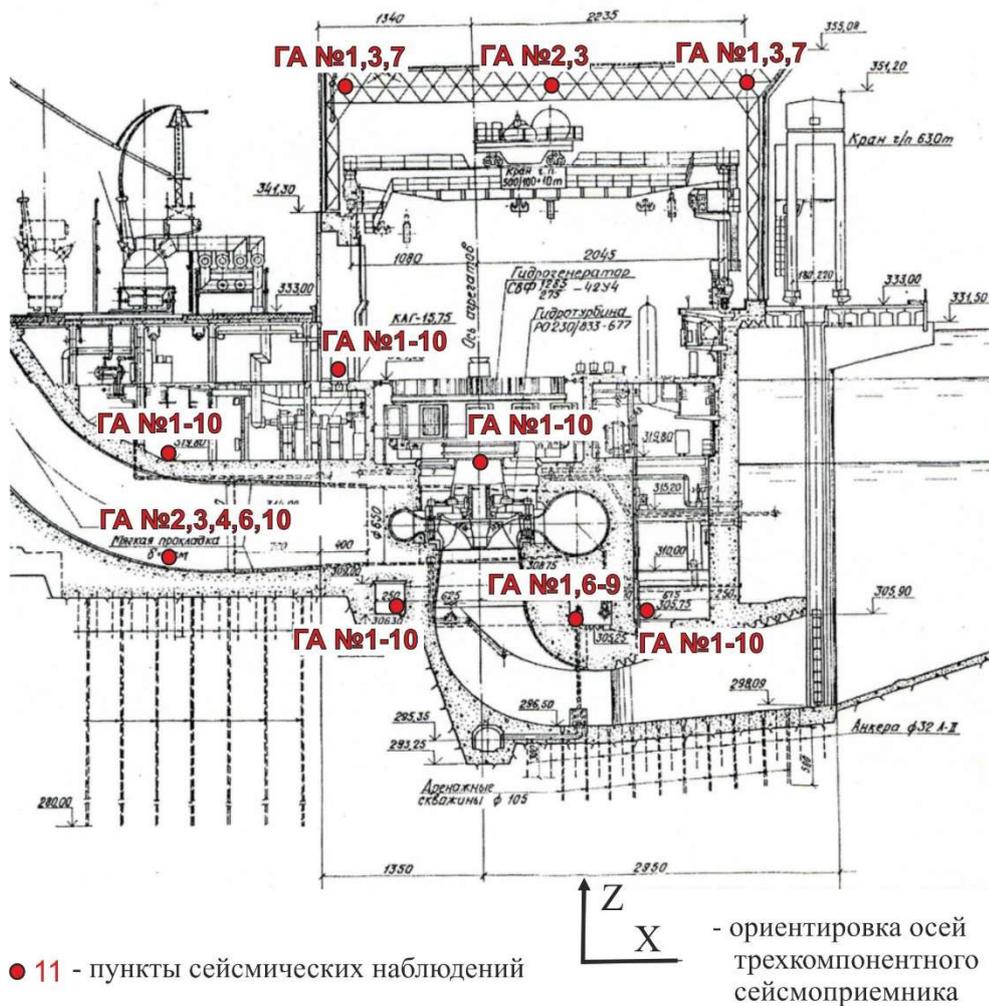


Рисунок 1.2 – Схема сейсмических наблюдений в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС возле каждого из гидроагрегатов



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-5Т и датчики-велосиметры GS-20DX, GS-ONE.

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

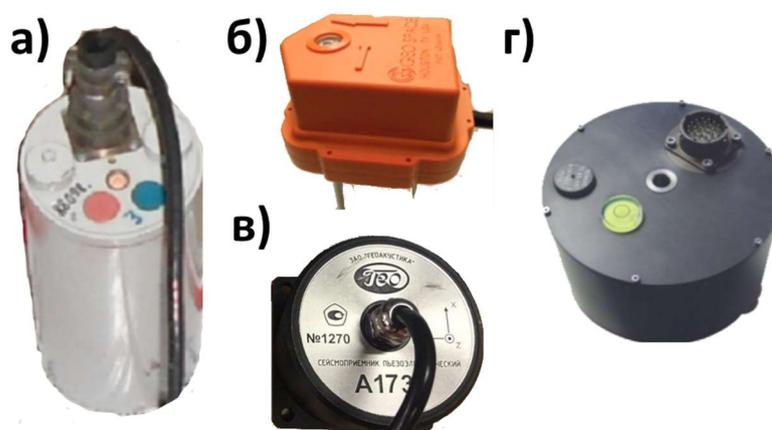


Рисунок 1.4 – Регистрирующая аппаратура: а) сейсмический регистратор Байкал-АСН; б) акселерометр А1738; в) велосиметр GS-20DX; г) акселерометр CMG-5Т

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

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

Таблица 1.2 - Краткие технические характеристики датчиков–акселерометров.

	Техническая характеристика сейсмодатчика	A1738	CMG-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 $\pm 1$ 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	$\pm 10$ $\pm 4$ $\pm 10$	$\pm 10$
6	Максимальное измеряемое гармоническое ускорение (эффективное значение), мсек <sup>-2</sup>	5	19.6
7	Интегральный шум в диапазоне частот от 0.2 до 400 Гц, не более, мсек <sup>-2</sup>	$2 \cdot 10^{-5}$	-
8	Максимальный уровень выходного сигнала, В	$\pm 5$	$\pm 20$
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 <sup>2</sup>	19,8 $\pm$ 10%	78,7 $\pm$ 3,5%
	Сопротивление, катушка    шунт,	283 $\pm$ 5%    1к	1800 $\pm$ 3,5%    20к
	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 <sup>-7</sup>
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 рисанках 1.6-1.9 показаны примеры установки сейсмических регистраторов и схемы сейсмических наблюдений, реализованные на практике.

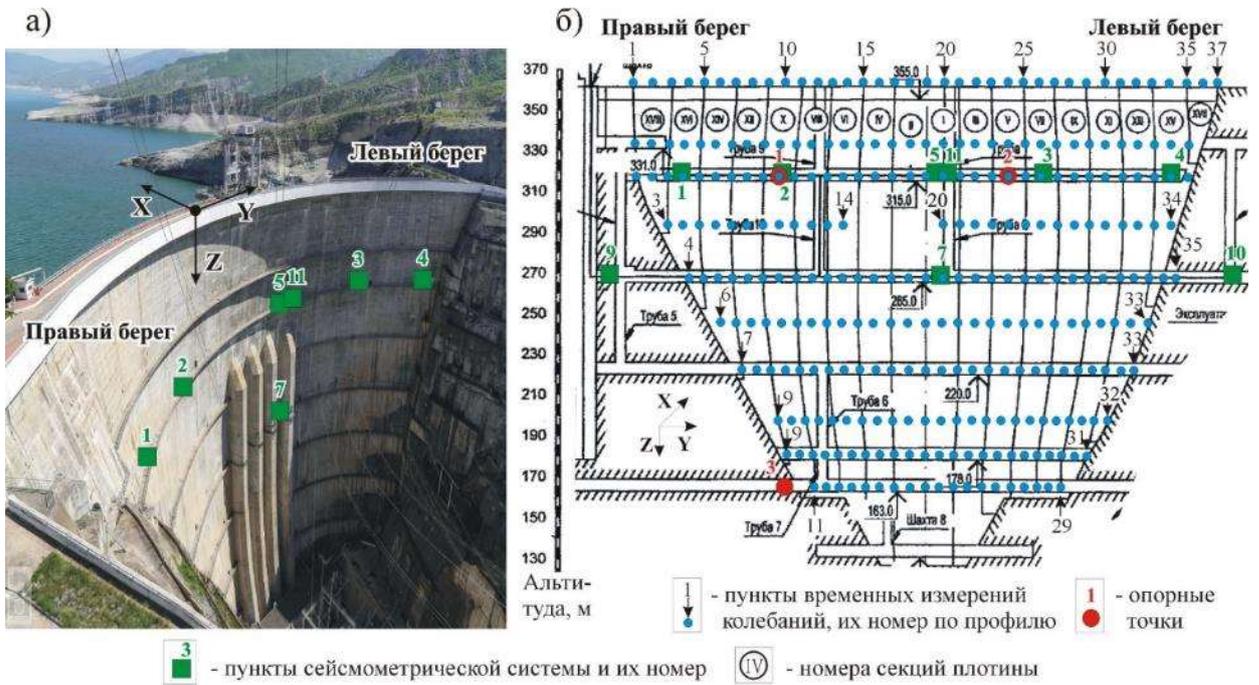


Рисунок 1.6 – Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС с пунктами постоянной сейсмической системы (а) и схема временно реализованных сейсмических наблюдений с регистраторами «Байкал-АСН» (б)



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

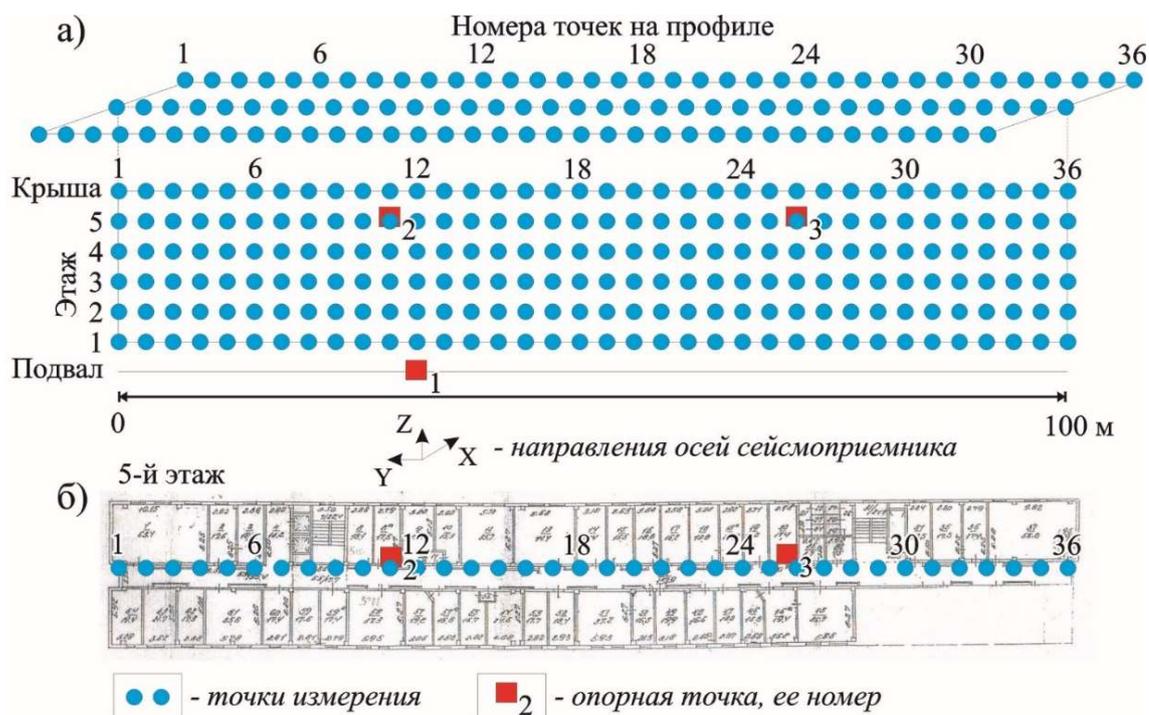


Рисунок 1.8 – Схема наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний жилого здания. (а) – общая; (б) – по профилю на 5-м этаже

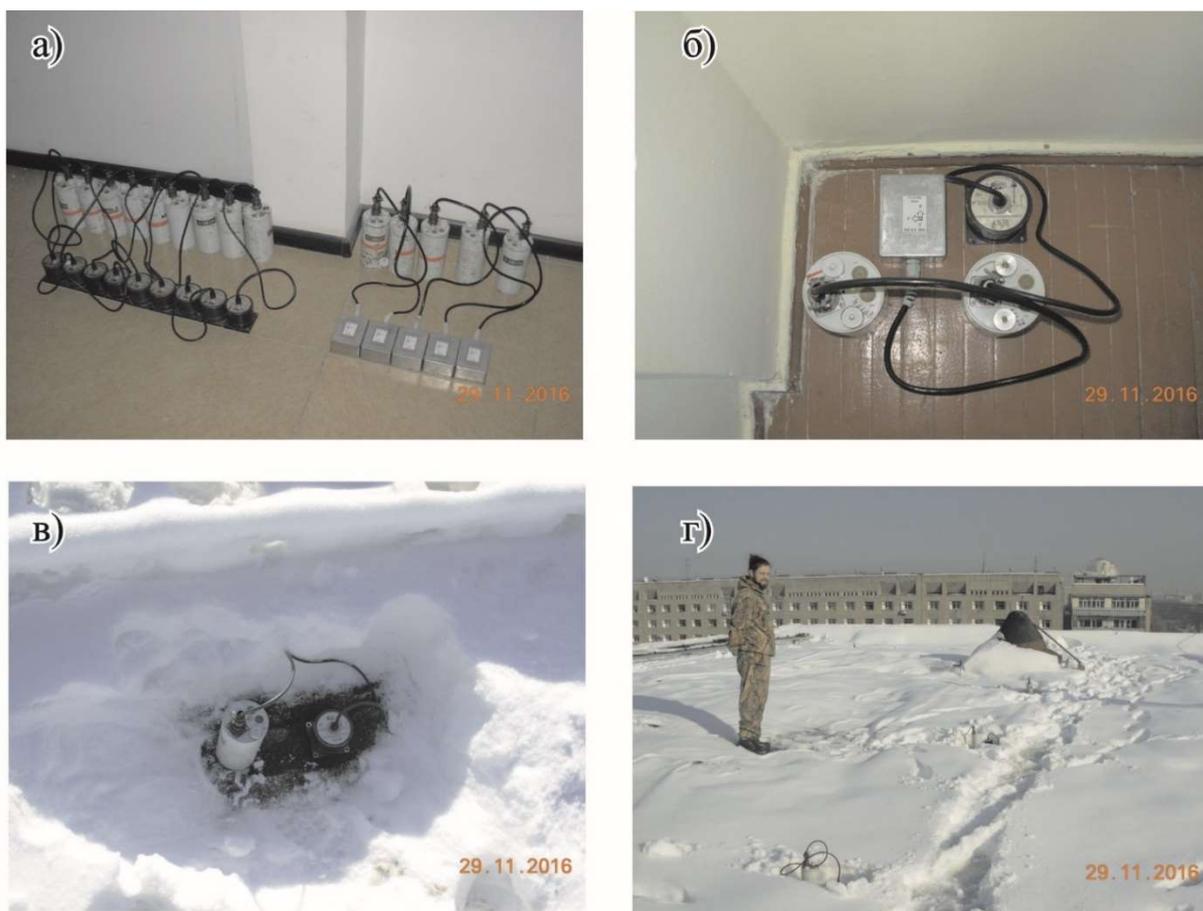


Рисунок 1.9 – Фотографии процесса проведения измерений на здании при помощи регистраторов «Байкал-АСН», датчиков-акселерометров А1638 и велосиметров GD-10: (а) – тест на идентичность; (б) – установка аппаратуры в опорной точке № 3; (в, г) – проведение измерений на крыше здания

### 1.3 Промышленные шумы городов

В 2020 г. силами СЕФ ФИЦ ЕГС РАН было установлено пять стационарных сейсмических станций (рисунок 1.10, таблица 1.5).

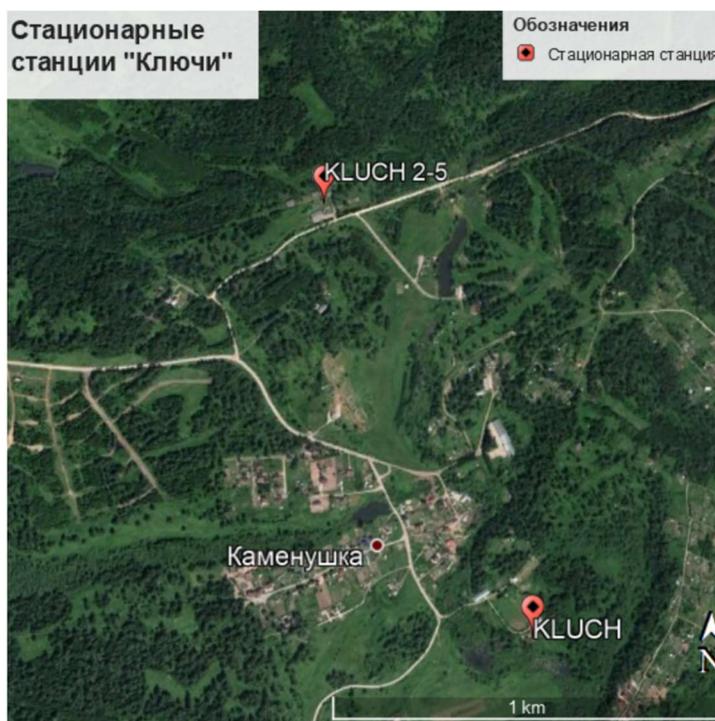


Рисунок 1.10 – Расположение стационарных сейсмостанций на полигоне «Ключи»

Таблица 1.5 – Сведения о стационарных сейсмических станциях СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 г.

№	Сейсмическая станция			Дата от-крытия	Координаты и высота над уровнем моря			Тип оборудования
	Название	Код			Широта N	Долгота E	h, м	
		между-народный	регио-нальный					
1	Ключи 1	KLCH	KLCH	10.2020	54,8396	83,2373	155	CD-4.5, Байкал-7
2	Ключи 2	KLCH2	KLCH2	10.2020	54.8506	83.2268	183	СМЗ-КВ, Байкал-7
3	Ключи 3	KLCH3	KLCH3	10.2020	54.8506	83.2269	183	СМЗ-КВ, Байкал-7
4	Ключи 4	KLCH4	KLCH4	10.2020	54.8507	83.2270	183	СМЗ-КВ, Байкал-7
5	Ключи 5	KLCH5	KLCH5	10.2020	54.8504	83.2273	181	СМЗ-КВ, Байкал-7

Сейсмическое оборудование станции состоит из регистратора сейсмически сигналов и велосиметра. Для электроснабжения оборудования использовано подключение USB-порта с питанием от электрической сети, в качестве резервного питания (в случае отключения электричества в сети) используются элементы питания, установленные в регистратор. Станция «Ключи 1», оборудована микрокомпьютером для хранения, сбора и передачи сейсмических данных, а также предоставления возможности удаленного контроля оборудова-

ния сейсмостанции. Сбор данных со станций «Ключи 2,3,4,5» 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 «Spectrum», разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН.

Места установки сейсмостанций выбраны согласно результатам опытных работ по резонансному приему техногенных сигналов и исследованиям, направленных на оптимизацию параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных (раздел 3.2).

#### **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 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») или внутренней («Байкал-7») антенны. Регистраторы имеют встроенные функции самодиагностики, устроенные таким образом, чтобы исключить получение некондиционных или бракованных записей (т.е. если прибор

не проходит тесты самодиагностики, то он не включается на запись и выдает ошибку на световом индикаторе).

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



Рисунок 1.11 – Автономные трехканальные регистраторы «Байкал-7»

а)



б)



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

а)



б)

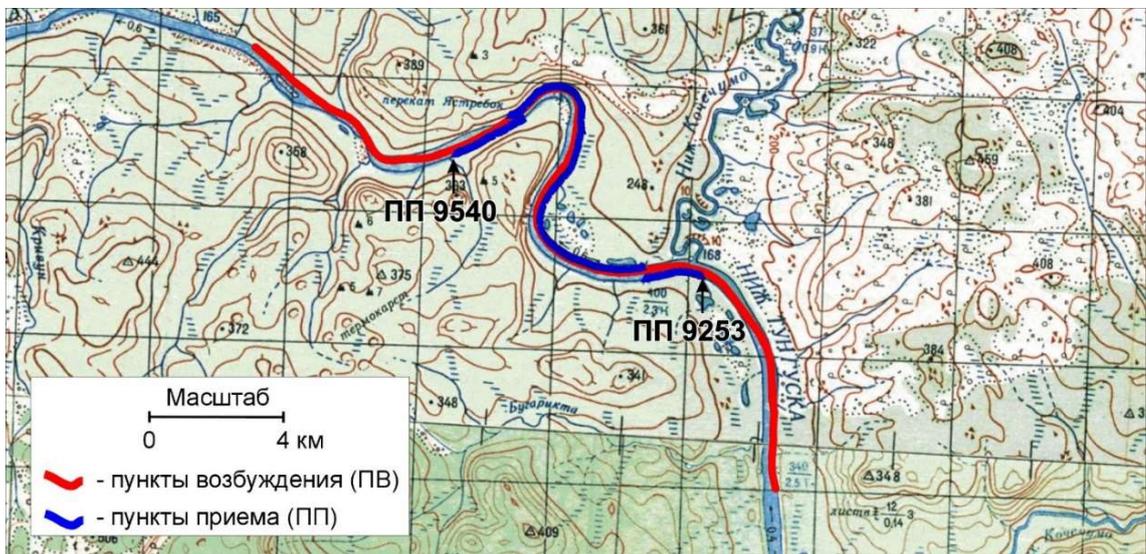


Рисунок 1.13 – Установка сейсмической аппаратуры «Байкал-АСН» с сейсмическими ко-сами и сейсмоприемниками GS-20DX для проведения теста на идентичность (а) и схема опытных работ (б) при речных сейсморазведочных исследованиях (р. Нижняя Тунгуска, 2012 г)

## **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 <sup>-7</sup>
Точность привязки времени Встроенный GPS	мкс	± 1
Объём энергонезависимой памяти.	Гб.	До 32 (флэш-карта)
Времена регистрации	с	0.00001÷64
Синхронизация работы приёмников-регистраторов		GPS-контроллеры
Точность синхронизации	мкс	1
Интерфейсы		Ethernet RS-232
файловая система		FAT-32
Потребляемая мощность	Вт	< 2.5
Диапазон рабочих температур	°С	-30 ÷ +60
Масса	кг	2.0
Пылевлагоустойчивость		IP 67



Рисунок 1.14 – Измерительные модули «Байкал МЭРС-Т»

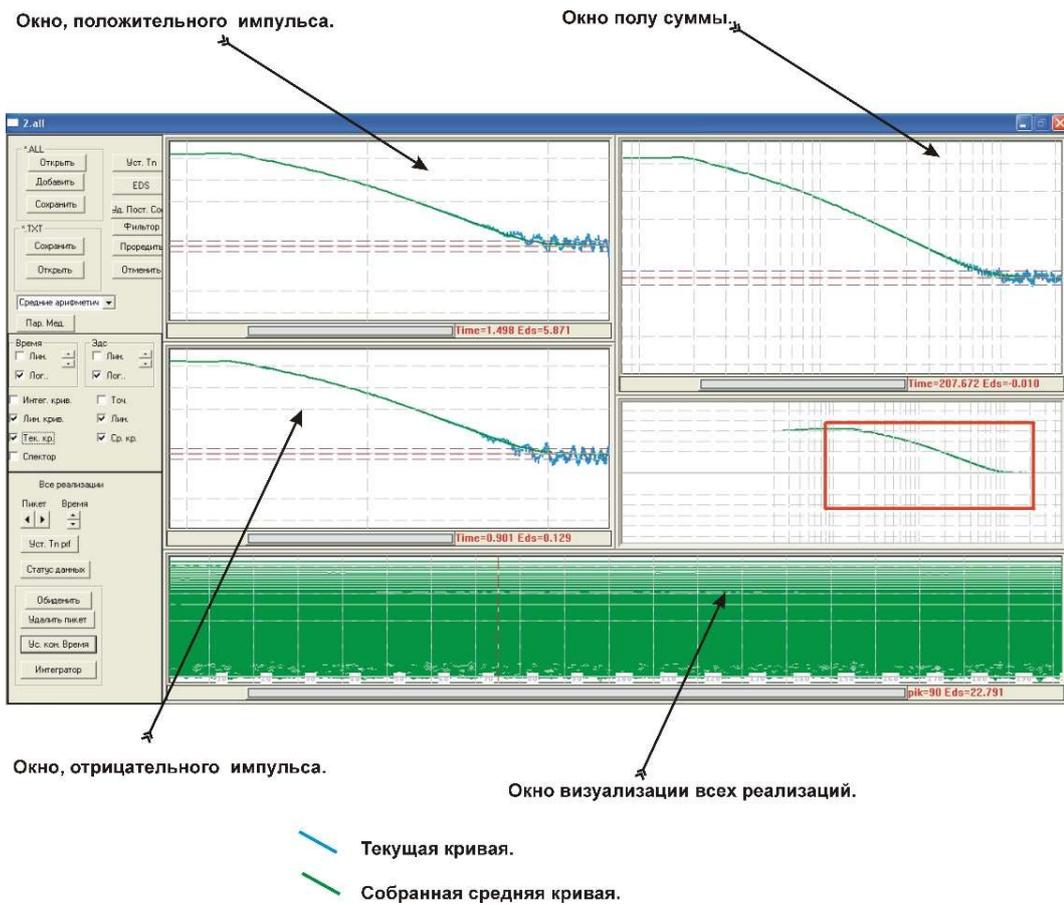


Рисунок 1.15 – Рабочее окно оператора, измеритель «Байкал МЭРС-Т»

## Генератор токовых импульсов (ГТИ 200)

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

Источниками напряжения на входе генератора являются:

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

В генераторе токовых импульсов реализована цифровая запись формы токовых импульсов.

Основные технические характеристики приведены в таблице 1.7.

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

Параметр	Значение
Входное рабочее напряжение: по переменному току по постоянному току	до 380 В 12 – 600 В
Максимальный рабочий ток	200 А
Максимальная мощность	До 100 кВт
Падение напряжения на коммутаторе не больше	6 В
Точность измерения рабочего напряжения	1%
Точность измерения рабочего тока	0.5% (0,1 А)
Форма тока в генераторном контуре	П – образный импульс
Нестабильность формы рабочего выходного тока при питании переменным 3 фазным напряжением	15 %
Длительность рабочего импульса тока (прямого или инверсного)	0,005 – 16 секунд
Суммарная длительность рабочего импульса тока и паузы	0,01 – 32 секунды
Полный цикл двух разнополярных рабочих импульсов и двух пауз	0,02 – 64 секунды
Длительность фронта выключения на активную нагрузку не больше	200 нс.
Точность привязки времени (встроенный GPS )	0,5мкс
Цифровая регистрация формы токовых импульсов	Частота дискретизации 20 кГц
Независимое напряжение питание устройства управления	12 вольт (аккумулятор)
Условная глубинность исследований: с локальной ПГ- конструкцией с закреплённым источником	до 1500 метров до 4000 метров
Формат записи параметров	внутренний
Внешний интерфейс	СОМ порт РС

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



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

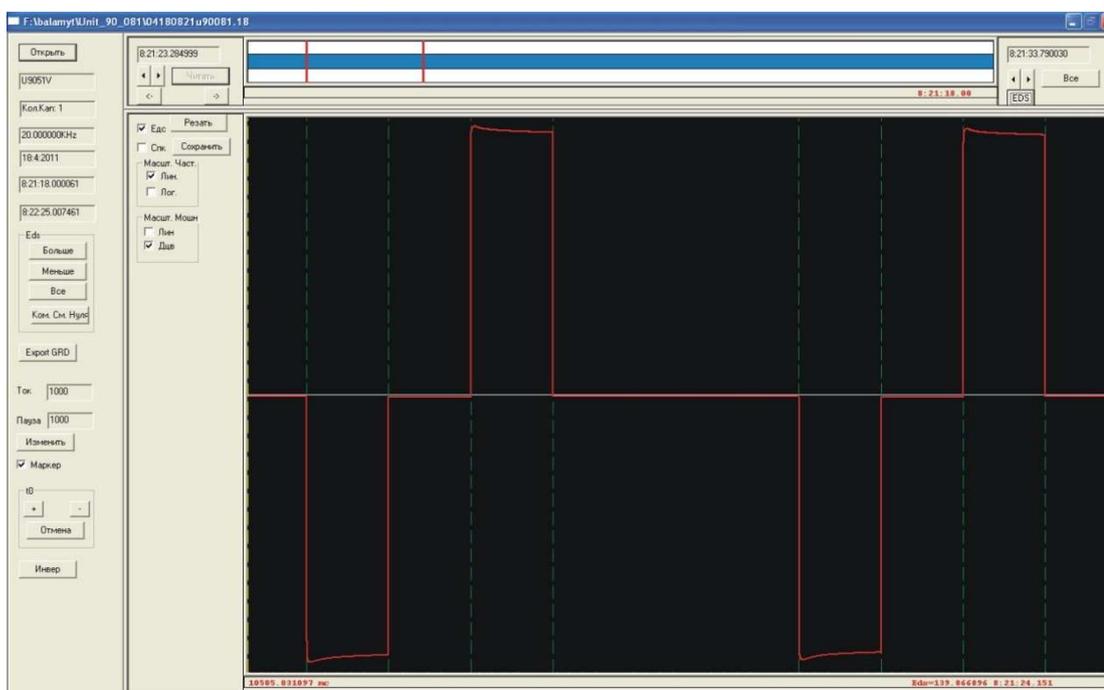


Рисунок 1.17 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись формы токовых импульсов

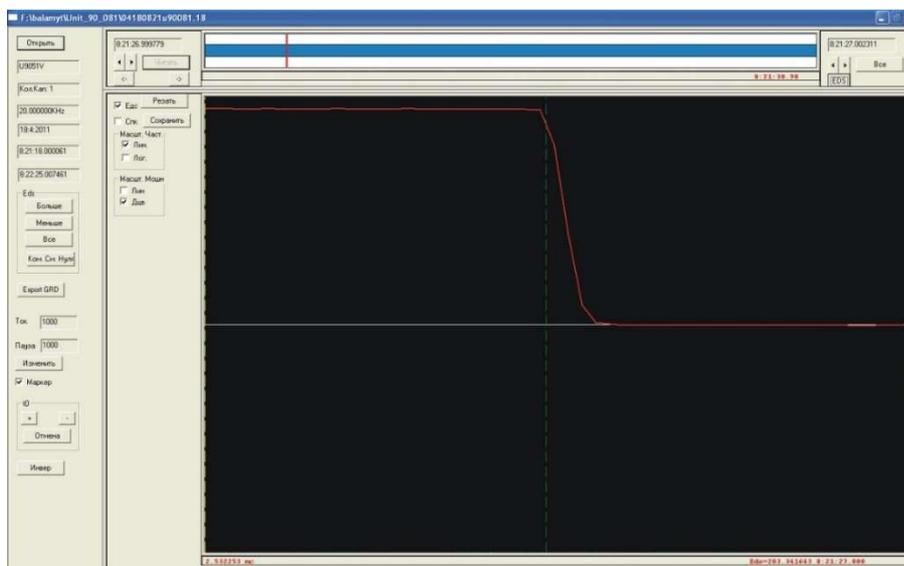


Рисунок 1.18 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись фронта выключения токового импульса

### Многовитковая приемная рамка

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

Переносной датчик ЭМ-поля выполнен в виде круга на жестком каркасе площадью 1,28 м<sup>2</sup>, число витков -96, индуктивность 0,71 мГн. Коэффициенты усиления:  $K_f = 1, 10, 100$ . Выход дифференциальный. Эквивалент квадратной одновитковой рамки со стороной равной от  $\min 11,085$  м до  $\max 156,767$  м.

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



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

Таблица 1.8 – Характеристики многовитковой приемной рамки.

Параметр	Значение
Диаметр	1.277 м
Площадь (S)	1.28 м <sup>2</sup>
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 (ПЛИМ) 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.

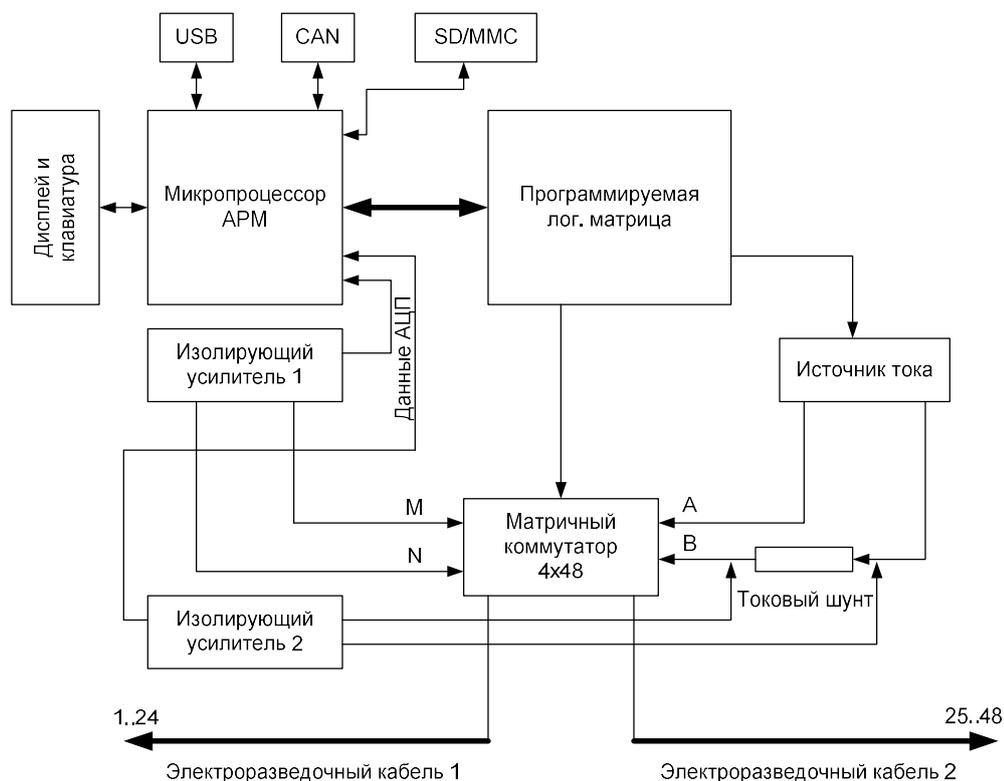


Рисунок 1.21 – Структурная схема аппаратуры «Скала-48»

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  $\pm 0.1$  мВ до  $\pm 250$  В

Ослабление помех промышленной частоты 50,60 ГЦ – 65 дБ

Точность измерения напряжения – 1 %

Разрядность АЦП – 24 бита

Защита от перенапряжения до – 1 кВ

#### **Внутренний генератор**

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

Выходной ток – 1 ÷ 2000 мА

Мощность максимальная – 200 Вт

Точность измерения тока – 1 %

Максимальное напряжение – 500 В

Защита от короткого замыкания – есть

#### **Технические средства**

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

Таблица 1.9 – Аппаратура и оборудование.

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

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

В течение 2020 г Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН завершил разработку 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.

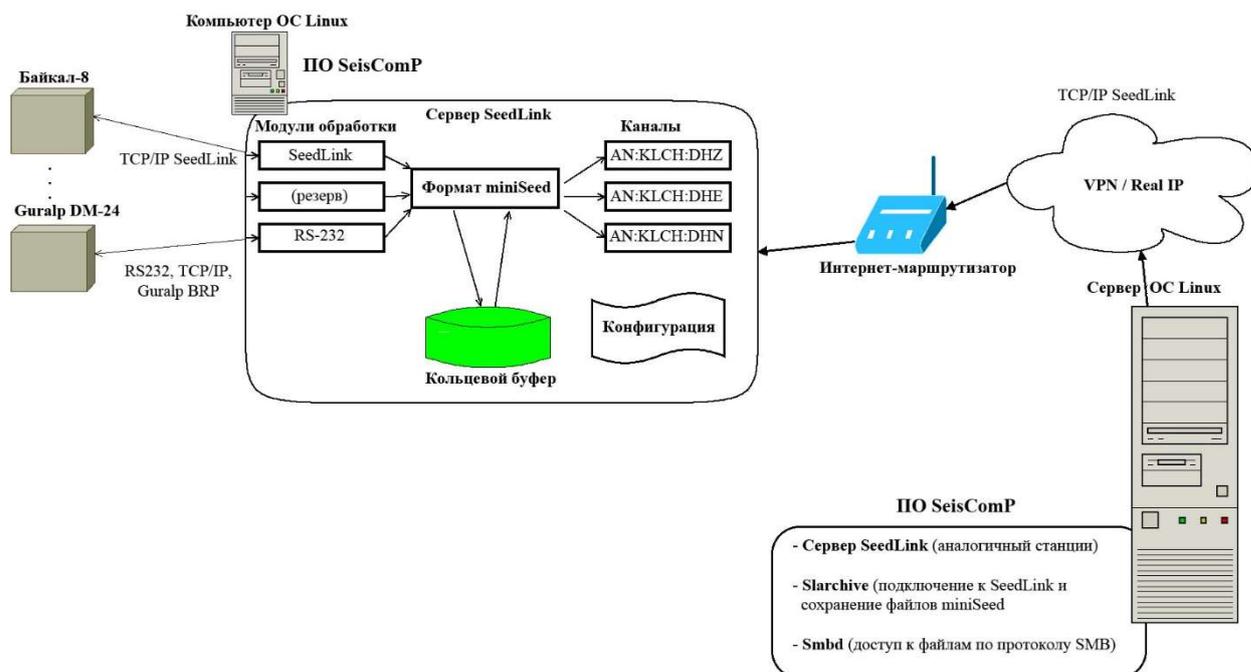


Рисунок 1.22 – Архитектура разработанного Комплекса

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 SeisCombian, 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

Внесены модификации в аппаратную часть микрокомпьютера: улучшен разъем питания и интегрирована кнопка быстрой перезагрузки.

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

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

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



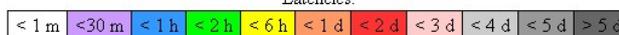
Рисунок 1.24 – Доступ к архиву данных (ОС Windows 10, OpenVPN)

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

"СЕФ ФИЦ ЕГС РАН" - Station KLCH  
 Kluchi, Kamenushka, Novosibirsk Region, Russia

Station/ Channel	Data		Feed		Diff.
	Last Sample	Latency	Last Received	Latency	
KLCH 00.LOG	2021-01-26 13:0	2.3 m	2021-01-26 13:05:19.58	2.3 m	0.6 s
KLCH 0A.DHE	2021-01-26 13:07:36.96	1.2 s	2021-01-26 13:07:38.14	0.0 s	1.2 s
KLCH 0A.DHN	2021-01-26 13:07:36.80	1.3 s	2021-01-26 13:07:37.59	0.5 s	0.8 s
KLCH 0A.DHZ	2021-01-26 13:07:36.57	1.6 s	2021-01-26 13:07:37.59	0.5 s	1.0 s

Latencies:



How to [interpret](#) these numbers?

Рисунок 1.25 – Монитор слежения доступности Комплекса

Первая из работающих сейсмостанций, реализованная на базе Комплекса, установлена в стационарном режиме (объект СЕФ ФИЦ ЕГС РАН) на устье 10-метровой скважины в районе п. Каменушка Новосибирской области (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26 – Снимок со спутника, красная фигура обозначает примерное расположение сейсмического датчика

Характеристики сеймостанции (Комплекса):

- сеть/название сеймостанции: AN/KLCH
- географические координаты установки датчика: 54.8396 СШ 83.2373 ВД;
- тип датчика: GD-4.5;
- регистратор: Байкал 8;
- частота дискретизации: 500 Гц;
- установлен микрокомпьютер: Raspberry Pi, ОС Seismobian;
- передача данных: 4G МТС.

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.

Задача расширения УНУ ФИЦ ЕГС РАН по-прежнему остается актуальной. В перспективе на 2021 год у Сейсмологического филиала есть хороший задел, позволяющий ввести в строй еще две станции, построенные на базе созданного Комплекса.

## 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.

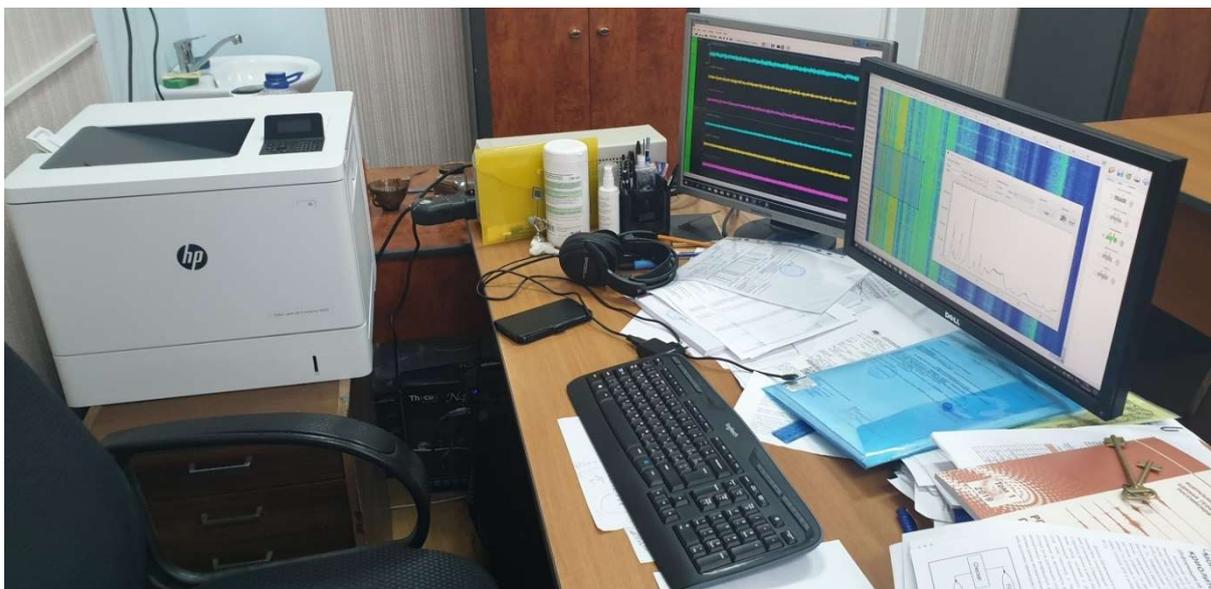


Рисунок 2.2 – Рабочее место специалиста УНУ, анализ и обработка данных

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 «Spectrum»**

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.

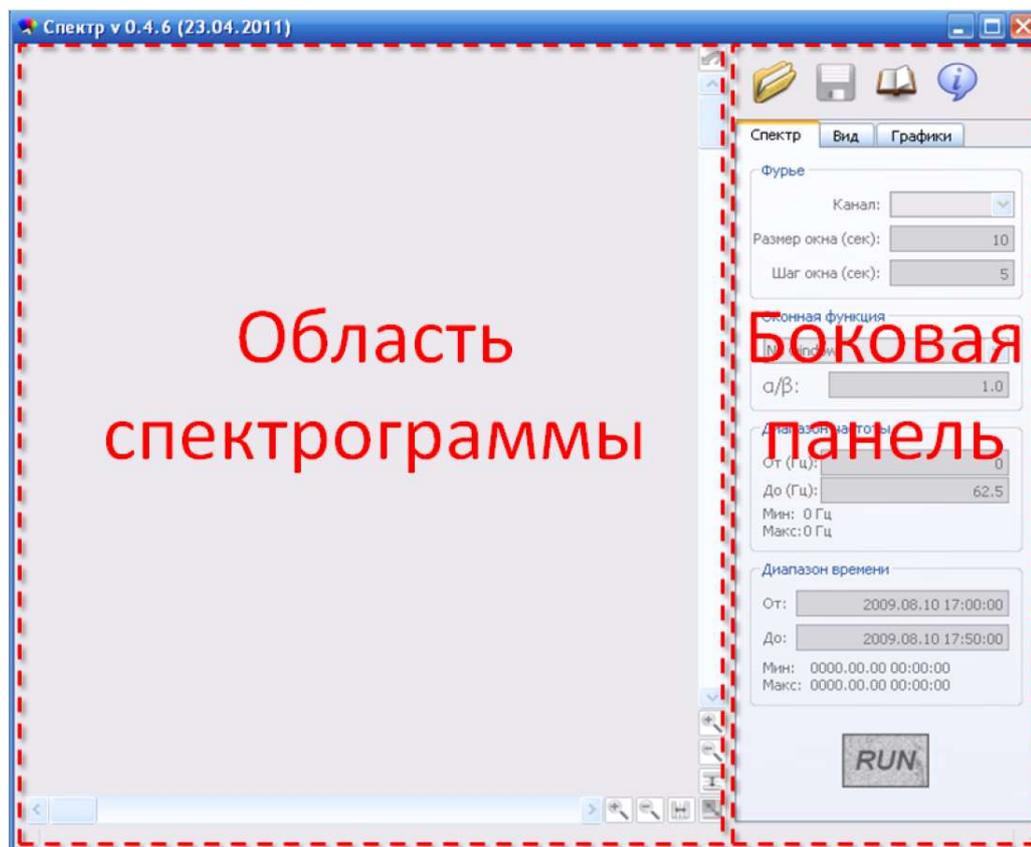


Рисунок 2.5 – Главное окно программы «Spectrum»

### 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, Роса-А, MiniSeed

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

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

Последняя версия программы и дата: 0.4 (25.01.2016)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.6.

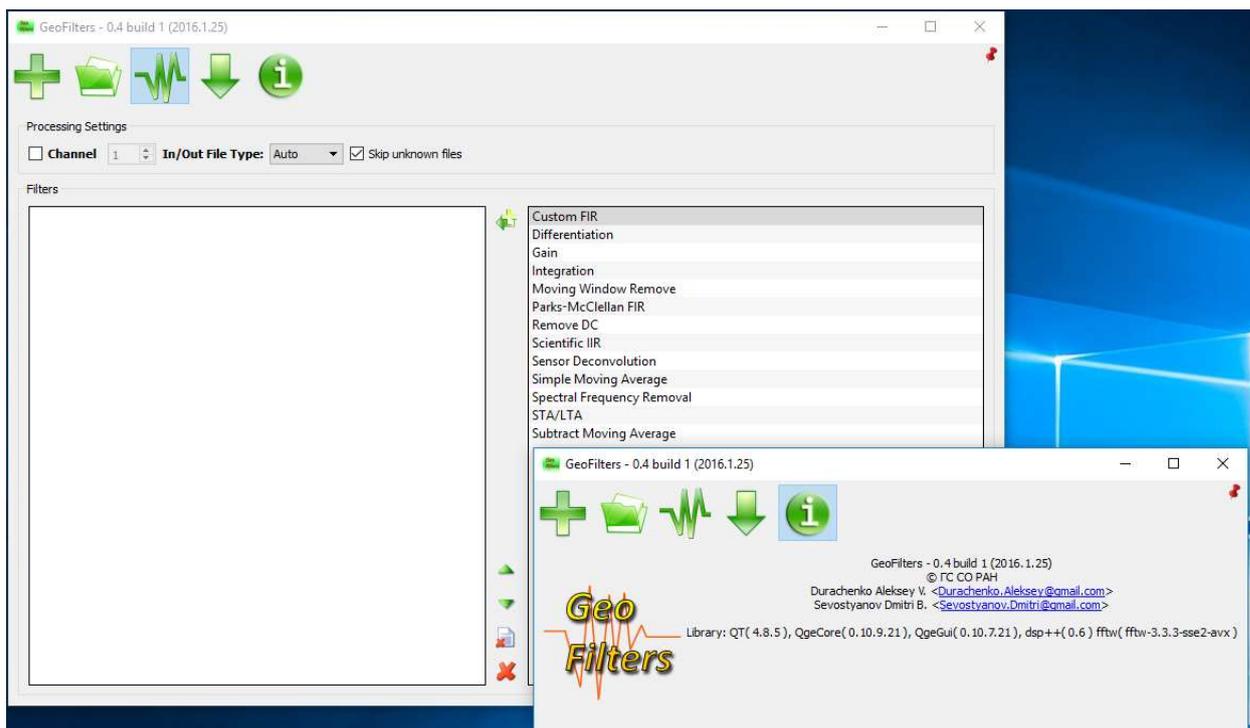


Рисунок 2.6 – Главное окно программы «GeoFilters»

### Программа «SSlicer»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

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

Форматы входных файлов: Байкал-10

Форматы выходных файлов: SEG Y

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

Последняя версия программы и дата: 1.0.1 (03.07.2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.7.

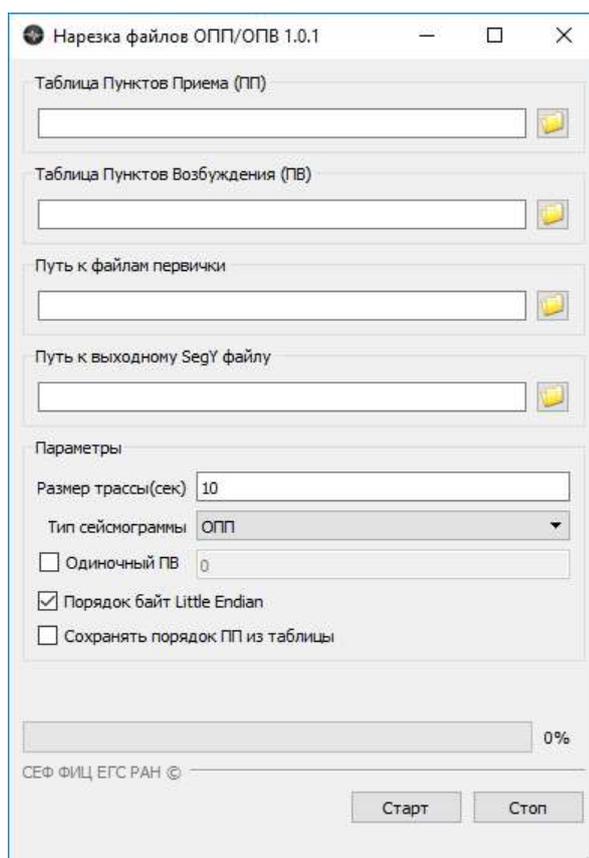


Рисунок 2.7 – Главное окно программы «SSlicer»

### Программа «RadExPro»

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

Разработчик: ООО «Деко–геофизика СК»

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

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

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

Последняя версия программы и дата: 2018.1 (май 2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 2.8.

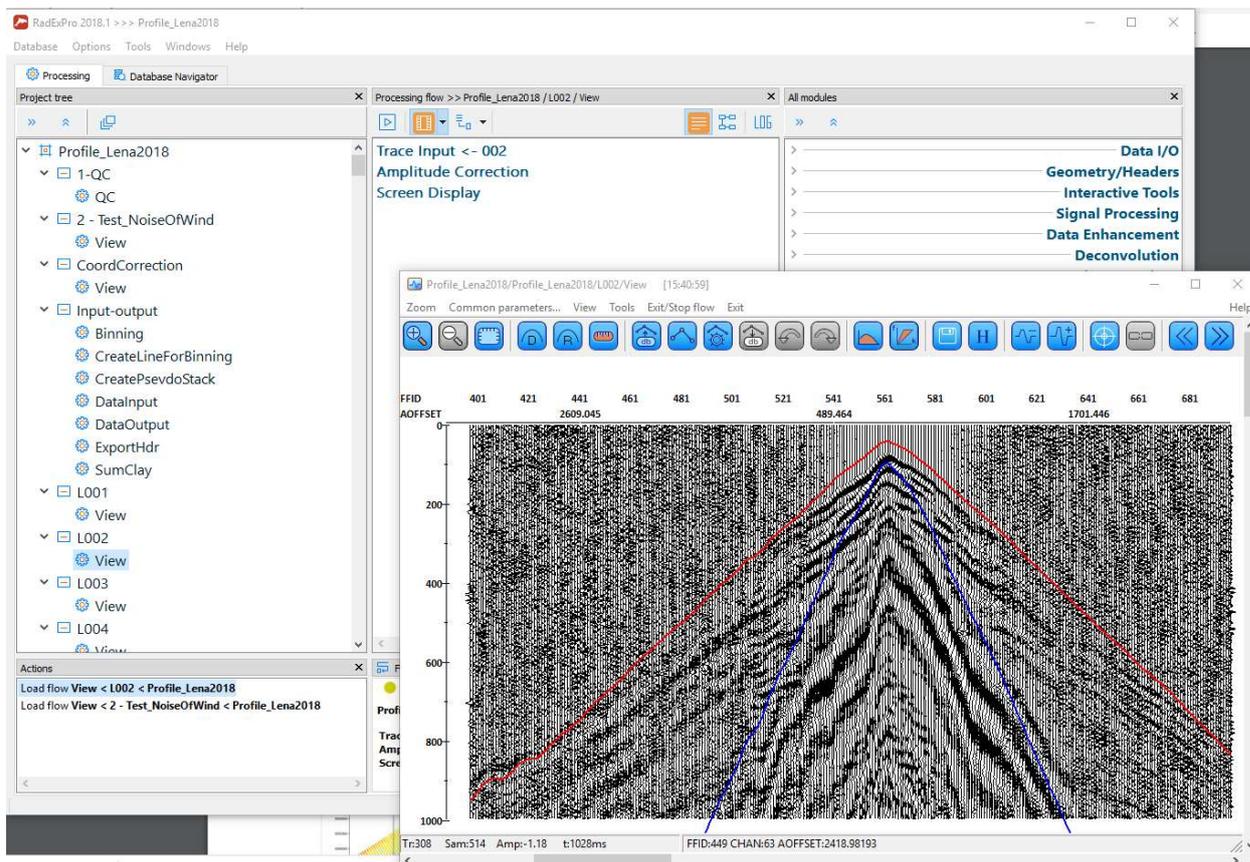


Рисунок 2.8 – Главное окно программы «RadexPro»

### Программы для обработки и интерпретации электромагнитных сигналов

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

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

№№ п/п	Наименование	Кол-во
1	2	3
1.	Программный комплекс “Эра”. (Программно-алгоритмические 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 2020 Г**

### **3.1 Разработка концепции системы мониторинга сейсмических шумов в городах и крупных промышленных объектах**

Влиянию сильных сейсмических воздействий на человека и на различные конструкции посвящено большое количество работ. Основной задачей ФИЦ ЕГС РАН является мониторинг природной и техногенной сейсмичности в России. Только получив данные о распределении землетрясений по времени, силе и местоположению можно составить карты сейсмического районирования, без которых невозможно проводить строительство различных объектов. В последнее время нами замечено, что влияние длительных сейсмических воздействий (небольших по амплитуде) на различные здания, сооружения и работающие механизмы может приводить к катастрофическим последствиям. Ярким примером может служить как авария на СШ ГЭС, так и большое количество внезапно разрушившихся объектов. При строительстве различных сооружений на урбанизированных территориях, необходимо хорошо изучить и знать, какие сейсмические колебания могут воздействовать на данную территорию. Это могут быть не только колебания, приходящие от сильных землетрясений, существенное влияние могут оказывать техногенные сейсмические воздействия (взрывы, сейсмические шумы, излучаемые различными промышленными установками и движущимся транспортом, излучения от высотных зданий и сооружений под воздействием ветра и т.п.). Карты сейсмического микрорайонирования дают лишь малую часть необходимой информации, и поэтому необходимо строить карты, показывающие изменение амплитудных спектров сейсмических шумов, регистрируемых в течение суток. Лишь обладая информацией о том, какие по амплитуде и частоте сейсмические техногенные колебания происходят в данном районе и какие колебания могут происходить, если произойдет землетрясение, можно проводить расчет, конструирование и строительство различных зданий и сооружений. Строительство даже в не сейсмоопасных районах сооружений, обладающих одной из резонансных частот, совпадающей по величине с частотой колебаний, излучаемой в данном месте техногенными объектами, может привести к разрушению данных сооружений и самым тяжелым последствиям для людей.

В Европе усилиями ряда стран осуществляется разработка системы мониторинга техногенных и природных катастроф, интегрированной с сетями сейсмологических станций (проект Global Earthquake Model – GEM – с финансированием 23 млн. евро). Подобную систему оперативного контроля в мониторинговом режиме за безопасной эксплуатацией крупных промышленных объектов, позволяющую выявлять нештатные ситуации по критериям несопоставимости данных, анализировать причины появления нештатных ситуаций,

хранить регистрируемую информацию для детальной расшифровки в случае возникновения аварии («черный ящик»), необходимо создавать и на крупных объектах России.

### **Формулировка задачи**

Опыт, полученный специалистами Геофизической службы СО РАН при расшифровке причин аварии на СШ ГЭС, показал, что созданная в Сибирском отделении сейсмическая диагностика зданий, сооружений, работающего оборудования и среды под воздействием техногенных процессов позволяет с высокой точностью и надежностью отслеживать все производственные процессы, сопровождаемые работой механизмов и регистрировать колебания от них даже на значительных расстояниях. Разработанная институтами СО РАН (Геофизическая служба, Институт лазерной физики) методика и аппаратно-программное обеспечение для диагностики физического состояния зданий и сооружений, не имеют конкурентных аналогов при изучении сооружений особо крупных размеров, какими являются электростанции и плотины ГЭС. Неразрушающая технология обследования обладает большой разрешенностью и детальностью анализа, позволяет определять собственные колебания всех составляющих объекта, и следить за тем, чтобы излучаемые механизмами колебания не совпадали с ними по частоте и не входили в резонансное возбуждение.

Как правило, любой работающий объект можно представить как систему со многими источниками колебаний. На работающей ГЭС можно выделить ряд возбуждений, перечисленных ниже. Механическое возбуждение, обусловленное несбалансированностью ротора турбины. Механическое возбуждение, обусловленное внешними источниками, например, сейсмической активностью окружающей среды. Гидродинамическое возбуждение, обусловленное окружной неравномерностью потока, возникающей вследствие: несимметричности граничных условий в спиральной камере; возмущений потока при обтекании лопастей направляющего аппарата; возмущения потока прецессирующим вихревым жгутом, сбегаящим с турбины; вращающегося отрыва, имеющего место на определенных режимах работы турбины. Гидродинамическое возбуждение, обусловленное неустойчивым характером обтекания лопастей турбины, в результате которого, в частности, возникают нестационарные вихревые следы – типа дорожек Кармана. Гидродинамическое возбуждение, обусловленное гидроупругими колебаниями лопастей турбины в режиме флаттера лопастей турбины. Гидроакустическое возбуждение, обусловленное возникновением акустических волн при взаимодействии турбины с нестационарным потоком сжимаемой жидкости и многократным их отражением от различных препятствий и открытых границ на входе и выходе в проточную часть гидротурбин. Такую колебательную систему, если учесть, что одновре-

менно работают до десяти гидротурбин, можно сравнить с играющим симфоническим оркестром. Человек, слушая оркестр и используя только органы слуха и вращение головы (что равносильно трехкомпонентной регистрации) для регистрации акустических колебаний и мозг для обработки поступающей информации может свободно различать любые инструменты и (при определенном навыке) записать партию каждого инструмента. Таким образом, на практике задачу распознавания (мониторинга) акустических колебаний человек решает легко. Соответственно, и при создании соответствующего программного обеспечения и систем регистрации сейсмических колебаний можно создать систему мониторинга различных объектов и работающего оборудования.

Для реализации в ФИЦ ЕГС РАН системы мониторинга сейсмического шума следует предпринять следующие действия. Прежде всего должна быть система регистрации. Второе – это система передачи и хранения данных. Третье – набор программного обеспечения, позволяющий работать с получаемыми данными. Четвертое – специально обученный коллектив специалистов и пятое – люди, способные получаемую информацию превращать в деньги (бюджетное финансирование (государству такая информация нужна не в меньшей степени, чем сейсмологические данные), гранты и проекты, договора с крупными организациями и администрациями городов.

Последняя самая современная концепция проектов сейсмических сетей базируется на компьютерных сетях. Сегодня возможна передача как данных в виде файлов событий, так и квазинепрерывных сейсмических данных через Интернет. Данные могут получать как специальные пользователи, так и широкий круг других пользователей Интернета, становится возможной работа в открытой архитектуре среды клиент/сервер. В таких системах данные могут обрабатываться и архивироваться в любом авторизованном узле компьютерной сети. Однако пока доступ к данным каждой станции без ограничений вряд ли возможен. В самых ответственных случаях он может приводить к перегрузке каналов связи и тем самым затруднить работу служб, ответственных за своевременное оповещение о сильном землетрясении. Также в сейсмических сетях, базирующихся на компьютерных сетях передачи, данных, станции не могут быть открытыми и независимыми от центров сетей. Остаются проблемы обеспечения работы станции, контроля характеристик ее оборудования, управления параметрами каналов регистрации, а также ремонта и технического обслуживания сейсмического оборудования. Эти задачи выполняются центрами сбора и обработки данных каждой сети. Достижимость точек подключения к компьютерной сети, и обязательная отдаленность сейсмических станций от источников шума часто находятся в противоречии друг с другом. Проблема передачи сейсмических данных к самому близкому узлу компью-

терной сети, вероятно, всегда будут оставаться задачей центра сети. Она может быть эффективно решена использованием на коротком расстоянии специальных проводных линий связи или радиолиний расширенного спектра частот. Эти линии не должны вызывать задержек времени получения данных, которые могут быть минимальными и составлять не более нескольких секунд.

На системе регистрации и на системе передачи и хранения данных останавливаться мы сейчас не будем, они в ФИЦ ЕГС РАН реализуются для систем сейсмологического мониторинга, и, как мы проверили на ряде станций («Новосибирск», «Быстровка», «Харино», «Москва», «Иркутск», «Дубки», «Черемушки» и ряде других), данные со станций могут вполне оперативно поступать в обрабатывающий центр, где бы он ни находился. Остановимся кратко на третьем пункте: какие задачи можно решать уже сегодня, используя имеющееся программное обеспечение. В качестве основной программы при изучении сейсмических шумов в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН используется разработанная сотрудниками программа «Spectrum». Ее детальное описание дается в приложении ниже, мы рассмотрим некоторые данные, полученные с ее использованием. При проведении мониторинга и изучении различных объектов можно выделить несколько типов регистрируемых сигналов.

Прежде всего это высокочастотные монохроматические сигналы, очень стабильные по частоте, имеющие набор кратных сигналов. Именно они всегда хорошо видны на спектрограммах, полученных на любой станции, если сигналы накапливать какое-то время. Это преимущественно сигналы от различных установок, производящих электричество (особенно хорошо они регистрируются вблизи ГЭС, ГЗЭС, ТЭЦ). Примеры таких сигналов мы можем видеть на рисунке 3.1. Изучая эти сигналы, можно очень многое рассказать о работе гидроагрегатов и других производящих электроэнергию установках.

Практически в любой точке регистрируются сигналы от работающих двигателей, это тоже монохроматические сигналы, но не такие стабильные по частоте, менее добротные и часто с небольшим смещением по частоте от величины  $f=K/60$ , где  $K$  – число оборотов двигателя в минуту. Самыми распространёнными являются двигатели с числом оборотов 1000, 1500, 3000. Работая, они вибрируют и излучают колебания на частотах близких к 16.6 Гц, 25 Гц, 50 Гц. Примеры таких сигналов видны на спектрограммах, представленных на рисунке 3.1. Хорошо видно, что работают несколько двигателей в разных режимах. Видны моменты их включения и выключения.

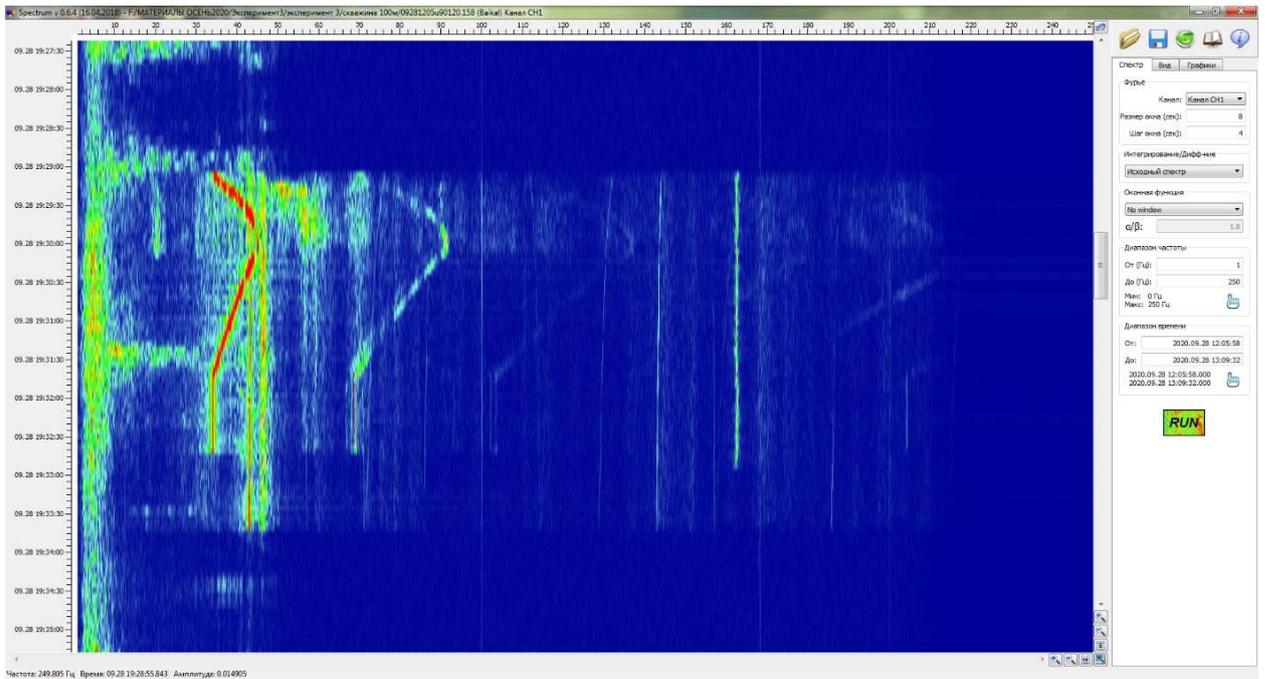


Рисунок 3.1 – Спектрограмма записи сейсмостанции во время включения насосной станции

Следующий вид – собственные колебания со свободными или закрепленными концами в таких объектах как трубы, водоводы, крупные геологические объекты типа грабе-нов, впадин и т.п. (рисунок 3.2).

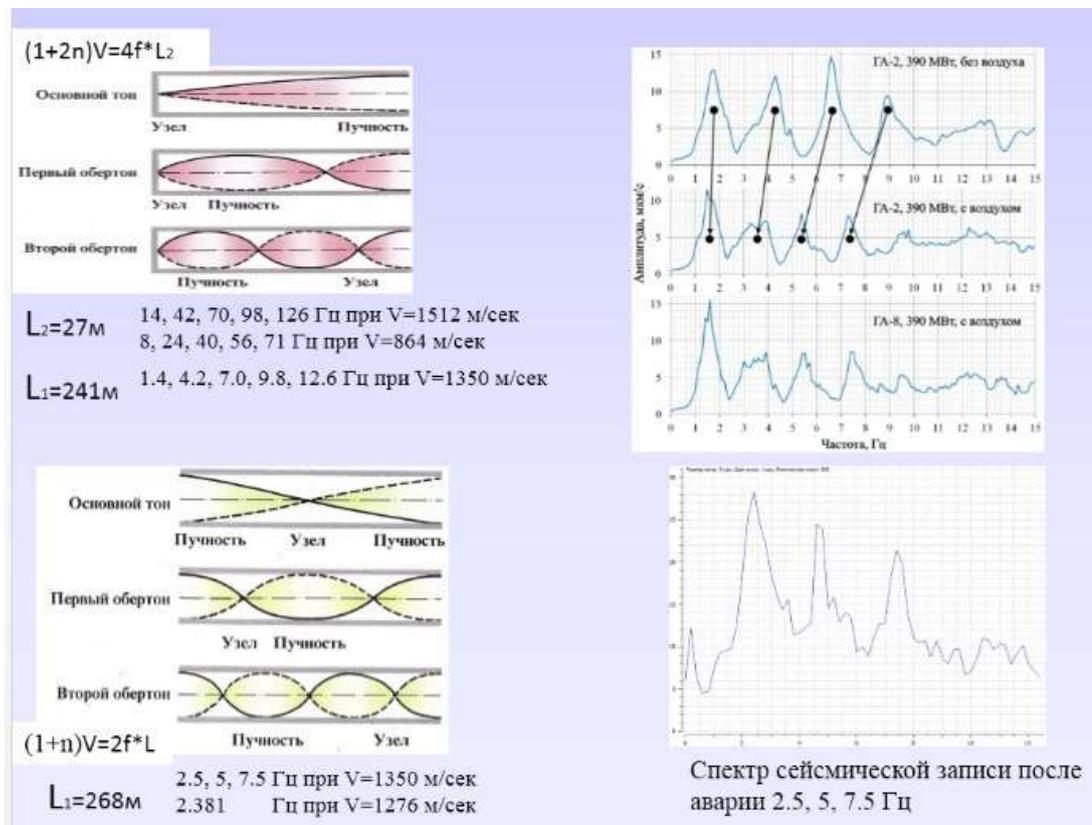


Рисунок 3.2 – Стоячие волны в водоводах Саяно-Шушенской ГЭС

Очень информативными являются стоячие волны в зданиях, сооружениях, слоях земной коры и др. Их изучению в ФИЦ ЕГС РАН посвящено множество работ, патентов. Написано специальное программное обеспечение для обработки этих волн.

С помощью сейсмологических сетей возможно изучение таких экзотических явлений, как падение метеоритов. Как правило, вход метеорного тела в атмосферу сопровождается взрывом большой мощности, сопоставимой с высотным ядерным взрывом. При взрыве формируется воздушная ударная волна, которая, достигая поверхности Земли, генерирует поверхностные волны, распространяющиеся на расстояния в сотни, а иногда и тысячи км [2]. Сейсмические станции регистрируют как звуковые, так и поверхностные волны (рисунок 3.3), интерпретация которых позволяет рассчитать точную траекторию болида и определить, например, область выпадения метеоритов. По амплитудам поверхностных волн, используя разработанные способы определения мощности высотных взрывов [3] можно оценивать энергию взрыва болида [4].

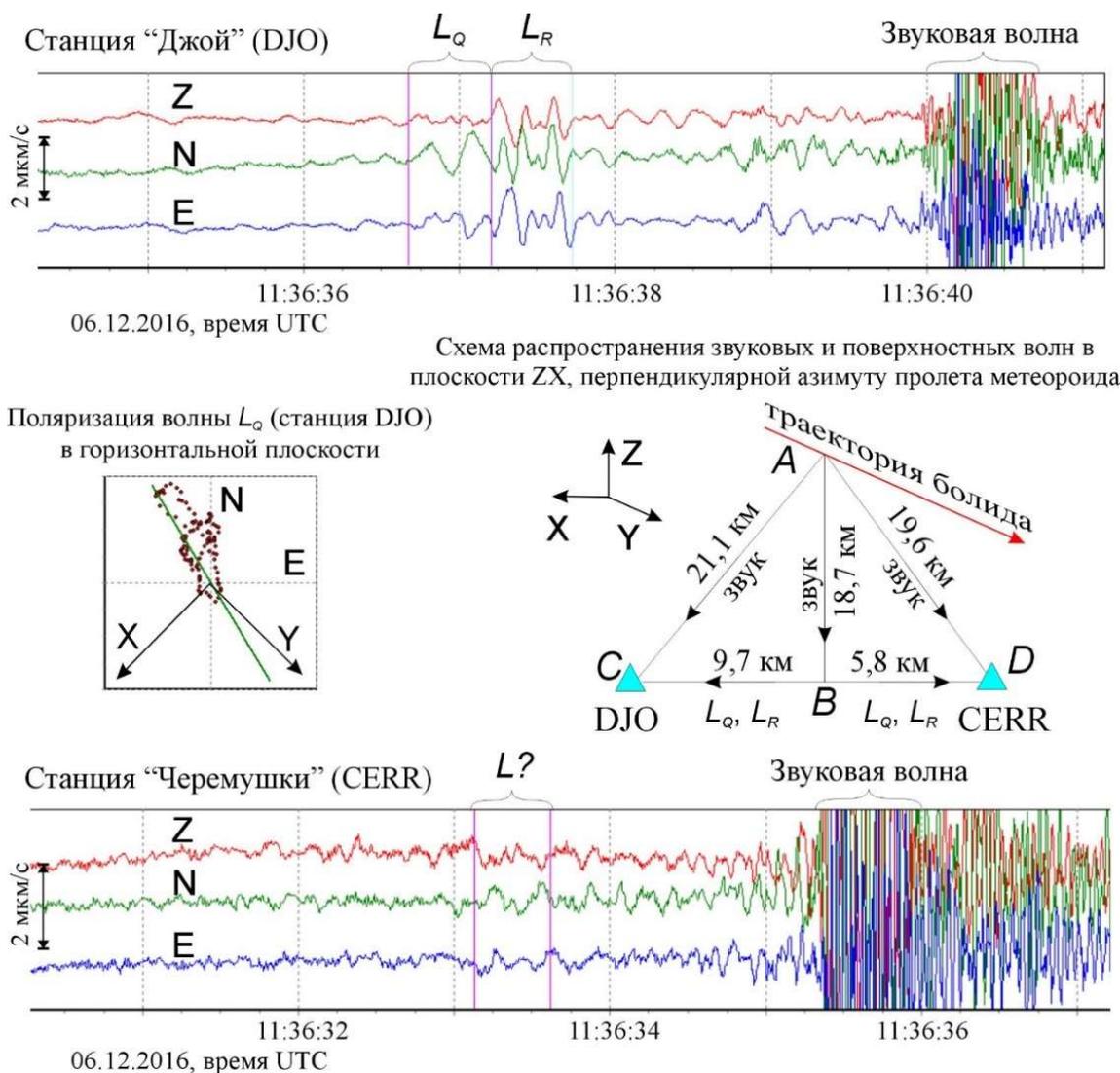


Рисунок 3.3 – Записи поверхностных и звуковых волн в воздухе на сеймостанциях «Джой» и «Черемушки» во время взрыва Саянского болида 06.12.2016 г

Рассмотрим ниже, как можно использовать дополнительно, кроме обработки землетрясений и создания каталогов, данные получаемые, полученные и хранящиеся в цифровых архивах ФИЦ ЕГС РАН. В настоящее время эти, во многом бесценные записи, практически не используются, а ведь в них находится информация о крупных авариях (например, на Саяно-Шушенской ГЭС), падении ракет, самолетов, космических объектов, городских шумах, проходящих поездах и пролетающих самолетах и др. По ним можно определить с какими собственными частотами строить крупные объекты нежелательно вблизи от сейсмостанции, что произошло со зданием, в котором зачастую расположена сейсмостанция после крупного землетрясения и многое другое, например, сколько полезных ископаемых добыто в каком-то районе и т.д. Разделим наше рассмотрение по характеру используемой информации.

### **Высокочастотные монохроматические сигналы**

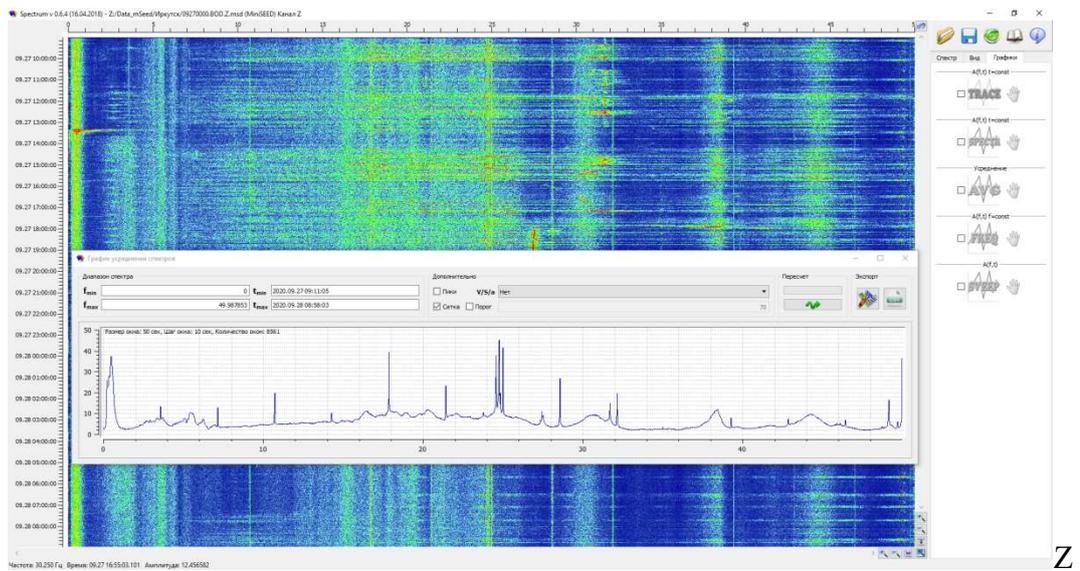
Рассмотрим данные, полученные на сейсмостанциях, расположенных в окрестностях ГЭС.

#### **Станция «Иркутск»**

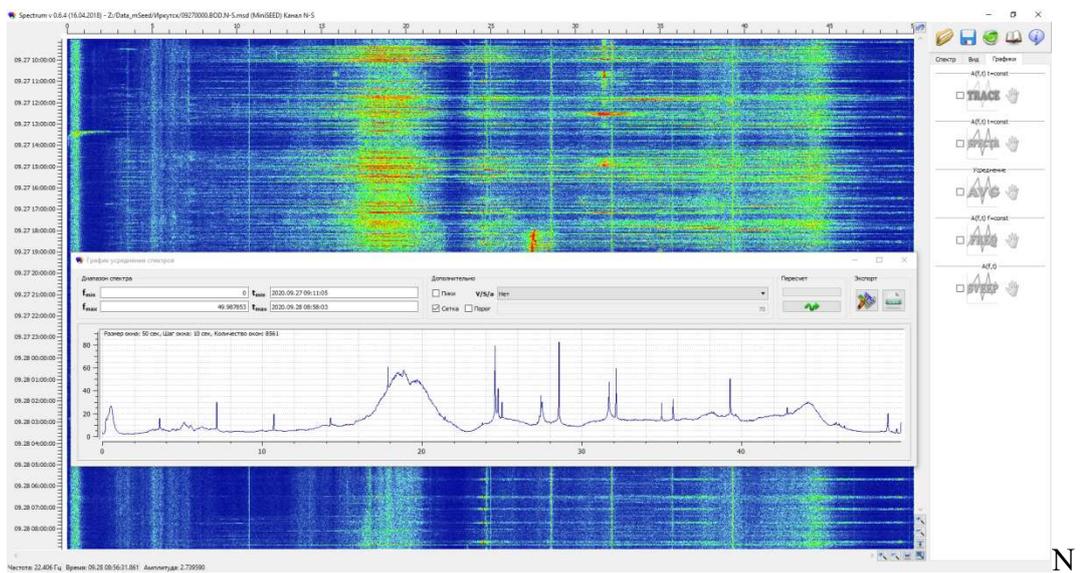
Станция «Иркутск» расположена в 3.54 км от гидроагрегатов Иркутской ГЭС (рисунок 3.4). Рассмотрим сейсмическую запись за 27.09.2020 г. Спектрограммы представлены на рисунке 1.5. На Z, N и E –составляющих мы видим прежде всего, набор монохромов, большинство из которых связано с работой гидроагрегатов. Это все монохромы с частотой  $f=3.5714*n$  Гц, где  $n$  – целое число. На рисунке 3.6 приведены данные по СШ ГЭС. Ситуация очень похожая. Есть несколько статей, посвященных СШ ГЭС и тому, что можно извлечь из представленных данных. Отметим, что так же, как и на СШ ГЭС по той информации, что приведена на рисунке 3.5, можно практически все рассказать о гидроагрегатах, начиная с того сколько электроэнергии они вырабатывают и заканчивая тем, как работает оборудование и сколько металла и на какой лопатке смыло если рассмотреть подобные данные за определенный период времени.



Рисунок 3.4 – Схема расположения станции «Иркутск» и Иркутской ГЭС



Z



N



E

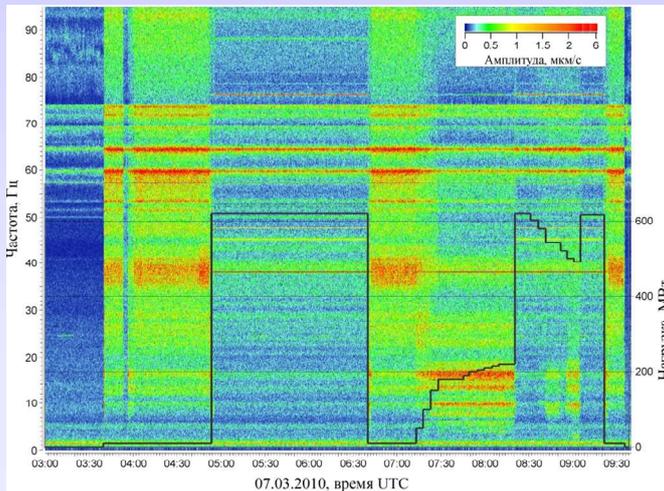
Рисунок 3.5 – Спектрограммы, полученные по записям станции «Иркутск» на Z, N и E-компонентах и усредненные за день спектры

## Методика обработки сейсмических данных

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

$f(\tau)$  – зарегистрированный сейсмический сигнал,  $\omega$  – частота,  
 $T$  – интервал времени (окно) для вычисления спектра

Спектрограмма сейсмической записи, зарегистрированной в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС



Графики изменения амплитуд колебаний на частотах, кратных оборотной частоте гидроагрегата

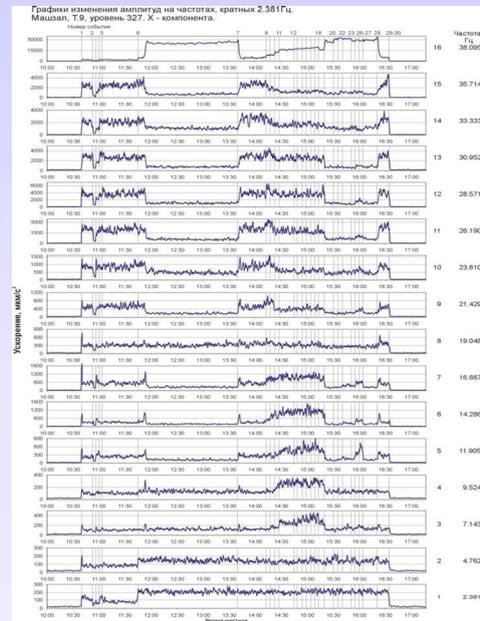


Рисунок 3.6 – Данные полученные на Саяно-Шушенской ГЭС

На рисунке 3.7 приводится пример изучения импульсных помех, которые тоже могут представлять определенный интерес на предмет изучения воздействия на здания и сооружения или на предмет изучения и слежения за работой оборудования, излучающего эти сигналы. Так как на хорошей станции частоты в 49 Гц подавляются, мы можем предположить, что на рисунке 3.7 мы видим электрические наводки, записанные сейсмостанцией, что тоже в определенных случаях может быть интересным.

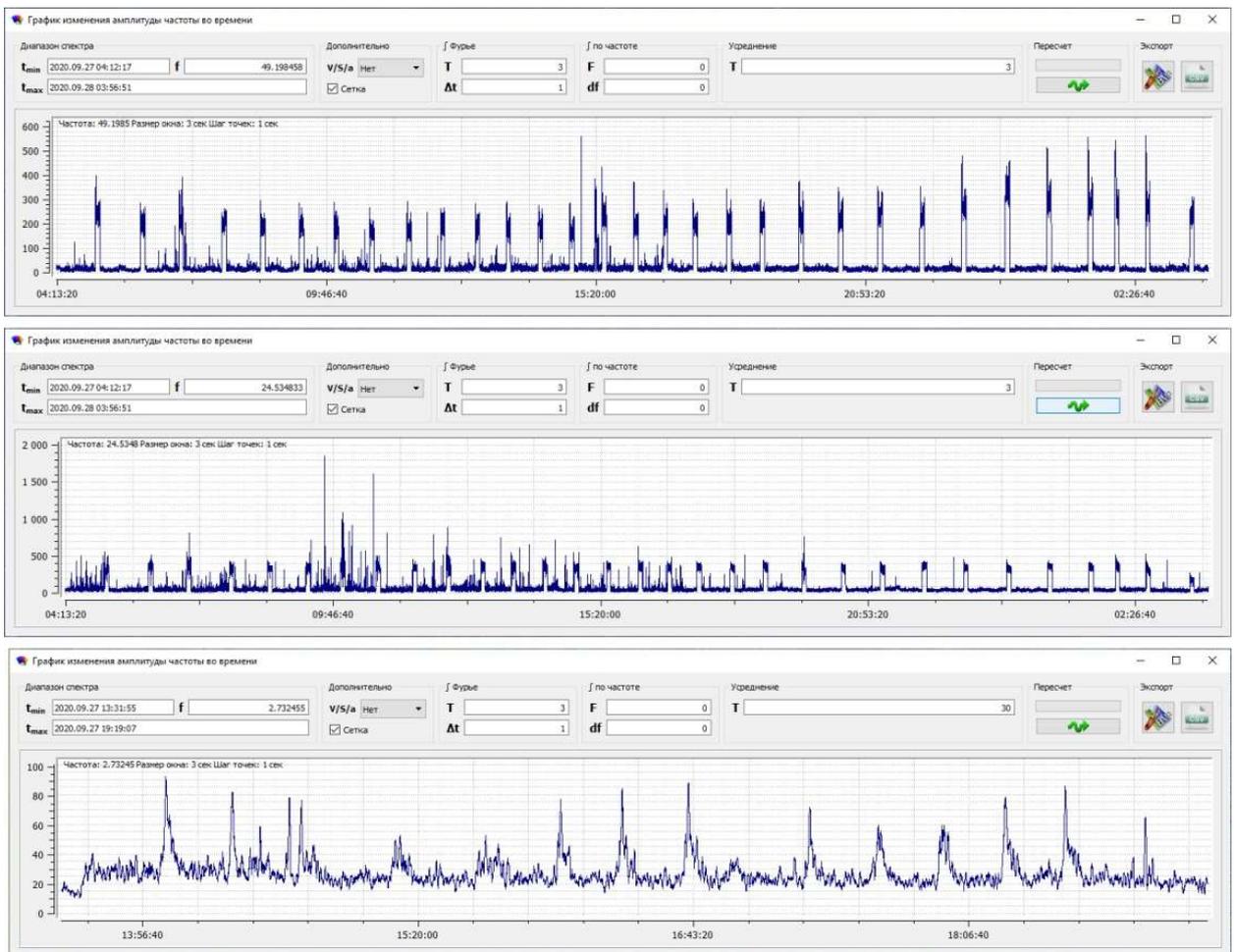


Рисунок 3.7 – Графики изменения амплитуд колебаний на заданных частотах 49.19, 24.53 и 2.73 Гц за 27.09.2020 г

Из рисунка 3.8 видно, какое большое количество информации спрятано сейсмической записи, если научиться ее правильно «читать». Каждое изменение в цвете на спектрограмме говорит о каком-то событии. Можно провести аналогию: вы стоите на многолюдной площади, работает оборудование, машины, оркестр и т.д., а вы все выделяете из этого хаоса и как-то интерпретируете. Здесь все то же самое.

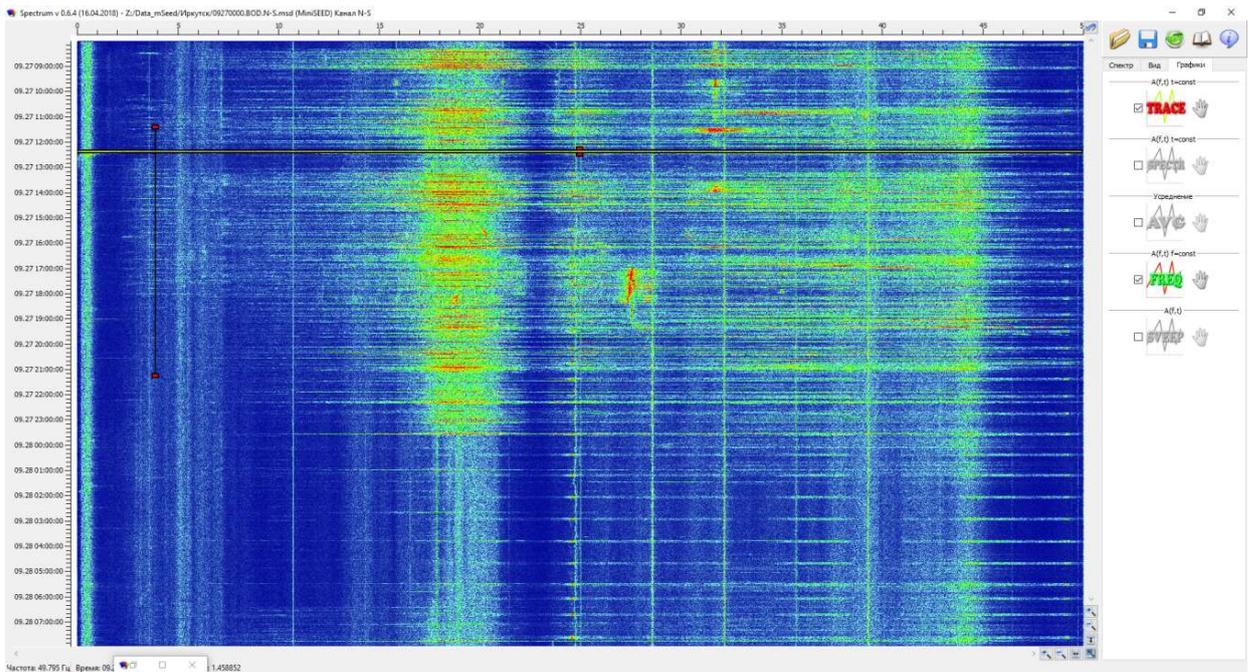


Рисунок 3.8 – Спектрограмма, полученная по записям станции «Иркутск» за 27.09.2020 г  
**Иркутская область, станция «Мамакан»**

В «Мамакане» сейсмическая запись не такая информативная, стоим не на «площади», а в «чистом поле», но частоты, кратные 1.39 Гц, видны (рисунок 3.9). Это тоже вызвано работой гидроагрегатов, но здесь другое число оборотов в работающей машине. Однако здесь видно, что с дебалансами не все в порядке: очень сильная по амплитуде оборотная частота. Интересно посмотреть как она изменялась за несколько лет.

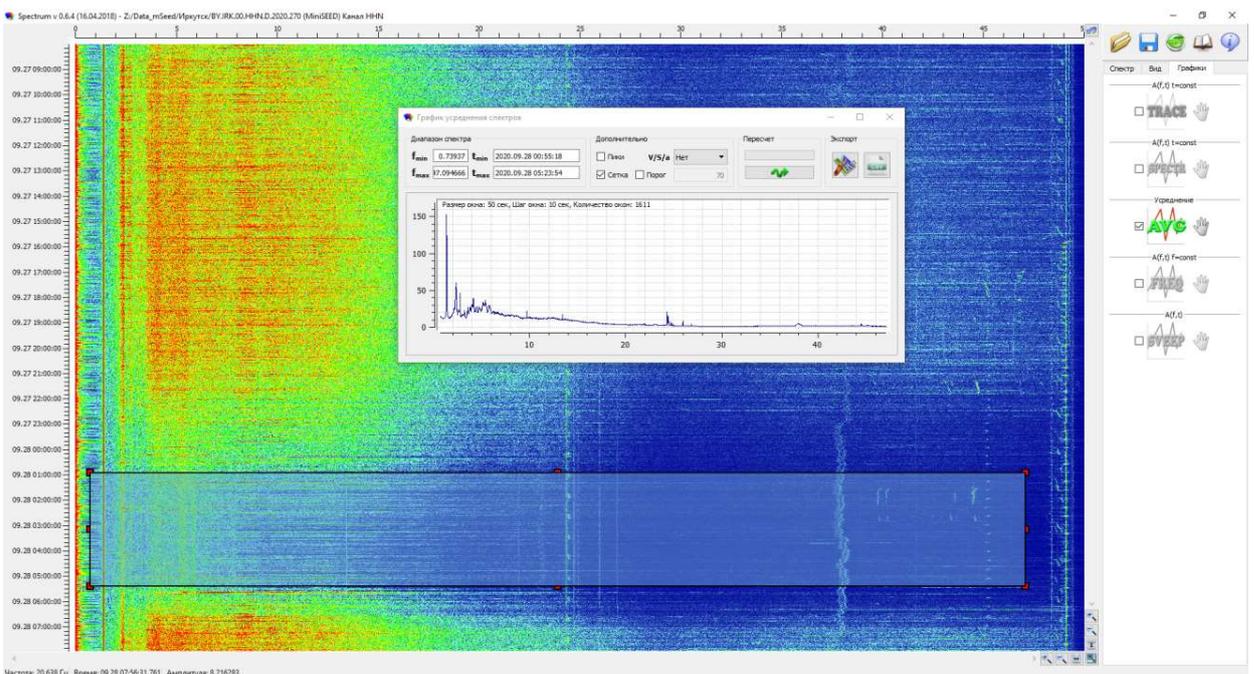


Рисунок 3.9 – Спектрограмма станции «Мамакан»

Нужно попутно отметить, что если аппаратура работает нормально, то на частоте 25 Гц (а надо бы аппаратуру до 100 Гц) должны быть нулевые амплитуды в спектре, как в «Мамакане». Станцию «Иркутск» необходимо отладить.

#### **Дагестан, сейсмостанция «Дубки»**

Станция Дубки расположена в 5 км от Чиркейской ГЭС (рисунок 3.10) и на записях, полученных на этой станции, конечно же должно быть много интересной и полезной информации.

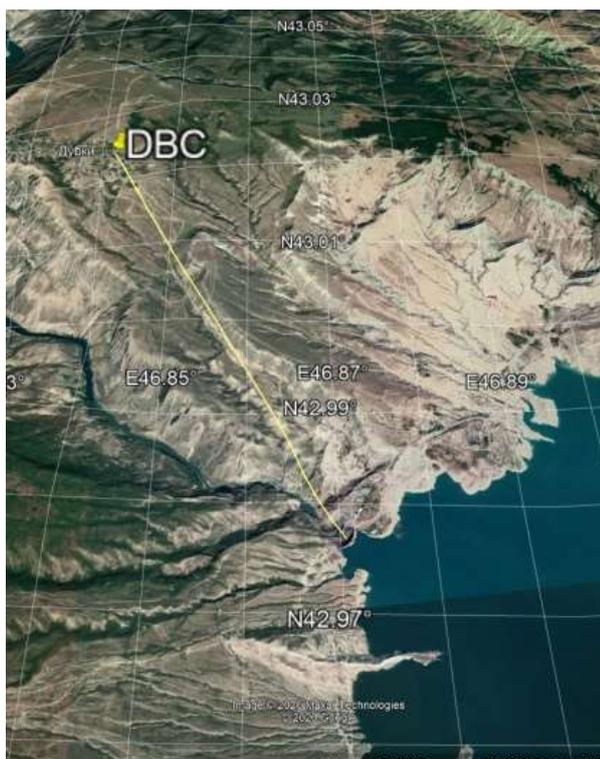


Рисунок 3.10 – Схема расположения станции «Дубки»

Первоначальное изучение спектрограммы записи, полученной на станции DBC (Дубки, 43.022; 46.841 h=850м, CM-3KB+SDAS) за 15-16 сентября 2020, показало следующее.

Если научиться читать информацию, представленную на спектрограмме (рисунок 3.11), то возможно следить за изменением многих параметров в объектах и работающем оборудовании, находящихся поблизости от станции, причем если объект находится не так близко, то можно накапливать монохроматические сигналы, увеличивая дистанцию слежения за объектом. На рисунке видно, что кроме небольшого землетрясения (?), которое произошло в 11 часов 15.09.2020 г. и землетрясения в 22:51:38, находящегося примерно в 100 км от станции (рисунок 3.12), выделяется много монохроматических сигналов с невысокой и высокой добротностью.

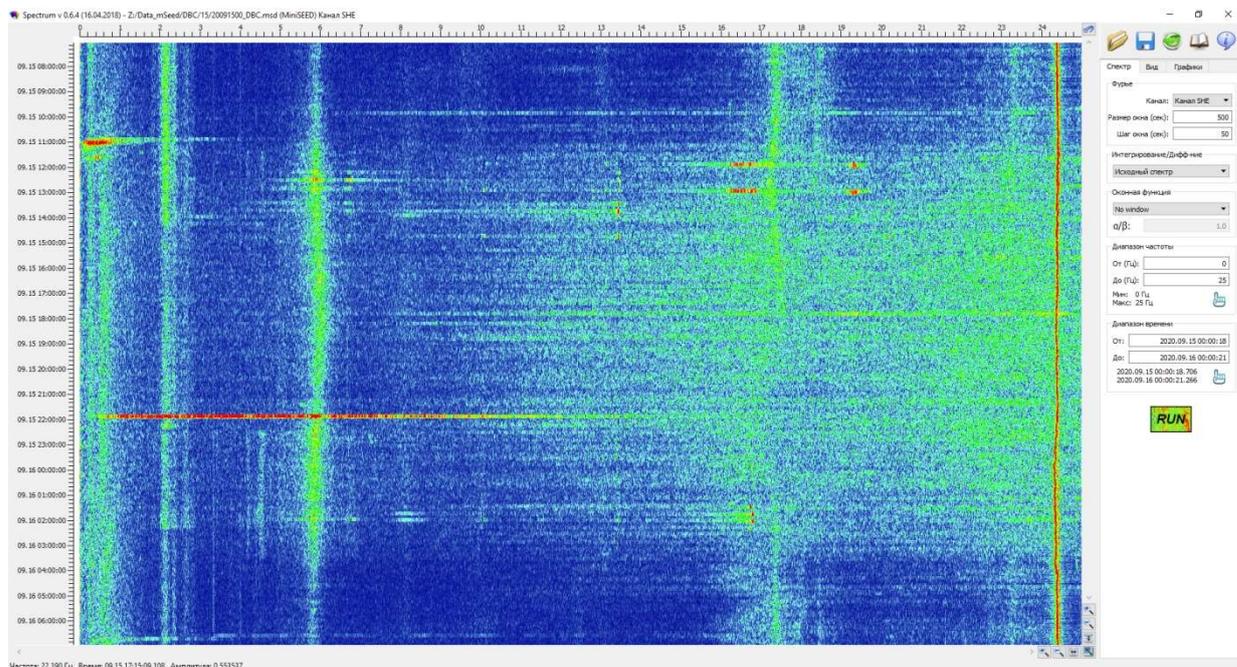


Рисунок 3.11 – Спектрограмма со станции DBC за 15.09.2020 г

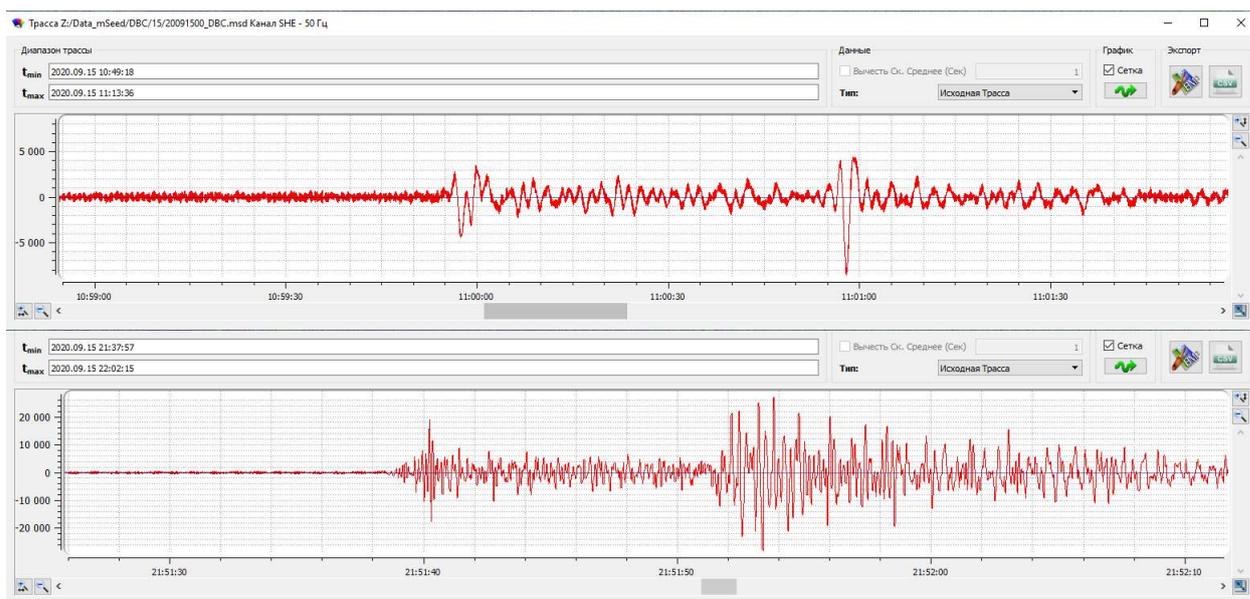
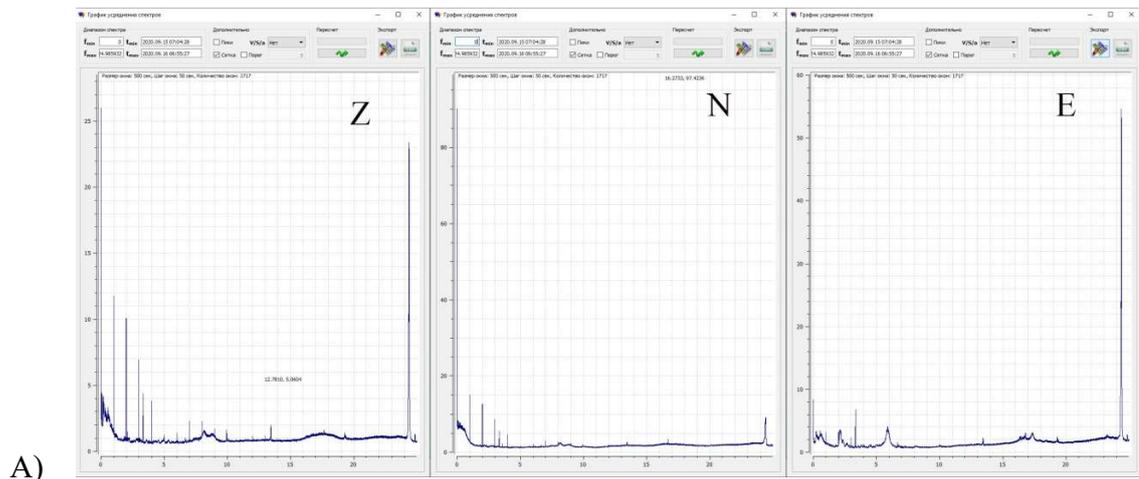
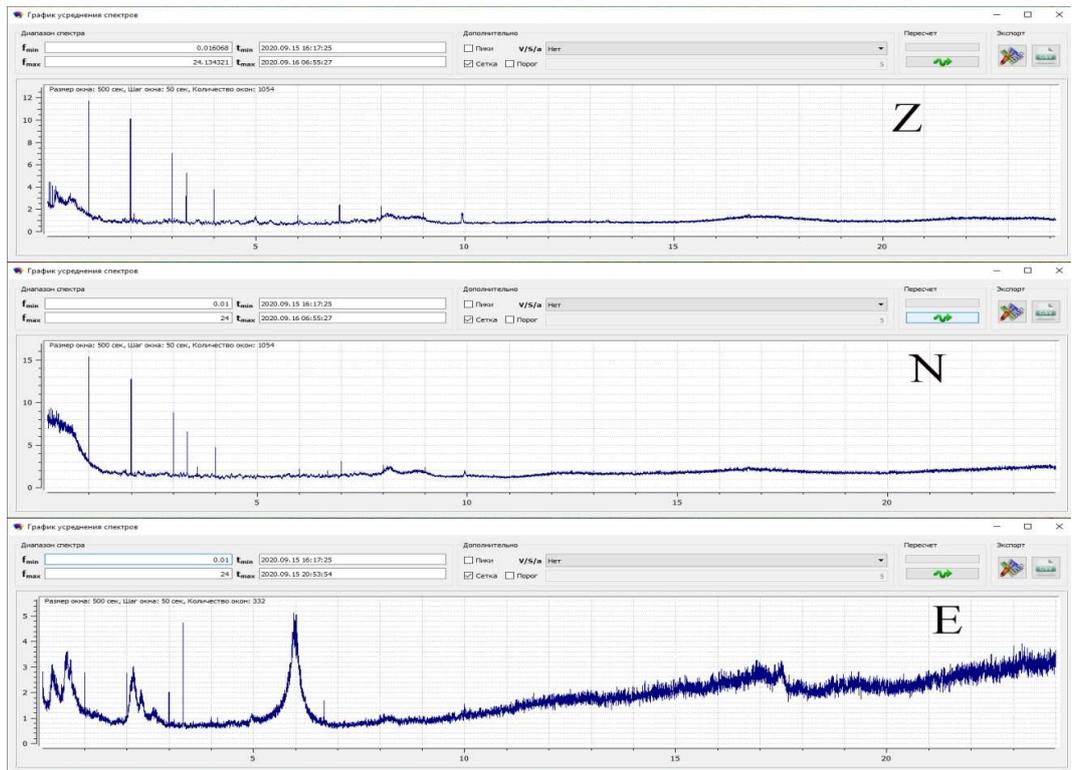


Рисунок 3.12 – Выделенные сейсмические события за 15.09.2020 г

Замечание к станции: набор монохроматических сигналов через 1 Гц скорее всего является аппаратной наводкой станции. Если все правильно работает, то на рисунке 3.13 на частоте 25 Гц должна быть нулевая амплитуда. Для исследований такого рода надо быть уверенным, что со станцией все в порядке.



А)



Б)

Рисунок 3.13 – Усредненные по всей записи за 15.09.2020 г, обзорные (А) и более детальные (Б) спектры Z, N и E-составляющих

Сигналы с высокой добротностью связаны с работающими механизмами, вырабатывающими электроэнергию, и можно определить, какие механизмы их излучают. После чего можно вести мониторинг (по частоте и амплитуде) этих монохромов и, соответственно, следить за работой соответствующих агрегатов.

### Станция «Новосибирская ГЭС»

Рассмотрим данные, полученные на станции «Новосибирская ГЭС». Она находится на расстоянии около 1 км от НГЭС и на сейсмических записях отражаются все нюансы ра-

боты ее гидроагрегатов. На рисунке 3.14 представлена спектрограмма записи сеймостанции за 10 суток, а на рисунке 3.15 – график усреднения спектров за 5 суток. Прежде всего, мы видим множество монохроматических высокочастотных сигналов, амплитуды которых изменяются во времени. Детально рассматривая информацию на спектрограмме, мы можем рассказать, что происходило в окрестности станции. На рисунке 3.17 мы видим изменение амплитуды «лопаточной» частоты во времени. Эти данные связаны с количеством вырабатываемой электроэнергии на станции. По данным, представленным на рисунках 3.16, 3.17 можно судить о том, как работали гидроагрегаты, когда шел более интенсивный сброс воды, влияли ли удаленные землетрясения на работу станции, изменялась ли балансировка гидроагрегатов и многое другое. Это стало возможным потому, что в течении многих лет мы изучали сейсмические записи, полученные на СШ ГЭС как вблизи гидроагрегатов, когда сеймостанции стояли в теле плотины, так и вдали, на станции «Черемушки». Если сравнивать со звучанием симфонического оркестра, мы научились отличать трубу от скрипки и можем определить, когда взята фальшивая нота. При работе любой гидростанции, как и многих других машин и механизмов, которые работают как сложные вибрационные источники генерируются монохроматические сигналы с частотами:

$$fn = \frac{K*n}{60}, \quad (3.1)$$

где  $K$ -число оборотов турбины в минуту, а  $n$ =целое число. Появление кратных частот связано с нелинейностью и тем, что все источники колебаний, турбина, лопатки, лопасти, генератор и т.д. работают на частотах, кратных частоте вращения турбины.

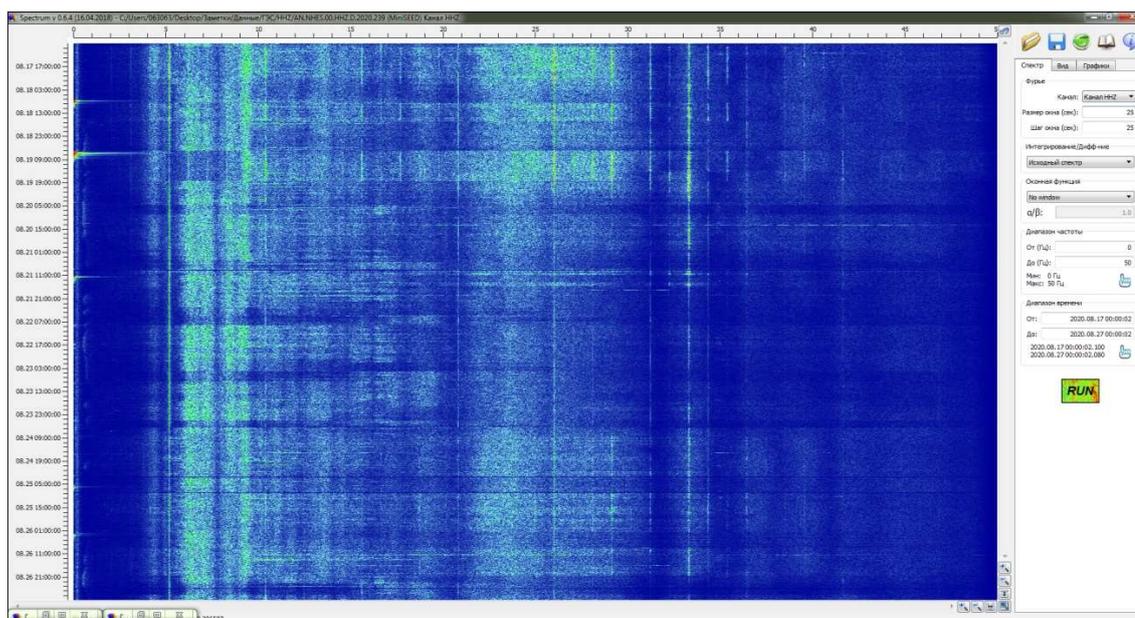


Рисунок 3.14 – Спектрограмма записей станции «Новосибирская ГЭС» за 10 суток

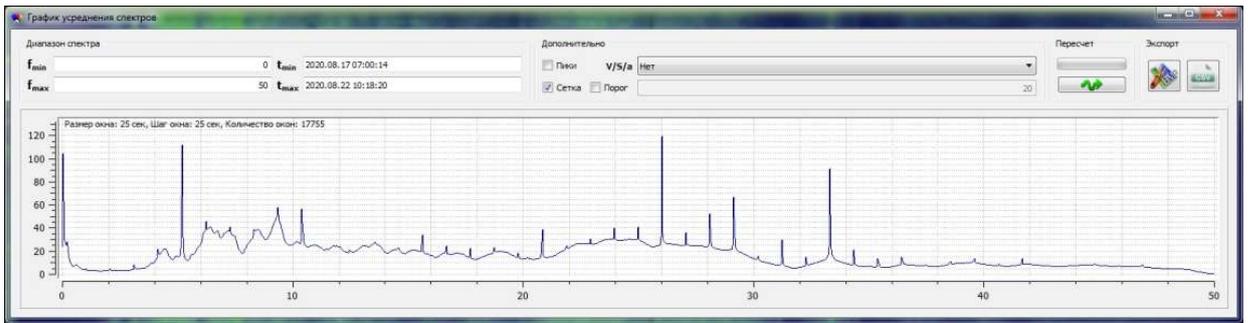


Рисунок 3.15 – График усреднённых спектров за 5 суток

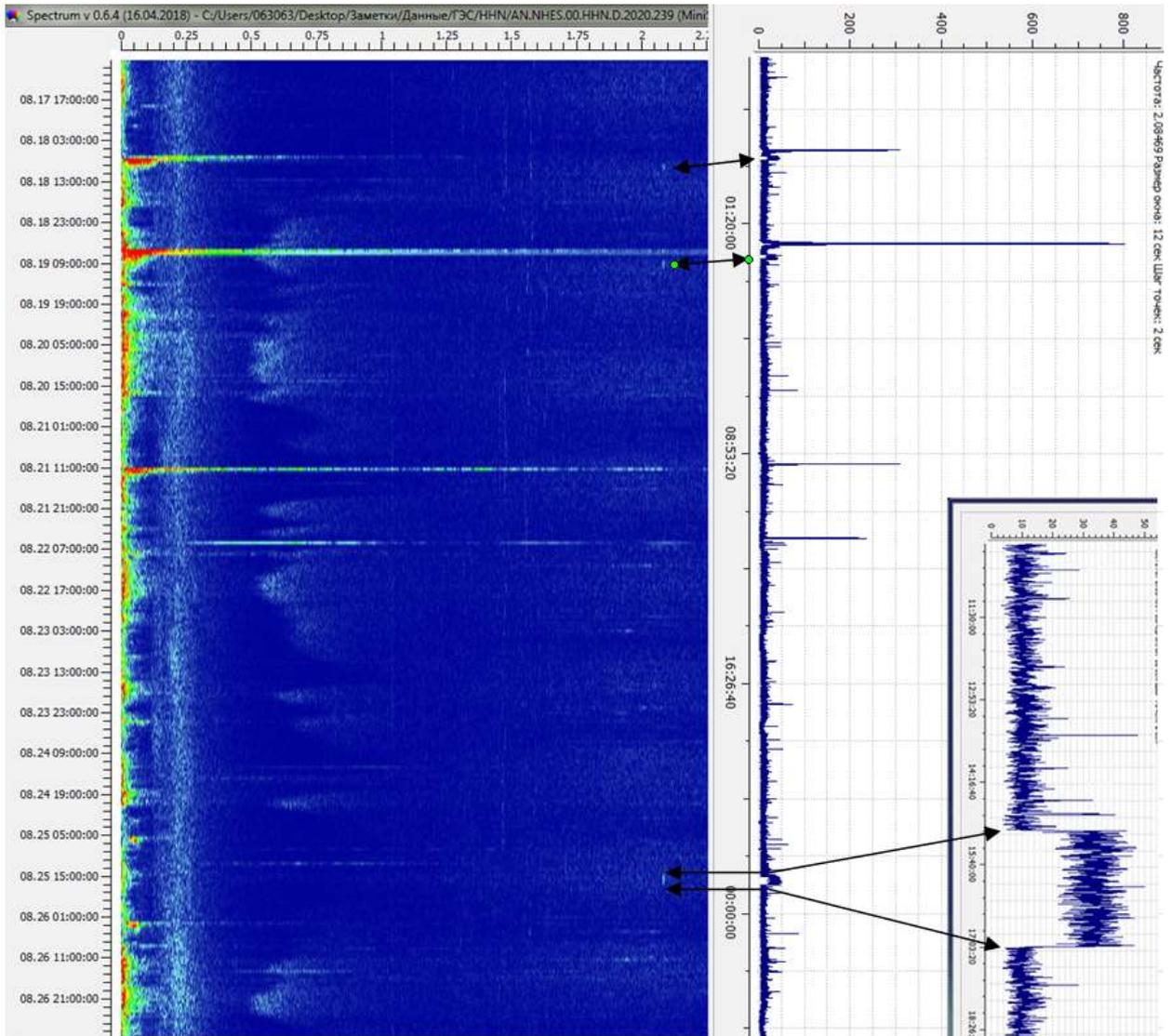


Рисунок 3.16 – Спектрограмма в низкочастотной области, полученная по данным со станции «Новосибирская ГЭС» и изменения амплитуды фиксированной частоты во времени

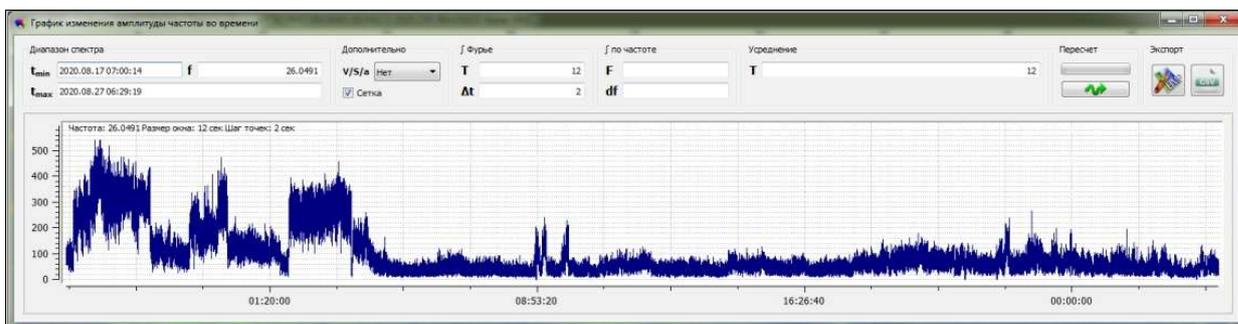


Рисунок 3.17 – Изменения амплитуды «лопаточной» частоты (26.04 Гц) во времени

В результате получается очень сложная картина, которую приблизительно можно описать следующим образом.

Колебания в каждой точке ГЭС запишем в виде:

$$A(x,y,z)=F(Q(x,y,z), M_i, F_{ki}(M_i), h), \quad (3.2)$$

где  $Q(x,y,z)$  – конструкция ГЭС,  $M_i$  – режим работы  $i$ -того агрегата,  $F_{ki}$  –  $k$ -тая собственная частота на  $i$ -том водоводе,  $h$  – уровень воды в водохранилище,  $i=1, \dots, 10$ .

$$A(x,y,z)=a_1(t)F_{\delta}(x,y,z)+a_2(t)F_l(x,y,z)+a_3(t)F_{ич}(x,y,z)+a_4(t)F_{сн}(x,y,z)+\dots+a_i(t)F_{вч}(x,y,z), \quad (3.3)$$

где  $F_{\delta}(x,y,z)$  – колебания, связанные с дебалансом турбины;  $F_l(x,y,z)$  – колебания, связанные с лопатками;  $F_{ич}(x,y,z)$  – колебания, связанные с «органными частотами»;  $F_{сн}(x,y,z)$  – собственные колебания плотины;  $F_{вч}(x,y,z)$  – высокочастотные колебания;  $a_i(t)$  – нелинейные функции.

Если мы определим значения этих колебаний во многих точках при разных режимах, то мы сможем восстановить колебания в источниках или восстановить амплитуды собственных колебаний в пространстве. Тем самым мы сможем описать работу гидроагрегата и, если такие наблюдения длятся долго, то описывать как изменяются различные параметры с течением времени. На рисунке 3.18 приводятся экспериментальные данные, которые можно использовать для решения представленной выше задачи. Представлены только часть данных на X, Y, Z компонентах значений кратности от 1 до 42. Для решения многих задач по контролю за гидроагрегатом этого достаточно.

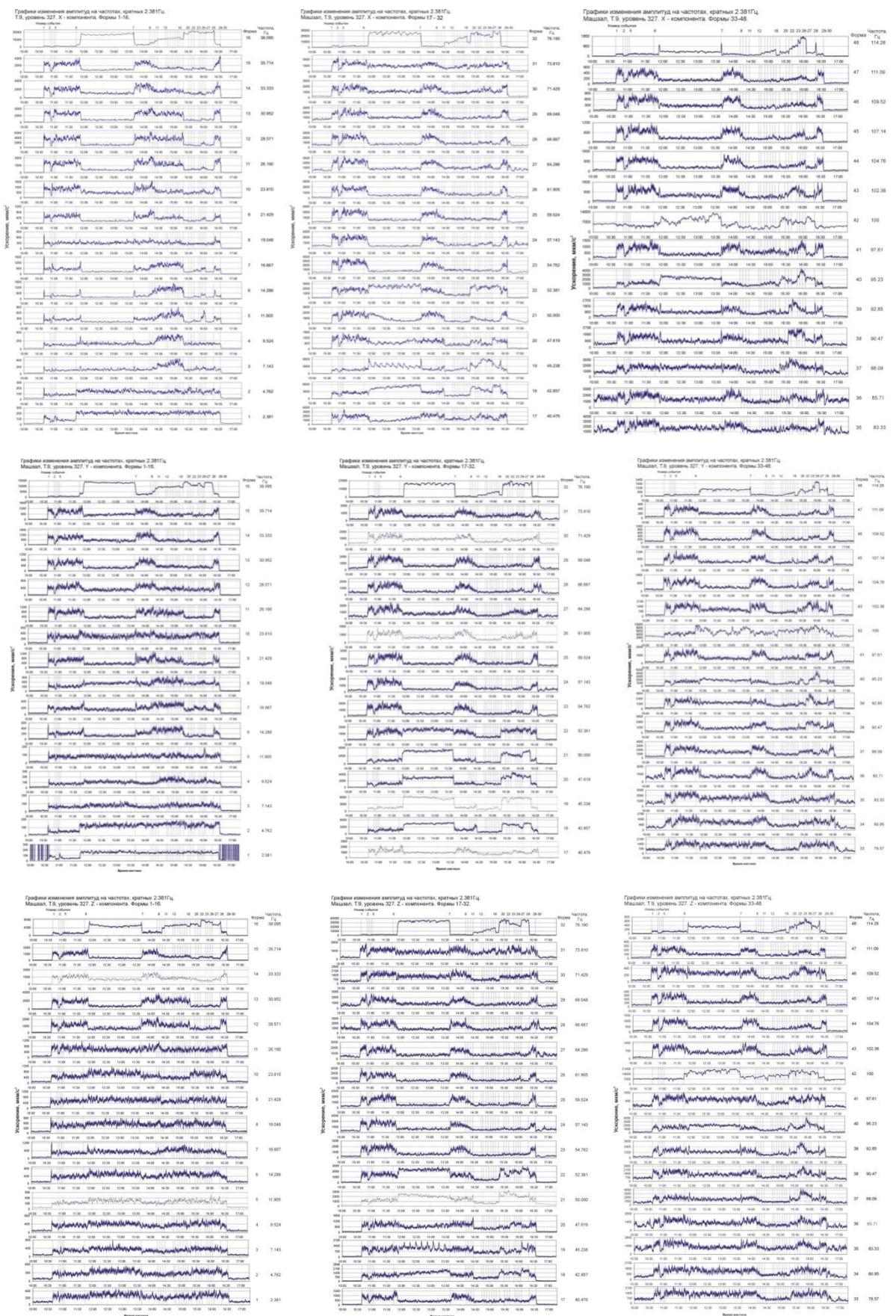


Рисунок 3.18 – Изменение амплитуды колебаний на частотах, кратных 2.381 Гц в зависимости от различных режимов работы гидроагрегата

При изучении колебаний на ГЭС или схожих объектах мы сталкиваемся со следующими видами колебаний.

1. Вынужденные колебания. Колебания от работающих механизмов, находящихся вне и внутри зданий и сооружений, передаются на эти объекты.

2. Колебания резонансные. Если частоты возбуждающих колебаний совпадают с собственными частотами колебаний объекта, то амплитуда колебаний возрастает в десятки и сотни раз.

3. Колебание с подкачкой энергии. Если есть подкачка энергии при вибрациях (вода, ветер, поток газа) возникает неустойчивое состояние, которое приводит к резкому возрастанию вибрации и разрушению объекта.

Все перечисленные выше виды колебаний являются источниками сейсмических волн. Часто это низкочастотные колебания, которые по Земле распространяются с большей, чем в воздухе скоростью, и могут регистрироваться на значительных расстояниях. Если амплитуды колебаний малы, то можно для их выделения применять сейсмические антенны и способы накопления, хорошо разработанные в сейсмике. В звуковом диапазоне частот для человека нет больших проблем выделять различные источники колебаний и анализировать их изменения во времени. При наличии специальных систем регистрации колебаний в низкочастотном диапазоне и программ для их анализа задачи становятся очень похожими и решаемыми. Отметим, что таких станций, как приведены выше, в данных ФИЦ ЕГС РАН достаточно много, а в сложных колебательных системах, при определенных режимах работы, в некоторых точках могут возникать колебания очень большой амплитуды, связанные с параметрическими резонансами, а это может привести к разрушению объекта, поэтому контроль этих процессов крайне необходим.

### **Станция «Москва»**

Станция «Москва» – бесспорно уникальная станция, по той накопленной за многие годы информации, что находится в ФИЦ ЕГС РАН, можно писать научные поэмы. Даже беглый взгляд на карту (рисунок 3.19) говорит о многом. Несмотря на то, что рядом с сейсмостанцией находятся несколько станций метро: Третьяковская – 340 м, Новокузнецкая – 440 м, Полянка – 422 м, Павелецкая – 990 м, Октябрьская – 1100 и т.д., но и на расстоянии чуть больше 1 км находятся 6 мостов, в 1.5 км – Храм Христа Спасителя и Кремль, в 2.5 км – Министерство Обороны РФ, в 4 км – одна из крупнейших ТЭЦ-12, и все объекты излучают монохромные на собственных частотах, в них находится различное (иногда очень мощное) оборудование. Но оставим самое интересное на потом, а здесь рассмотрим только сейсмическую информацию, связанную с получением электрической энергии.

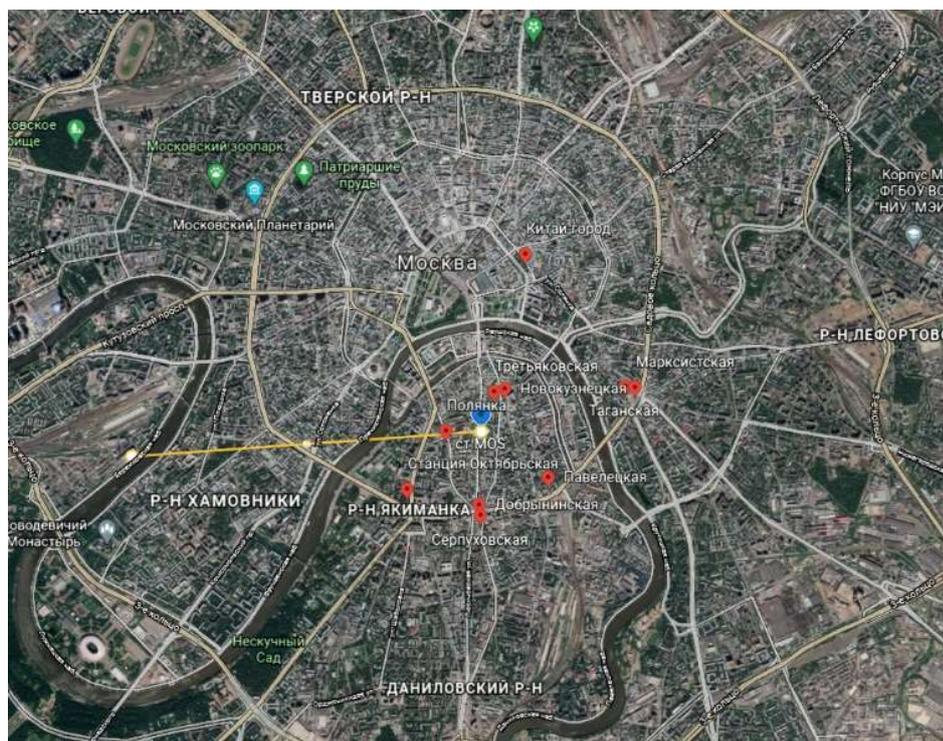


Рисунок 3.19 – Схема расположения станции «Москва»

Данные, полученные на станции «Москва», хотя и содержат информацию о работе крупной энергетической установки, но она существенно отличается от информации, представленной выше. Здесь электроэнергию получают от работы тепловых турбин. В отличие от гидроагрегатов при их работе нет (или почти нет) нелинейного взаимодействия с окружающей средой и поэтому на рисунках 3.20 и 3.21 мы видим постоянно присутствующую частоту 3.85 Гц, у которой самая мощная – это не вертикальная, а горизонтальная составляющая, следовательно, колебания происходят в основном в горизонтальном, близком к северному (N) направлению. Такого обилия кратных частот, как в сигналах от гидростанций, мы здесь не видим. Вероятнее всего эта частота связана с работой турбин ТЭЦ-12, расположенной в 4-х км от сеймостанции.

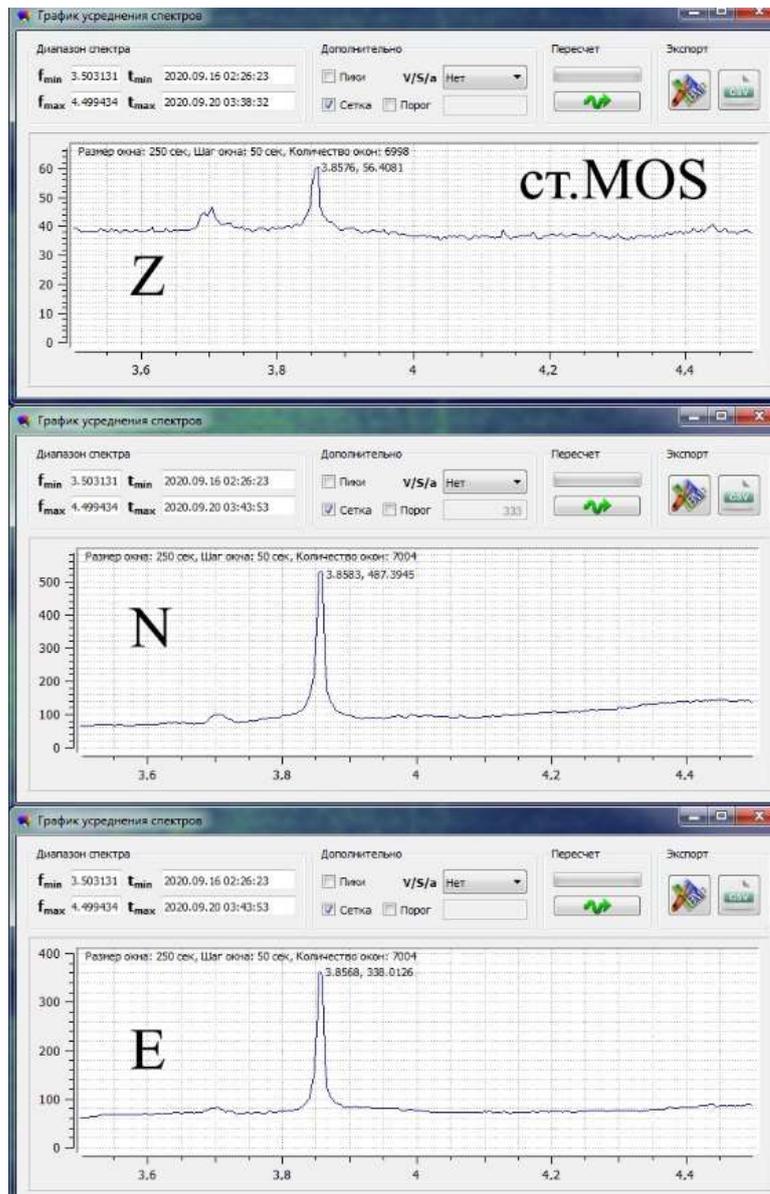


Рисунок 3.20 – График усредненных за 4 часа спектров, Z, N, E компоненты

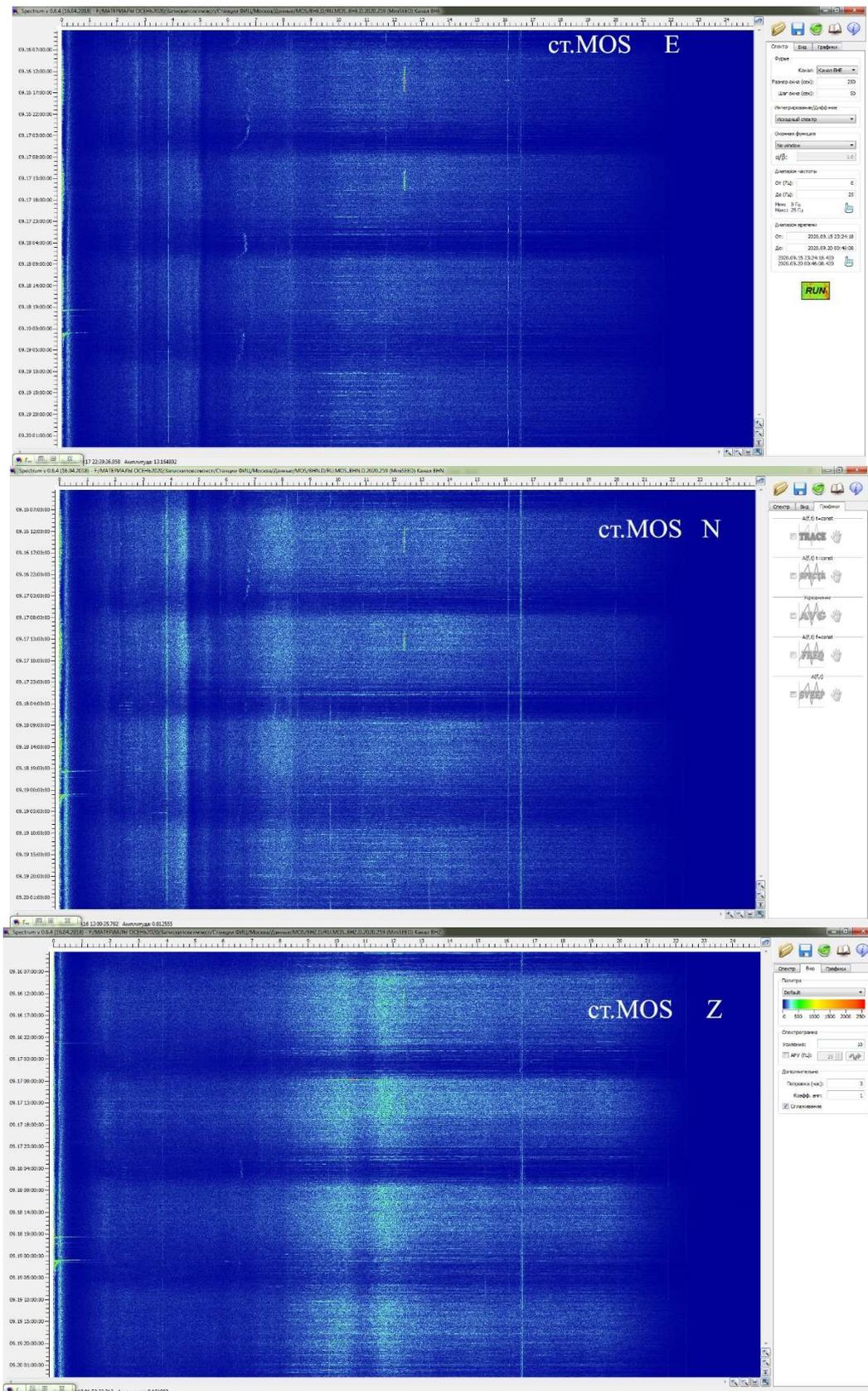


Рисунок 3.21 – Спектрограммы записи за 4 суток, полученной на ст. «Москва» на E, N и Z компонентах

Посмотрев на рисунок 3.22 с целью изучения изменения амплитуды частоты 3.85 Гц, мы видим, что в середине ночи турбины останавливаются (или почти останавливаются, у

нас нет опыта работы с ТЭЦ). Детально рассматривая эти кривые можно следить за работой турбин, выработкой электроэнергии, изучать особенности их работы и т.д.

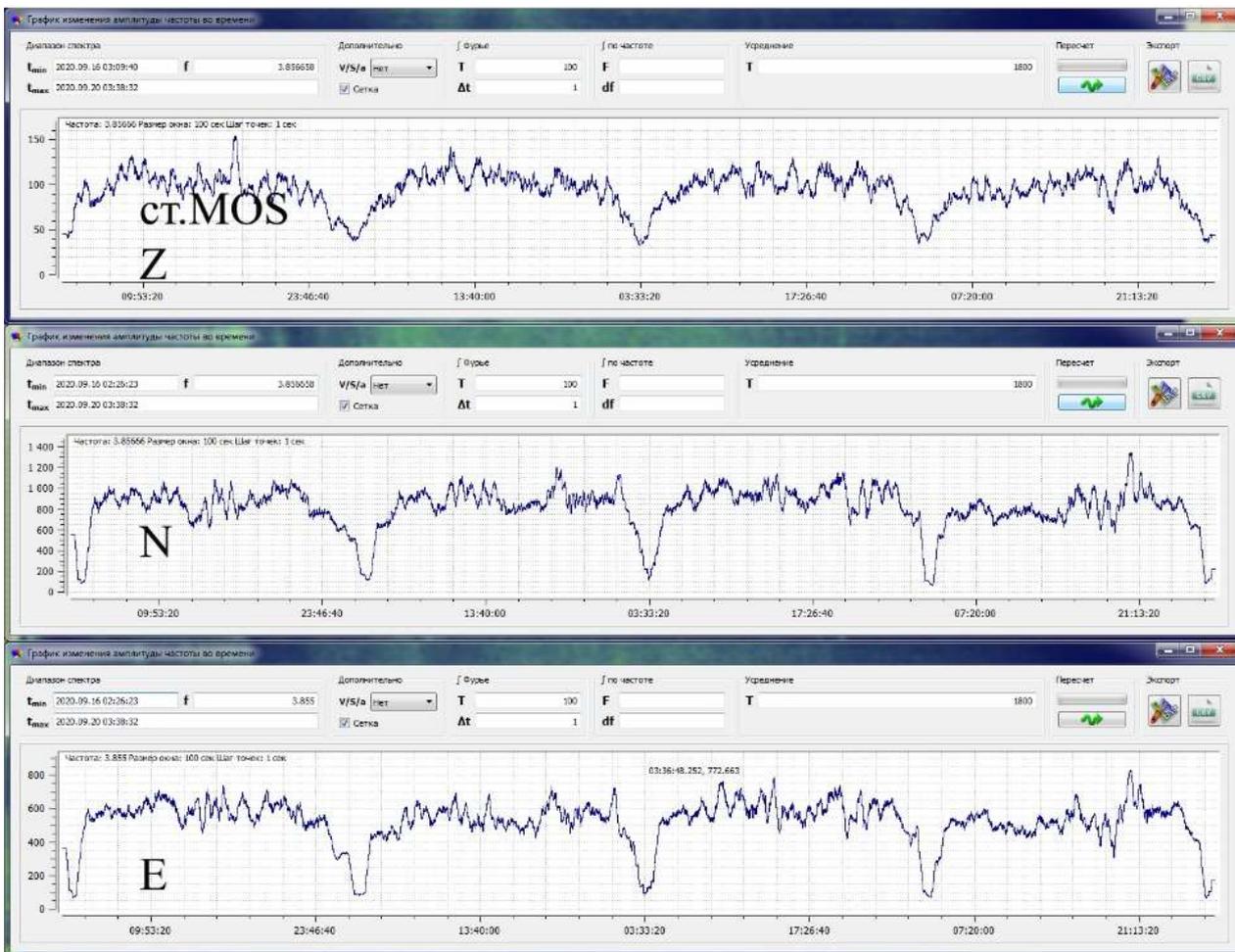


Рисунок 3.22 – График изменения амплитуды частоты во времени, станция «Москва», Z, N, E компоненты

На рисунке 3.23 представлены графики изменения амплитуды частоты во времени на разных частотах, которые мы видим на спектрограммах (рисунок 3.21). Анализ этой информации является первым шагом для выяснения источников этих колебаний, а потом их мониторинга во времени.

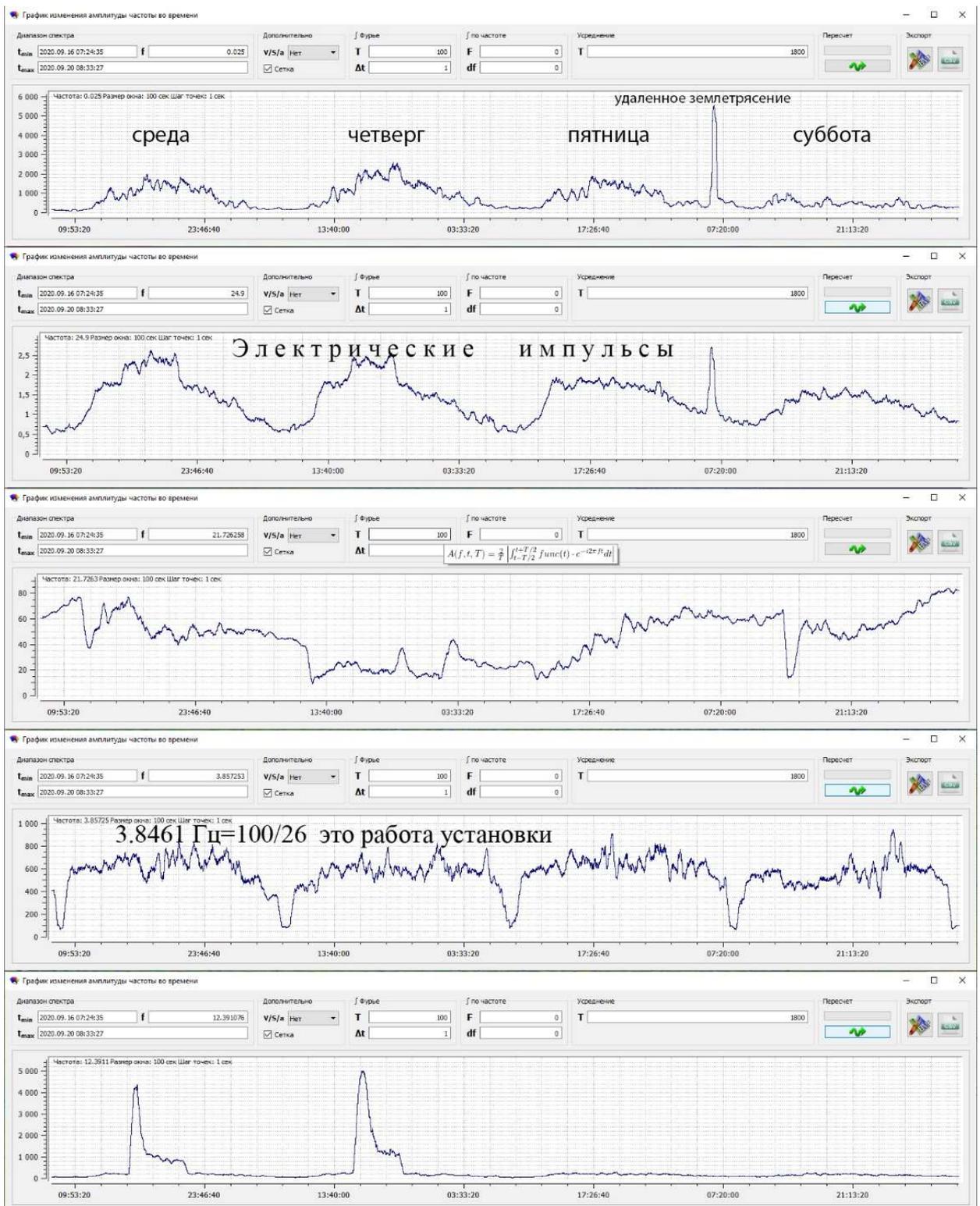


Рисунок 3.23 – Графики изменения амплитуды частоты во времени на разных частотах

Монохроматические сигналы, не стабильные по частоте, менее добротные и часто с небольшим смещением по частоте от величины  $f_n = \frac{K \cdot n}{60}$

На рисунке 3.24 представлен примеры спектрограмм, по которым можно судить о работе двигателя, работающего на частоте 24.4 Гц. Если это гудит счетчик рядом с прибором, то особого интереса эта информация не имеет, а если – это двигатель, работающий на

снабжение питьевой водой города или теплом поселка, то режим работы его подшипников может быть жизненно важным. Поставив несколько временных станций, легко определить источник колебаний и немного понаблюдав за ним понять, как его работа отражается в сейсмических параметрах. Если удастся за пару дней предупредить поселок, что есть шанс остаться без воды или тепла, значит, ФИЦ ЕГС РАН выполнил государственное задание.

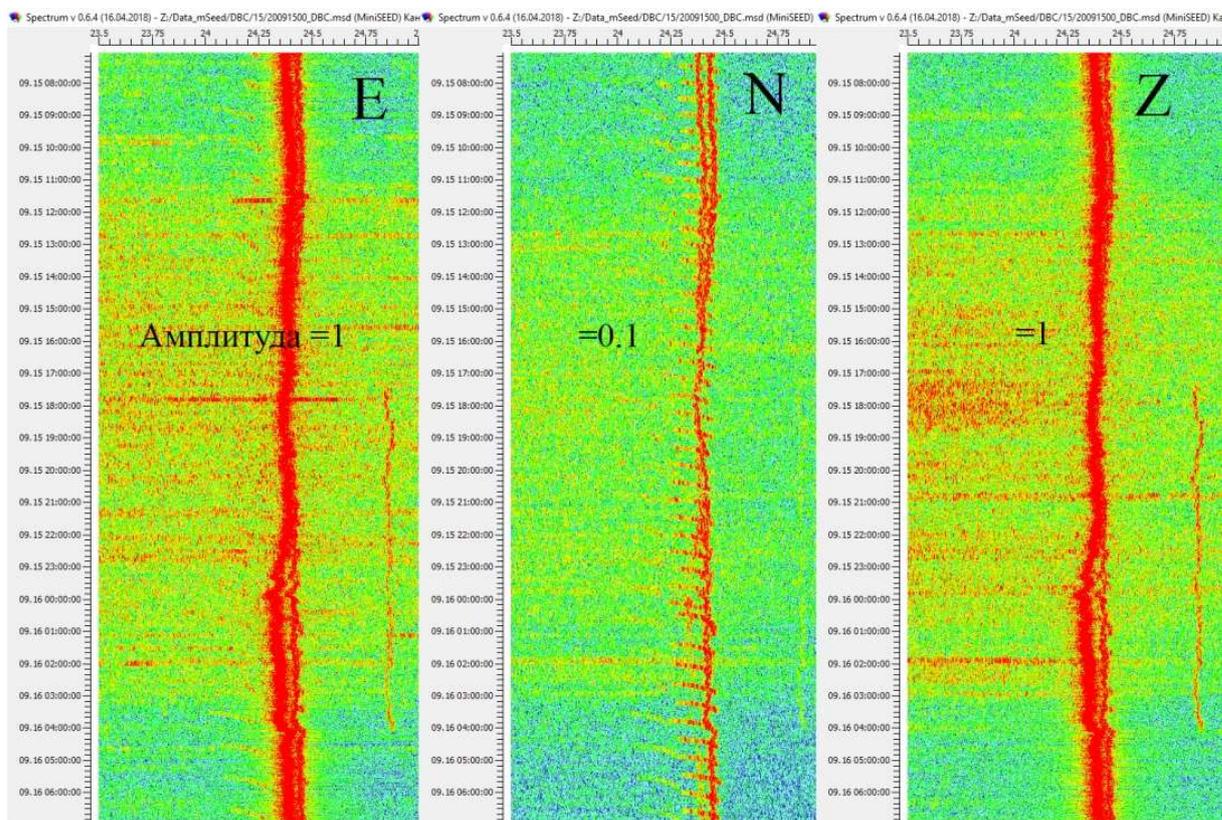


Рисунок 3.24 – Спектрограммы в окрестности частоты 24.4 Гц на E, N и Z-компонентах

### Собственные колебания в зданиях и сооружениях

Монохроматические колебания с низкой добротностью на частотах, как правило, до 10 Гц – это отклик от собственных колебаний зданий и сооружений, находящихся недалеко от, и в том числе в доме, где расположена станция. Изучение изменений частот этих колебаний связано с изучением состояния данных сооружений. Очень интересно их смотреть после землетрясений, особенно если это дом, в котором живешь. Изменение собственных частот сейсмологу должно говорить о необходимости быстро сменить адрес проживания.

Ранее, на примере данных с сеймостанции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, была разработана методика диагностики физического состояния зданий и сооружений, позволяющая по непрерывным записям сеймостанций, расположенных в их окрестностях, решать задачи мониторинга технического состояния плотин и других сооружений по изменениям их собственных частот (рисунок 3.25). Из-за удален-

ности сейсмостанции «Черемушки» от ГЭС, расположения ее на территории поселка, повышенной сейсмической активности региона, сейсмические записи «зашумлены» всевозможными техногенными и природными помехами, затрудняющими выделение сигналов, связанных с собственными колебаниями плотины. Чтобы повысить достоверность их выделения, применялись следующие способы цифровой обработки данных. Первоначально записи отфильтровывались от высокоамплитудных помех (например, от движущегося транспорта, или от землетрясений) путем обнуления участков записей с амплитудами колебаний выше фоновых значений. Следующим шагом выполнялась процедура накопления полезного сигнала: сейсмическая запись разделялась на фрагменты временных окон, для каждого фрагмента вычислялись амплитудные спектры, которые затем усреднялись. Для определения длины всей записи, достаточной для накопления полезного сигнала, производилось усреднение спектров за различные интервалы записи. Из рисунка 3.25(б) видно, что при длине записи от 10.7 часов, усредненные спектры стабилизируются и с дальнейшим увеличением длины записи не меняются. В целом, опытным путем установлено, что для уверенного выделения на сейсмостанции «Черемушки» сигналов, связанных с собственными колебаниями плотины ГЭС (при условии очистки сейсмограмм от высокоамплитудных помех), интервал накопления должен составлять порядка 0.5-1.0 суток.

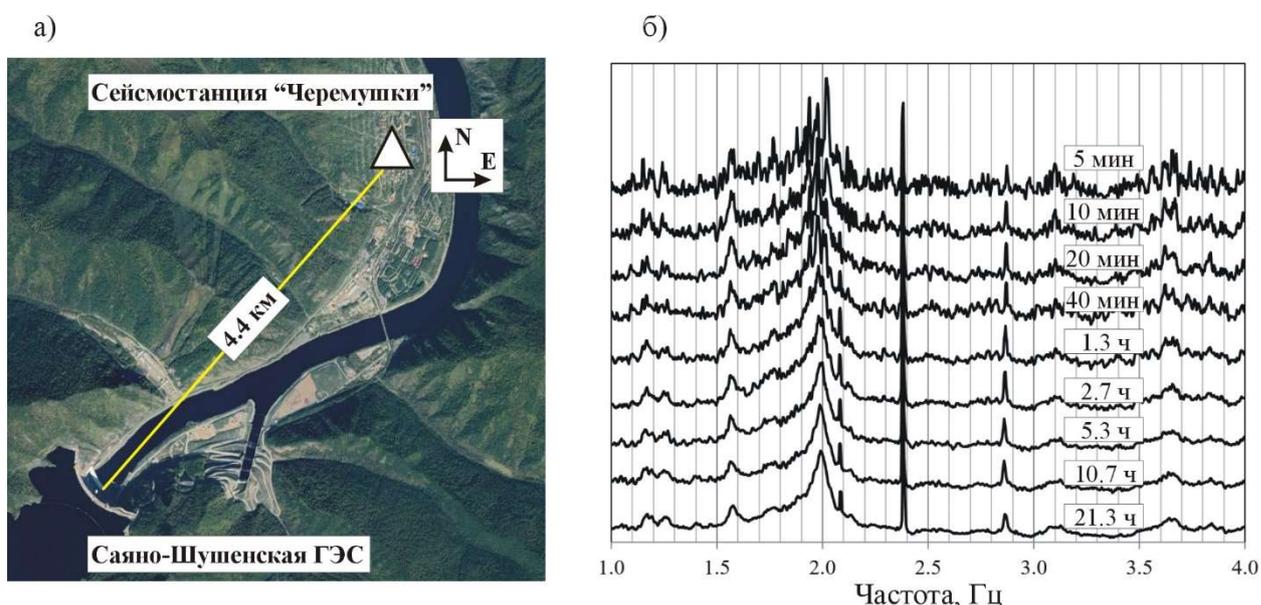


Рисунок 3.25 – Схема расположения станции «Черемушки» (а) и усредненные спектры микросейсмических шумов на N-компоненте за 01.01.2012 г при разной длине записи (б)

Разработанные подходы были применены для исследования изменений собственных частот Чиркейской ГЭС (рисунок 3.26).

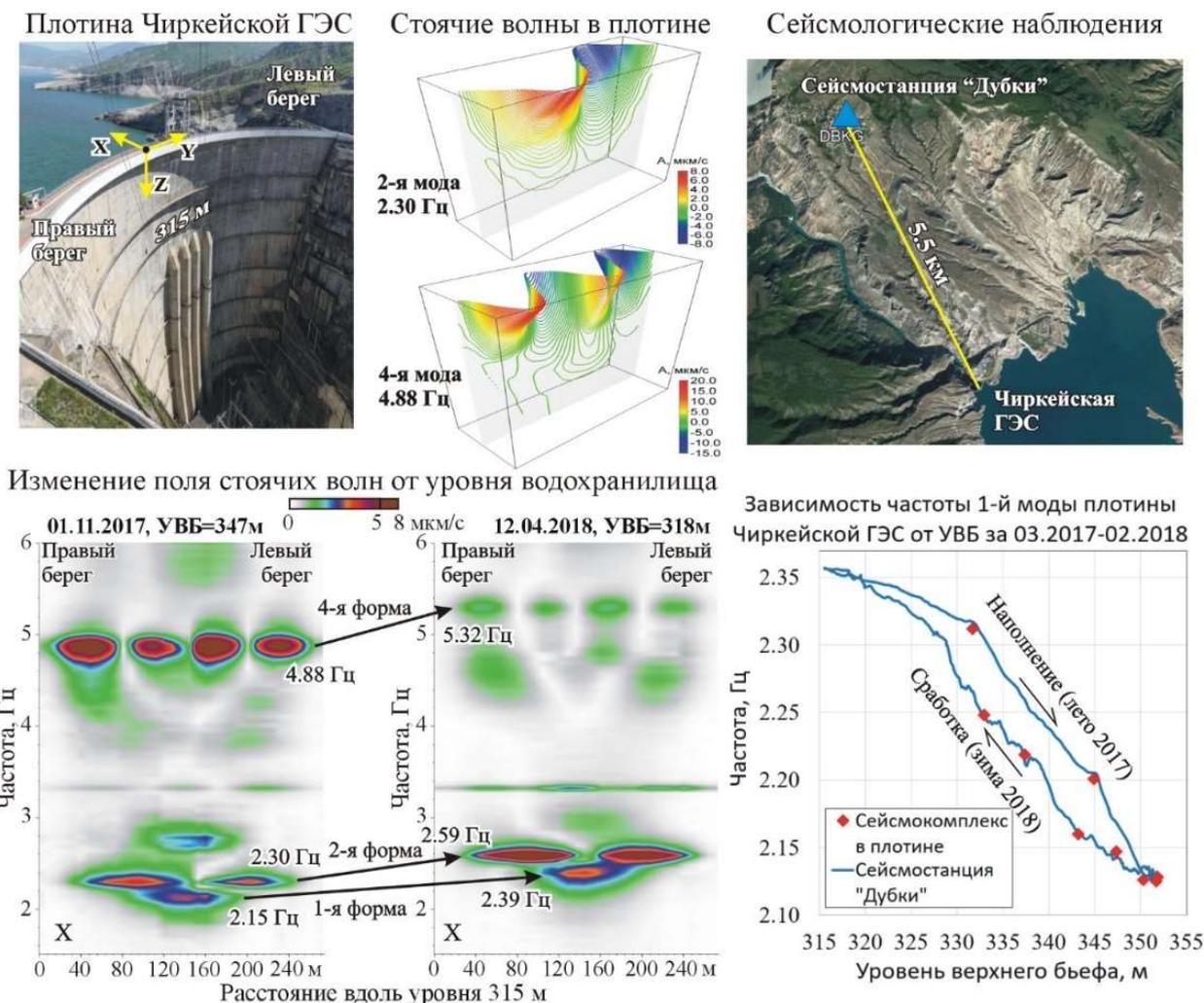


Рисунок 3.26 – Исследование изменений собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС

### Стоячие волны в крупных геологических объектах

#### Сейсмостанция «Москва»

Примером станции, установленной в крупном промышленном городе, является станция «Москва». Она установлена недалеко от линии метрополитена и, конечно же, содержит информацию о движении поездов. В записях присутствует информация о собственных частотах близлежащих зданий, но интересным может быть и то, что станция имеет длиннопериодный сейсмоприемник, и мы можем подробнее остановиться на анализе низкочастотной части спектра (рисунок 3.27). Что можно извлечь полезного из этой части информации.

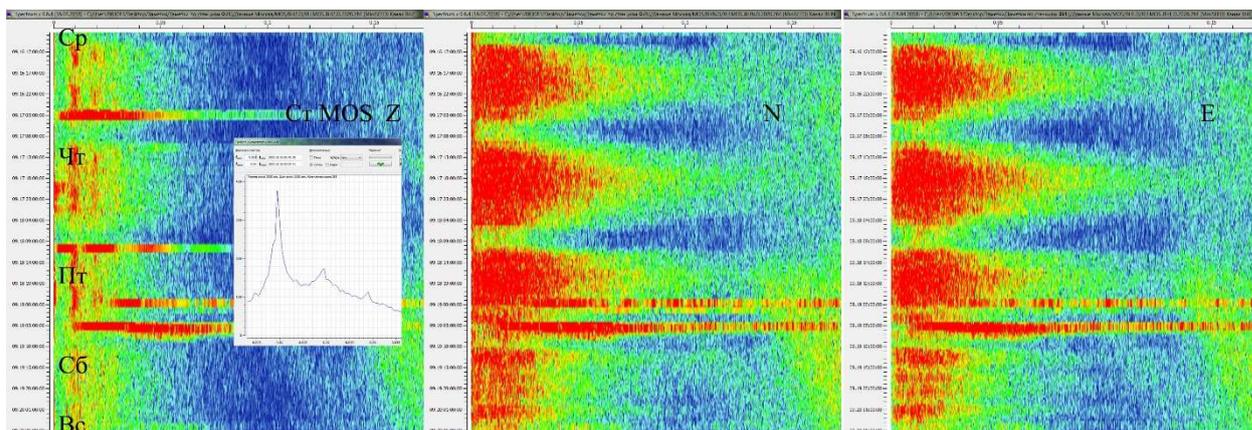


Рисунок 3.27 – Спектрограммы, полученные по данным станции «Москва» за 5 дней в диапазоне от 0 до 0.27 Гц на Z, N, E составляющих

Прежде всего заметно, что уровень низкочастотных шумов на станции изменяется в зависимости от времени суток и дней недели. Вероятно, это связано с работой промышленных установок, за которыми при желании можно организовать контроль. Второе, на что сразу обращается внимание, это наличие кратных частот на Z-компоненте которые образуются в рабочие дни (рисунок 3.28). Это частоты 0.0097, 0.0193 и 0.029 Гц. Такой набор частот связан с колебаниями крупного объекта с не закрепленными (или закрепленными концами), где частота связана с параметрами объекта по формуле:  $f=V/2L$ . Объект крупный, и здесь скорость  $V$  должна быть равной средней скорости в осадочных породах до поверхности фундамента (возьмем, в среднем, 3 км/с). Тогда размер объекта будет равен  $V/2f = 3/2*0.0097=154.6$  км. Вполне возможно, что это колеблется Подмосковная впадина, на краю которой и стоит сейсмостанция «Москва» (рисунок 3.29).

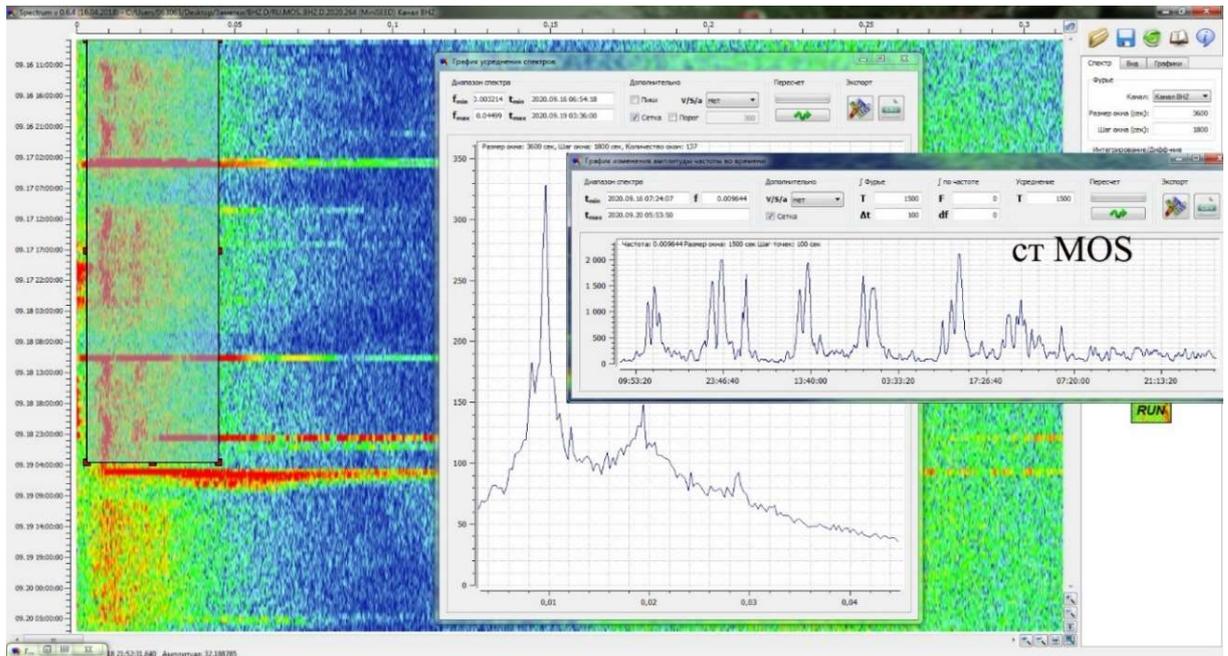


Рисунок 3.28 – Спектрограмма с врезками, показывающими усреднённый спектр и изменения амплитуды сигнала на частоте 0.0096 Гц

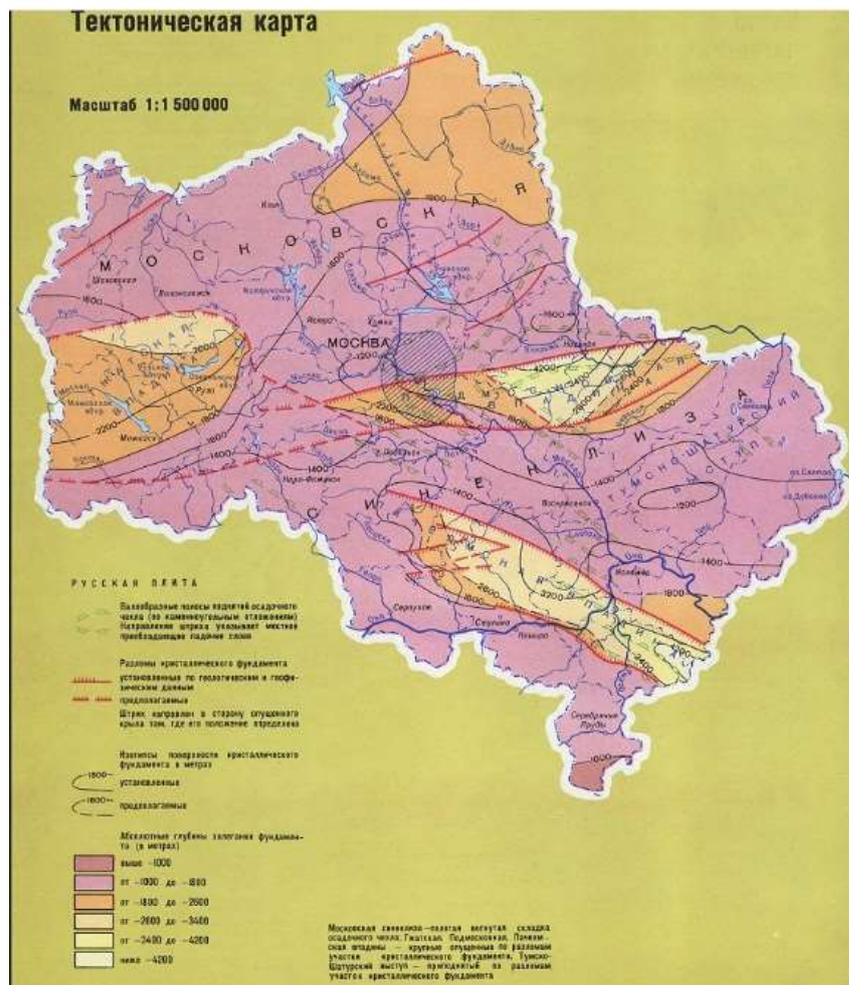


Рисунок 3.29 – Тектоническая карта Московской области

## **3.2 Создание и развитие сейсмической антенны на полигоне «Ключи» для решения инженерно-сейсмологических задач**

Приведем опыт модернизации сейсмической антенны, разрабатываемой СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, как инструмента для изучения природы микросейсм, вызванных влиянием различных техногенных или природных источников и их причинно-следственной связи.

В 2019 г. была выполнена установка экспериментальной сейсмической малоапертурной антенны на полигоне «Ключи». В качестве основного результата было определено, что показания сейсмической антенны позволяют выделять из зарегистрированных колебаний сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия работающего оборудования. Выделены источники колебаний, удалённые от точек наблюдения на 7 км и 15 км (воздушные компрессоры гиперзвуковой установки ИТПМ СО РАН и турбины Новосибирской ГЭС соответственно). Определены моменты включения, работы и отключения от сети воздушных компрессоров гиперзвуковой установки ИТПМ СО РАН. Был выявлен ряд существенных недостатков антенны, определенных в ходе эксплуатации. Во-первых, для получения более качественного сигнала необходимо изменить местоположение точек наблюдения, ввиду значительных шумовых помех в составе сигнала. Во-вторых, уровень регистрируемых сигналов недостаточно высок для определения сигналов от удаленных объектов.

Для устранения вышеописанных недостатков было сделано следующее.

Проведены работы по оптимизации параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных (пара регистратор – сейсмоприемник) для получения более качественного сигнала: проведена оценка характеристик различных типов сейсмоприемников – регистраторов для их дальнейшего включения в работу антенны, рассмотрены показания одиночных приборов с различных мест установки.

Проведены работы по расширению группы сейсморегистрирующей аппаратуры антенны (для дальнейшего когерентного суммирования сигнала от группы сейсмоприемников, с целью улучшения соотношения сигнал/шум сейсмической записи) и изучению поверхностных условий в районе установки сейсмической антенны.

### **3.2.1 Работы с целью оптимизации параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных**

Проведены опытные работы по резонансному приему сигналов, в точках пучностей поля стоячих волн исследуемого объекта. Для определения которых был использован метод стоячих волн [5,6], позволяющий определить динамические характеристики сооружения.

Показана возможность использования данного подхода для мониторинга техногенных сигналов.

Объектом исследования было выбрано сооружение на свайно-бетонной конструкции (рисунок 3.30). Сейсмическую аппаратуру устанавливали в сооружении и на его основании.



Рисунок 3.30 – Объект сейсмических наблюдений на полигоне «Ключи»

Для регистрации микросейсмических колебаний использовались трехкомпонентные пьезокерамические сейсмоприемники А1638 (производства ООО «Геоакустика» г. Зеленоград) и сейсмические регистраторы «Байкал-АСН», общее количество пар сейсморегирующей аппаратуры – 10, с ориентацией осей датчиков: X-север, Y-восток, Z-вертикально. Перед началом работ по регистрации сейсмическая аппаратура была проверена на идентичность. Тест на идентичность был проведен в сооружении, датчики и регистраторы устанавливались на основании на площадке в профиле 2 точке 4 (рисунок 3.31) на 15 минут непрерывной записи. Результаты проверки и краткие характеристики аппаратуры приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Сведения о сейсмических датчиках и регистраторах, использованных в эксперименте (паспортные данные).

№ регистратора	Тип регистратора	№ датчика	Тип датчика	Кэфф. преобр-я рег.(мкВ/дискрет)	Кэфф. преобр-я датч.(В/(м/с <sup>2</sup> )) (паспорт)	Итог кэфф. преобр-я датч (мкм/с <sup>2</sup> )/дискрет		
						N	E	Z
113	Байкал- 88	228	A1638	0.185	0.5	0.33	0.35	0.52
116	Байкал- 88	229	A1638	0.185	0.5	0.37	0.41	0.52
117	Байкал- 88	230	A1638	0.185	0.5	0.38	0.34	0.37
119	Байкал- 88	231	A1638	0.185	0.5	0.38	0.35	0.50
121	Байкал- 88	233	A1638	0.185	0.5	0.39	0.41	0.42
124	Байкал- 88	309	A1638	0.185	0.5	0.35	0.36	0.44
126	Байкал- 88	311	A1638	0.185	0.5	0.38	0.38	0.45
132	Байкал- 88	312	A1638	0.185	0.5	0.36	0.35	0.45
135	Байкал- 88	311	A1638	0.185	0.5	0.34	0.33	0.33
146	Байкал- 88	312	A1638	0.185	0.5	0.37	0.37	0.37

На рисунке 3.31 приведена схема наблюдения методом стоячих волн. Общее количество точек измерений составило 49 единиц. Для восстановления поля стоячих волн были установлены три опорные точки. Один сеанс, включающий в себя регистрацию с 7 точек наблюдения, занимал 15 минут. Анализ зарегистрированных данных производился по методике [5] с помощью программного пакета «Geoton», разработанного в ФИЦ ЕГС РАН.

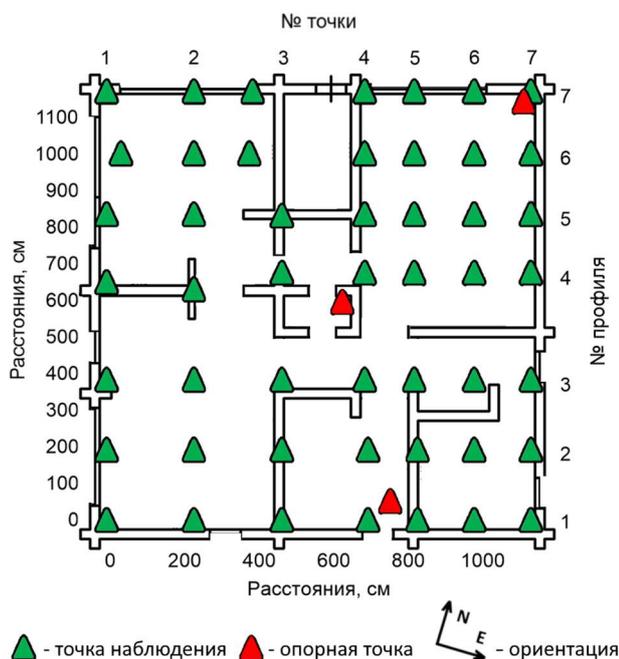


Рисунок 3.31 – Схема наблюдения методом стоячих волн

На рисунке 3.32 показан пример карт пространственных распределений значений выделенных колебаний на собственных частотах сооружения 4.3-4.7 Гц, полученных при обработке сейсмических записей. Из рисунка видно, что распределение значений амплитуд колебаний в пространстве неравномерно, это связано с тем, что свайно-бетонные конструкции также установлены несимметрично.

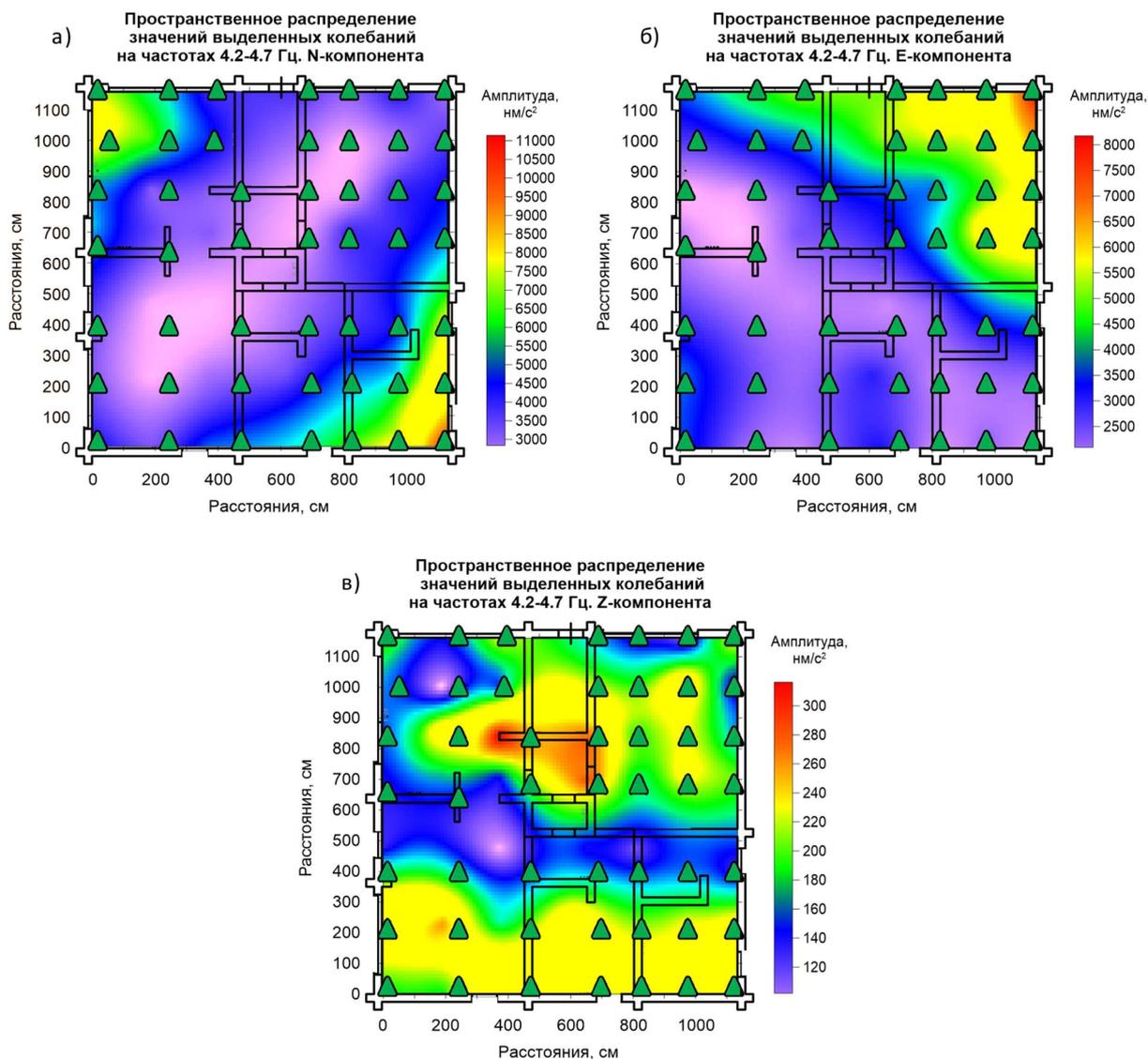


Рисунок 3.32 – Пример карты пространственных распределений значений выделенных колебаний на частотах 4.3-4.7 Гц: N (а), E (б) и Z (в) компоненты колебаний

Во время проведения работ в сооружении были установлены пять точек наблюдения, включающие в себя 5 пар регистраторов типа «Байкал-7» и сейсмоприемников типа СМЗ-КВ, с ориентацией осей датчиков: X-восток, E-север, Z-вертикально (рисунок 3.33). Точки наблюдения выбирались исходя из расположения узлов и пучностей N-компоненты колебаний на частотах 4.3-4.7 Гц (рисунок 3.32(а)). Перед началом работ по регистрации сейсмическая аппаратура была проверена на идентичность. Тест на идентичность был проведен в сооружении, датчики и регистраторы устанавливались на основании в области профиля 7, точки 7, на 15 минут непрерывной записи. Результаты проверки, краткие характеристики аппаратуры и место дальнейшей установки приведены в таблице 3.2.

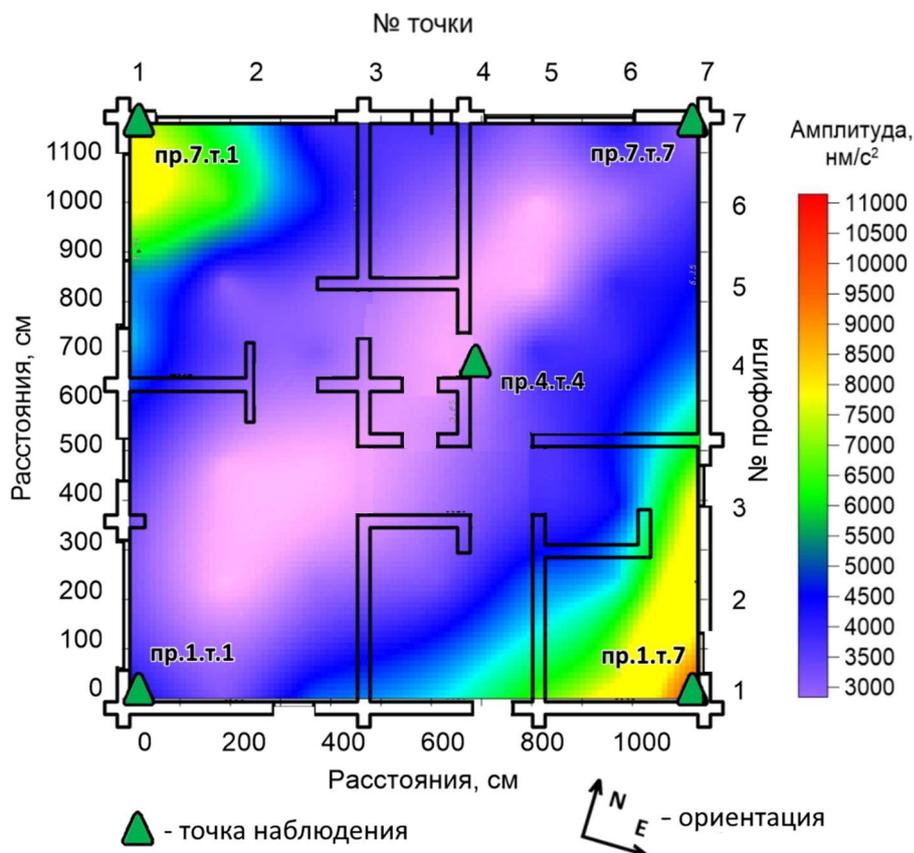


Рисунок 3.33 – Пример карты пространственных распределений значений выделенных колебаний на частотах 4.3-4.7 Гц N-компонента колебаний и схема расположения точек наблюдения сети мониторинга

Таблица 3.2 – Сведения о сейсмических датчиках и регистраторах, использованных в эксперименте (паспортные данные).

№ профиля	№ точки	№ рег.	№ датч. (N,E,Z)	Кэфф. преобр-я рег.(мкВ/дискрет)	Кэфф. преобр-я датч.(В/(м/с) (паспорт)	Итог. коэфф. преобр(нм/с)(паспорт)	Итог. коэфф. преобр(нм/с)(рассчет)		
							N	E	Z
1	1	60	227,7,447	0.5	135	3.7	2.61	3.35	4.14
4	4	72	125,350,281	0.5	135	3.7	2.78	2.31	2.96
1	7	93	77,397,442	0.5	135	3.7	2.78	2.50	6.06
7	7	128	276,336,840	0.5	135	3.7	2.85	2.28	3.01
7	1	240	337,438,139	0.5	135	3.7	2.91	2.67	4.12

На рисунке 3.34 показаны примеры усредненных спектров, полученных при обработке сигналов, зарегистрированных аппаратурой, установленной в точках наблюдения сети мониторинга. Для получения усредненных спектров 4-х часовая сейсмическая запись разбивалась на фрагменты длительностью 200 с, для каждого из них вычислялся амплитудный спектр, затем спектры усреднялись. На рисунке видно хорошее соответствие полученных спектров с картами пространственных распределений значений выделенных колебаний на частотах 4.3-4.7 Гц (рисунок. 3.33). Наиболее явная корреляция наблюдается на N-

компонентах зарегистрированных колебаний: видно почти 2-х кратное усиление колебаний в точках наблюдения, установленных в зонах пучностей (профиль 1 точка 7 и профиль 7 точка 1) относительно узлов (остальные точки) на собственной частоте сооружения, порядка 4.5 Гц.

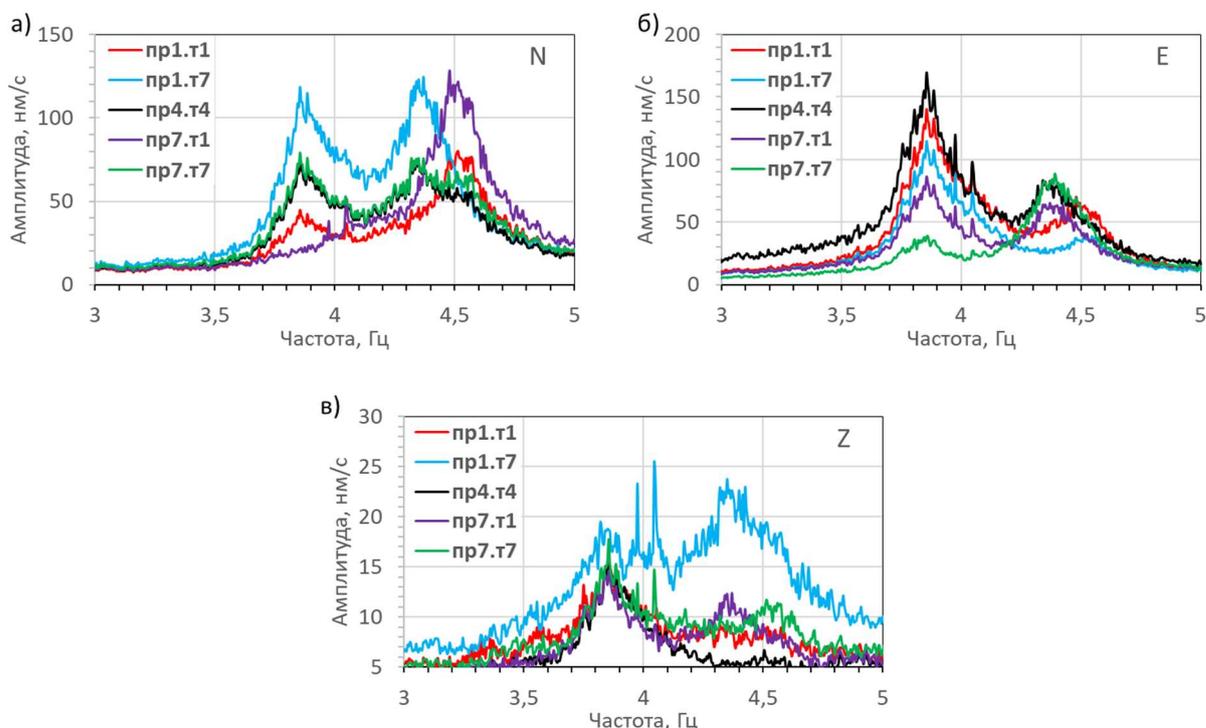


Рисунок 3.34 – Пример усредненных спектров, полученных при обработке сейсмических записей, зарегистрированных в сети мониторинга: (а, б, в) – N-, E- и Z-компоненты колебаний

Как отмечалось выше, основной целью установки данной сети мониторинга является определение возможности резонансного усиления техногенного сигнала по показаниям её регистрации. На рисунке 3.35 представлен усредненный за 4 часа амплитудный спектр Z-компоненты сейсмических записей, зарегистрированных сетью мониторинга. Из рисунка хорошо видны высокоамплитудные колебания на частотах 15, 16.3, 16.5, 16.7, 24.5, 24.9 Гц. Вероятно, данные колебания вызваны работой техногенных источников, так как высокоамплитудные собственные колебания сооружения смещены в зону более низких частот и не имеют такую высокую добротность. Наиболее высокоамплитудный сигнал наблюдается на частотах порядка 16 Гц.

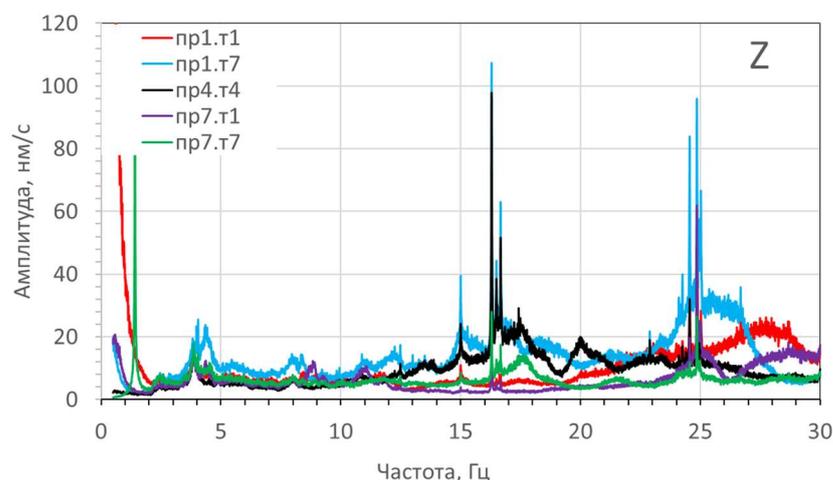


Рисунок 3.35 – Пример усредненных спектров, полученных при обработке сейсмических записей, зарегистрированных в сети мониторинга. Z-компонента колебаний

На рисунке 3.36 показан пример карт пространственных распределений значений выделенных колебаний на частотах сооружения 16.3-16.7 Гц, полученных при обработке Z-компонент сейсмических записей. Из рисунка видно, что распределение зон узлов колебаний в пространстве смещено в левую часть сооружения, а зон пучностей - в правую. Также видно, что ни одна из установленных точек наблюдения не попадает в центр пучности, все они находятся на периферии. На рисунке 3.37 показаны примеры вышеописанных усредненных спектров, но с масштабированием по оси частот. Хорошо видно, что амплитуды сигналов, зарегистрированных с точек наблюдения, находящихся на периферии, в несколько раз превышают значения, зарегистрированные в зонах узлов, то есть наблюдается резонансное усиление сейсмического сигнала.

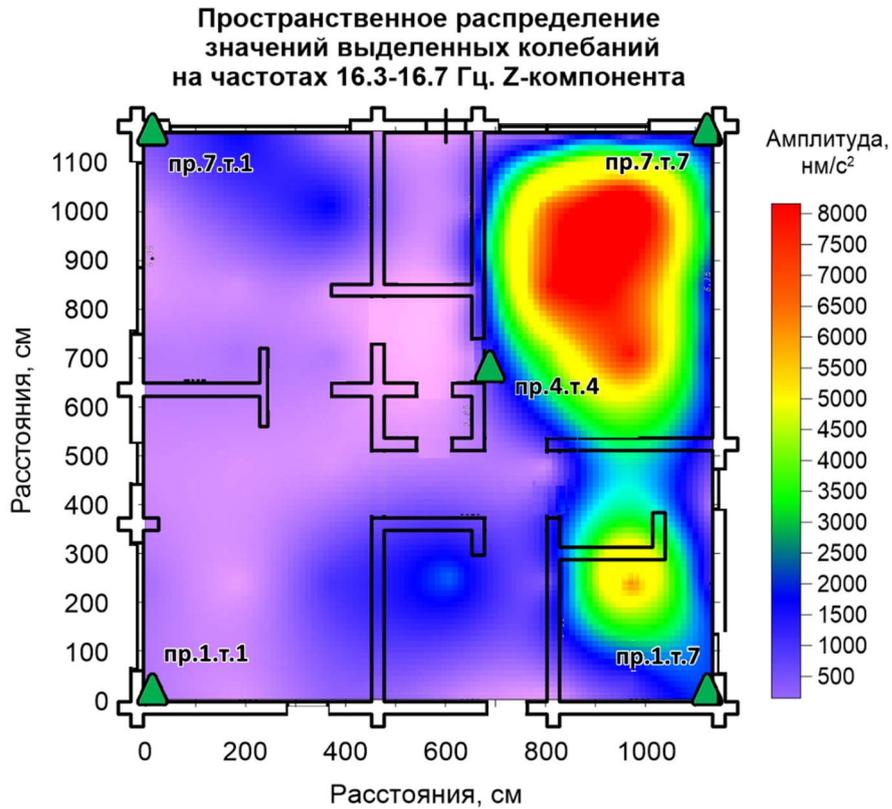


Рисунок 3.36 – Пример карты пространственных распределений значений выделенных колебаний на частотах 16.3-16.7 Гц. Z-компонента колебаний

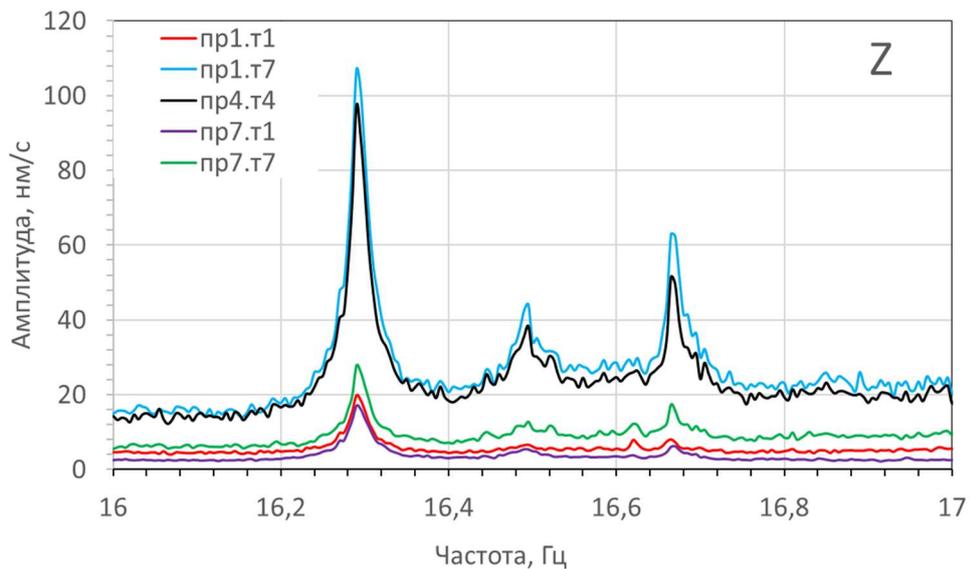


Рисунок 3.37 – Пример усредненных спектров, полученных при обработке сейсмических записей, зарегистрированных в сети мониторинга. Z-компонента колебаний

Проведены опытные работы по оптимизации параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных была опытная установка сейсмической аппаратуры. В результате которых удалось выделить сигналы, источниками которых являются техногенные воздействия работающего оборудования (турбины Новосибирская ГЭС и т.п.).

На рисунках 3.38 и 3.39 изображены примеры установки сейсмической аппаратуры на 10-ти и 100-метровые трубы пробуренных скважин. Для регистрации сигнала использовались пары регистраторов типа «Байкал-7» и сейсмоприемников «GD-4.5» с ориентацией осей датчиков: X-север, Y-восток, Z-вертикально.



Рисунок 3.38 – Примеры точек наблюдения: скважина 10м: (а) – место установки; (б) – схема расположения



Рисунок 3.39 – Примеры точек наблюдения: скважина 100м: (а) – место установки; (б) – схема расположения

На рисунке 3.41 представлен пример спектрограммы, полученной при обработке сигнала с точек наблюдения, установленных на скважине 10 м, и на стационарной сейсмической станции «Новосибирская ГЭС», обслуживаемой ФИЦ ЕГС РАН, которая удалена от

плотины на 537 м (риунок. 3.40). Сигнал, зарегистрированный с аппаратуры, установленной на скважине, был отфильтрован по амплитуде 6 мкм/с для устранения шумовых помех (сигнал свыше данного значения вырезался из сейсмической записи при помощи программного обеспечения «Geofilter»). В низкочастотной части спектрограмм отчетливо видны монохроматические колебания с частотой 5.2 Гц, вызванные работой турбин Новосибирской ГЭС на её лопастной частоте.

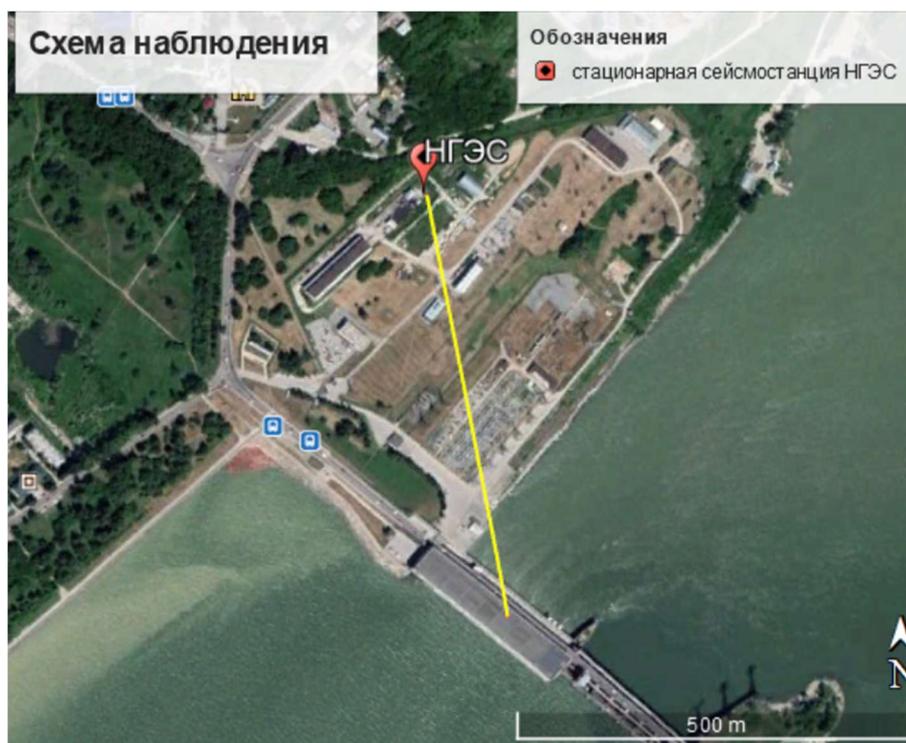


Рисунок 3.40 – Схема расположения стационарной станции «Новосибирская ГЭС»

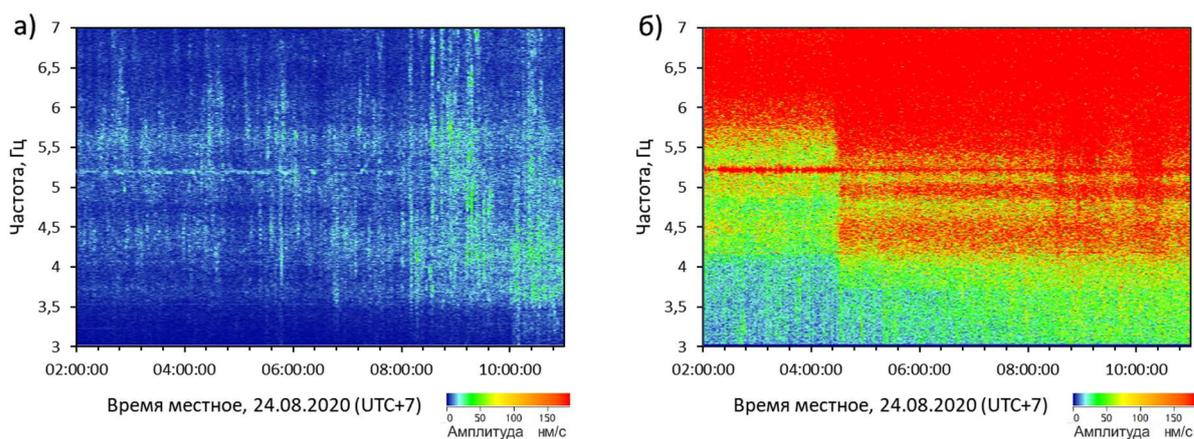


Рисунок 3.41 – Пример спектрограммы, полученной при обработке сейсмических записей, зарегистрированных: (а) - в точке наблюдения «скважина 10м» регистратор Байкал-7 и датчик GD-4.5 (б) в точке наблюдения «НГЭС» регистратор CMG-3ESP и датчик CMG-3ESP

На рисунке 3.42 представлен пример графиков выделенных колебаний с частотой 5.2 Гц на N-компоненте (вызванные работой Новосибирской ГЭС). К сожалению, на других компонентах сигнала, зарегистрированного на скважине, колебаний с частотой 5.2 Гц выделить не удалось. На графиках видно, что изменения амплитуд сигналов, зарегистрированных с обеих точек, хорошо коррелируют, видны моменты изменений нагрузки на гидроагрегатах.

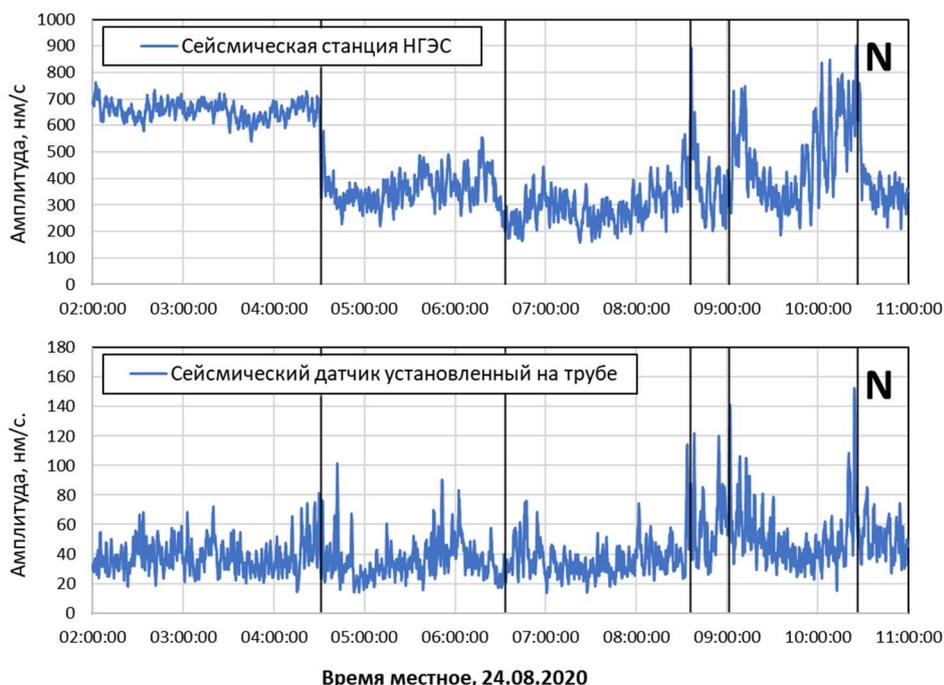


Рисунок 3.42 – График выделенных колебаний с частотой 5.21 Гц, вызванных работой турбин Новосибирской ГЭС, в спектрах записей, зарегистрированных в точках наблюдения станции «Новосибирская ГЭС» и «скважине 10 м»

В ходе исследования было сопоставлено изменение частоты 69.45-69.75 Гц с изменениями лунно-солнечных приливов (рисунки 3.43 и 3.44). Наблюдается хорошая корреляция между лунными приливами и изменениями колебаний частоты в указанном диапазоне, что скорее всего вызвано влиянием подъема/снижения уровня жидкости в скважине.

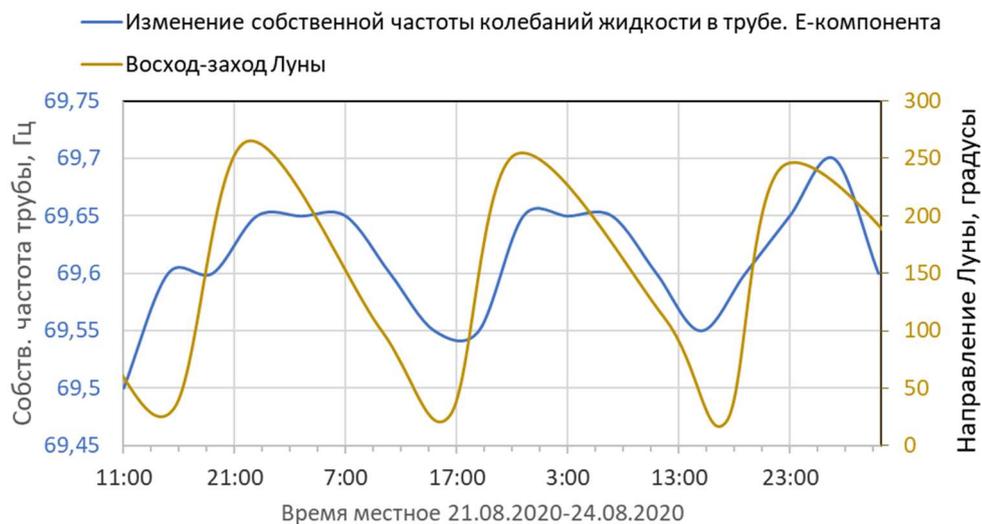


Рисунок 3.43 – График изменения частоты в области 69.6 Гц от изменения направления Луны, полученный с записи, зарегистрированной в точке наблюдения на скважине 10м. Направление Луны взято с сайта [www.timeanddate.com](http://www.timeanddate.com)

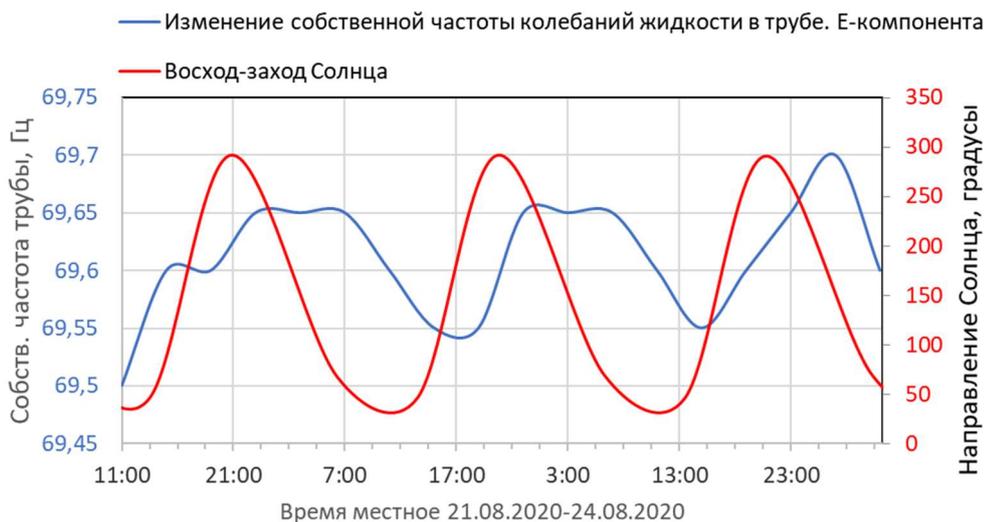


Рисунок 3.44 – График изменения частоты в области 69.6 Гц от изменения направления солнца, полученный с записи, зарегистрированной в точке наблюдения на скважине 10м. Направление солнца взято с сайта [www.timeanddate.com](http://www.timeanddate.com)

### 3.2.2 Работы по изучению поверхностных условий в районе установки сейсмической антенны сейсмическими методами

Проведённые исследования преследовали следующие цели:

1. Изучение возможности накопления монохроматических сигналов при площадных расстановках сейсмоприёмников.
2. Изучение возможности накопления и выделения стоячих волн.
3. Проведения экспериментов по регистрации сигналов от вибрационной установки, передающей сигнал через деревья.
4. Изучение строения верхней части разреза.

На рисунках 3.45 и 3.46 представлены схемы расположения источника и приёмников, включающих в себя регистраторы типа «Байкал» с датчиками различной модификации, при проведении различных экспериментов. Регистраторы программировались на непрерывную запись с частотой дискретизации 500 Гц, сейсмоприёмники устанавливались с ориентацией осей датчиков: X-север, Y-восток, Z-вертикально.

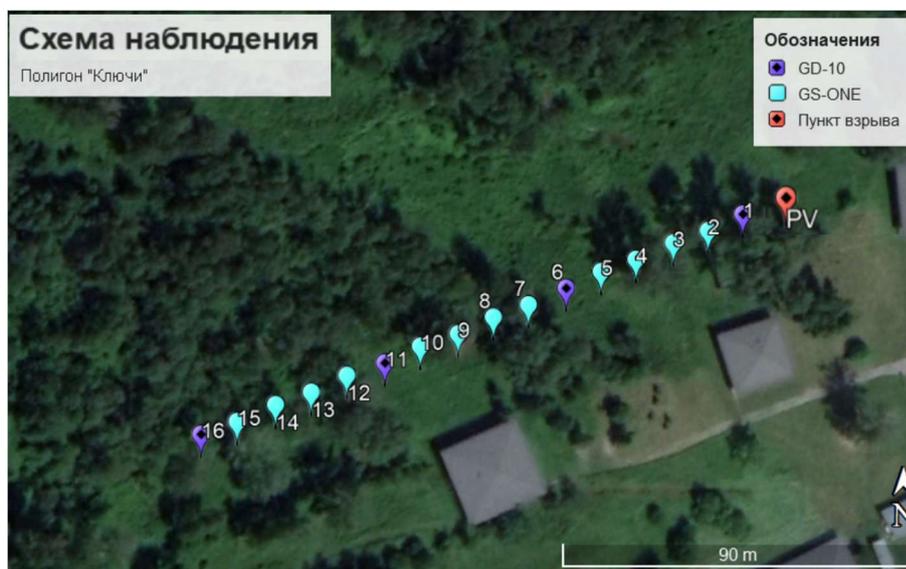


Рисунок 3.45 – Схема сейсмических наблюдений на полигоне «Ключи»

На профиле в 160 метров было установлено 12 вертикальных и 4 трёхкомпонентных сейсмоприёмника (рисунок 3.45). В таблице 3.3 приведены сведения об аппаратуре, установленной для регистрации, координаты пунктов регистрации и расстояния источник-приёмник. В землю был вбит кол и по нему провели 25 ударов кувалдой с интервалом в 23 с. Данный эксперимент моделировал речные работы и проводился с целью не только изучить строение верхней части разреза, но и исследовать формирование и распространение кратных волн в верхних слоях разреза.

На площадной расстановке (рисунок 3.46) регистраторы стояли в течение нескольких недель, велась непрерывная запись, в таблице 3.4 приведены основные сведения об аппаратуре, установленной для регистрации, координаты пунктов регистрации и расстояния источник-приёмник. Были проведены эксперименты по регистрации сигналов от ударов по вбитому в землю колу и от разно-нагруженного вибратора при вибрационном и импульсном воздействии на дебаланс.

Таблица 3.3 – Сведения о сейсмических датчиках и регистраторах, использованных в эксперименте (паспортные данные).

№РР	Широта	Долгота	Расстояние от ПВ, м	Тип рег.	Тип датч.	№ рег.	Коэфф. преобр-я рег.(мк В/дискрет)	Коэфф. преобр-я датч.(В/(м/с) (паспорт)	Итог. коэфф. преобр(нм/с)(паспорт)
пункт взрыва	54.85095	83.22695	0	Байкал-88	GD-10	126	0.185	28.8	6.42
1	54.85092	83.22680	10	Байкал-88	GD-10	132	0.185	28.8	6.42
2	54.85088	83.22666	20	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
3	54.85085	83.22652	30	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
4	54.85081	83.22637	40	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
5	54.85078	83.22623	50	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
6	54.85074	83.22609	60	Байкал-88	GD-10	146	0.185	28.8	6.42
7	54.85070	83.22594	70	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
8	54.85067	83.22580	80	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
9	54.85063	83.22566	90	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
10	54.85060	83.22551	100	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
11	54.85056	83.22537	110	Байкал-88	GD-10	119	0.185	28.8	6.42
12	54.85053	83.22522	120	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
13	54.85049	83.22508	130	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
14	54.85046	83.22494	140	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35

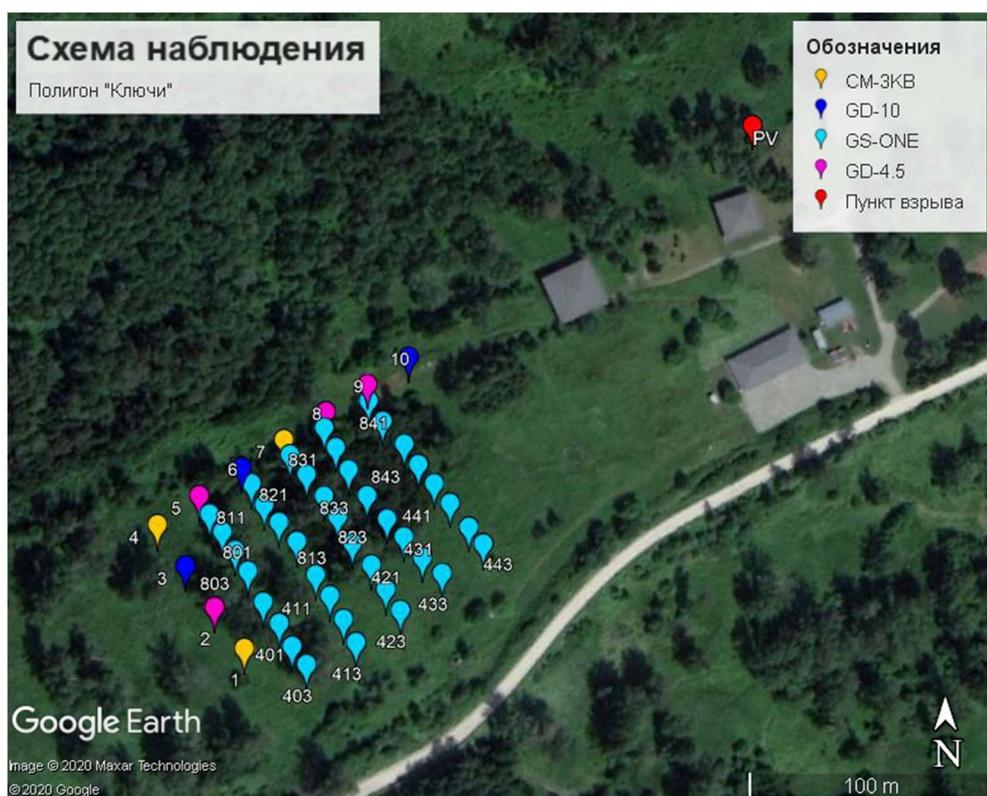


Рисунок 3.46 – Схема сейсмических наблюдений на полигоне «Ключи»

Таблица 3.4 – Сведения о сейсмических датчиках и регистраторах, использованных в эксперименте (паспортные данные)

№РР	Широта	Долгота	Расстояние от ПВ, м	Тип рег.	Нип датч.	№ рег.	Коэфф. преобр-я рег.(мк В/дискрет)	Коэфф. преобр-я датч.(В/(м/с)(паспорт)	Итог. коэфф. преобр(нм/с)(паспорт)
пункт взрыва	54.85095	83.22695	0	Байкал-88	GD-10	132 и 126	0.185	28.8	6.42
скважина 10м	54.83961	83.23729	1424	Байкал-7	GD-4.5	67	0.5	28.8	17.36
1	54.84906	83.22377	292	Байкал-7	CM-3KB	60	0.5	135	3.7
2	54.8492	83.22358	290	Байкал-7	GD-4.5	120	0.5	28.8	17.36
3	54.84935	83.2234	288	Байкал-88	GD-10	113	0.185	28.8	6.42
4	54.84949	83.22321	288	Байкал-7	CM-3KB	128	0.5	135	3.7
5	54.8496	83.22347	268	Байкал-7	GD-4.5	79	0.5	28.8	17.36
6	54.8497	83.22373	249	Байкал-88	GD-10	121	0.185	28.8	6.42
7	54.8498	83.22398	229	Байкал-7	CM-3KB	93	0.5	135	3.7
8	54.8499	83.22424	209	Байкал-7	GD-4.5	27	0.5	28.8	17.36
10	54.8501	83.22476	169	Байкал-88	GD-10	135	0.185	28.8	6.42
403	54.849	83.22414	281	Байкал-7	GS-ONE	195	0.5	78.7	6.35
402	54.84906	83.22406	280	Байкал-7	GS-ONE	195	0.5	78.7	6.35
401	54.84914	83.22398	276	Байкал-7	GS-ONE	195	0.5	78.7	6.35
400	54.84922	83.22388	275	Байкал-7	GS-ONE	195	0.5	78.7	6.35
803	54.84933	83.22378	271	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
802	54.8494	83.2237	270	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
801	54.84947	83.22362	269	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
800	54.84953	83.22354	269	Байкал-7	GS-ONE	25	0.5	78.7	6.35
413	54.84907	83.22445	263	Байкал-7	GS-ONE	160	0.5	78.7	6.35
412	54.84916	83.22437	259	Байкал-7	GS-ONE	160	0.5	78.7	6.35
411	54.84924	83.22428	255	Байкал-7	GS-ONE	160	0.5	78.7	6.35
410	54.84931	83.22419	253	Байкал-7	GS-ONE	160	0.5	78.7	6.35
813	54.84943	83.22408	249	Байкал-7	GS-ONE	131	0.5	78.7	6.35
812	54.8495	83.22396	250	Байкал-7	GS-ONE	131	0.5	78.7	6.35
811	54.84956	83.22387	250	Байкал-7	GS-ONE	131	0.5	78.7	6.35
810	54.84964	83.22379	249	Байкал-7	GS-ONE	131	0.5	78.7	6.35
423	54.84919	83.22472	242	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
422	54.84926	83.22463	239	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
421	54.84935	83.22454	236	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
420	54.84943	83.22442	234	Байкал-7	GS-ONE	187	0.5	78.7	6.35
823	54.84952	83.22432	231	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
822	54.84959	83.22424	230	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
821	54.84967	83.22413	229	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35
820	54.84974	83.22402	230	Байкал-7	GS-ONE	250	0.5	78.7	6.35

433	54.84932	83.22497	221	Байкал-7	GS-ONE	257	0.5	78.7	6.35
432	54.84937	83.22485	221	Байкал-7	GS-ONE	257	0.5	78.7	6.35
431	54.84945	83.22473	219	Байкал-7	GS-ONE	257	0.5	78.7	6.35
430	54.84951	83.22463	218	Байкал-7	GS-ONE	257	0.5	78.7	6.35
833	54.84959	83.2245	217	Байкал-7	GS-ONE	117	0.5	78.7	6.35
832	54.84969	83.22439	215	Байкал-7	GS-ONE	117	0.5	78.7	6.35
831	54.84977	83.22431	214	Байкал-7	GS-ONE	117	0.5	78.7	6.35
830	54.84984	83.22423	213	Байкал-7	GS-ONE	117	0.5	78.7	6.35
443	54.84942	83.22523	202	Байкал-7	GS-ONE	232	0.5	78.7	6.35
442	54.84948	83.22514	200	Байкал-7	GS-ONE	232	0.5	78.7	6.35
441	54.84957	83.22502	197	Байкал-7	GS-ONE	232	0.5	78.7	6.35
440	54.84964	83.22492	195	Байкал-7	GS-ONE	232	0.5	78.7	6.35
843	54.84971	83.22482	194	Байкал-7	GS-ONE	72	0.5	78.7	6.35
842	54.84978	83.22473	192	Байкал-7	GS-ONE	72	0.5	78.7	6.35
841	54.84986	83.2246	193	Байкал-7	GS-ONE	72	0.5	78.7	6.35
840	54.84994	83.22451	192	Байкал-7	GS-ONE	72	0.5	78.7	6.35

Зарегистрированные данные с точек наблюдения подвергались процедуре суммирования волновых форм с помощью программного обеспечения, разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Процедура предназначена для того, чтобы просуммировать все указанные каналы у набора регистраторов с целью получить усиление малоамплитудных сигналов, которые многократно записываются в ходе проведения эксперимента.

В результате суммирования записей, зарегистрированных в точках наблюдения, были получены сейсмограммы, представленные на рисунке 3.47 и построены сводные годографы.

На рисунке 3.48 видны Р-волны в первых вступлениях (синяя линия), звуковая волна (красная линия) и ниже (по оси времени) поле поперечных волн. После применения различных фильтров и других параметров обработки были выделены три волны в поле продольных (рисунок 3.48) и две волны в поле поперечных волн (рисунок 3.49), затем построены годографы этих волн.

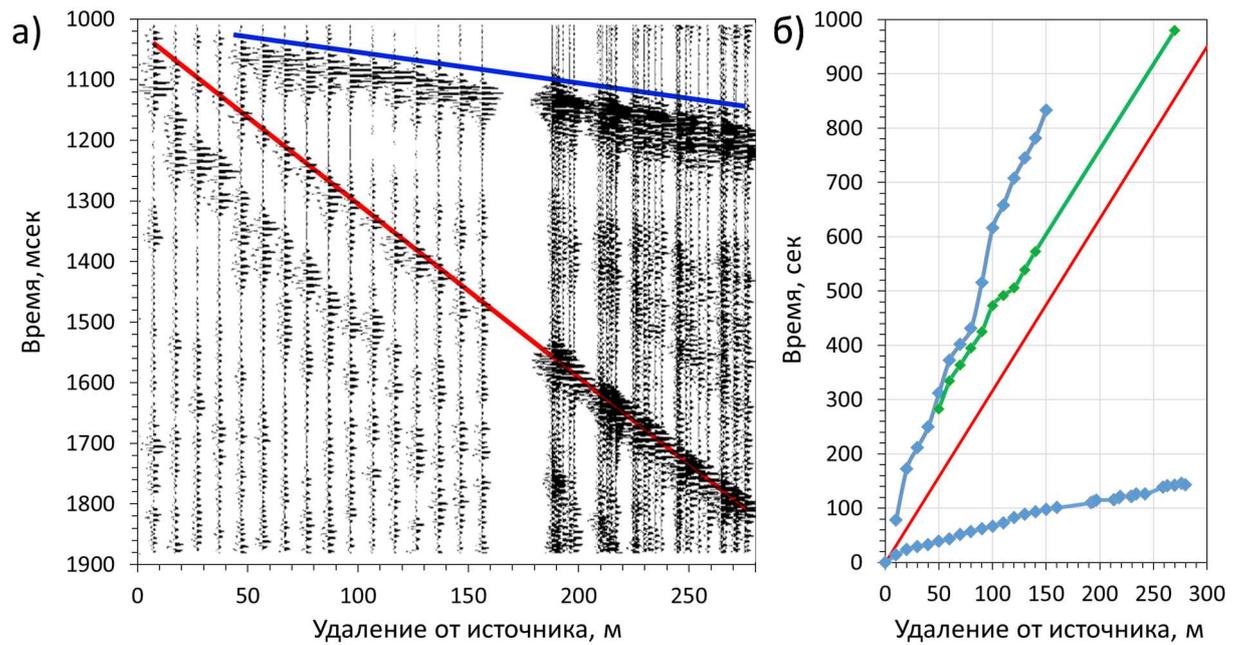


Рисунок 3.47 - Обзорная сейсмограмма при высокочастотной фильтрации данных, зарегистрированных с точек наблюдения на расстановке полигона «Ключи», характеризующая волновое поле (а) и сводные годографы (б)

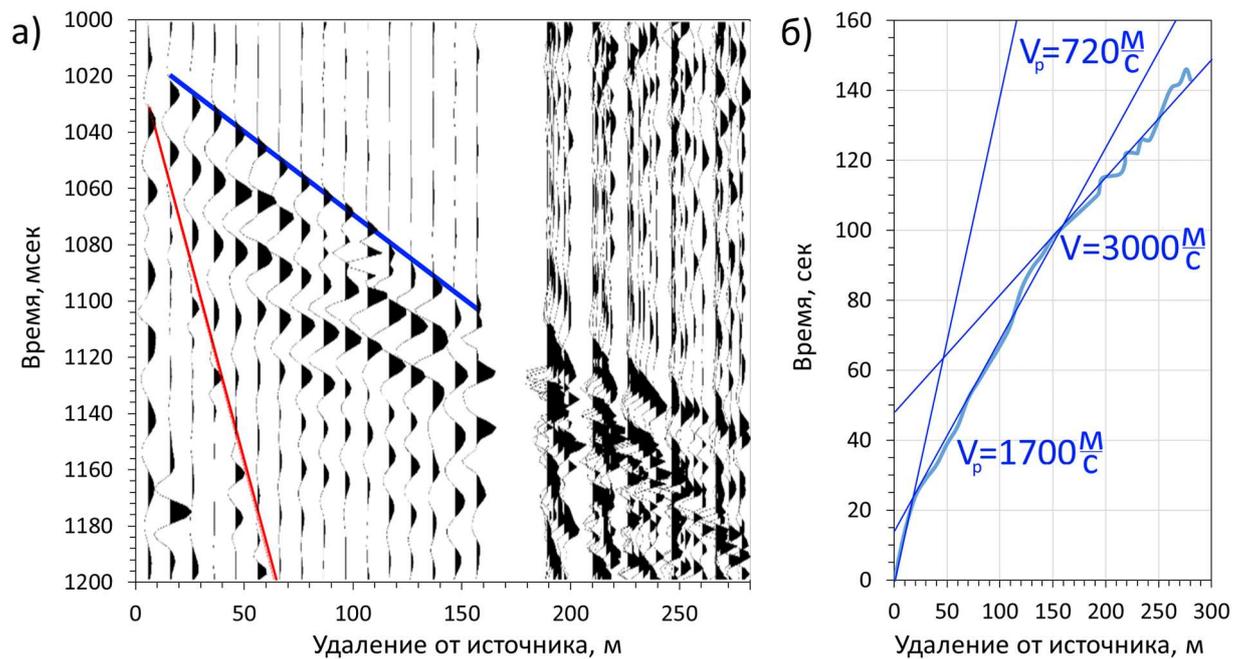


Рисунок 3.48 – Результат анализа данных, зарегистрированный с точек наблюдения на расстановке полигона «Ключи»: (а) – поле продольных волн, (б) – годографы продольных волн

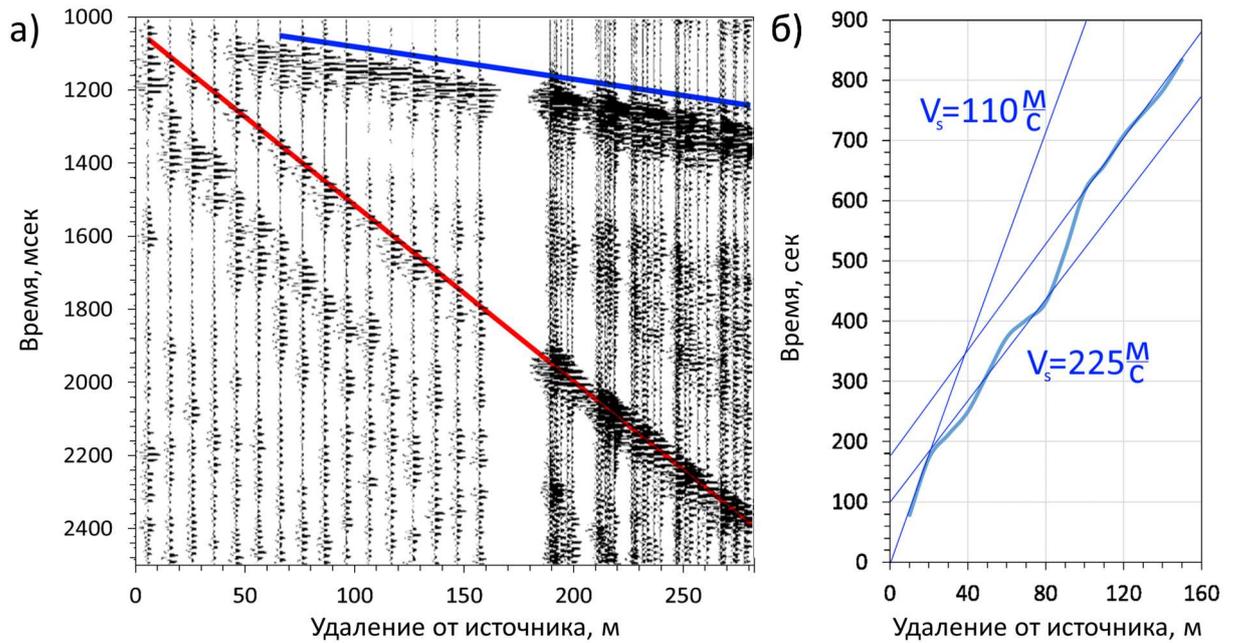


Рисунок 3.49 – Результат анализа данных, зарегистрированный с точек наблюдения на расстановке полигона «Ключи»: (а) – поле поперечных волн, (б) – годографы поперечных волн

По годографам продольных и поперечных волн видно, что на удалении порядка 90 метров от источника находится преломляющая граница, и далее наблюдается её углубление. Если в поле продольных волн в это время мы видим смену волн на более высокоскоростную, то в поле поперечных волн это место забито помехами и смены волн не наблюдается. Чтобы определить параметры разреза воспользуемся уравнением годографа преломлённых волн в трёхслойной модели:

$$T = t_{01} + t_{02} + \frac{1}{v_3} \quad (3.4)$$

$$t_{01} = \frac{2h_1 \cos(i_{13})}{v_1} \quad (3.5)$$

$$t_{02} = \frac{2h_2 \cos(i_{23})}{v_2} \quad (3.6)$$

$$\sin(i_{12}) = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.7)$$

$$\sin(i_{13}) = \frac{v_1}{v_3} \quad (3.8)$$

$$\sin(i_{23}) = \frac{v_2}{v_3} \quad (3.9)$$

$$t_0 = K h \quad (3.10)$$

$$K = \frac{2\cos(i)}{v} \quad (3.11)$$

Где для  $m$ -го слоя  $t_{0m}$ -минимальное время годографа,  $m$ -го слоя;  $i_{l,m}$ - критический угол луча, который падает на пласт  $h_m$  под углом с вертикалью в  $l$ -м слое;  $h_m$ -толщина  $m$  слоя,  $v_m$  скорость распространения волны  $m$ -слоя.

Используя полученные значения скоростей волн и формулы (3.4-3.11), получены расчетные данные для определения параметров разреза, которые приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчетные данные для определения параметров разреза на полигоне Ключи

тип волны	Поперечная, $s_1$	Поперечная $s_2$	Продольная, $p_1$	Продольная, $p_2$	Продольная, $p_3$
скорость $V$ , м/с	110	225	720	1700	3000
годограф, $t_0$	0	0.77	0.013	0.035	0.048
$\cos(i)$	0.872		0.906	0.971	0.824
коэффициент, $K$	15.86			2.51	0.969
глубина слоя $h$ , м		48		5.5	36.5
частота волны, $f_s=v/4h$	0,6 Гц	частота волны, $f_p=v/4h$	35 Гц	частота волны, $f_p=v/2h$	23.3 Гц

В результате расчета по S-волнам мощность слоя получилась 48 м, по Р-волнам выделено два слоя - 5.5 м и 36.5 м общей мощностью 42 м. В таких слоях должны образовываться стоячие волны. Для S-волн (слой на полупространстве формула  $f=v/4h$ ) с частотой 0.6 Гц. Для Р-волн: от слоя в 5.5 метров - 35 Гц, для двух объединенных слоев - 8,6 Гц (слой на полупространстве). Если рассматривать резонанс второго слоя ( $f_p=v/2h$ ) - 23.3 Гц.

Полученные данные были сопоставлены с таблицей распределения скоростей продольных и поперечных волн в горных породах (рисунок 3.50) и с результатами геолого-технической разведки, полученными при бурении скважины в 2013 г (рисунки 3.51, 3.52). По данным геолого-технической разведки в районе скважины 100 м (место бурения указано на рисунке 3.39) на глубине 46 метров находится слой глины с прослаиванием песков и галечником, а на глубине порядка 5 метров происходит обводнение пород. То есть, если рассматривать данные рисунка 3.50, с учетом полученных распределений скоростей (таблица 3.5), вышеописанным условиям отвечает только влажная глина.

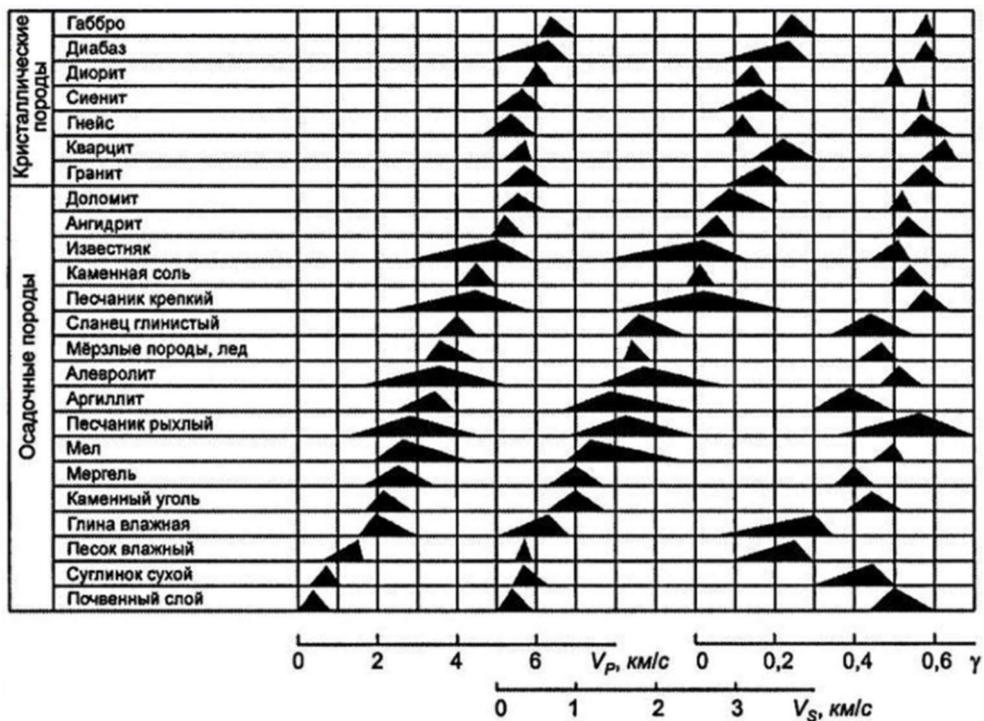


Рисунок 3.50 – Распределение скоростей продольных и поперечных волн в горных породах

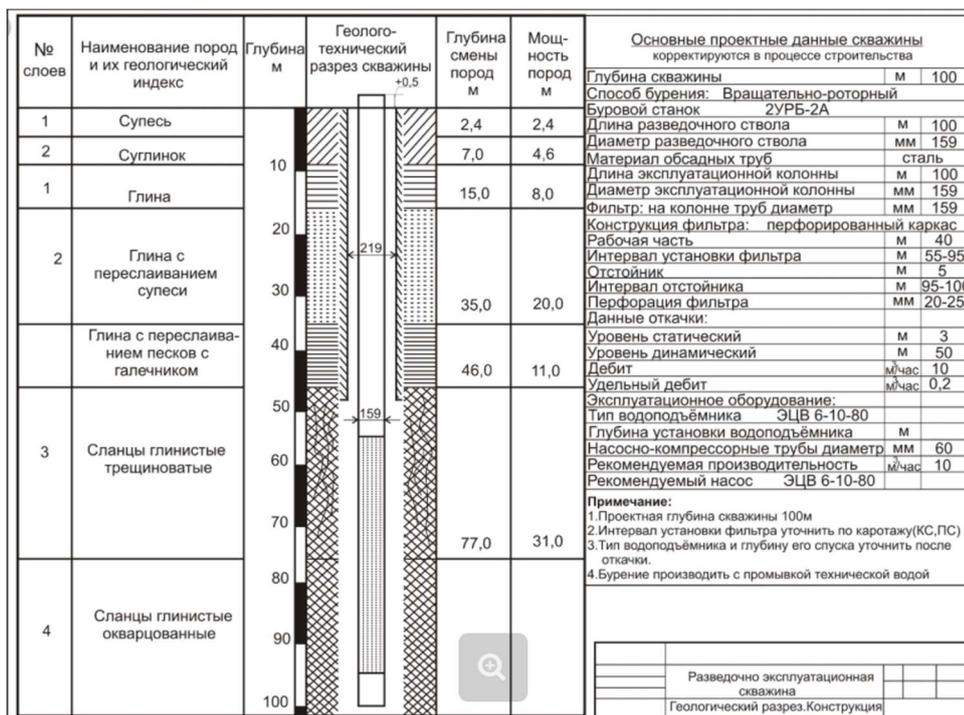


Рисунок 3.51 – Геолого-технический разрез скважины, полученный при бурении в 2013 г

Скважина № 5161

Дата начала бурения: 07.05.2013  
Дата окончания бурения: 08.05.2013

Абс. отметка устья: 175,61 м  
Масштаб: 1:100

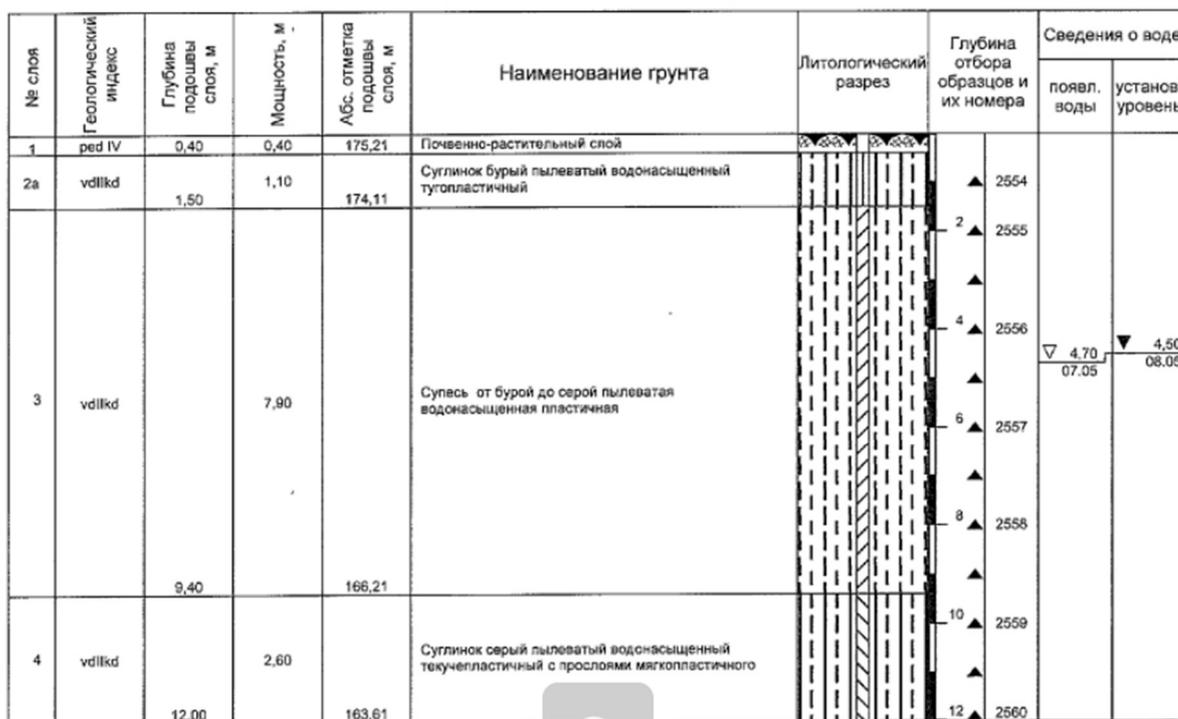


Рисунок 3.52 – Геолого-технический разрез скважины, полученные при бурении в 2013 г

В итоге проведены опытные работы по резонансному приему сигналов, показана возможность их использования для мониторинга техногенных сигналов. По показаниям записей с сейсмической антенны выделен набор колебаний, источниками которых являются техногенные воздействия работающего оборудования (турбины Новосибирская ГЭС и т.п.). Исследовано колебание жидкости в скважине, результаты сопоставлены с изменениями лунно-солнечного прилива. Описана система мониторинга, включающая 50 точек наблюдения. Выполнены работы по изучению верхней части разреза в районе расположения антенны, получены данные о глубинах слоев и типах пород залегания.

### 3.2.3 Работы по изучению поверхностных условий в районе установки сейсмической антенны электромагнитными методами

Исследования проводились летом 2020 г. методом ЗС (зондирование становлением поля). Схема расположения генераторных и измерительных контуров на участке работ приведена на рисунке 3.53.

Рабочая установка состояла из генераторной петли 200x200 м, приемных петель 100x100 м и 10x10 м, измерителя «Байкал».

При наблюдениях в одном пункте выполнялось три цикла измерений с малым током, амплитуда порядка 1,4 – 1.6А и с большим током 25 – 27А. Коэффициент усиления менялся

в пределах 1-16. Уровни амплитуды токовых импульсов регистрировались в цифровом виде на электронный носитель. При обработке сигналов программным путем производилась нормировка каждого единичного воздействия на соответствующий ему уровень токового импульса.

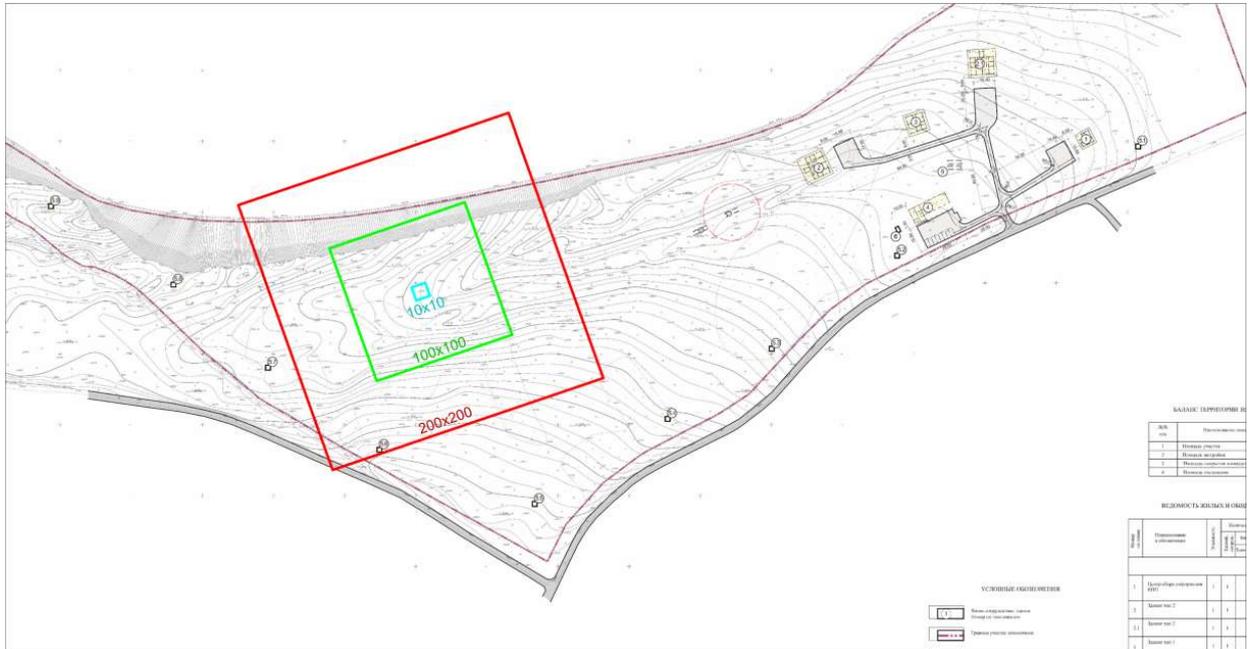


Рисунок 3.53 – Расположение установок ЗС в плане

Первичные полевые измерения сигналов от этих установок с различными моментами измерительных контуров и уровнями токовых импульсов показаны на рисунке 3.54.

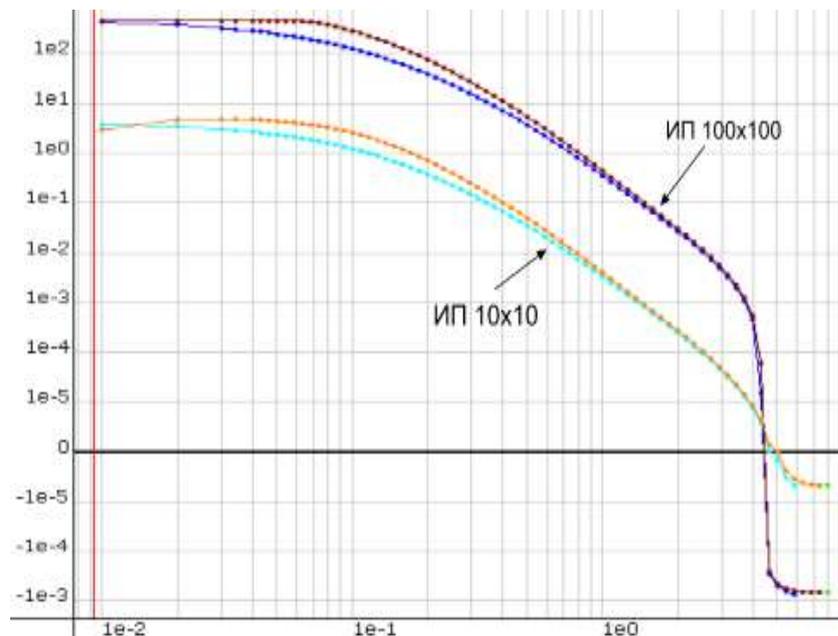


Рисунок 3.54 – Процессы ЗС на большой и малой измерительных петлях

В процессе обработки исходных полевых материалов производилась нормировка сигналов на моменты приёмных петель, уровней токовых импульсов и коэффициентов усиления. Осуществлялась фильтрация сигнала и подавления техногенных электромагнитных помех.

Результаты обработки зарегистрированных сигналов с различными параметрами регистрации и их уровни относительной погрешности приведены на рисунке 3.55.

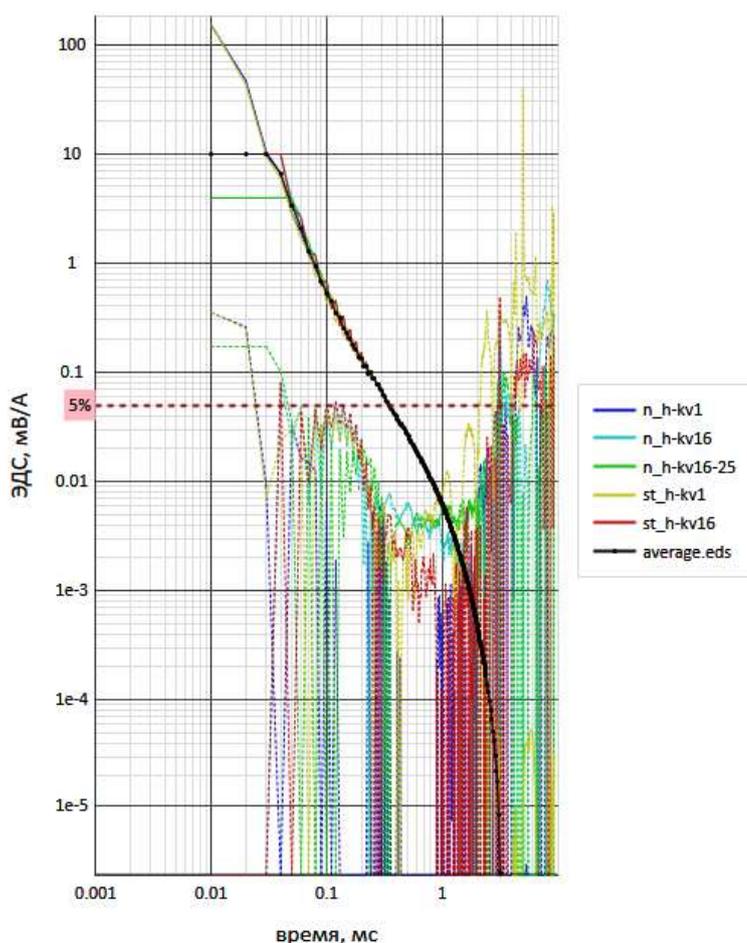


Рисунок 3.55 – Кривая ЭДС и график относительной погрешности

Анализ значений относительной погрешности измерений показывает, что в рабочем интервале 0,1 – 20 мс относительная погрешность в этом пункте в среднем не превышает 1.0 – 4.0 %.

Для более достоверного подбора геоэлектрической модели в методе ЗС был привлечен результат одномерной инверсии электротомографического профиля длиной 360 м, выполненного в комплексе с измерениями ЗС. Конфигурация профиля приведена на рисунке 3.56.

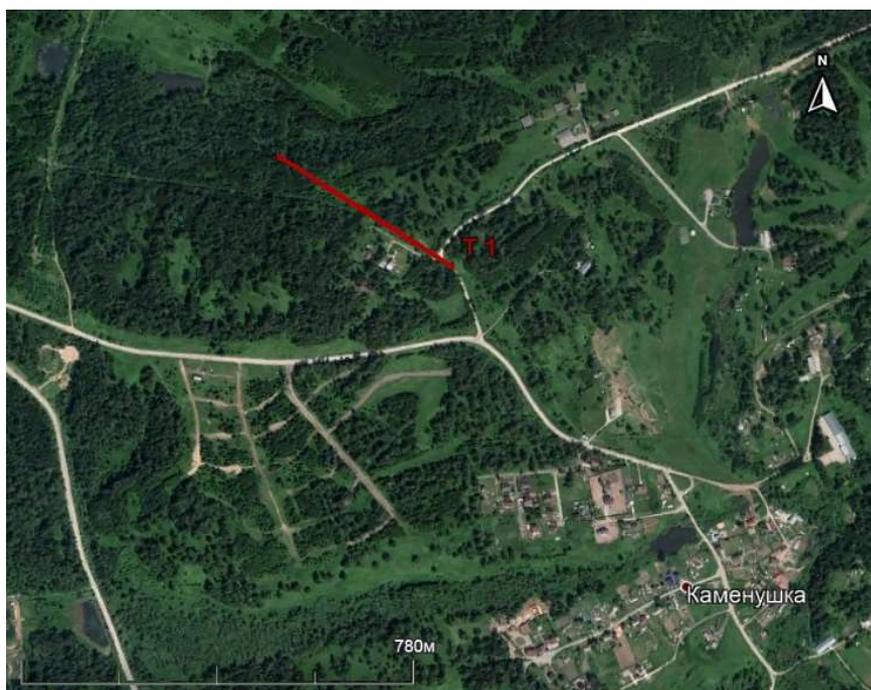


Рисунок 3.56 – Расположение профиля электротомографии в плане

На рисунке 3.57 представлен геоэлектрический разрез верхней части осадочных пород по результатам 1D инверсии, а также приближенная усредненная электрофизическая модель среды участка, которую можно использовать в качестве модели ВЧР для метода ЗС.

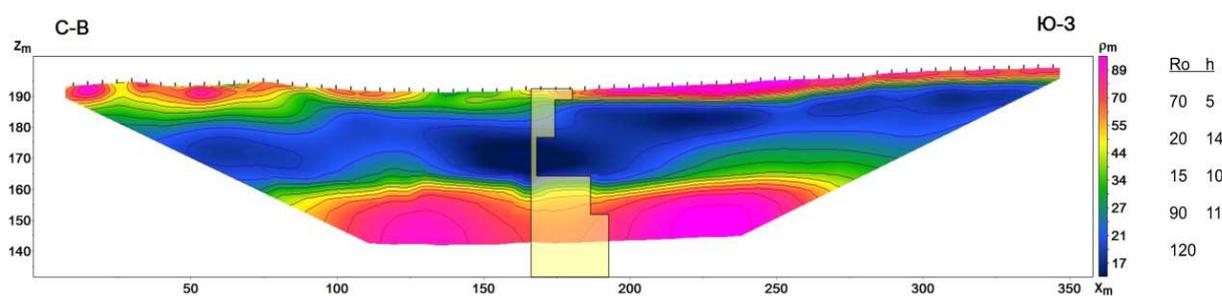


Рисунок 3.57 – 1D инверсия электротомографического разреза

Если зафиксировать при подборе модель ВЧР, полученную из разреза электротомографии, то подбор геоэлектрической модели по данным измерений нестационарных электромагнитных полей (ЗС) представлен на рисунке 3.58.

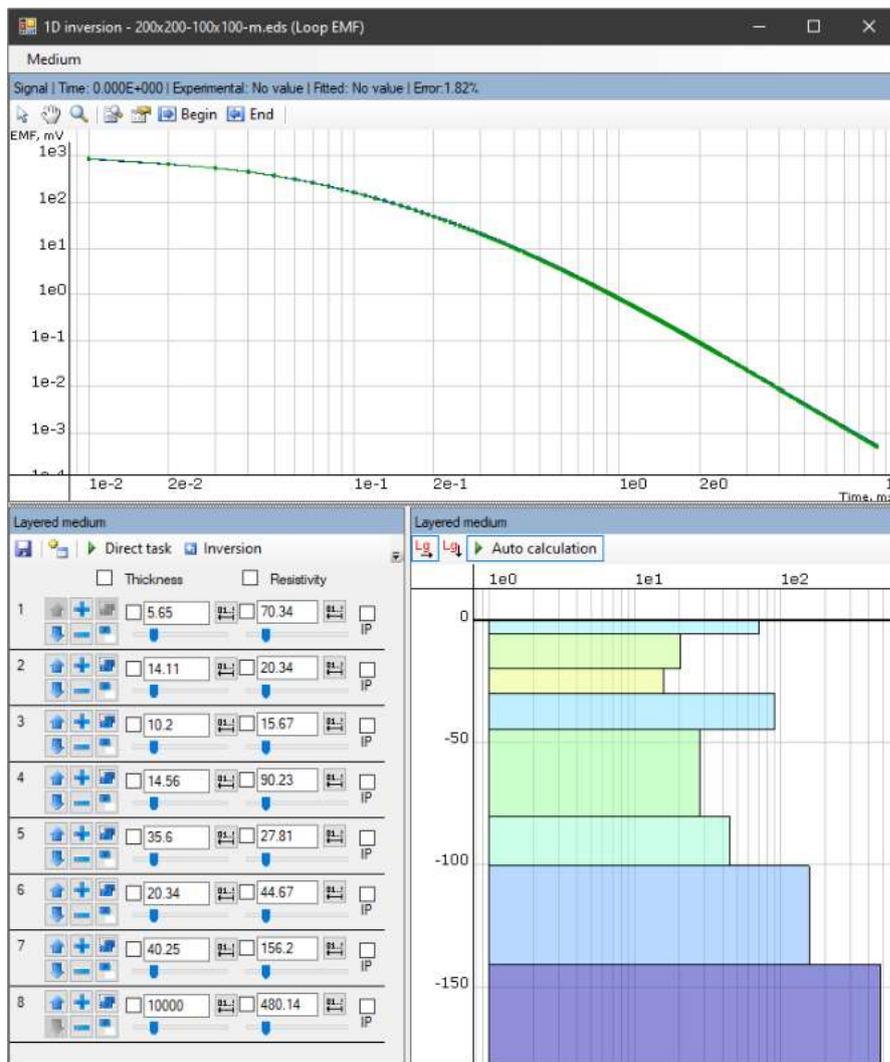


Рисунок 3.58 – Подобранная слоистая среда с учетом ВЧР

Результат одномерной инверсии данных зондирования становлением поля (ЗС) на полигоне «РАДИКС» приведен на рисунке 3.59.

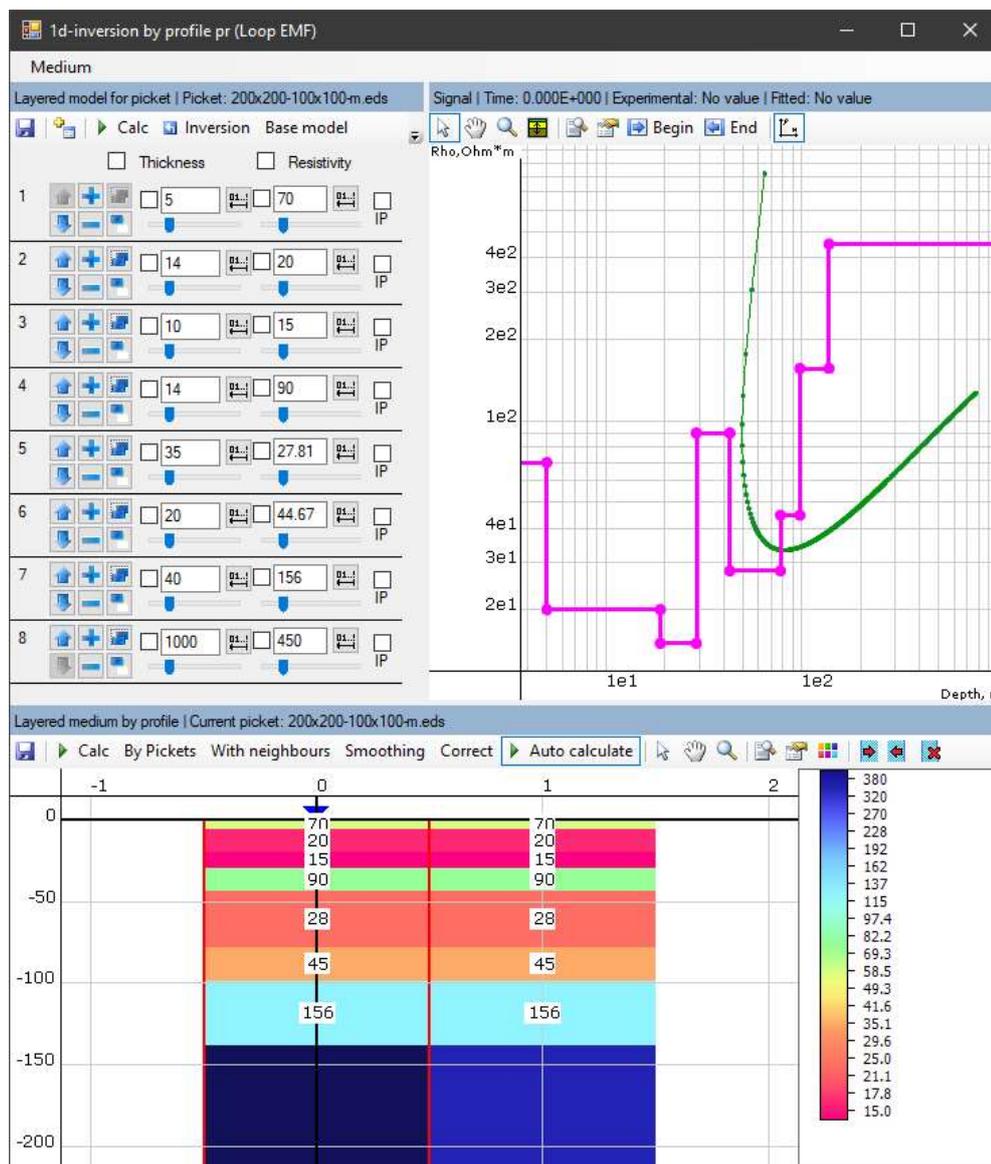


Рисунок 3.59 – Одномерная инверсия

Геоэлектрический разрез представлен в виде восьми геоэлектрических горизонтов, кровля опорного горизонта со значениями УЭС порядка 450 Ом\*м залегает на глубине порядка 138 метров.

Следует также выделить промежуточные горизонты со следующими значениями УЭС:

- четвертый горизонт, значения УЭС 90,00 Ом\*м, кровля на глубинной отметке 29 метров;
- шестой горизонт, значения УЭС 44,67 Ом\*м, кровля на глубинной отметке 78 метров;
- седьмой горизонт, значения УЭС 156,00 Ом\*м, кровля на глубинной отметке 98 метров.

### 3.3 Мониторинг собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС

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) [7]. 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 [8] и Чиркейской ГЭС, а также на аналогичных крупных плотинах за рубежом, 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. [9]. Эти изменения являются сезонными и не связаны с дефектами в теле плотин.

Мониторинг собственных частот плотин ГЭС чаще всего проводится по данным сейсмических станций, установленных непосредственно в теле плотины [10]. Это имеет ряд очевидных достоинств, в частности максимальный уровень сигнала (при правильном выборе места установки станции) и минимальные помехи от других источников. Но при этом такой способ мониторинга, как правило, значительно ограничен во времени и определяется сроком контракта на исследования с эксплуатирующей ГЭС компанией. Многолетних непрерывных сейсмических наблюдений внутри станций практически нет.

Представленный в данной главе мониторинг проведён по данным сейсмической станции «Черёмушки», установленной в 4.4 км от плотины в скальном горном массиве на левом берегу Енисея. Это позволило собрать практически непрерывный массив наблюдаемых данных с 2001 года.

Методика обработки данных наблюдений сейсмической станции следующая. По записям микросейсмических колебаний рассчитывались усредненные по интервалам в течение 24 часов спектры. По их локальным максимумам амплитуд определялись значения частот, соответствующих модам, определенным по данным исследования частот собственных колебаний плотины [11, 12] (рисунок 3.60). Для повышения качества выявляемых частот собственных колебаний сейсмические записи были подвергнуты предварительной фильтрации по амплитуде с целью минимизировать влияние землетрясений и иных сейсмических событий.

Расположение сейсмической станции на удалении от плотины безусловно, повысило уровень внешних микросейсм относительно сигнала, но тем не менее, достаточно точно в течение всего периода наблюдений прослеживаются 3-я, 4-я и 5-я моды. Их амплитуда на усреднённом спектре превышает фон в примерно в 2 раза. Менее чётко, но устойчиво

наблюдаются 6-я и 7-я моды. 1-я мода в основном выделяется чётко, но в отдельные периоды перекрывается микросейсмическим шумом. Хуже всего прослеживается 2-я мода, на некоторых временных интервалах она не выделяется вообще. При этом наилучшим образом частоты собственных колебаний плотины прослеживались на горизонтальных E (восток) и N(север) компонентах. Опытным путём установлено, что 1-я, 3-я, 4-я и 5-я моды наилучшим образом просматриваются на E-компоненте, а 2-я, 6-я и 7-я – на N-компоненте (рисунок 3.60).

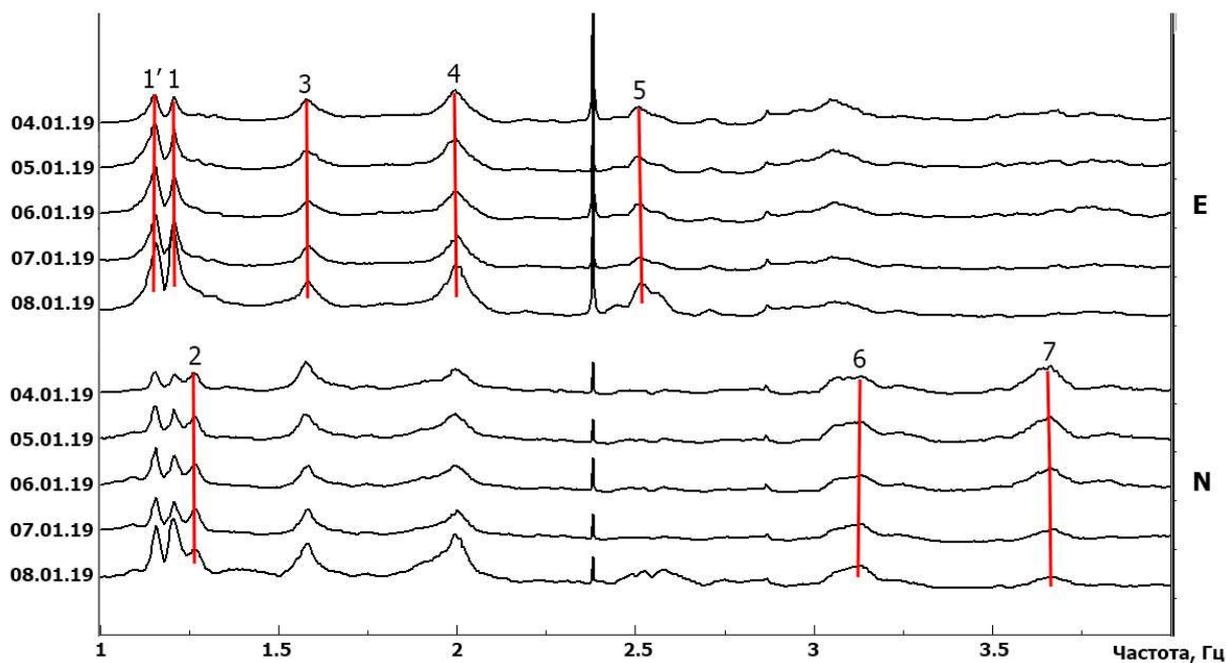


Рисунок 3.60 – Амплитудные пики, соответствующие частотам собственных колебаний ГЭС, на усреднённых спектрах сейсмограмм компонент E (вверху) и N(внизу). Над пиками подписаны номера соответствующих мод

Рядом с 1-й модой большую часть года (кроме периода с марта по начало июня) наблюдается ещё один локальный максимум на частотах 1.14 – 1.17 Гц, который условно обозначен как мода 1'. Чем он является, точно не установлено. Возможно, это еще одна из собственных частот плотины.

Рассмотрим более подробно, как меняются частоты собственных колебаний ГЭС с течением времени и в зависимости от уровня наполнения водохранилища. На рисунке 3.61 представлены графики названных параметров за период 2018-2020 гг (по март 2020 г). В целом, видна однозначная сезонная повторяемость уровня частот собственных колебаний ГЭС, а также обратная корреляция их с уровнем водохранилища; с ростом УВБ частоты понижаются. Подобная зависимость характерна для плотин ГЭС и объясняется исследователями изменением присоединенной массы воды (чем больше масса, тем ниже собственная частота и наоборот).

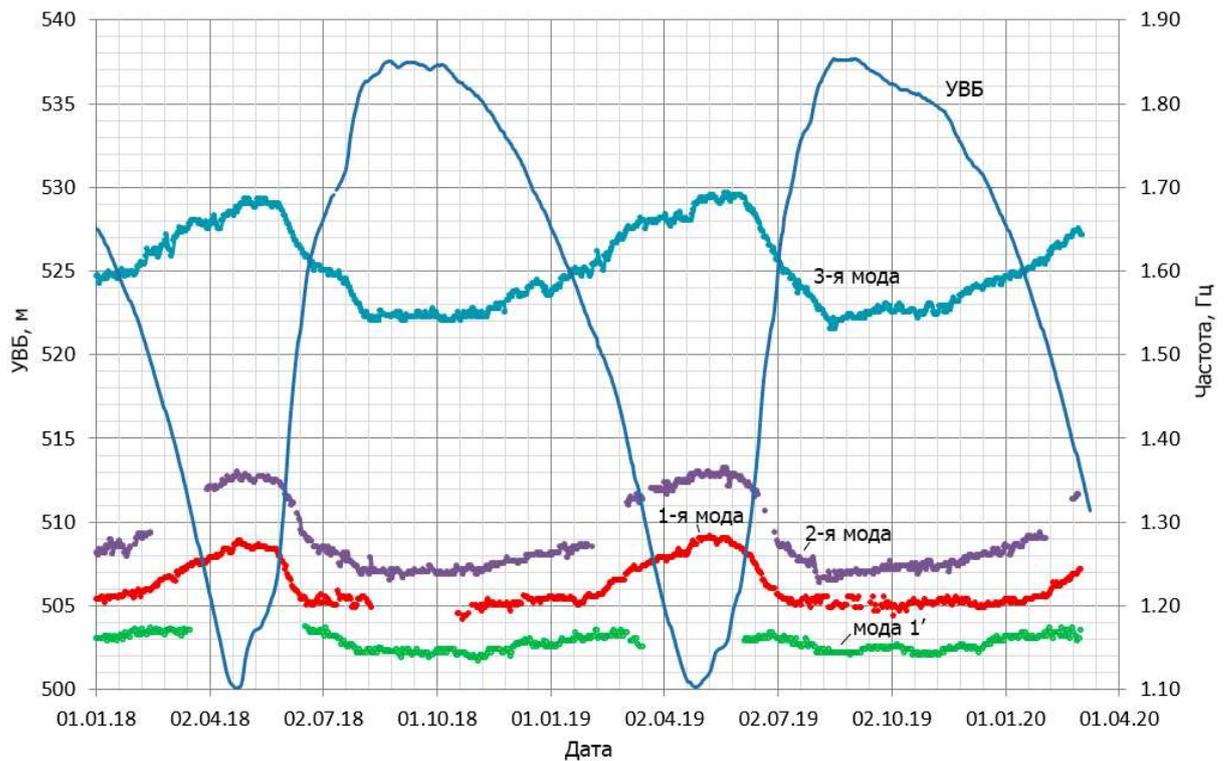


Рисунок 3.61 – Изменение уровня Саяно-Шушенского водохранилища (УВБ) и значений частот первых трех мод собственных колебаний плотины в 2018-2020 гг

Но помимо сезонных колебаний наблюдаются и многолетние изменения в частотах собственных колебаний плотины. Так, начиная с 2001 года собственные частоты постепенно возрастают, особенно заметным был рост в период до 2010-2011 годов, а после многолетние изменения практически прекратились (рисунок 3.62). В целом, усреднённые частоты 3-й и 4-й мод за первое десятилетие наблюдений выросли примерно на 0.025 – 0.030 Гц. Это значит, что ещё в период 2001-2010 годов в плотине Саяно-Шушенской ГЭС проходили глобальные процессы, влияющие на её частоту собственных колебаний. Можно предположить, что шёл процесс консолидации плотины.

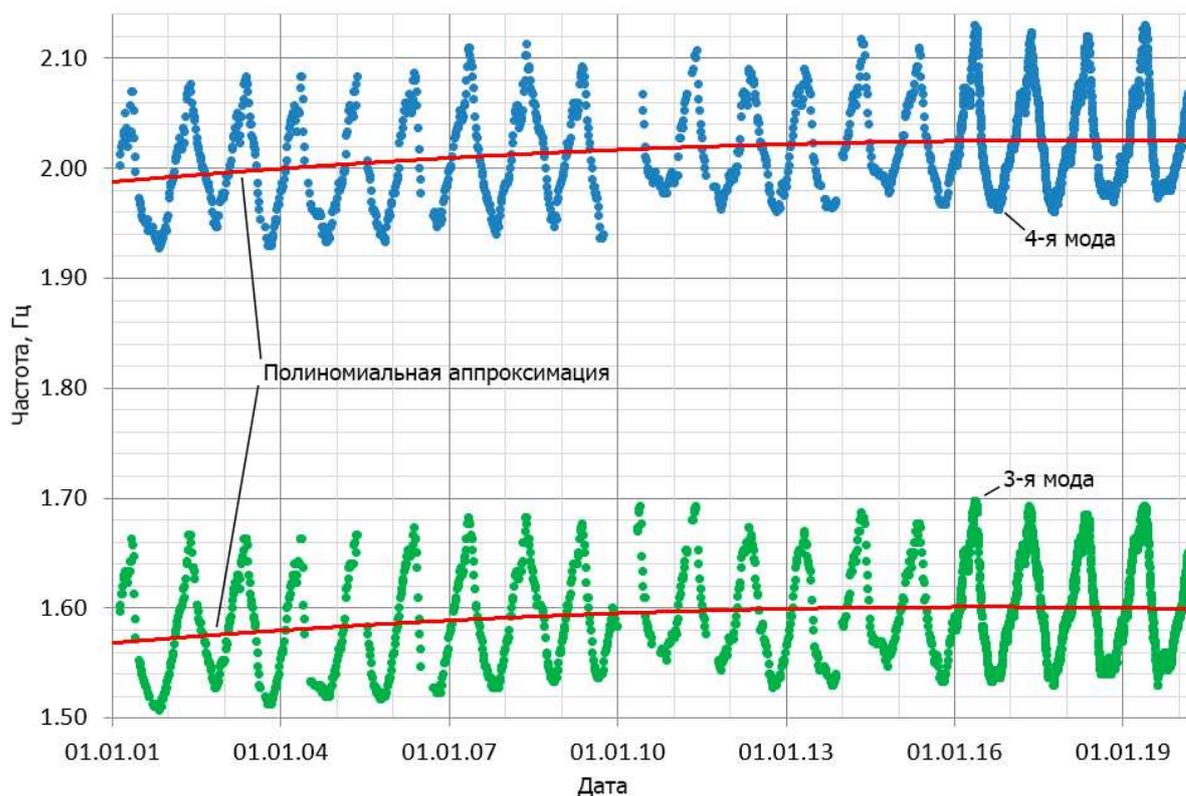


Рисунок 3.62 – Изменения частот собственных колебаний плотины 3-й и 4-й мод за весь период наблюдений, и их полиномиальная аппроксимация 2-й степени

Рассмотрим также, какие еще факторы, кроме присоединенной массы воды, могут влиять на значения частот. Для этого построим зависимости между значениями частот и УВБ (рисунок 3.63). Из него видно, что зависимость между значениями частот и УВБ неоднозначная. Графики имеют отличия в зависимости от режима водохранилища – его наполнения или сработки. В режиме наполнения отмечается явное запаздывание изменений частот от хода изменений УВБ. Это приводит к образованию эллипсообразной кривой. Аналогичный эффект наблюдался и

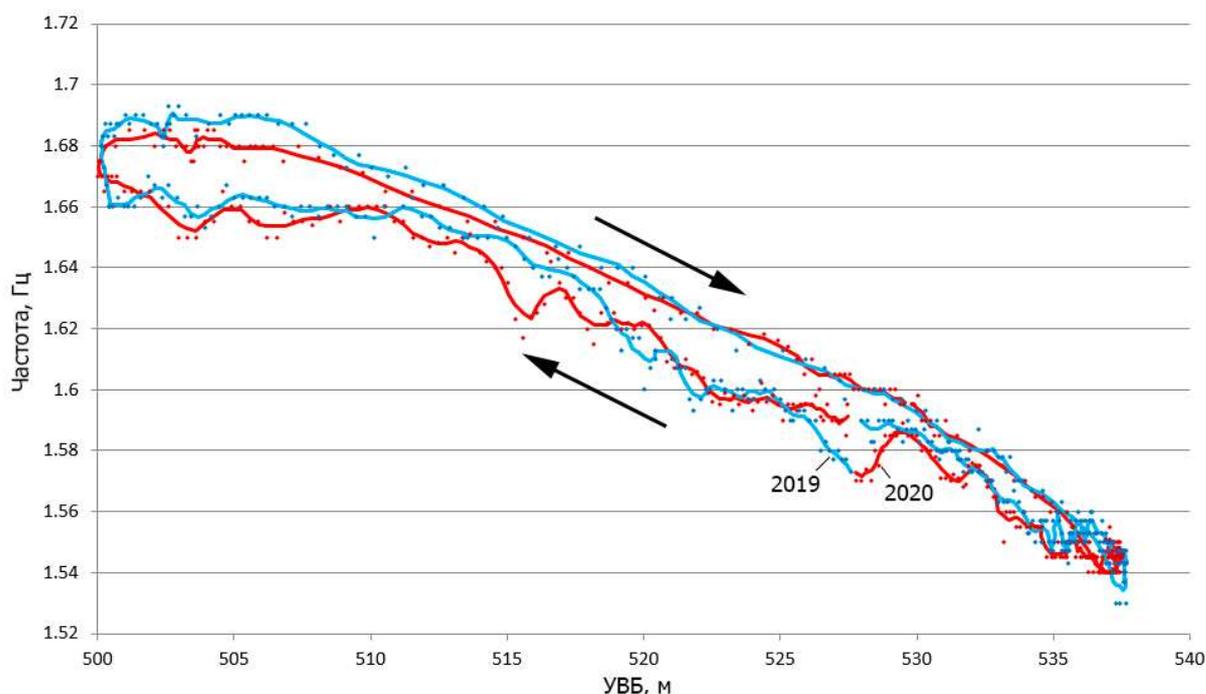


Рисунок 3.63 – Зависимость собственных частот колебаний плотины (на примере 3-й моды) от УВБ. Показаны данные за 2018 (красным цветом) и 2019 (синим цветом) годы. Точками показаны значения, кривыми – их сглаженная аппроксимация, стрелками – направление изменений с течением времени

Таким образом, можно сделать вывод, что мониторинг состояния плотины ГЭС по собственным частотам колебаний в период сработки водохранилища крайне затруднён, ибо изменение частоты зависит от нескольких факторов, влияние которых очень сложно оценить количественно. В частности, масса намёрзшего на плотину льда постоянно изменяется, так как регулярно происходят как дополнительное намерзание, так и откол. Всё это влияет на частоту собственных колебаний плотины, зачастую приводя к скачкообразным изменениям.

Напротив, в период наполнения водохранилища имеется чёткая зависимость частоты от УВБ, а влияние иных факторов минимально, что позволяет проводить мониторинг состояния плотины с достаточно высокой точностью.

На рисунке 3.64 приведены графики зависимости 3-й моды собственных колебаний плотины от УВБ за период 2015 – 2016 годов. Если в начале процесса наполнения водохранилища ещё наблюдаются заметные отклонения значений частот в разные годы (связанные, по-видимому, со сходом остатков льда с плотины), то примерно со значений УВБ в 505 – 506 м над уровнем моря графики практически синхронны. Отклонения между ними не превышает 0.020-0.025 Гц, что практически на уровне погрешности снятия частот. Это свидетельствует о стабильном состоянии плотины Саяно-Шушенской ГЭС в последние годы и отсутствии в ней каких-либо развивающихся дефектов.

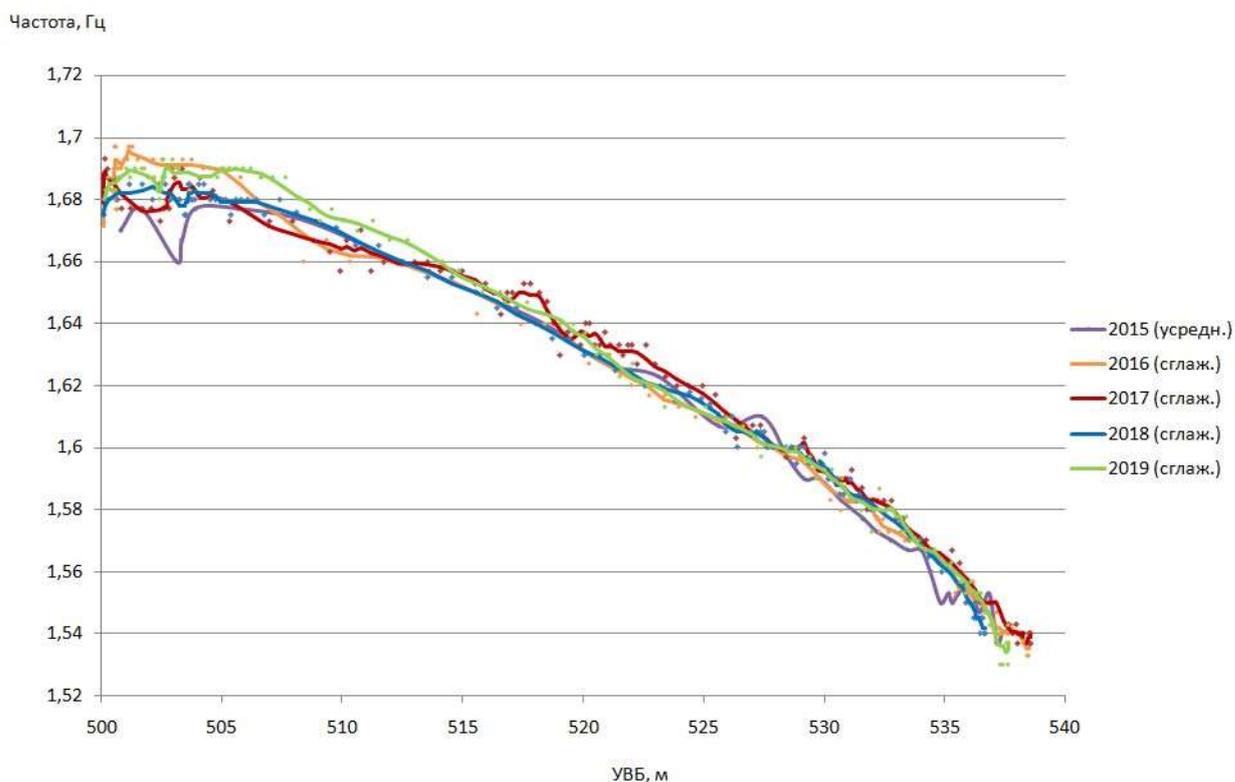


Рисунок 3.64 – Зависимость собственных частот колебаний плотины (на примере 3-й моды) от УВБ за 2015 – 2019 годы в периоды наполнения водохранилища

Но если проанализировать данные за 2001-2011 годы, то можно наблюдать постепенный ежегодный прирост частоты собственных колебаний плотины в зависимости от УВБ (рисунки 3.65 и 3.66). Так, при отметке верхнего бьефа в 510 м над уровнем моря, частота 3-й моды собственных колебаний плотины в 2001, 2006 и 2019 годах составляла примерно 1.65 Гц, 1.658 Гц и 1.675 Гц соответственно (рисунок 3.65). При этом, кривая 2011 года практически совпадает с кривой 2019 года. В целом, данные наблюдений говорят о том, что до начала 2010-х годов плотина Саяно-Шушенской ГЭС не была стабильна, в её теле происходили процессы консолидации и которые в последующие годы практически прекратились.

Для 4-й моды собственных колебаний наблюдается в целом аналогичная тенденция, с той разницей, что кривая частоты от УВБ 2011 года ниже кривой 2019 года примерно на 0.01 Гц (рисунок 3.66). Возможно, это небольшая ошибка измерений, но не исключено, что процесс консолидации плотины продолжался и после 2010 года, но проследить его можно только на частотах больших мод, поскольку он проявлялся локально. Данное предположение требует подтверждения в ходе дальнейших исследований.

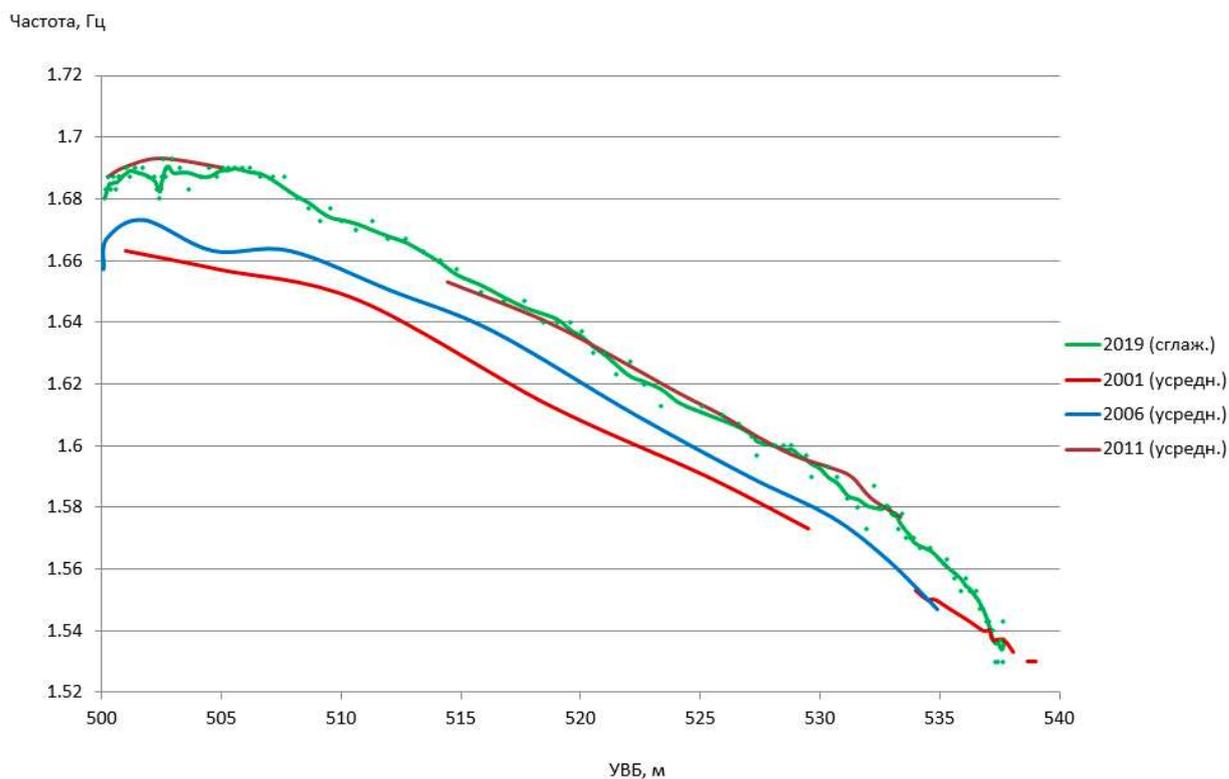


Рисунок 3.65 – Зависимость 3-й моды собственных частот колебаний плотины от УВБ за 2001, 2006, 2011 и 2019 годы в периоды наполнения водохранилища

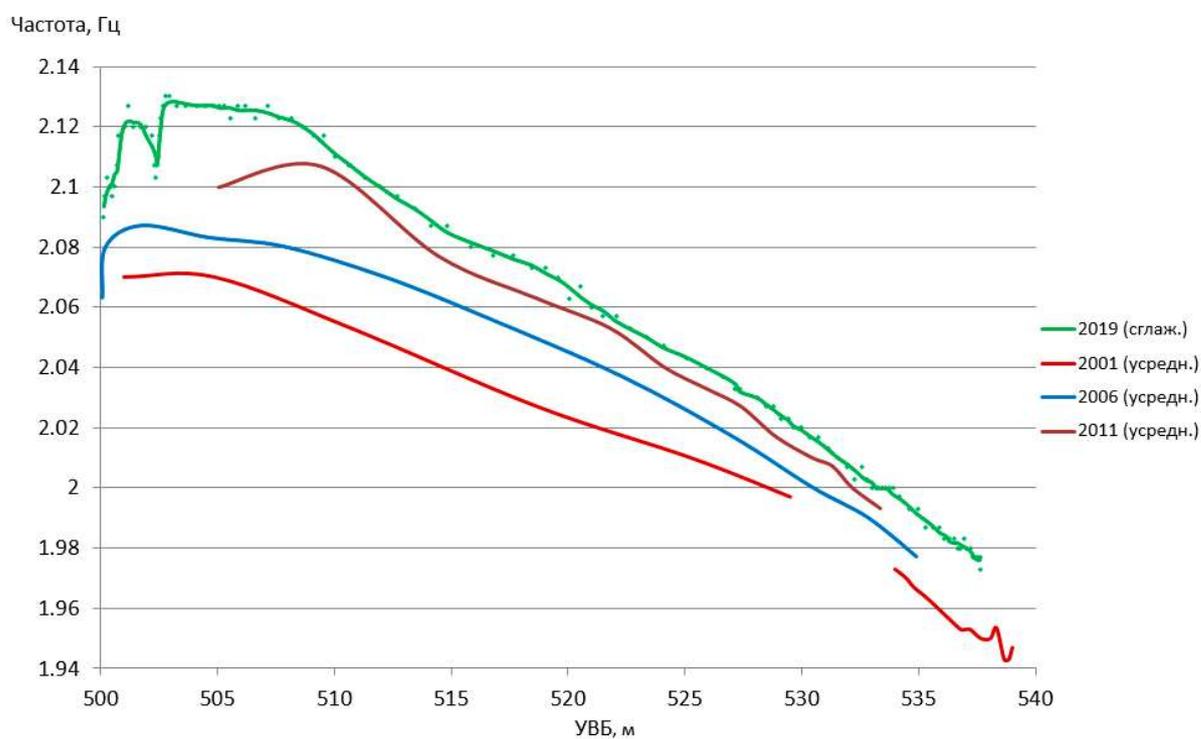


Рисунок 3.66 – Зависимость 4-й моды собственных частот колебаний плотины от УВБ за 2001, 2006, 2011 и 2019 годы в периоды наполнения водохранилища

В дальнейшем планируется оценить время релаксации плотины при росте уровня водохранилища. Возможно, при правильном подборе временного сдвига, станет возможным с достаточно высокой точностью аппроксимировать график зависимости частоты собственных колебаний от УВБ линейной или полиномиальной функцией. Это позволит с достаточно высокой точностью проводить мониторинг состояния плотины ГЭС и на ранней стадии фиксировать процессы его изменения. Также планируется тщательно обработать массив архивных сейсмических данных за 2001-2015 года с целью более точно проследить изменение состояния плотины ГЭС за этот период.

В итоге проведенных исследований получены следующие результаты:

1. По данным сейсмической станции «Черёмушки» получены собственные частоты колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС за период 2001-2020 годов для с 1-й по 7-ю моды.

2. Установлено, что частоты собственных колебаний ГЭС меняются при изменении УВБ, при этом прослеживается достаточно чёткая обратная зависимость частоты от УВБ.

3. В периоды сработки (уменьшения уровня) водохранилища на значение частот оказывают значительное влияние не только УВБ, но и другие факторы. Предположительно, это температура воздуха и намерзающий в верхнем бьефе плотины лёд. Эти факторы сложно поддаются прогнозированию и анализу, поэтому мониторинг технического состояния плотины по частотам собственных колебаний затруднён.

4. В периоды наполнения водохранилища собственные частоты плотины стабильно и плавно снижаются с ростом УВБ. При этом процесс изменения частот происходит с некоторой задержкой, предположительно, вызванной релаксационными процессами в теле плотины и/или в системе плотина-основание после изменения уровня водохранилища.

5. В периоды наполнения водохранилища графики зависимости частоты собственных колебаний от УВБ за 2015 – 2019 годы практически идентичны, что свидетельствует о стабильном состоянии тела плотины и её основания. Но в более ранний период 2001-2011 годов наблюдался ежегодный постепенный рост частоты собственных колебаний при тех же значениях УВБ. На нынешний уровень значений частоты вышли примерно в 2010-2011 годах. Это может свидетельствовать о том, что в тот период в плотине ГЭС происходили какие-то изменения, возможно, шёл процесс консолидации плотины и её основания, который как раз завершился к началу 2010-х годов.

### 3.4 Сейсмологические наблюдения во время оползня на отвале Колыванского месторождения антрацита

На Колыванском месторождении антрацита 18 июля 2020 г, примерно в 21:15 местного времени, произошел оползень с предварительно оцененным объемом около 10% от Елбашинского отвала [13]. Создана комиссия, которая занимается выяснением причин возникновения деформации.

ФИЦ ЕГС РАН занимается изучением сейсмической обстановки в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях. Одна из станций сейсмологической сети (“Харино”) расположена в 9 км от Елбашинского отвала. Попробуем, используя данные космической съемки и записи сейсмической станции, разобраться в причинах, которые привели к образованию оползня.

На рисунке 3.67 представлены космические снимки исследуемого района, полученные в разное время. Чтобы понять окружающую обстановку вокруг отвала, на рисунке приведены отметки высот 185, 212 и 219 м над уровнем моря. На снимке 2013 года видно, что формирующийся отвал препятствовал естественному стоку вод, и в его северо-восточной части происходило обводнение. В 2017 году из сформировавшегося в северо-восточной части отвала озера был сооружен дренажный канал на уровне в 212 м, а в 2019 году он находился уже на уровне 219 м. К 2020 г обводненная часть отвала могла составлять несколько десятков метров по высоте и около квадратного километра по площади. Для того чтобы оползень начал движение нужен был лишь толчок. Возникает вопрос: что могло послужить спусковым крючком для начала движения?

На рисунке 3.68 представлен фрагмент карты месторождений горючих полезных ископаемых Новосибирской области. Колыванское месторождение, на котором произошел оползень, расположено в северной части Горловской впадины. В 9 км на юго-юго-запад от Елбашинского отвала установлена широкополосная сейсмическая станция «Харино». При анализе записей, полученных за период, охватывающий время схода оползня, не было выявлено каких-либо значимых сейсмических воздействий, которые могли бы быть достоверной причиной деформации. Возможно, такие воздействия и были, но из-за удаленности станции от отвала, 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.

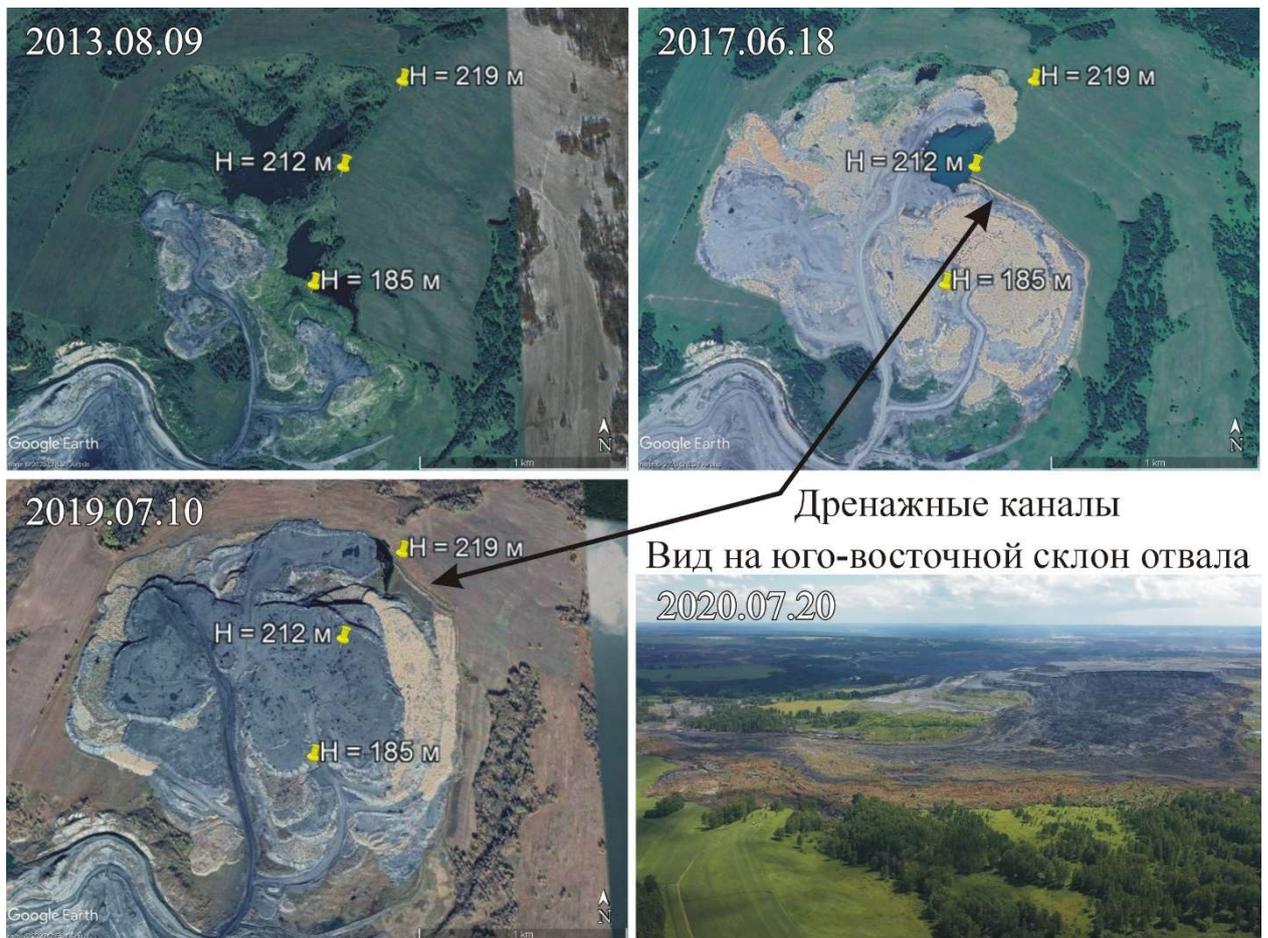


Рисунок 3.67 – Космические снимки Елбашинского отвала и фотография оползня



Рисунок 3.68 – Фрагмент карты угольных месторождений Новосибирской области [14]

В СЕФ ФИЦ ЕГС РАН разработаны алгоритмы и программное обеспечение, позволяющее проводить анализ изменений амплитудно-частотных характеристик сейсмических записей с течением времени. Для качественного анализа строятся спектрограммы в виде двумерных функций, по одной оси которых представлено время, по другой – частота; третье измерение является амплитудой на определенной паре частота-время и представлено цветовой шкалой. Заложенные в программном обеспечении функции позволяют отслеживать изменения амплитуд колебаний на выбранной частоте и рассчитывать усредненные амплитудные спектры в выбранном частотно-временном окне. Алгоритм вычисления последних состоит в расчете наборов амплитудных спектров для заданных временных интервалов, на которые разделяется сейсмическая запись, с их последующем усреднением. Это позволяет выделиться из сейсмического шума полезные сигналы, имеющие квазистабильные спектры, по амплитуде на порядки ниже уровня шума, при условии достаточной длины записи.

Изучая спектрограммы, полученные по записям станции «Харино» на N, E и Z-компонентах (соответственно, северная, восточная и вертикальная) за период с 14 по 21 июля мы можем отметить нетипичную для станций сейсмологической сети картину шумов на низких частотах (рисунок 3.69(а)). Видно, что в дневное время уровень низкочастотных шумов 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 непрерывно на всех компонентах записи и прервались после схода 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 E-компоненте отмеченные колебания изменились: понизилась амплитуда и незначительно увеличилась частота. Вероятно, эти сигналы также связаны с колебаниями отвала, физические параметры которого поменялись после деформации. На рисунке 3.69(б) показаны фрагменты усредненных спектров, вычисленных по сейсмической записи длиной в 5 суток перед моментом схода оползня. Видно, что наибольшая энергия колебаний сосредоточена

на E-компоненте. Если предположить, что они являются в основном поверхностными волнами Лява, то можно оценить азимут на источник по соотношению амплитуд N и E-компонент – он составляет около  $20^\circ$ , что совпадает с направлением от сейсмостанции в сторону отвала.

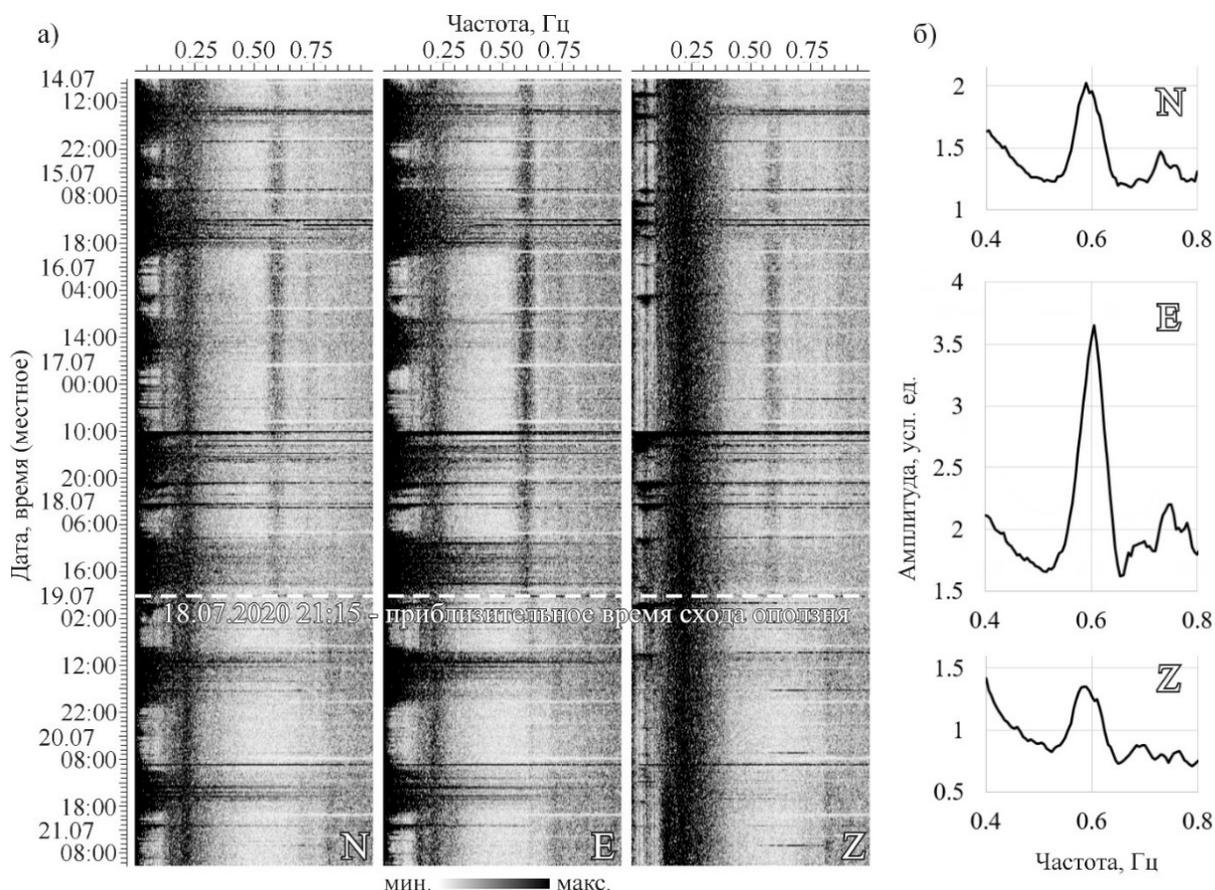


Рисунок 3.69 – Спектрограммы сейсмических данных станции «Харино» (а) и фрагменты усредненных спектров записей за интервал в 5 суток перед сходом оползня (б)

Для повышения достоверности выявленной связи колебания с частотой 0.6 Гц с Елбашинским отвалом, мы проанализировали архивные записи сейсмической станции за 10-месячный период – с 01.01.2020 г. по 31.10.2020 г. Отвал формировали не один год, поэтому колебания, связанные с ним, должны были прослеживаться длительное время. На рисунке 3.70(а) показаны изменения фрагментов (в интервале частот 0.4-1.0 Гц) усредненных 5-ти суточных спектров сейсмической записи и соответствующие выделенным колебаниям изменения частот и амплитуд. При этом, длина записи для вычисления единичного спектра составляла 200 с, что определило разрешенность спектра – 0.005 Гц. Выбрана для анализа E-компонента, как наиболее интенсивная по амплитуде, а результат усреднения соотнесен с серединой соответствующего временного интервала. Из рисунка видно, что на всех записях вплоть до момента деформации присутствуют колебания  $f_1$  с частотой, меняющейся в пределах 0.60-0.61 Гц, которые затем сменяются колебаниями  $f_2$  с меньшей в несколько раз

амплитудой и с частотой, повышенной до 0.620-0.625 Гц. Колебания  $f_2$  после 30.08.2020 г. становятся практически неразличимыми, вероятно, из-за снижения их амплитуд.

Для подробного рассмотрения изменений характеристик исследуемых колебаний до и после схода оползня, были построены наборы усредненных спектров за односуточные интервалы (рисунок 3.70(б)). Видно, что примерно за 20 дней до деформации, происходил постепенный рост амплитуд колебаний  $f_1$ , а за 2 дня до оползня – их снижение. Амплитуда сменивших их колебаний  $f_2$  примерно в 5-6 раз ниже.

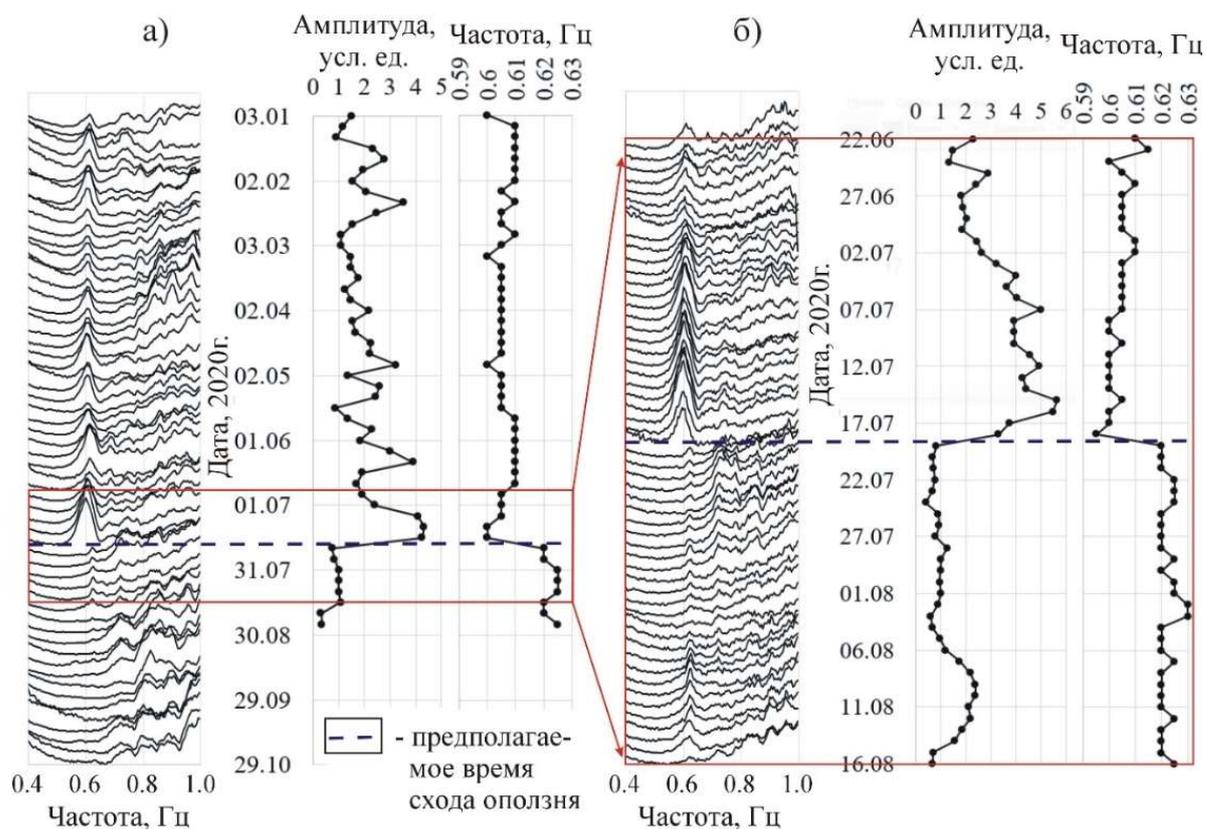


Рисунок 3.70 – Изменение колебаний отвала на усредненных спектрах записей E-компоненты сейсмостанции «Харино» и соответствующие им амплитуды и частоты. (а) – усреднение 5-ти суточных записей; (б) – односуточных

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, в разы превышающее высоту отвала. Такое могло произойти только при условии, что породы были сильно обводнены. Как следует из космических снимков, основание отвала находилось на отметке 185 м над уровнем моря. Перед оползнем единственный дренажный канал находился на уровне 219 м, превышение 34 м. Площадь отвала более 2 км<sup>2</sup>, отсюда можно оценить, что в нем находилась вода объемом не менее 7 млн. м<sup>3</sup> (при среднем водонасыщении 10 %), которая и вытекла из тела отвала вместе с породами. Обводнение отвала являлась причиной его неустойчивости, что выразилось в его

многомесячных колебаниях с частотой 0.6 Гц, характеристики которых изменились после деформации. Сход оползня привел к уменьшению массы отвала, и этим объясняется увеличение частоты колебаний, которое составило около 3 %. На столько же должна была уменьшиться масса отвала, если на характеристики колебаний 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  $f_2$  затихли примерно через месяц после события. Обводнение отвала и является основной причиной возникновения оползня. 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 возникла по сценарию «последней капли».

Таким образом, анализ данных космических снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположения о вероятной причине возникновения и развития оползня на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита, связанной с его сильным обводнением.

### 3.5 Изучение глубинного строения Земной коры по данным речной сейсморазведки

Специалисты ФИЦ ЕГС РАН на протяжении ряда лет проводили сейсморазведочные работы методом ОГТ-2D на реках Восточной Сибири (Лена, Витим, Нижняя Тунгуска) [16]. Начиная с 2007 года, технология сбора полевых сейсмических данных основывалась на использовании автономных регистраторов (типа «Байкал»), настроенных на непрерывную запись и устанавливаемых вдоль речного профиля на берегу реки. Возбуждение упругого сигнала производилось в воде с помощью пневматических источников, объединенных в группу. Важная особенность такой технологии состоит в том, что излучатели и приборы регистрации работают независимо друг от друга. Сейсмические регистраторы осуществляют запись в непрерывном режиме. При этом они, как и пневмоизлучатели, синхронизированы во времени с помощью систем ГЛОНАСС-GPS. В процессе полевых работ формируется набор табличных данных, позволяющих привести в однозначное соответствие время срабатывания группы источников и начало полезной записи сигнала на каждом из автономных регистраторов. Разработано специализированное программное обеспечение (ПО «SSlicer»), позволяющее выполнять монтаж сейсмограмм с приведением их к виду, аналогичному получаемым стандартными многоканальными сейсморазведочными станциями. Длительность записи таких сейсмограмм определена геологическим заданием и составляет, как правило, от 6 с до 10 с. Связано это с тем, что задание ориентировано на получение сведений только о верхней части земной коры. При этом, глубинное строение огромных территорий Восточной Сибири до настоящего времени мало изучено, ввиду высокой затратности исследований.

Интервал между сейсмическими воздействиями в речной сейсморазведке, как правило, составляет не менее 15 с (обычно, 18-23 с). Он обусловлен, прежде всего производственной необходимостью – для нагнетания сжатого воздуха в пневмоисточники и для перемещения судна-источника на следующий пункт возбуждения. В связи с этим, появляется возможность, используя непрерывные записи сейсмических регистраторов «Байкал», сформировать сейсмограммы соответствующей длительности. Целевые отраженные волны от глубинных слоев земной коры, включая поверхность Мохоровичича, по имеющимся исследованиям методом ГСЗ в Восточной Сибири, находятся на временах до 13-14 с. Таким образом ожидается, что сформировав сейсмограммы с увеличенным временем регистрации, можно, без существенных затрат, строить временные разрезы и изучать глубинное строение земной коры на участках отработки речных сейсморазведочных профилей.

В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русла р. Лена, Витим и Нижняя Тунгуска, на профилях общей длиной около 2700 км (рисунок 3.71), получен и хранится в архивах значительный объем цифровых сейсмических данных: непрерывные записи пневмоисточников с интервалом между воздействиями 15–25 с. В данной статье, на примере 60-километрового участка профиля, расположенного в нижнем течении р. Лена, обосновывается возможность использования данных речной сейсморазведки для изучения глубинного строения земной коры на всю глубину, включая поверхность Моховичича.



Рисунок 3.71 – Схема профилей речной сейсморазведки МОГТ-2D, по которым имеются архивные данные для переинтерпретации с целью изучения глубинного строения земной коры

Экспериментальной базой исследования являются наборы непрерывных сейсмических записей, полученных автономными регистраторами типа «Байкал», расставленными по берегу реки (рисунок 3.72). Для анализа выбран 60-ти километровый участок профиля (от 130 км до 190 км регионального профиля, рисунок 3.72(а)). Исследования проводились в рамках полевых сейсморазведочных работ, выполненных в нижнем течении р. Лена в 2018

г. Источники возбуждения – группа из 10-ти пневмоисточников «Малыш». Основные параметры системы наблюдения представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Основные параметры сейсморазведочных исследований на р. Лена в 2018 г.

№	Параметр, единица измерения	Значение
1	Средний интервал между пунктами приема (ПП), м	50
2	Средний интервал между пунктами возбуждения (ПВ), м	19
3	Максимальный вынос ПП-ПВ, не менее, м	8000
4	Шаг дискретизации, мс	2
5	Источники возбуждения / кол-во в группе, шт.	Пневмоисточники «Малыш» / 10
6	Временной интервал между воздействиями, с	18-23
7	Регистрирующая аппаратура	Байкал-7, Байкал-АСН
8	Сейсмоприемники	GS-One или группы из 3-х GS20DX

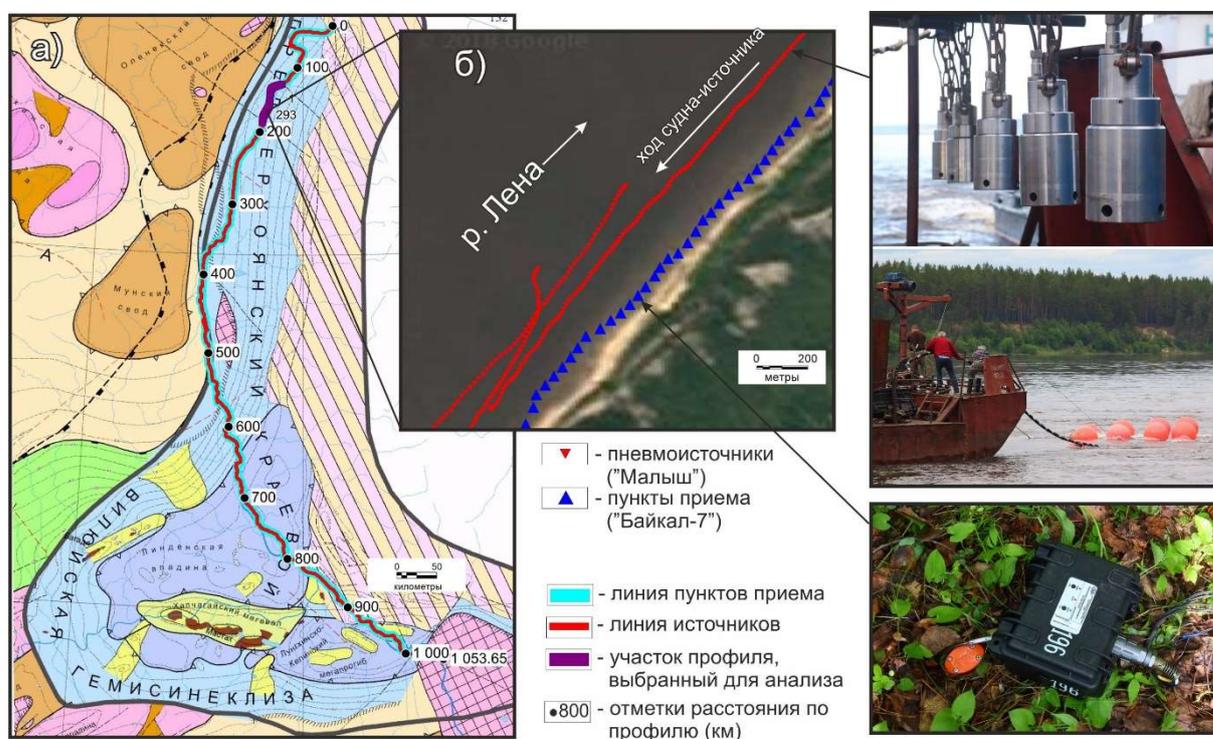


Рисунок 3.72 – Схема обработки речного сейсморазведочного профиля на р. Лена в 2018 г. (а) – профиль на структурно-тектонической карте, составленной в АО «СНИИГГиМС» (<http://www.sniiggims.ru/maps/strtect.html>), (б) – детальная схема обработки на основе спутникового снимка (<https://www.google.ru/maps/>)

На рисунок 3.73 показана схема выполнения монтажа сейсмограмм с использованием непрерывных записей регистраторов «Байкал». Исходная запись содержит серию сейсмических импульсов от воздействий пневмоисточников с известным временем срабатывания. Как правило, интервал между ними – от 18 с до 23 с. Разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее формировать монтажи сейсмограмм (ПО «SSlicer»). Длина записи на результирующей сейсмограмме задана геологическим заданием

исходя из глубинности исследований и составляла, в данном случае, 6 с. Кроме этого, геологическим заданием были ограничены и максимальные расстояния между источниками и приемниками – до 8000 м. Подобные сейсмограммы, ограниченные по времени и максимальным расстояниям, являясь результатом полевых сейсморазведочных работ, сдавались заказчику работ. Исходные непрерывные записи до настоящего времени не использовались, однако, были сохранены в цифровых архивах и находятся в ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом, есть техническая возможность формировать сейсмограммы с большими удалениями источник-приемник и большей длительности, вплоть до интервала между воздействиями.

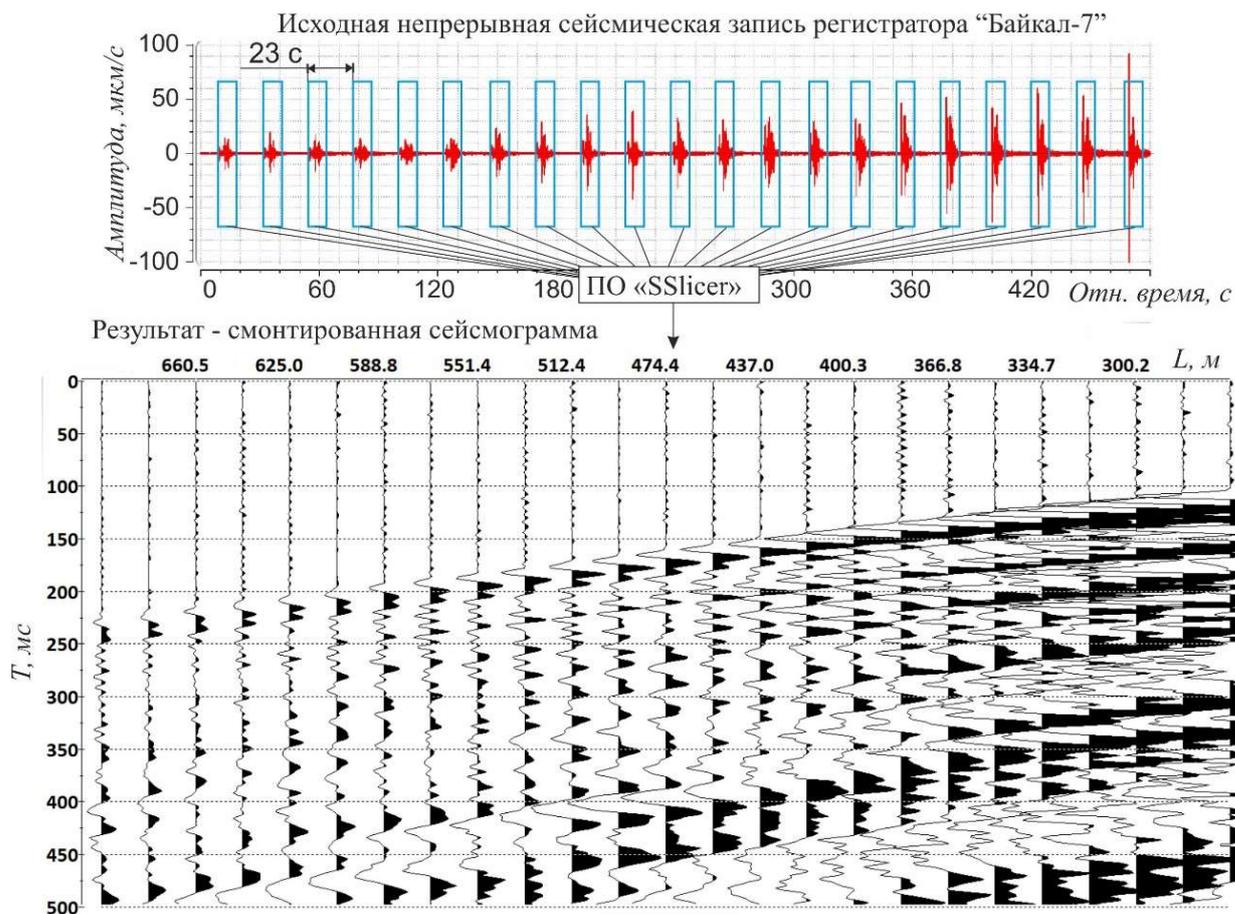


Рисунок 3.73 – Схема выполнения монтажа сейсмограмм из непрерывных записей автономных сейсмических регистраторов типа «Байкал»

На рисунке 3.74 показана изученность района исследований методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Видно, что речной сейсморазведочный профиль не пересекается профилями ГСЗ, они проходят на расстояниях в 30-70 км с севера и с юга. Таким образом, глубинное строение данного участка Приверхоянского прогиба ранее не было изучено.

Ввиду отсутствия сведений о глубинном строении Земной коры на выбранном участке речного сейсморазведочного профиля, была построена приближенная скоростная

модель по данным с ближайших профилей ГСЗ («Шпат» и «Горизонт»): глубина до поверхности Мохоровичича (далее – граница М) меняется в пределах 42–46 км, а средняя скорость продольных волн составляет 6.6-6.7 км/с [17]. Рассчитаны теоретические сейсмограммы отраженных волн от подошвы земной коры (видимая частота волн выбрана равной 10 Гц) в моделях с пониженным (глубина 42 км, скорость 6.6 км/с) и повышенным (глубина 46 км, скорость 6.7 км/с) значениями мощности (рисунок 3.75). По этим данным можно оценить, до каких времен на разрезах ОГТ следует ожидать проявлений отражающих границ – они составляют от 12.5 с до 13.7 с. Кроме этого, можно оценить, что из-за малых удалений источник-приемник относительно глубины до границы, лучи отраженных волн почти вертикальные (рисунок 3.75(а), поэтому влияние неточностей в определении значений скоростей в модели на качество получаемого разреза методом ОГТ не существенно. Так, при удалении источник-приемник до 10 км и частоте сигнала в 10 Гц, вариации скорости  $V_{огт}$  в пределах 6-7 км/с, различия кинематических поправок за счет разной кривизны годографов не превышают четверти видимого периода сигнала (рисунок 3.75(б)).

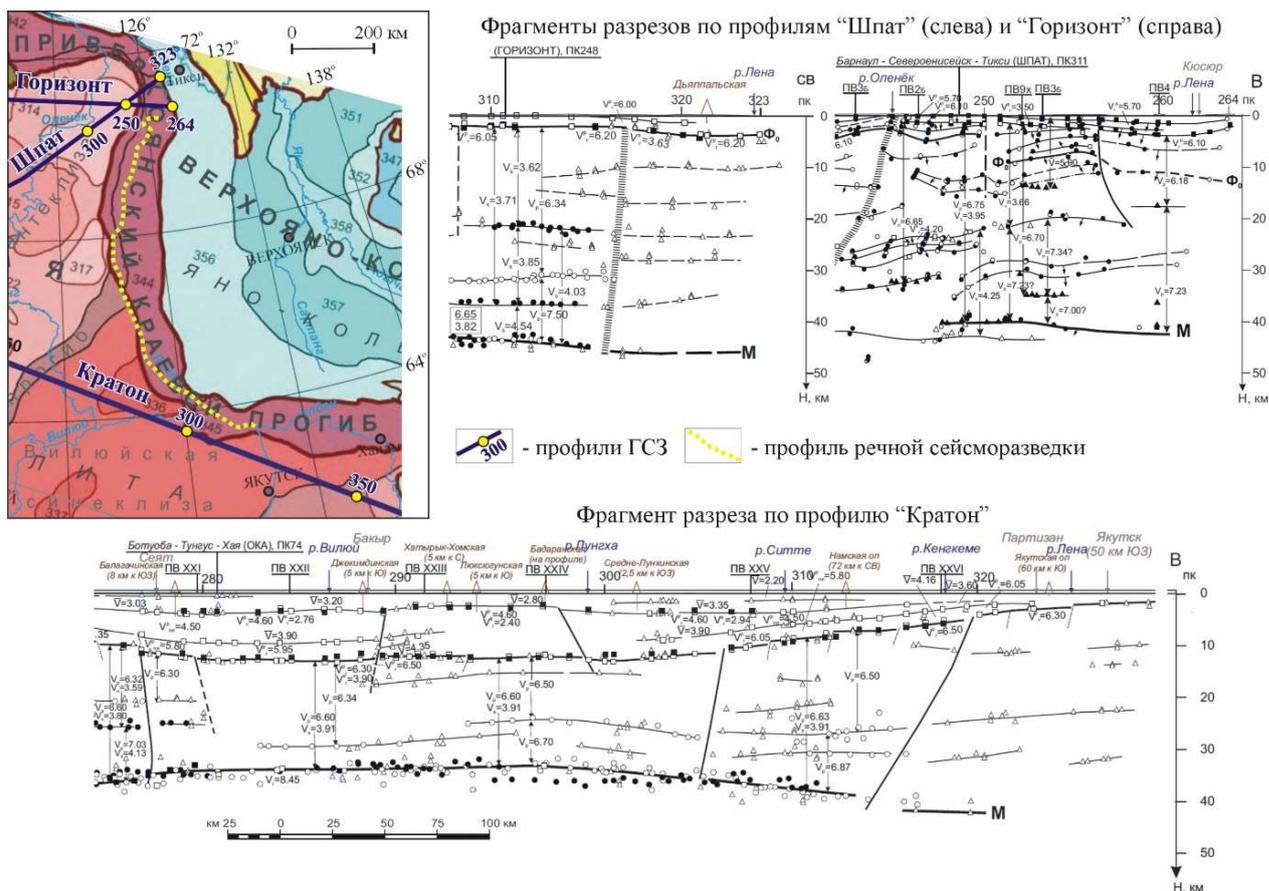


Рисунок 3.74 – Сведения о глубинном сейсмическом строении района по данным предыдущих исследований [17]

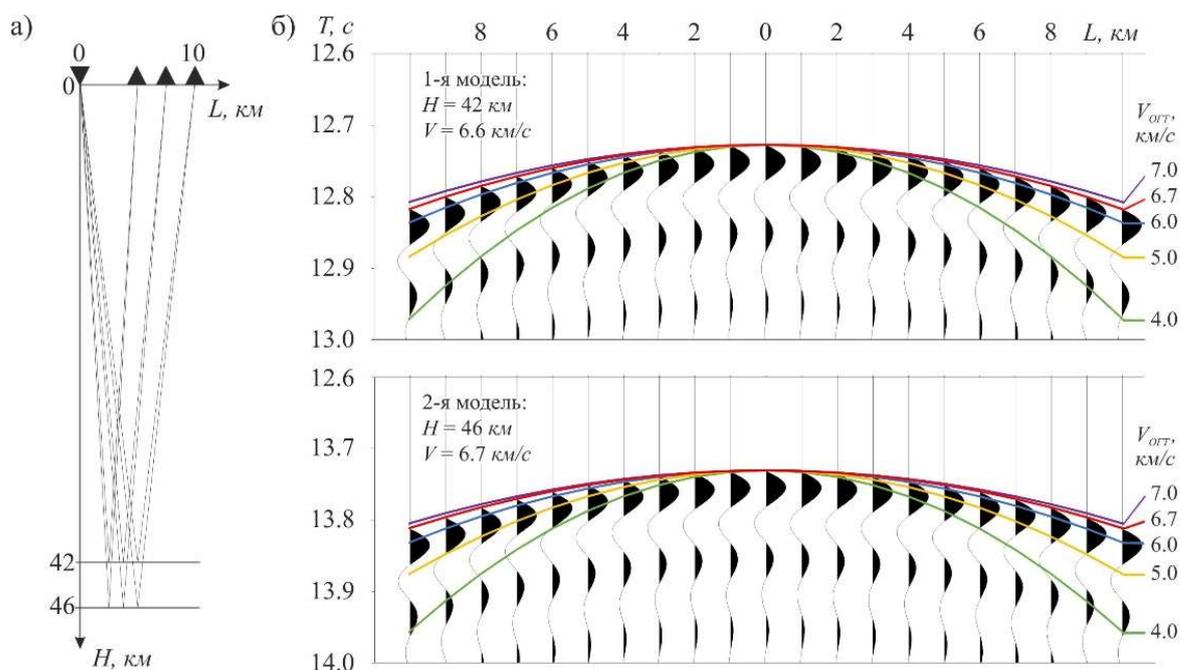


Рисунок 3.75 – Лучевая схема (а) и теоретические сейсмограммы (б) отраженных волн для однослойных однородных моделей земной коры

На рисунке 3.76 представлен пример типичной сейсмограммы, полученной при производстве речных сейсморазведочных исследований в нижнем течении р. Лена в 2018 г. Видно, что если на небольших временах (как правило, до 2 с) в волновом поле можно визуально проследить целевые отраженные волны, то на больших временах (порядка 13-14 с, где по предварительной скоростной модели следует ожидать вступлений отраженных волн от границы М) полезных сигналов не наблюдается. Предположим, что отраженные волны от границы М были зафиксированы сейсмической аппаратурой, но амплитуда их значительно ниже фона сейсмического шума, и для их выделения требуется применять многократное суммирование по методу ОГТ. Тогда, следует оценить максимальную кратность, при которой возможно выделение малоамплитудных сигналов из шумов.

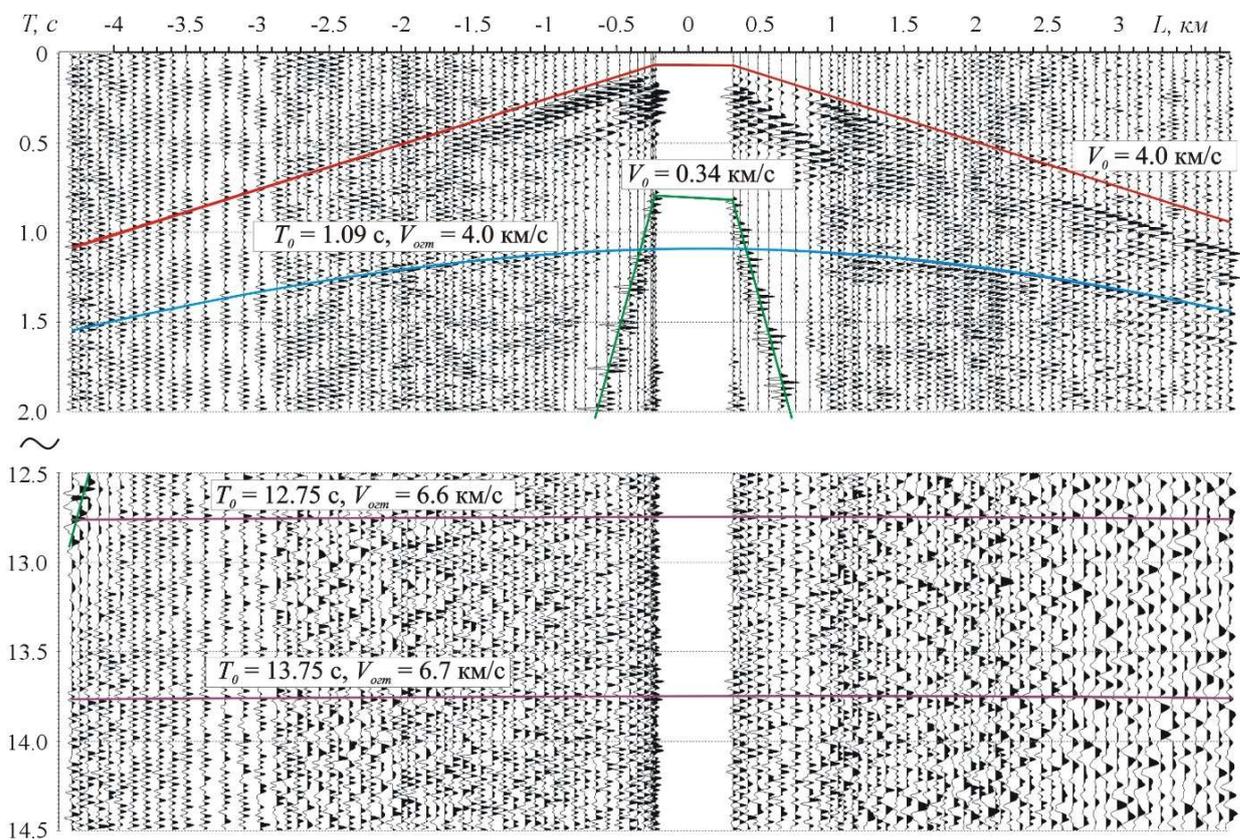


Рисунок 3.76 – Фрагмент типичной сейсмограммы, полученной при работах МОГТ-2D в нижнем течении р. Лена

Такая оценка проведена путем сравнения амплитудного спектра микросейсмических колебаний, записанных регистратором «Байкал-7», оснащенным вертикальным сейсмоприемником «GS-One», и спектра аппаратного шума (рисунок 3.77). Последний был получен путем выполнения записи с горизонтальным положением сейсмоприемника. Из данных, приведенных на рисунке 3.77 можно оценить, что амплитуда сейсмического шума, в целом, на 2 порядка выше, чем у аппаратного. Отсюда можно полагать, что если в цифровой записи присутствует сигнал с амплитудой меньше сейсмического шума, но больше аппаратного, то его можно выделить при суммировании до 10000 крат.

Высокую кратность можно получить, прежде всего, за счет увеличения размера бина вдоль профиля. Как правило, при интерпретации данных сейсморазведки указанный размер задается равным половине от интервала между пунктами приема или возбуждения. Так, при обработке сейсморазведочных данных, полученных на р. Лена в 2018 г., он составлял 25 м. При этом, ширина бина достигала 2500 м из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (рисунок 3.78). Кратность суммирования изменялась, в целом, от 400 до 600 (рисунок 3.78(а)). Для изучения глубокозалегающих границ (в десятки километров), размер бина вдоль профиля можно существенно увеличить, что приведет к росту кратности. Как пример, на рисунке 3.78(б) показана кратность, получившаяся после бинирования фрагмента профиля площадками размером 200x2500 м. Видно, что кратность

существенно увеличилась – в целом, до 5000. Дополнительный прирост кратности возник также за счет использования всех имеющихся удалений источник-приемник. Следует отметить, что увеличение размера бина не только повышает кратность, но и одновременно приводит к уменьшению детальности разреза. Поэтому, при обработке данных, следует подобрать оптимальное значение размеров площадки бинирования.

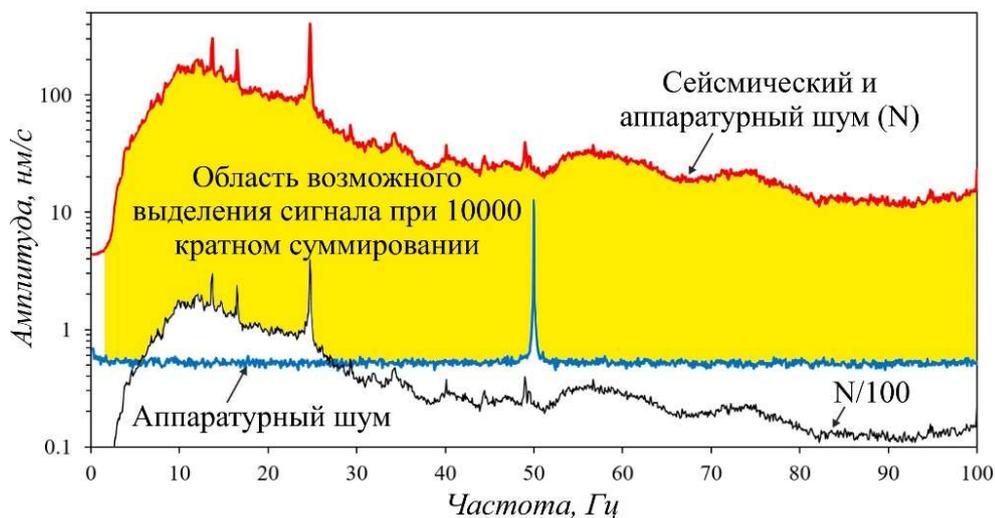


Рисунок 3.77 – Усредненные амплитудные спектры сейсмических и аппаратурных шумов для регистратора «Байкал-7», оснащенного вертикальным сейсмоприемником «GS-One»

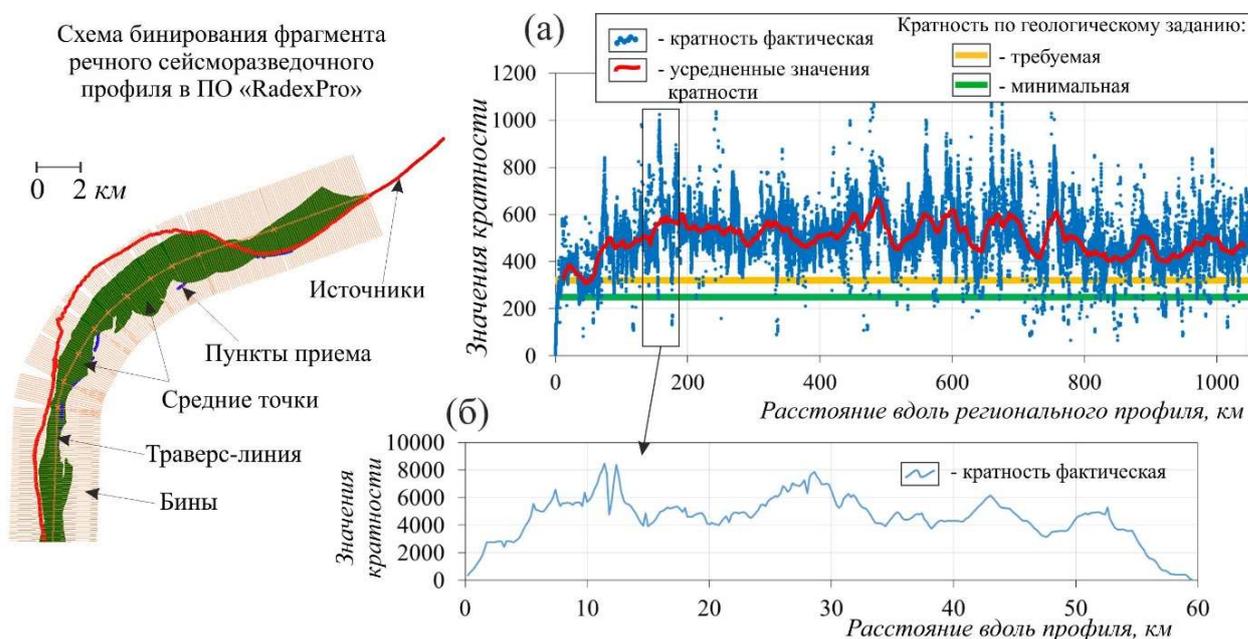


Рисунок 3.78 – Схема бинирования фрагмента речного сейсмозонировочного профиля и графики кратности: (а) – при размере бина 25x2500 м и ограничении максимальных удалений 8000 м, (б) – при размере бина 200x2500 м и неограниченных удалениях

Как отмечалось выше, в зарегистрированном при речной сейсмозонировке первичном волновом поле визуально не наблюдается отраженных волн от глубинных границ. Исполь-

зованная аппаратура имеет достаточный динамический диапазон для возможности многократного (до 10000 крат) суммирования по методу ОГТ. Первоначально, мы попытались просуммировать данные в области времен около 13-14 с (где ожидается проявление отражений от поверхности М), используя упрощенные параметры обработки, которые задавались исходя из следующих соображений. Известно, что отраженные волны от поверхности М достаточно низкочастотные (как правило, 5-10 Гц) по сравнению с целевыми волнами, которыми оперируют при сейморазведке (десятки Гц). Исходя из этого, первичные данные были отфильтрованы в полосах частот от 5 Гц до 10-14 Гц, которые ранее применялись нами при обработке данных метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Следующим шагом применялась процедура автоматического регулирования усиления (АРУ) с окном в 1 с. Произведено бинирование данных с площадками 100x2500 м – кратность на исследуемом участке профиля составила, в целом от 2000 до 4000. Последней процедурой был ввод кинематических поправок – они вычислялись по упрощенной скоростной модели, представленной на рисунке 3.75. Полученные в результате суммирования фрагменты временных разрезов, с тремя разными фильтрациями, показаны на рисунке 3.79. Видно, что в разрезах, на временах около 13-14 с, прослеживаются волны, которые предположительно являются отраженными от М. Видно, что наиболее контрастно эти волны выделяются при фильтрации 5-10 Гц, а видимый период составляет около 8 Гц. Поэтому, в дальнейшем исследовании, мы использовали указанную полосу частот.

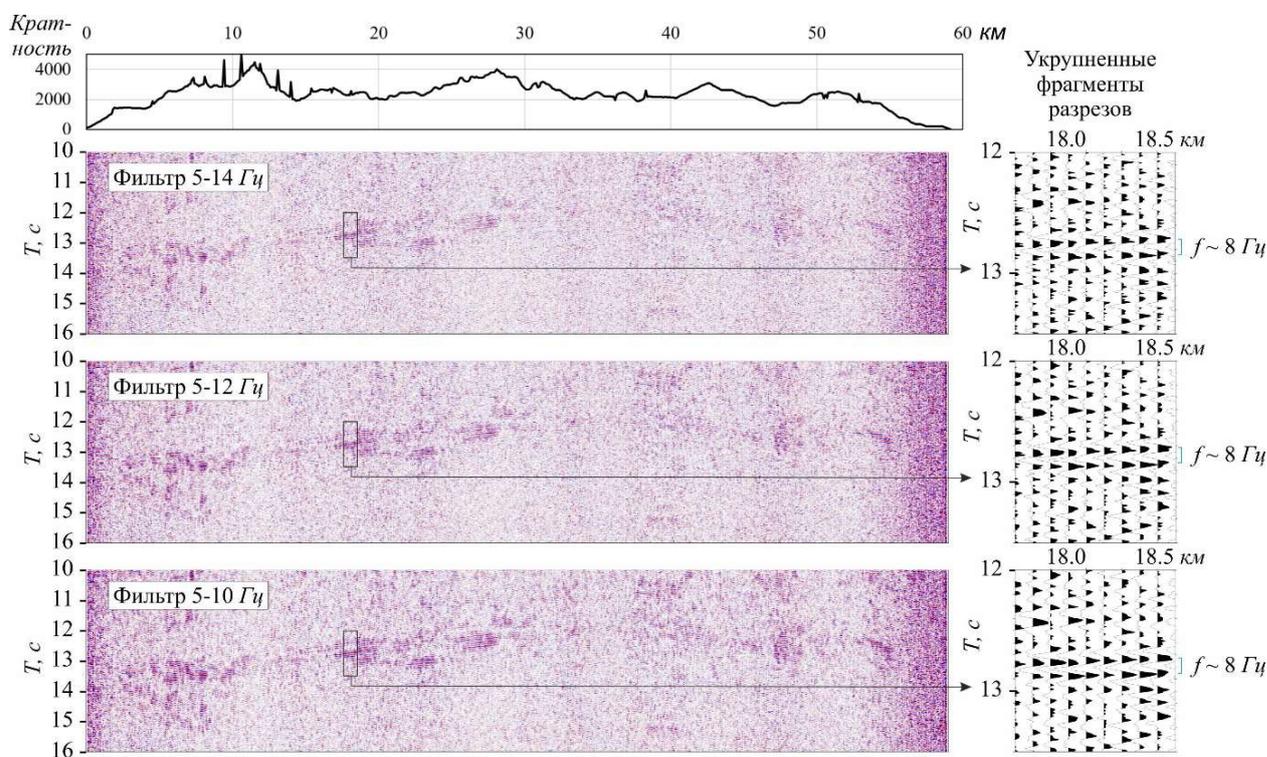


Рисунок 3.79 – Фрагменты временных разрезов при различной полосовой фильтрации исходных данных

Следующим этапом мы попытались оценить, какую кратность следует использовать для получения временных разрезов (рисунок 3.80). На рисунке представлены фрагменты разрезов, построенных при обработке различных наборов исходных данных. Пониженную кратность (относительно расчетов, представленных на рисунке 3.79, где средняя кратность составляла 2500) мы получили путем прореживания исходных данных (использовали каждую 2-ю, или каждую 4-ю трассы), а повышенную – за счет увеличения размера бина вдоль линии профиля. Видно, что уменьшение кратности (до 600-1200) приводит к закономерному ухудшению качества разреза (снижается отношение сигнал/шум, фрагменты отражающих границ не просматриваются). Увеличение кратности до 5000-10000 путем увеличения размеров бина, приводит к видимому увеличению отношения сигнал/шум. Однако, дополнительной информации это не дает, а детальность разреза по горизонтали уменьшается. Поэтому, для дальнейшего анализа, мы использовали бинирование с площадками 100x2500 м, при котором средняя кратность на исследуемом фрагменте профиля составляет 2500.

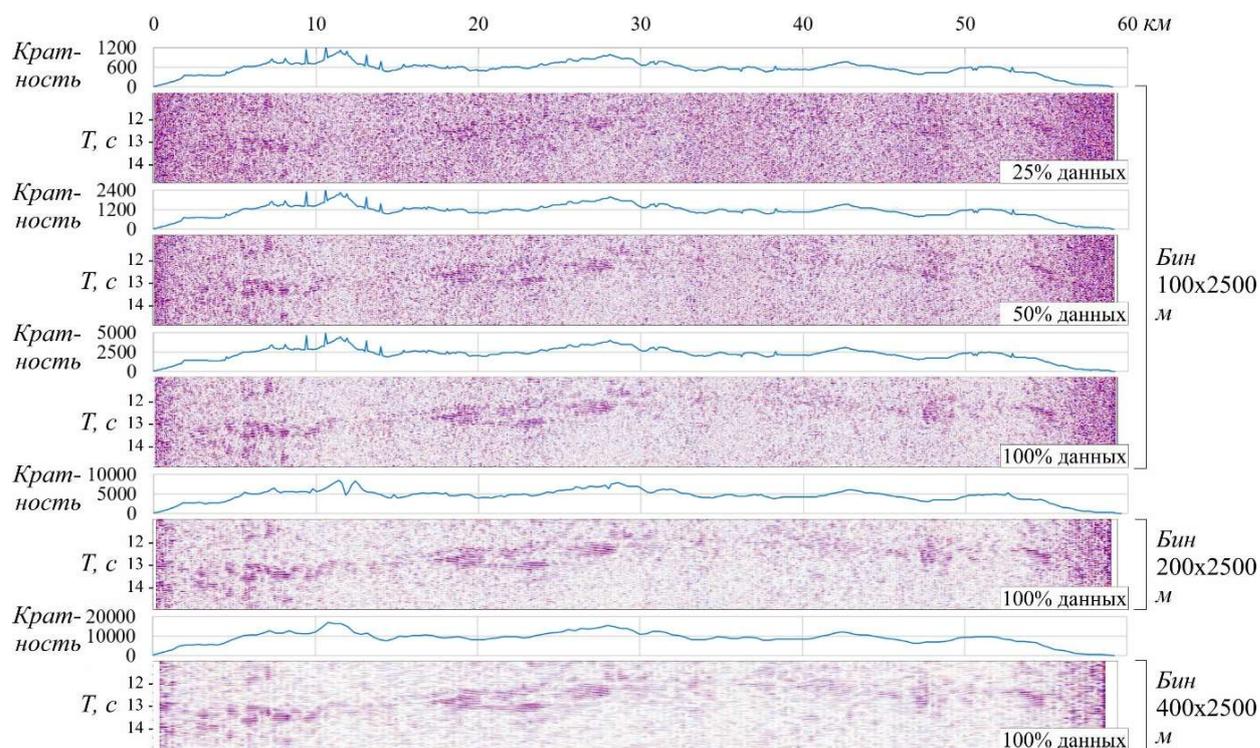


Рисунок 3.80 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при различной кратности

Как отмечалось выше, теоретические расчеты показали, что неточно заданные значения скоростей в земной коре, будут слабо влиять на качество временных разрезов. Это справедливо для использованной системы наблюдений (малые удаления источник-приемник относительно глубины до границы, низкая частота сигнала – 8 Гц), и в этом одно из главных отличий настоящих исследований от традиционной сейсморазведки. По оценкам, изменения в средней скорости  $V_{огт}$  (используемой для расчета кинематических поправок), для времен 13-14 с в пределах 6-7 км/с не должно повлиять на качество построения разреза.

Как видно из рисунка 3.81, где представлены фрагменты временных разрезов, рассчитанных при разных скоростях  $V_{огт}$ , разрезы заметно ухудшаются только при использовании значе- ний скорости в 4-5 км/с, которые противоречат известным представлениям о средних ско- ростях в Земной коре.

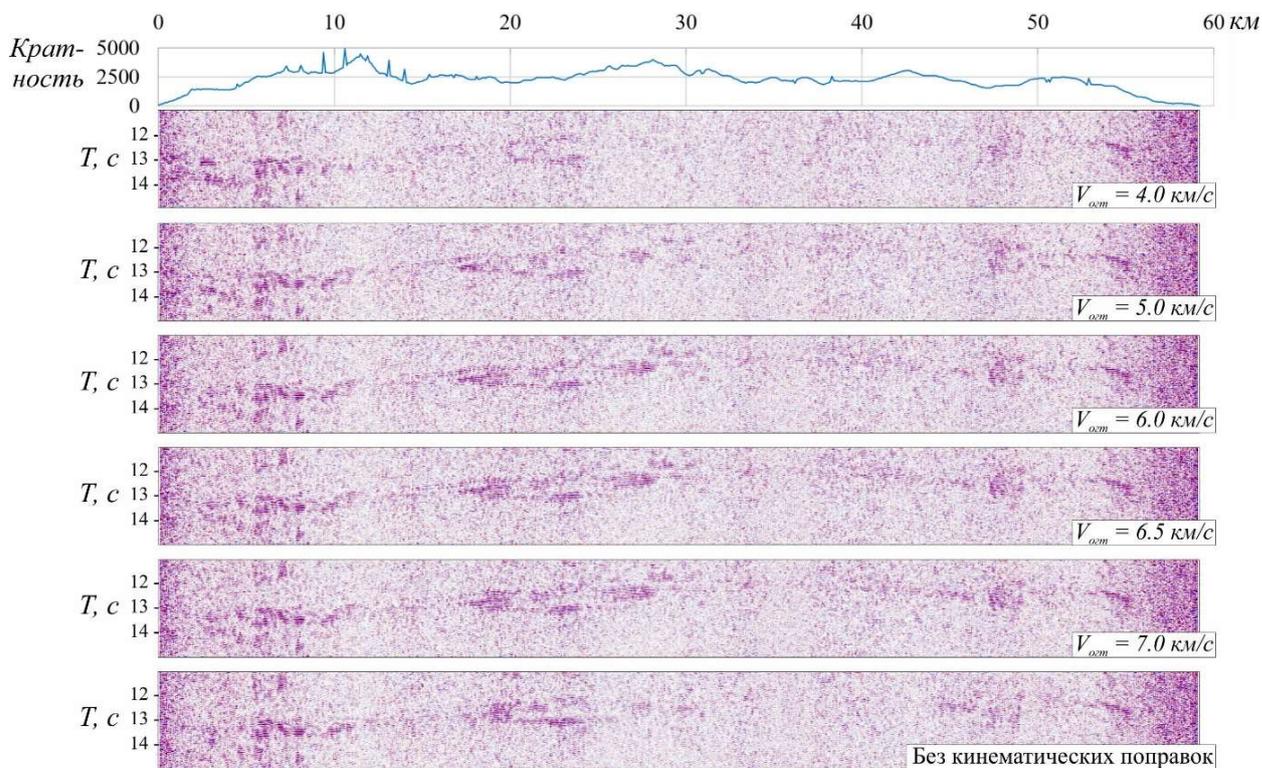


Рисунок 3.81 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных в разных скоростных моде- лях

При производстве и обработке данных сейсморазведочных работ, особое внимание уделяется борьбе с помехами. Как правило, если в исходных данных присутствуют трассы с повышенным фоном помех, то они исключаются из обработки. При речной сейсмораз- ведке в нижнем течении р. Лена, ввиду отсутствия промышленных источников шумов, ос- новным источником помех являлся ветер и, как следствие, волны, воздействующие на бе- рег, вдоль которого устанавливались сейсмоприемники. Хотя работы и проводились в тихую погоду, тем не менее, ввиду больших пространств открытой воды (ширина реки в нижнем течении достигала десяти и более км) часть сейсмограмм содержали в себе высокие по уровню помехи (рисунок 3.82). Из рисунка видно, что частотный диапазон помех состав- лял от 20 Гц и выше. Это перекрывает частотный диапазон полезных волн, используемых при сейсморазведке. Поэтому, такие данные считаются браком и исключаются из обра- ботки. В настоящем исследовании, как было показано выше, частоты полезных сигналов существенно ниже частотного диапазона помех и наличие сейсмограмм, аналогичных изоб- раженным на рисунке 3.82, не должно ухудшить качество разреза. Для проверки этого пред- положения, мы произвели расчеты фрагментов временных разрезов для разных выборок

данных. В первую очередь, рассчитали разрез при использовании всех имеющихся данных, включая данные с повышенным уровнем помех. Затем, для каждой трассы были рассчитаны средние (по модулю) амплитуды помех, произведена отбраковка трасс с повышенным шумом и рассчитаны соответствующие разрезы. Из рисунка 3.83, на котором представлены результаты расчетов фрагментов разрезов по различным (по уровню помех) выборкам данных, видно, что исключение шумных трасс не приводит к улучшению качества разреза. Более того, при исключении большого числа данных из обработки (50 %, 75 %), качество разреза заметно снижается, вероятно, из-за снижения кратности суммирования. Таким образом, можно заключить, что данные, которые при обычной сейморазведке считаются браком из-за наличия ветровых помех, в настоящем исследовании могут быть использованы в обработке.

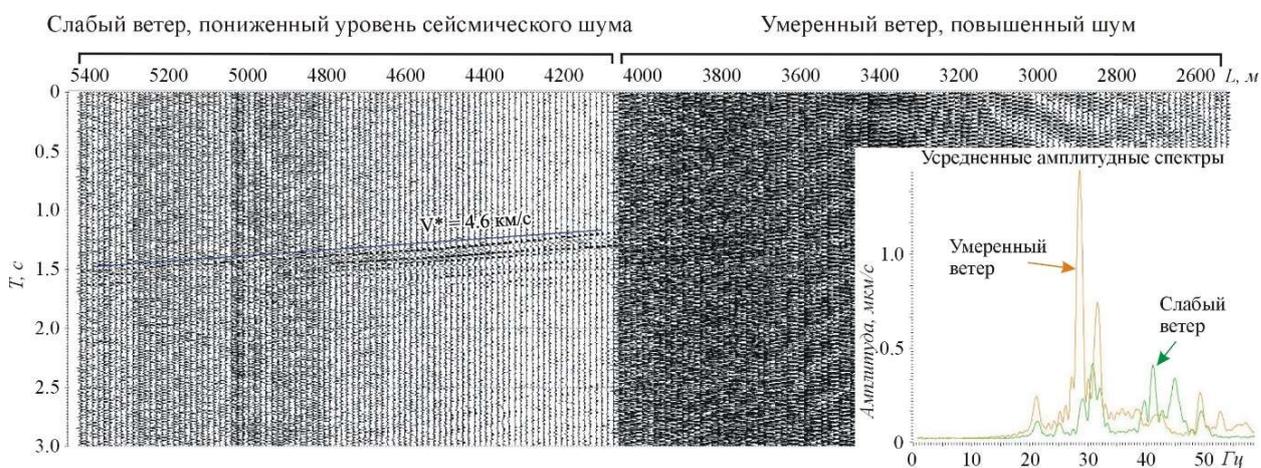


Рисунок 3.82 – Сейсмограмма общего пункта приема, зарегистрированная при разных погодных условиях

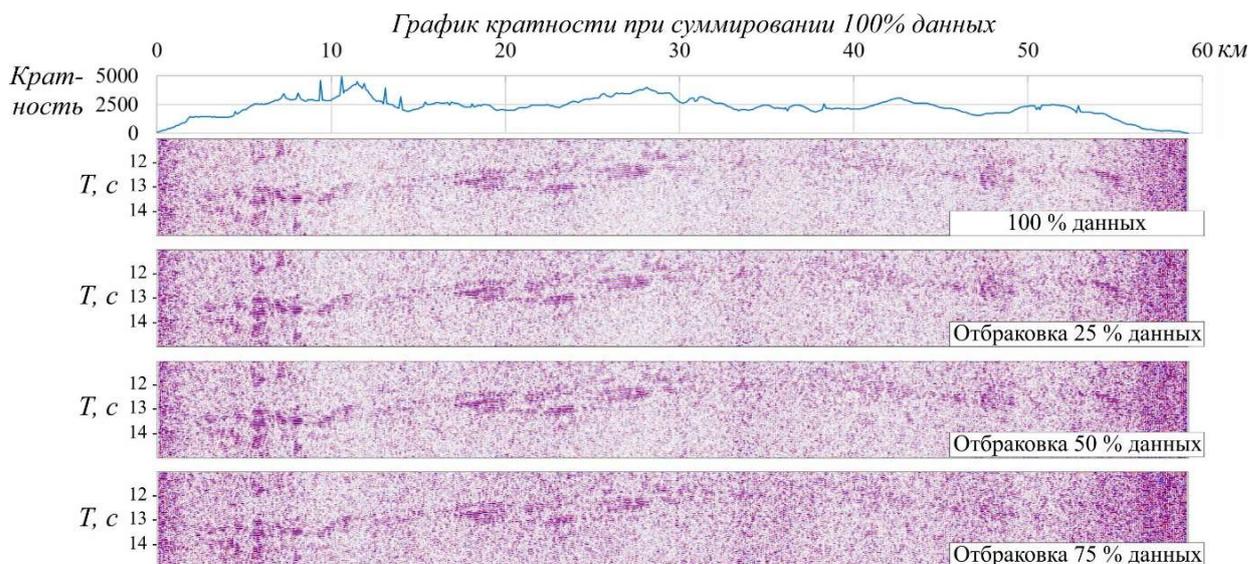


Рисунок 3.83 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при отбраковке трасс с повышенным уровнем сейсмического шума

На рисунке 3.84 представлен временной разрез, построенный по всей совокупности имеющихся данных для выделенного 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы Мохоровичича. Двойное время пробега меняется от 13.0 с до 14.2 с тогда, в предположении, что средняя скорость продольных волн в земной коре на данном участке составляет около 6.7 км/с, глубина до М достигает 44-48 км.

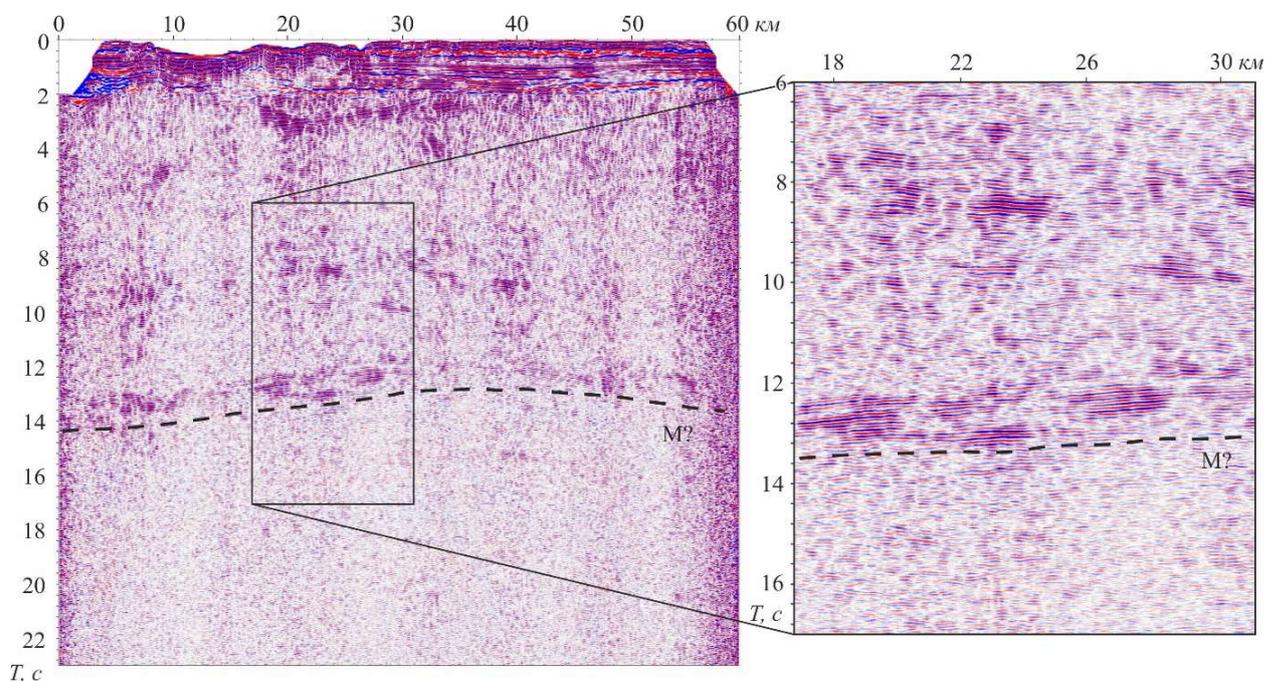


Рисунок 3.84 – Временной разрез, построенный для исследуемого фрагмента речного сейсморазведочного профиля

Таким образом, исследованиями показано, что используемая современная технология речных сейсморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части земной коры, но и по всей ее мощности, включая поверхность Мохоровичича.

### 3.6. Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской горной области

На данном этапе научно-исследовательских работ использовались методы теоретического анализа, обобщения и интегрирования информации, а также обоснования оптимальности выбора пути решения научной задачи. В работе применялись методы электромагнитного зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗС) в нескольких модификациях и метод вертикальных электрических зондирований (ВЭЗ).

Для получения новых полевых данных методом ЗС была усовершенствована цифровая аппаратура серии «Байкал».

Обработка, интерпретации и визуализация полученного материала методом ЗС выполнена с использованием нескольких программных комплексов моделирования и инверсии: EMS, ERA (разработаны в ИНГГ СО РАН).

Для анализа полученных данных с учетом результатов других геолого-геофизических методов привлекались: базы научной литературы и патентов в ИНГГ СО РАН и НГУ; материалы и научно-техническое обеспечение из открытых научных отчетов ИНГГ СО РАН и геологических фондов ИНГГ СО РАН; оперативный сейсмологический каталог (ФИЦ ЕГС РАН); базы данных Территориального центра «Алтайгеомониторинг».

В ходе выполнения получены следующие научные результаты:

1. Получены новые полевые данные и определены основные геоэлектрические характеристики разреза методом ЗС в эпицентральной зоне Чуйского землетрясения;
2. Проведен анализ, первичная обработка и интерпретация полевых данных.
3. Выявления вариаций коэффициента электрической анизотропии.
4. Провести натурные полевые измерения в режимной точке (ПК 134, Чуйская впадина) с использованием новых модификаций электроразведочной аппаратуры ЗС
3. Уточнены геоэлектрические модели строения литосферы Чуйской впадины Горного Алтая в зоне проведения ежегодных режимных наблюдений.

## Введение

Геоэлектрические исследования выполняются для сейсмоактивного региона России – Алтае-Саянской горной области. Задачи, поставленные в программах, относятся к фундаментальной проблеме изучения и прогнозирования напряженного состояния земных недр. Эти вопросы остаются актуальными не только для многих сейсмоактивных регионов мира, но также для различных территорий с обширными техногенными воздействиями на окружающую среду, с экологически опасными производствами.

Работы методами электроразведки с контролируруемыми источниками на территории Горного Алтая направлены в первую очередь на изучение геоэлектрического строения, и далее результаты всех режимных наблюдений анализируются с максимальным учетом полученных сведений о строении участков исследования.

На территории Горного Алтая регулярные и структурные наблюдения электромагнитными методами с контролируемым источником: электрические и нестационарные электромагнитные зондирования (ВЭЗ, ЗС) сосредоточены большей частью в эпицентральной зоне разрушительного Чуйского землетрясения 2003 г. с  $M=7.3$ . Измерения были начаты в 2004 г. и продолжаются в настоящее время. Каждый год выполняются новые измерения методами ВЭЗ и ЗС для уточнения строения. Кроме того, существует целый ряд режимных пунктов для различных методов электроразведки, измерения в которых повторяются ежегодно.

Цель работ заключалась в следующем:

- а) получение новых полевых данных на территории Горного Алтая;
- б) уточнение и построение обоснованных геоэлектрических моделей литосферы исследуемой территории на основе обработки и комплексной интерпретации полевых данных электроразведки;
- в) получение временных вариаций электропроводности и параметра электрической анизотропии ( $\lambda$ ) по данным интерпретации режимных полевых измерений электромагнитных методов;
- г) дополнение базы данных полевых материалов комплекса электромагнитных методов (ВЭЗ, ЗСБ) по Горному Алтаю.
- д) проведение лабораторных и полевых сравнительных измерений с модернизированной электроразведочной аппаратурой с расширенным частотным диапазоном «Байкал 512».

## **Содержание работ 2020 г**

1. Провести геоэлектрические измерения с использованием новых модификаций электроразведочной аппаратуры ЗС в высокосейсмичных впадинах Горного Алтая.

2. Опробовать на материалах электрических и электромагнитных измерений 2017-2020 г.г. программно-алгоритмические средства для учета анизотропных свойств геологической среды, что позволит уточнить геометрические и физические характеристики разломных зон.

### **Детальный план работ 2020 г**

1. Провести регулярные площадные измерения индуктивной «соосной» установкой ЗС в западной части Чуйской впадины (9 физ. наблюдений).

2. На участке Мухор-Тархата для выявления вариаций коэффициента электрической анизотропии провести измерения в 6 ежегодных пунктах мониторинга комплексом модификаций метода ЗС (Q, q; АВ-q; АВ-MN).

3. В районе поселка Бельтир (долина реки Чаган) для уточнения глубинного геоэлектрического строения выполнить измерения индуктивными «соосными» установками ЗС (7 физ. наблюдения).

4. Продолжить ежегодные измерения методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) с целью определения закономерностей вариаций геоэлектрических параметров (УЭС, анизотропии) на одном из наиболее сложно построенных участков Чуйской впадины в долине р. Чаган, (западная окраина впадины) в зоне основного разрыва Чуйского землетрясения 2003 г.

5. Провести натурные полевые измерения в режимной точке (ПК 134, Чуйская впадина) с использованием новых модификаций электроразведочной аппаратуры ЗС.

### **Район работ**

Основным объектом исследования 2020 года являлись крупные тектонические структуры западной части Чуйской впадины Горного Алтая.

Чуйская впадина – крупнейшая межгорная котловина Алтая. При длине 80 километров, её ширина достигает 40 км. Дно котловины вогнуто и находится на высотах 1850-1750 метров над уровнем моря. Южные ограничения впадины совпадают с государственной границей РФ и Монголии.

Со всех сторон впадина обрамлена заснеженными хребтами – Южно-Чуйским, Северо-Чуйским, Курайским, плато Сайлюгем. Этим и обусловлен суровый климат. Абсолютный минимум температур -62 градуса по Цельсию, максимум +31. Однако средняя температура июля всего +13,8 градуса – это обусловлено значительной разницей между дневными и ночными температурами, характерной для резко континентального климата.

Чуйская впадина характеризуется очень сухим климатом. Годовое количество осадков здесь едва превышает 100 мм в год, причём большая их часть выпадает летом. Зимой в котловине почти нет снега.

Карта районов проведения полевых работ 2020 года представлена на рисунке 3.85.

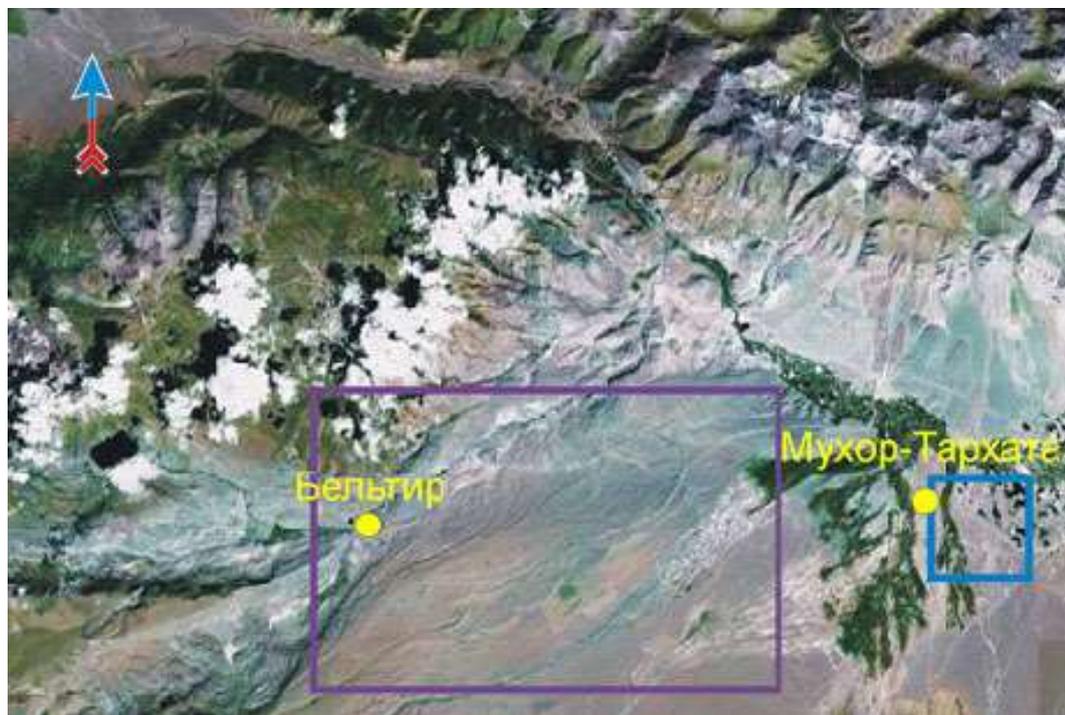


Рисунок 3.85 – Районы работ 2020 г. Чуйская впадина

Для проведения электроразведочных работ до глубин ~ 500-800 м использовался электроразведочный комплекс «Байкал МЭРС-Т» в комплекте с коммутатором тока ГТИ-200 (см. раздел 1.5). Датчиком регистрации переходного процесса служила многовитковая рамка, разработанная, изготовленная и прошедшая лабораторные и полевые тестирования.

Результаты работ СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за 2020 год

Сотрудники СЕФ ФИЦ ЕГС РАН проводят ежегодные экспериментальные исследования методом нестационарных электромагнитных зондирований (ЗС) для изучения геоэлектрического строения и электромагнитного мониторинга сеймотектонических процессов.

Проведены режимные наблюдения методами геоэлектрики с контролируемым источником с целью регистрации временных вариаций геоэлектрических параметров пород в сейсмоактивных зонах Горного Алтая (Чуйская впадина).

Режимные наблюдения проведены в девяти регулярных пунктах (рисунок 3.86) квадратными соосными центральными петлями (Q, q). Размер генераторной петли составляет 500x500 м, приемной петли: 200x200 м. Ток в генераторном контуре поддерживается в интервале 1.5 - 20 А.

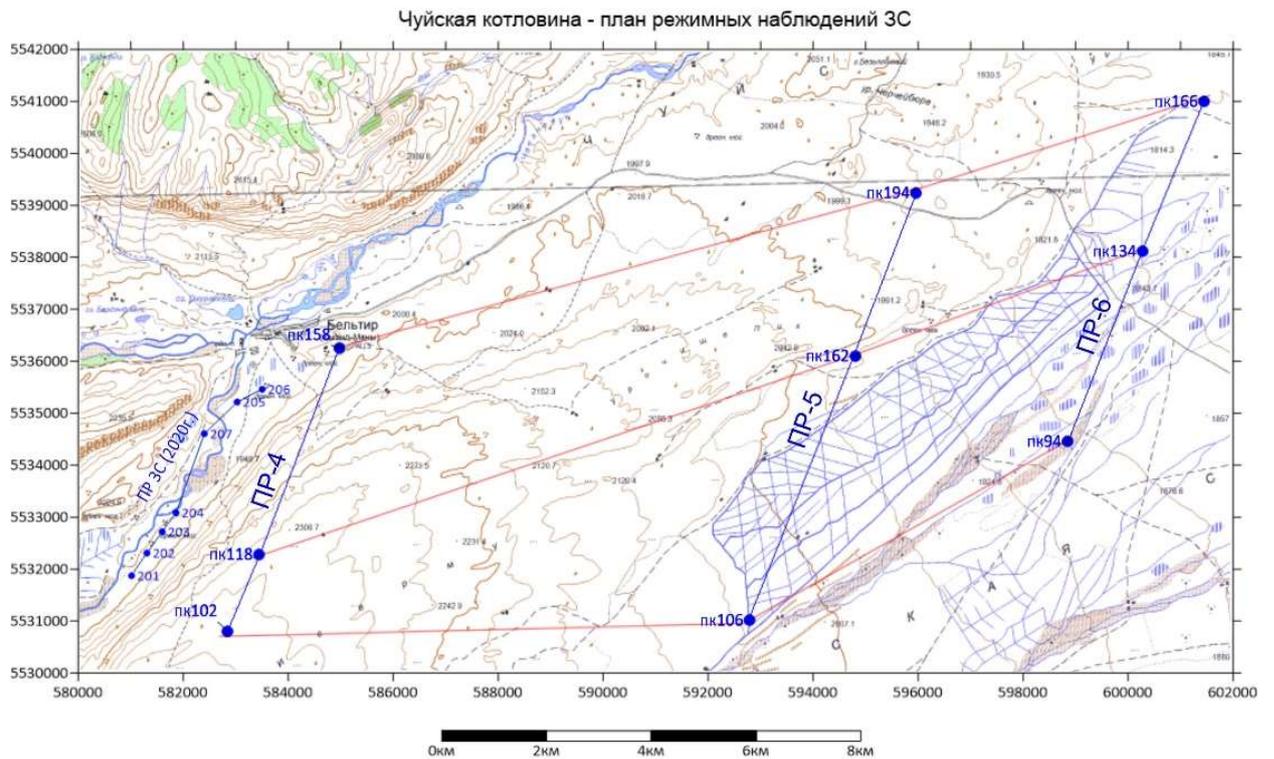


Рисунок 3.86 – Схема регистрации в режимных точках, Чуйская впадина, Горный Алтай

В результате работ получен большой объем полевых данных, в каждом из девяти пунктов режимных наблюдений было выполнено по шесть циклов измерений, что позволило достичь уровня выделения сигнала порядка  $1.0 \cdot 10^{-8}$  В. Кривые ЭДС становления поля в режимных точках приведены на рисунке 3.87.

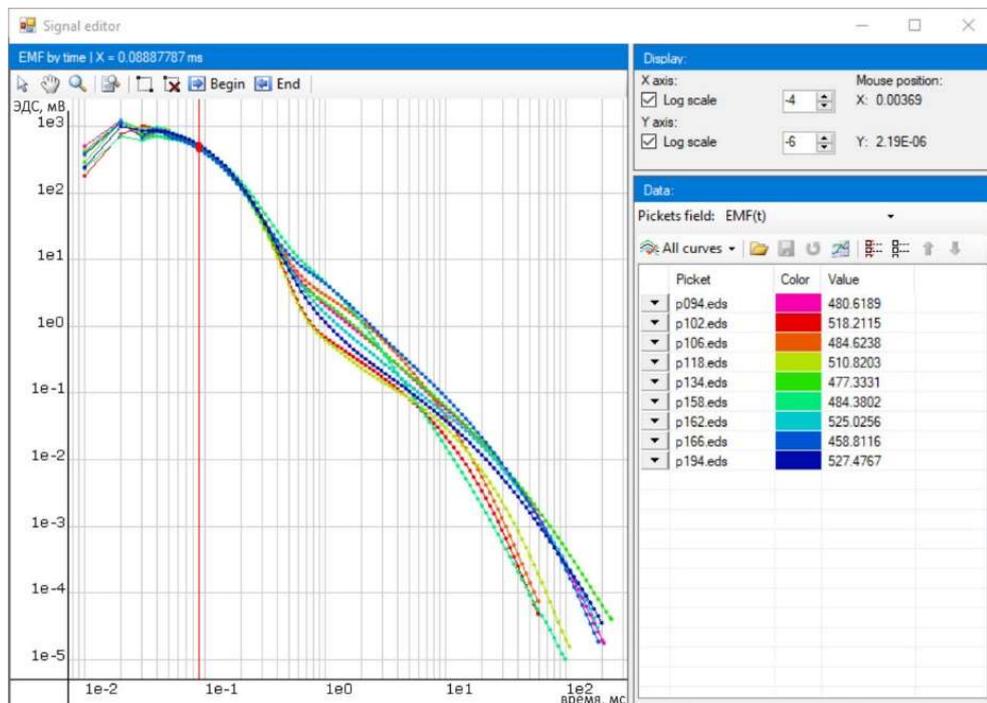


Рисунок 3.87 – Вид кривых процесса становления поля в режимных точках

## Последовательность обработки данных режимных наблюдений

Вначале проводится редактирование исходного сигнала. Выполняется нормирование на силу тока генераторного контура, расчет среднеарифметического всех дублей регистрации, фильтрация данных. Вид обработанных процессов ЭДС режимных точек приведен на рисунке 3.88.

Следующим шагом предварительной обработки является расчет и построение кривой  $\rho_T$ .

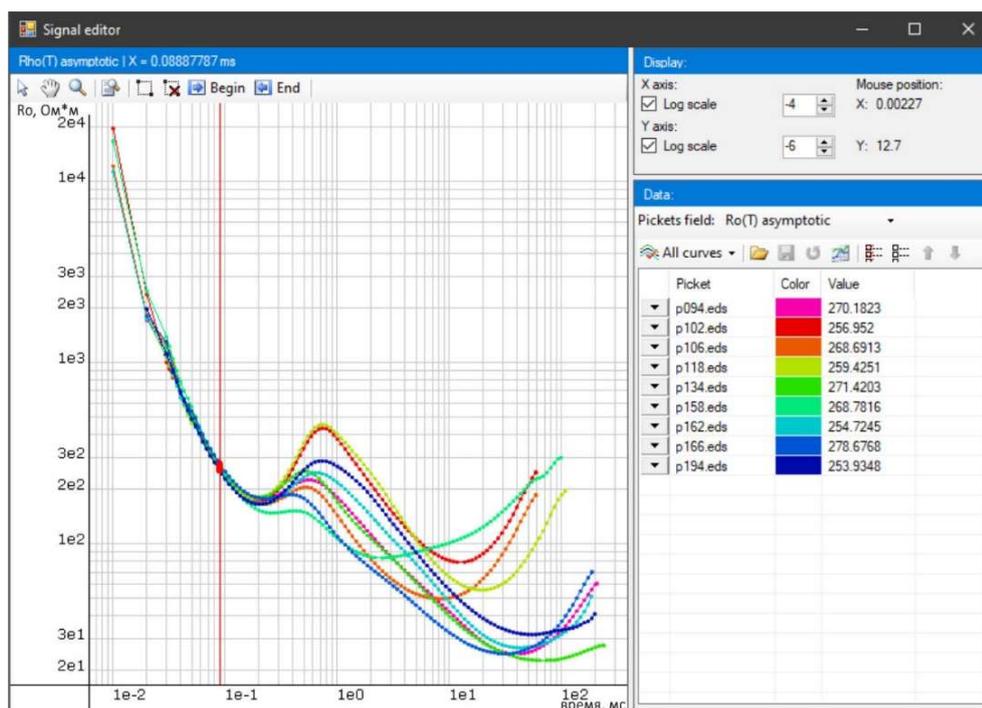


Рисунок 3.88 – Кривые  $\rho_T$  становления поля в режимных точках

Анализ предварительной обработки (расчет параметра  $\rho_T$ ) подтверждает правильность выбранных параметров регистрации, все кривые имеют явно выраженную правую восходящую ветвь, устойчивый выход на структуру фундамента.

Окончательным этапом обработки является одномерная инверсия полевых данных и построение геоэлектрической модели всех пунктов режимных наблюдений (рисунки 3.89 - 3.91)

По результатам одномерной инверсии процессов становления поля в режимных точках построены геоэлектрические разрезы по трем линиям пикетов. Разрезы выполнены по профилям, расположенным практически в субмеридианном направлении, проходят через режимные пункты ЗС (рисунки 3.92 - 3.94).

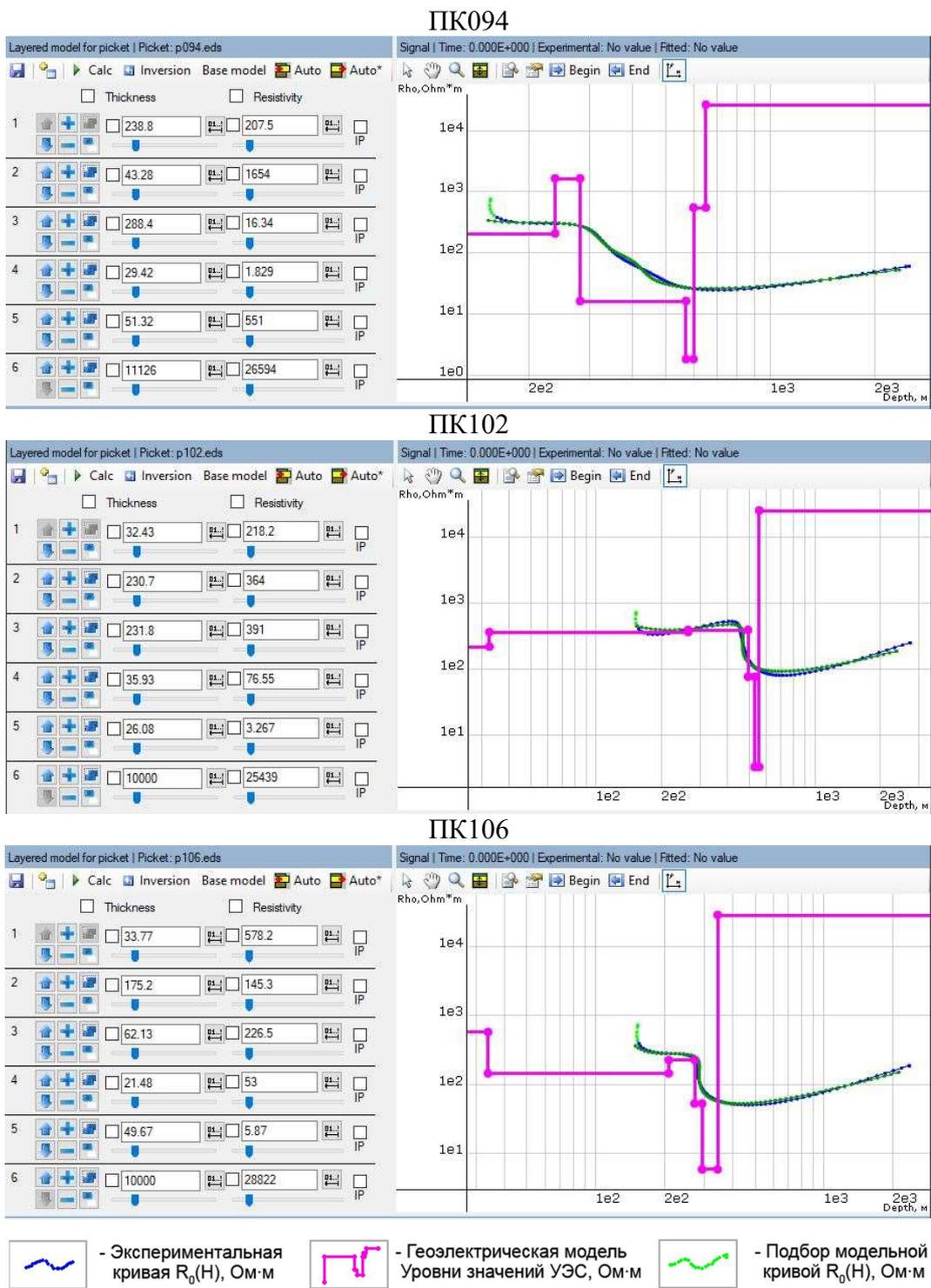
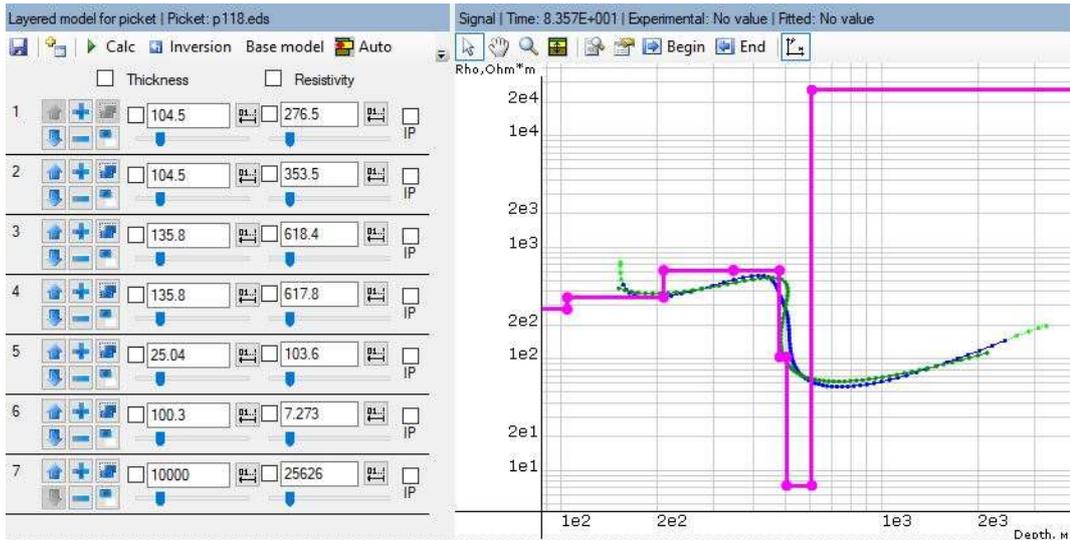
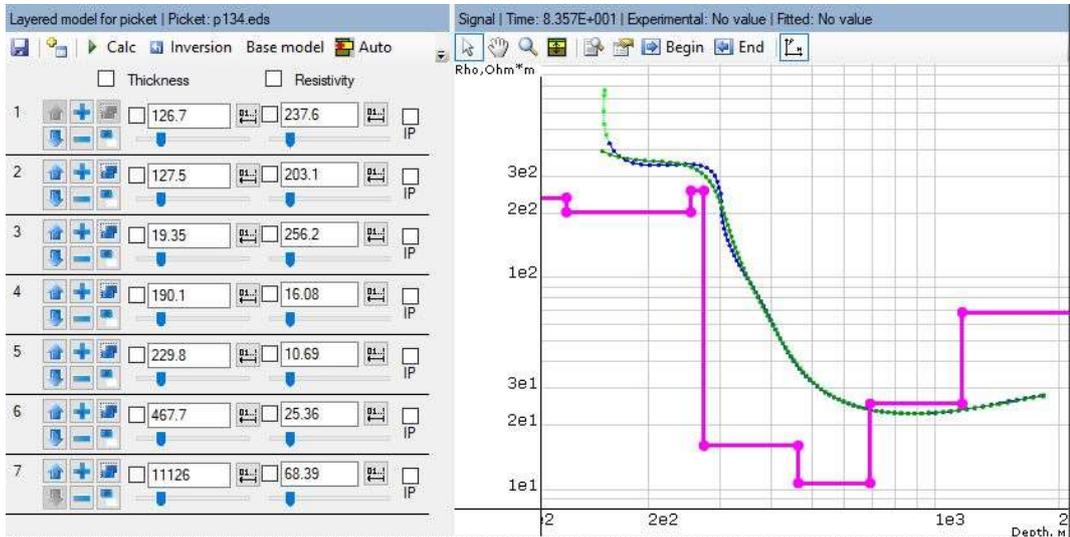


Рисунок 3.89 – Геоэлектрические модели (одномерная инверсия) пикетов режимных наблюдений 2020 г (ПК 94÷ПК 106)

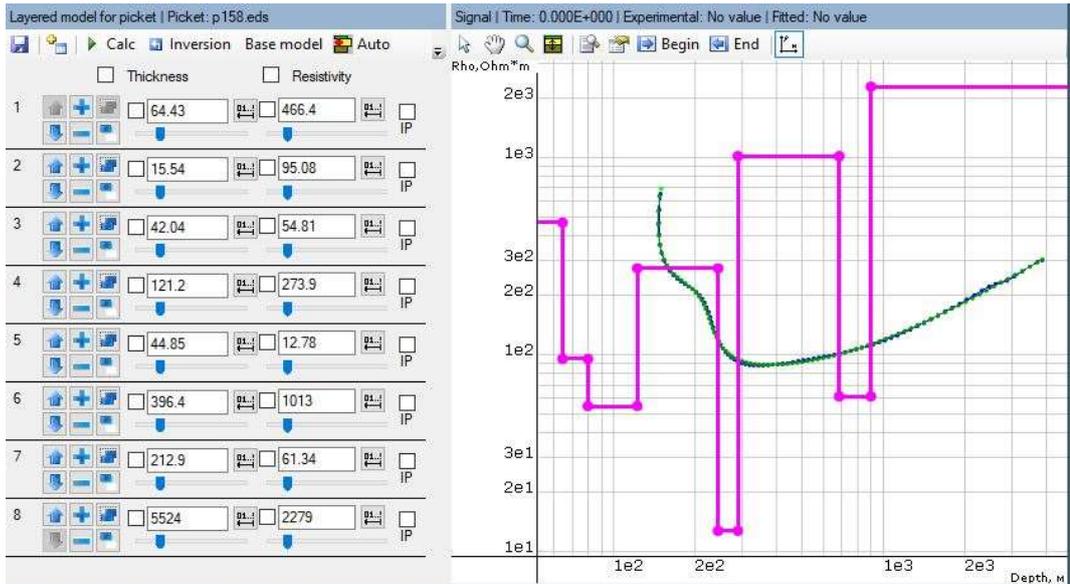
### ПК118



### ПК134



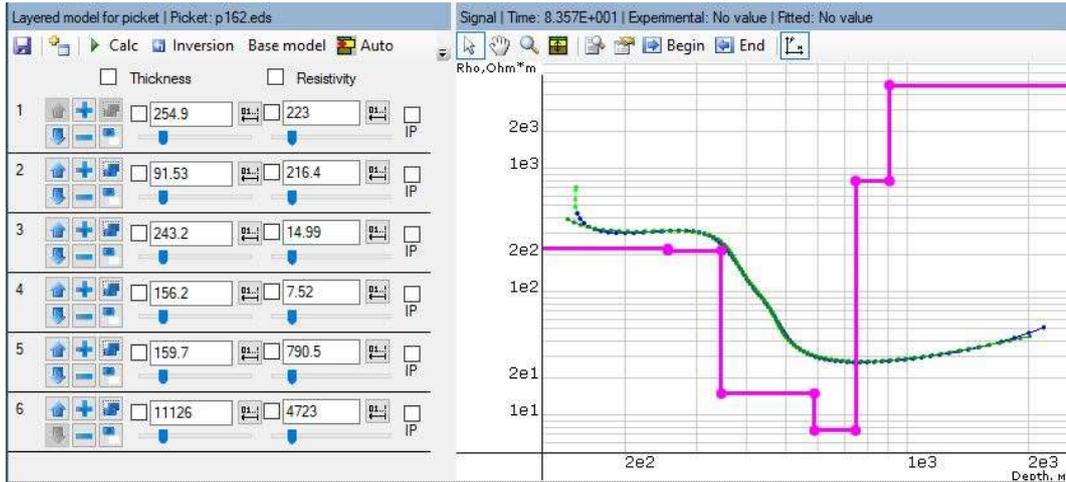
### ПК158



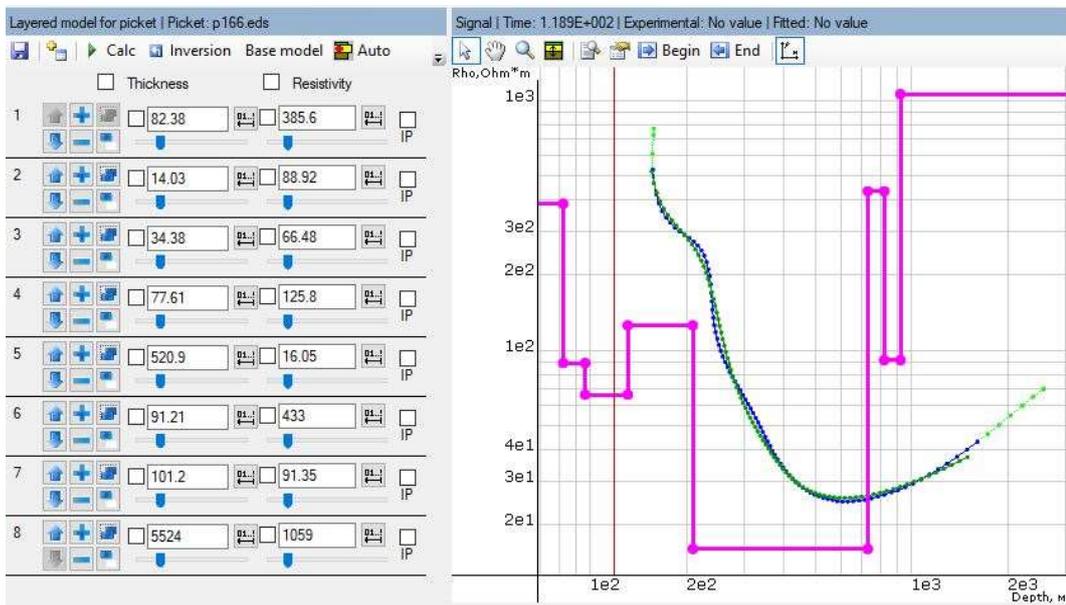
 - Экспериментальная кривая  $R_0(H)$ , Ом·м
  - Геоэлектрическая модель Уровни значений УЭС, Ом·м
  - Подбор модельной кривой  $R_0(H)$ , Ом·м

Рисунок 3.90 – Геоэлектрические модели (одномерная инверсия) пикетов режимных наблюдений 2020 г (ПК 118÷ПК 158)

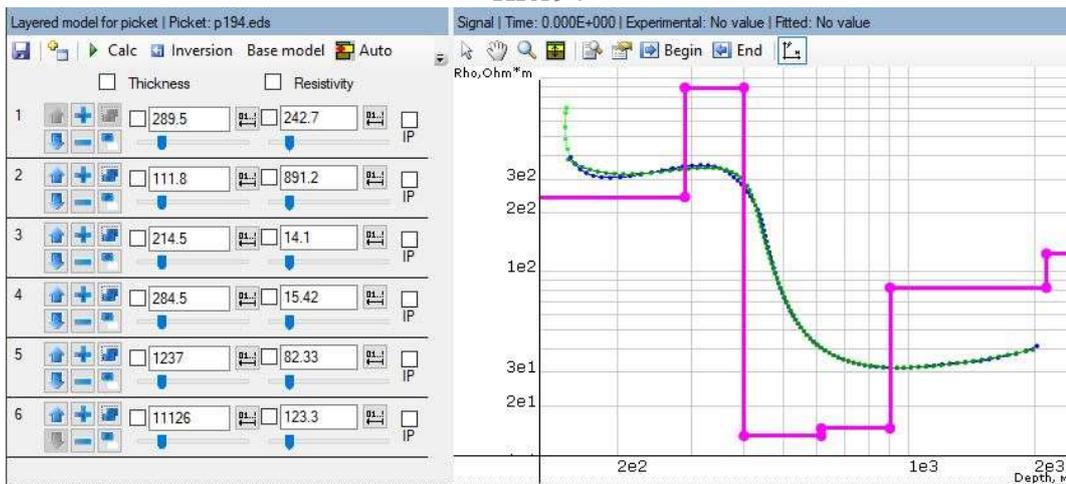
### ПК162



### ПК166



### ПК194



 - Экспериментальная кривая  $R_0(H)$ , Ом-м   
  - Геоэлектрическая модель Уровни значений УЭС, Ом-м   
  - Подбор модельной кривой  $R_0(H)$ , Ом-м

Рисунок 3.91 – Геоэлектрические модели (одномерная инверсия) пикетов режимных наблюдений 2020 г (ПК 162÷ПК 194)

На разрезах отмечается два основных параметра строения опорного геоэлектрического горизонта, который интерпретируется как фундамент с повышенным значением УЭС. При средних значениях глубин порядка 500 – 600 метров на пикетах 134 и 194 выявлено резкое погружение фундамента до глубинных отметок более 1500 метров. Осева линия данной депрессии широтного простирания.

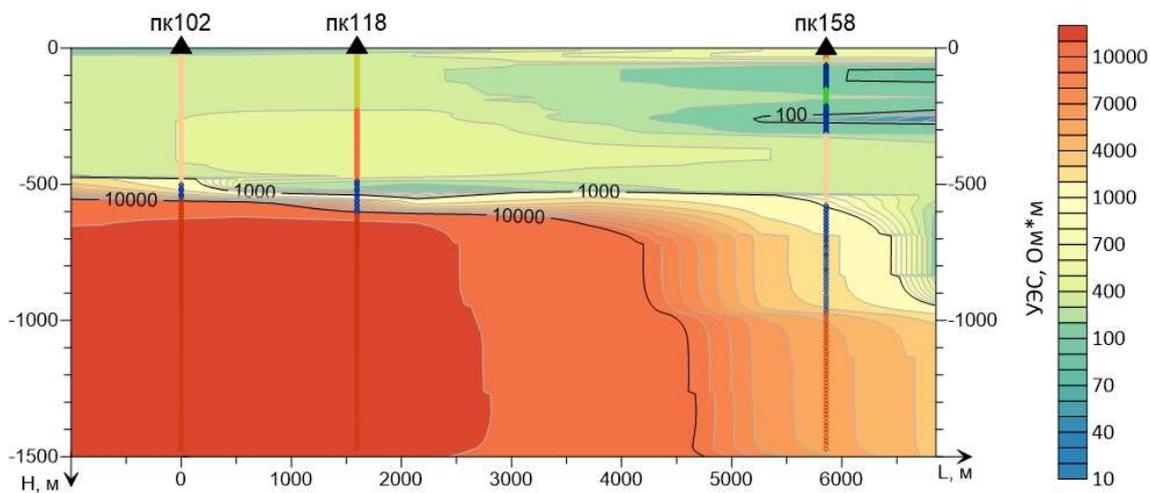


Рисунок 3.92 – Разрез по линии пикетов 102-118-158

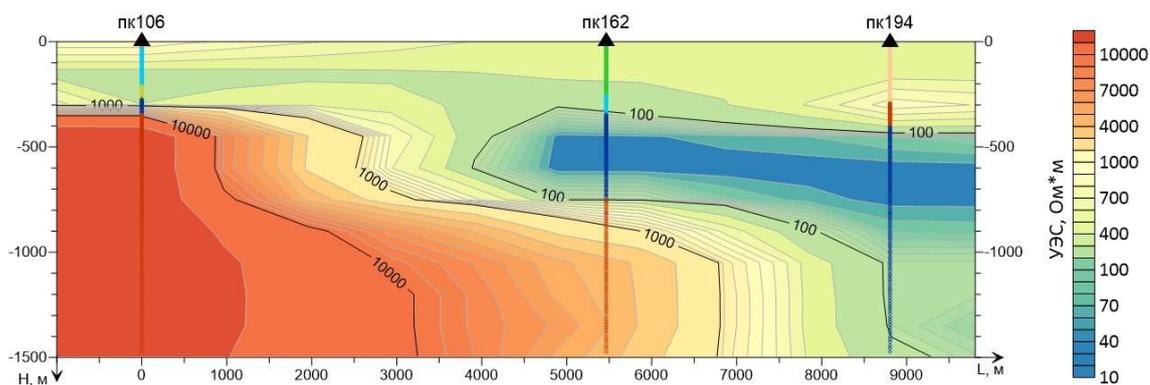


Рисунок 3.93 – Разрез по линии пикетов 106-162-194

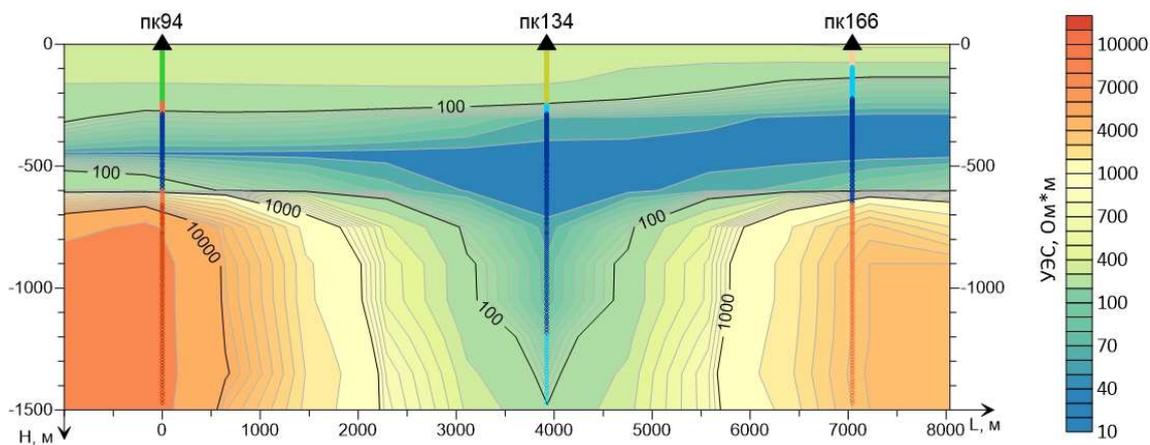


Рисунок 3.94 – Разрез по линии пикетов 94-134-166

## Уточнения геоэлектрического строения структур долины реки Чаган.

В 2020 г. выполнены измерения индукционными «соосными» установками ЗС (7 физ. наблюдения)

Необходимость измерений ЗС вдоль долины р. Чаган обусловлена необходимостью получение дополнительных данных о глубинах до опорного горизонта на участке вблизи горного обрамления.

Размер генераторной петли составлял 200x200 м, в качестве приемной использовалась одновитковая квадратная петля размером 100x100 м. Ток в генераторном контуре для разных измерений составлял от 3.5 А до 20.0 А. На рисунке 3.95 показано карта фактического материала полевых измерений 2020 года и предыдущих лет.

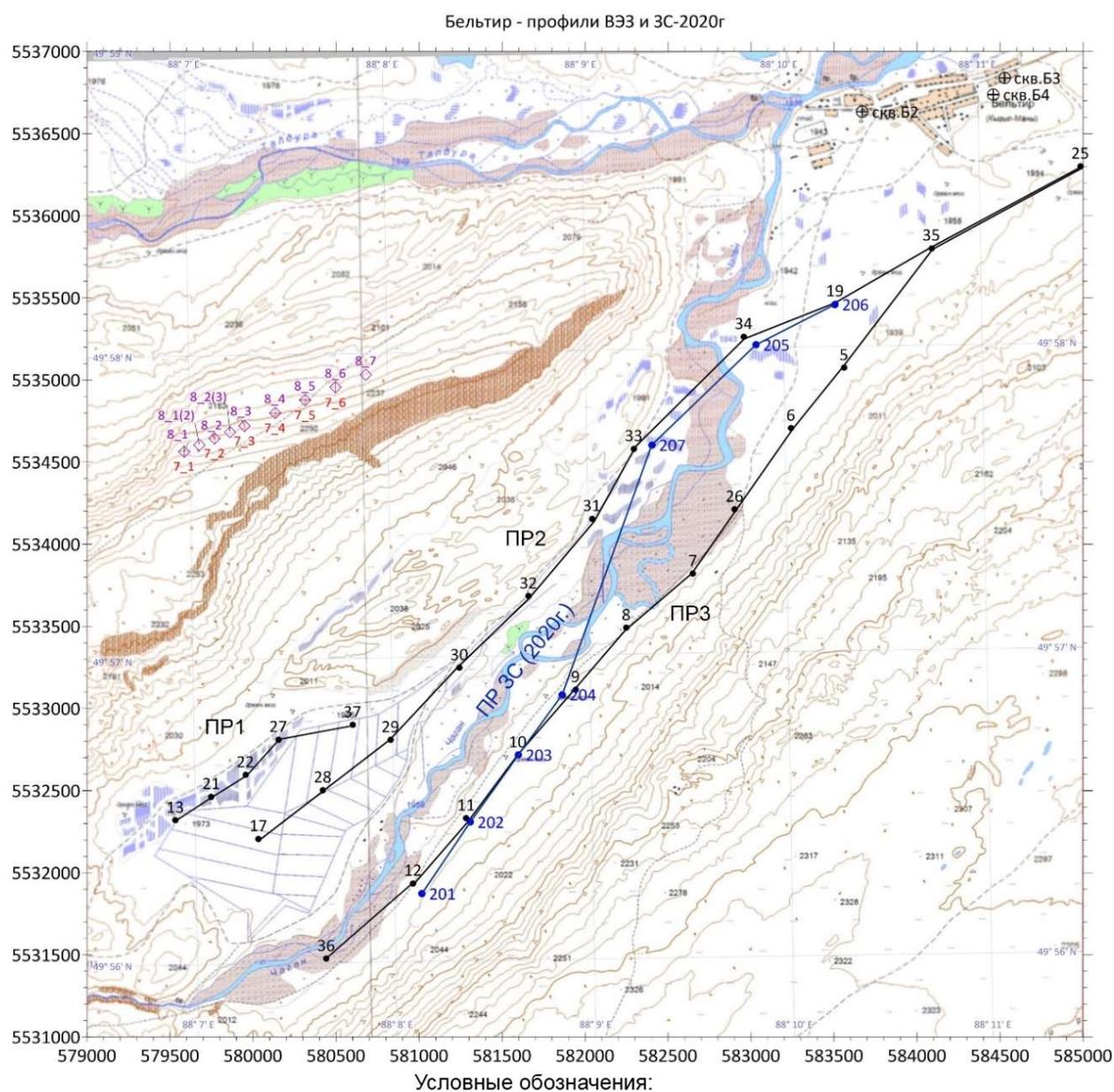


Рисунок 3.95 – Расположение профиля вдоль долины р. Чаган в плане

На каждом пикете осуществлялось по три цикла измерений на разных уровнях токовых импульсов и коэффициентов усиления регистратора, количество накоплений в каждом цикле не менее 1000, что позволило достичь уровня выделения сигнала порядка  $1.0 \cdot 10^{-8}$  В. На рисунке 3.96 приведены результаты регистрации процессов становления поля по пикетам.

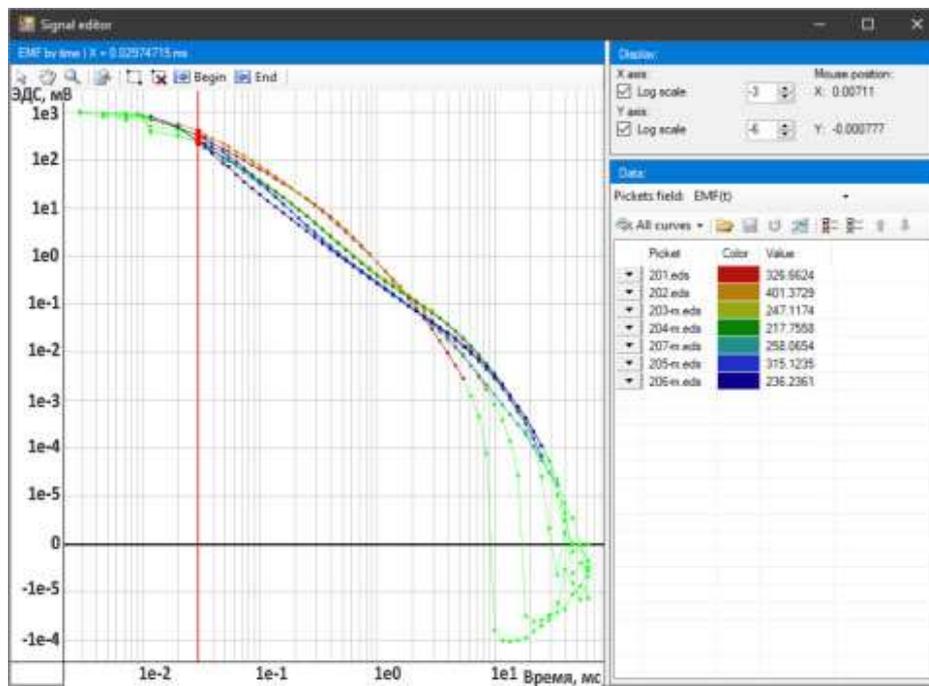


Рисунок 3.96 – Кривые ЭДС пикетов профиля, после нормировки на ток и сшивки

Расчет и построение трансформации  $\rho_t$  приведен на рисунке 3.97.

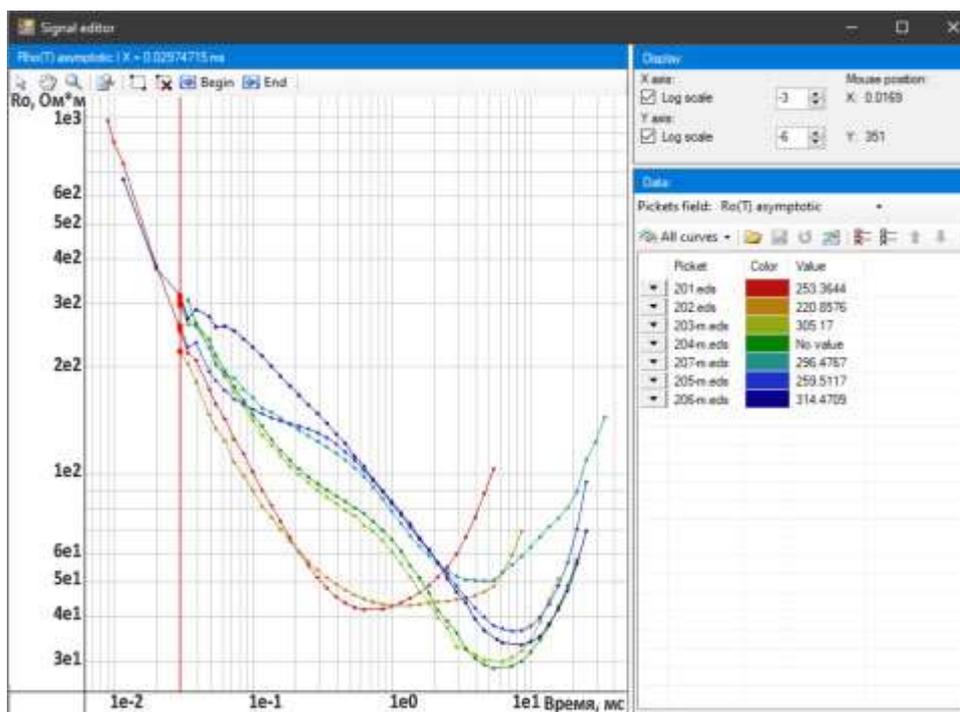


Рисунок 3.97 – Трансформации  $\rho_t$  пикетов профиля

Анализ предварительной обработки (расчет параметра  $\rho_T$ ) подтверждает правильность выбранных параметров регистрации, все кривые имеют явно выраженную правую восходящую ветвь, устойчивый выход на структуру фундамента.

По всем пикетам бы проведен расчет геоэлектрических параметров, построены геоэлектрические модели (рисунок 3.98).

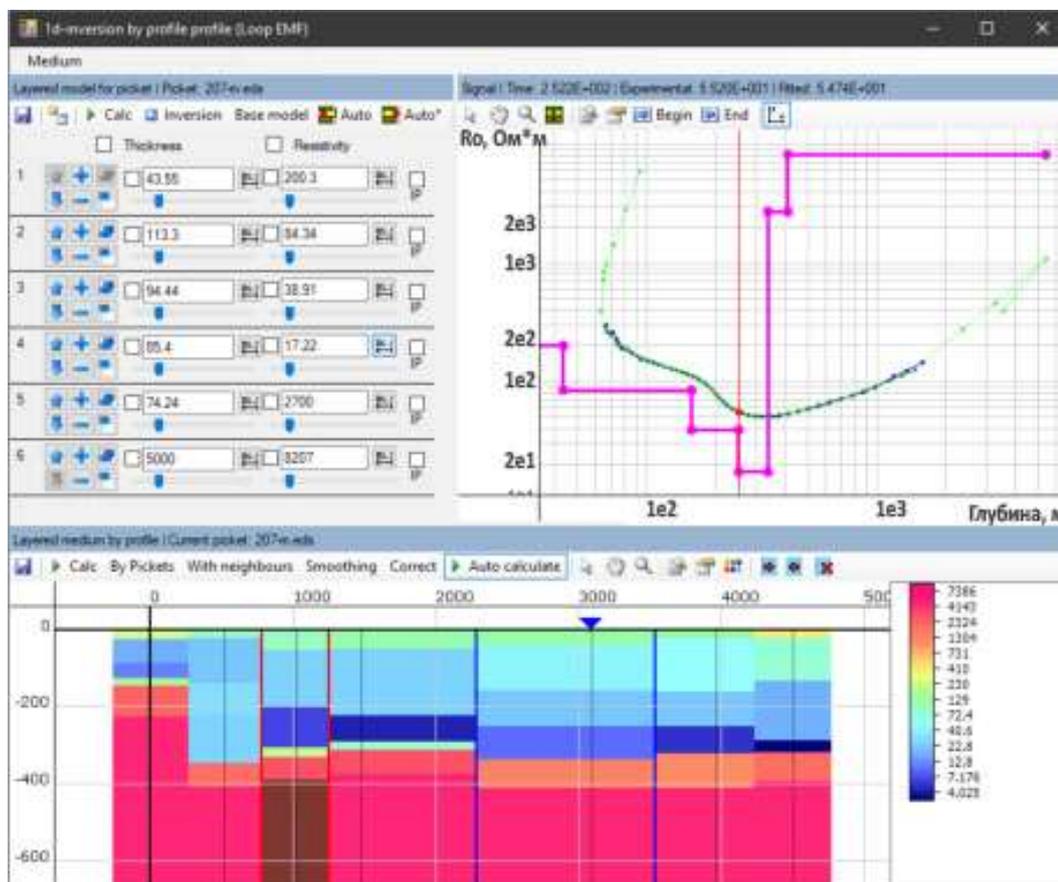


Рисунок 3.98 – Построение геоэлектрических моделей. Подбор слоистой среды

Выполнена одномерная инверсия, (1 D модель профиля, рисунок 3.99). Рассчитаны глубины до опорного горизонта со значениями УЭЗ более 1000 ом\*м.

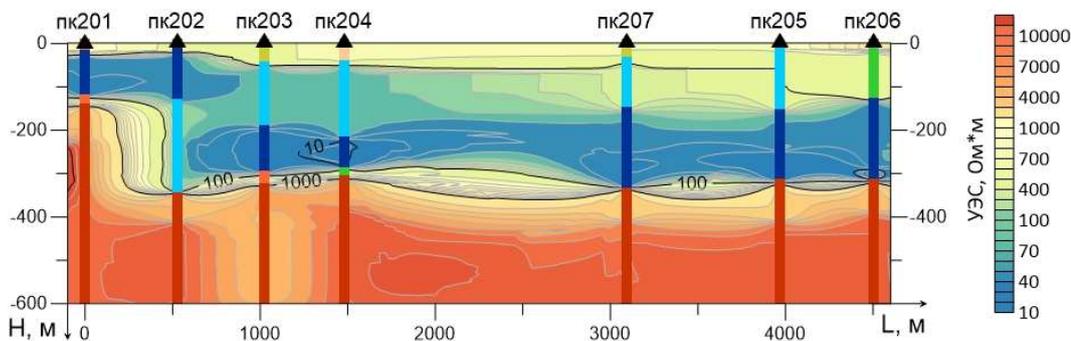


Рисунок 3.99 – Одномерная инверсия (1 D)

Пикет ПК 201 максимально приближен к горному обрамлению, глубина до фундамента порядка 150 метров. На остальных пикетах профиля глубина до опорного горизонта

составляет порядка 300 – 350 метров. Значительное увеличение глубины до опорного горизонта в интервале между ПК 201 и ПК 202 связано с зоной разлома, приуроченного к горному обрамлению.

Площадные электроразведочные измерения в пунктах мониторинга комплексом модификаций метода ЗС (Q-q, АВ-q, АВ-MN) на полигоне в восточной части пос. Мухор-Тархата (Чуйская впадина) для учета анизотропных свойств геологической среды методом нестационарных электромагнитных полей.

Для выявления вариаций коэффициента электрической анизотропии были выполнены ежегодные многоразносные измерения методом зондирования становлением электромагнитного поля в центральной части Чуйской впадины на участке Мухор-Тархата. На рисунке 3.100 приведена схема размещения пунктов ЗС на участке исследования, измерения повторяются ежегодно с 2007 года.

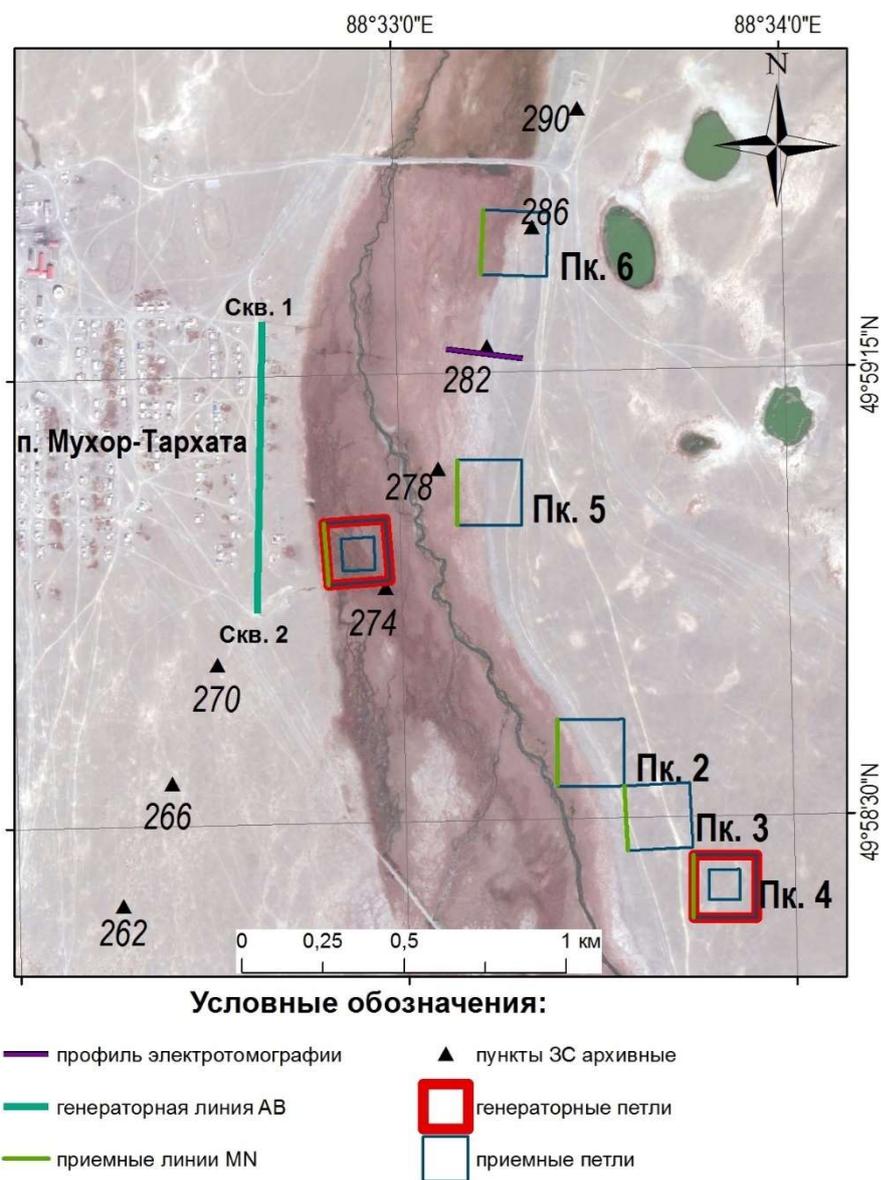


Рисунок 3.100 – Схема размещения пунктов ЗС в районе села Мухор-Тархата в 2020г

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. 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 3.101 и 3.102 приведены полевые кривые ЭДС 2020 года установки АВ-q и АВ-MN, которые характеризуют геоэлектрическую модель в каждом пункте ЗС.

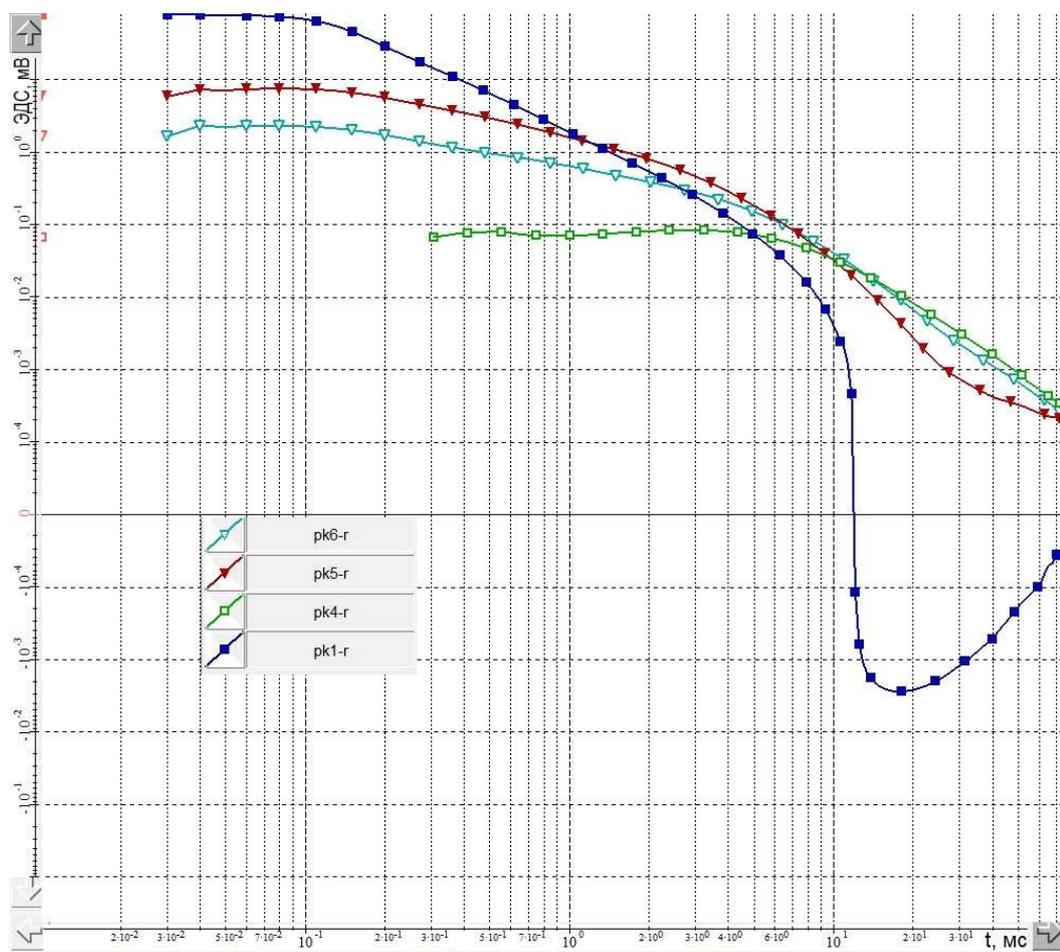


Рисунок 3.101 – Полевые кривые ЭДС 2020 г., установка АВ-q

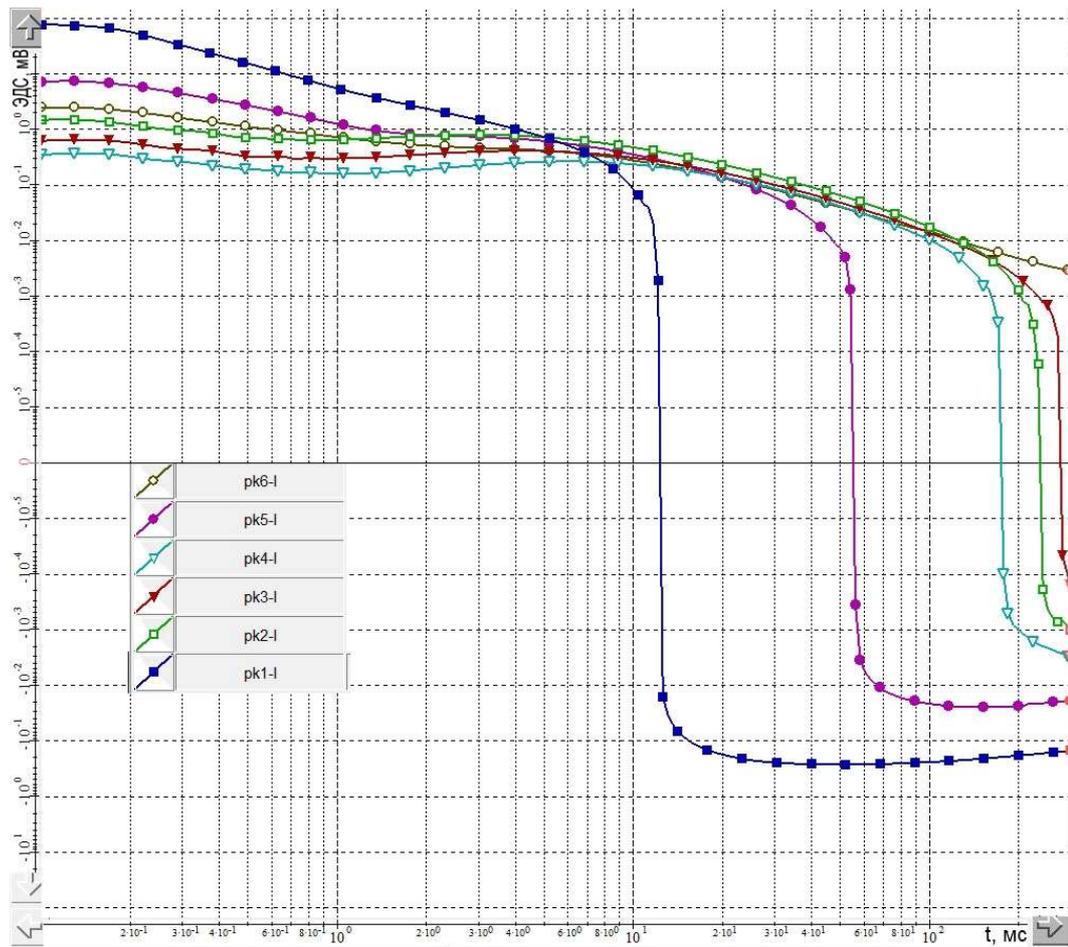


Рисунок 3.102 – Полевые кривые ЭДС 2020 г., установка АВ-МН.

Выполнена предварительная обработка и интерпретация данных ЗС. На рисунке 3.103 представлен пример интерпретации данных ЗС1 с соосной установкой, а на рисунках 3.104 и 3.105 результат интерпретации ЗС1 и ЗС6 с установкой АВ-МН.

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.

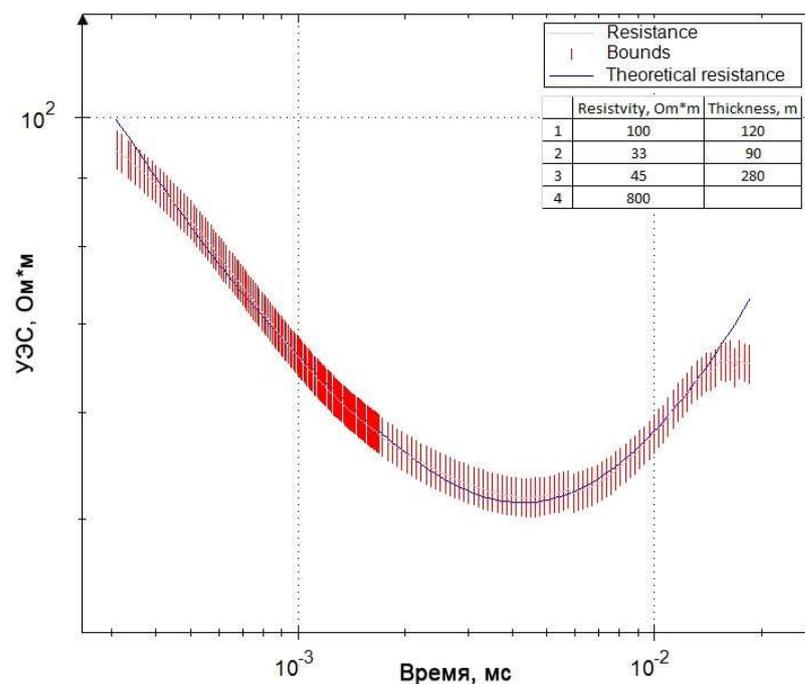


Рисунок 3.103 – Пример интерпретации данных ЗС1 с соосной установкой

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 данным четырёх пунктов ЗС 1, 2, 5, 6 с установкой АВ-MN получены максимальные значения коэффициента электрической анизотропии ( $\lambda$ ), что можно объяснить влиянием зоны разлома, к которой эти пункты наиболее близко расположены.

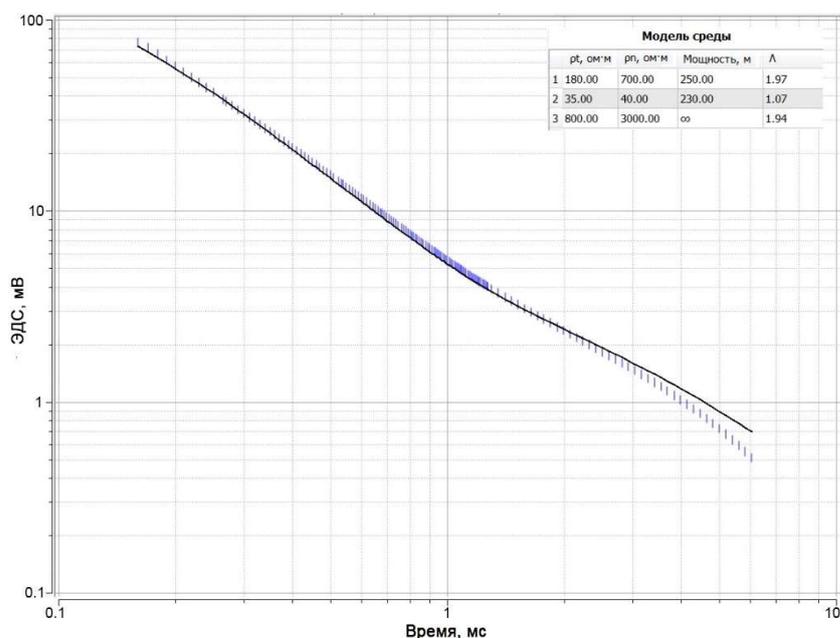


Рисунок 3.104 – Пример интерпретации данных ЗС1 с установкой АВ-MN

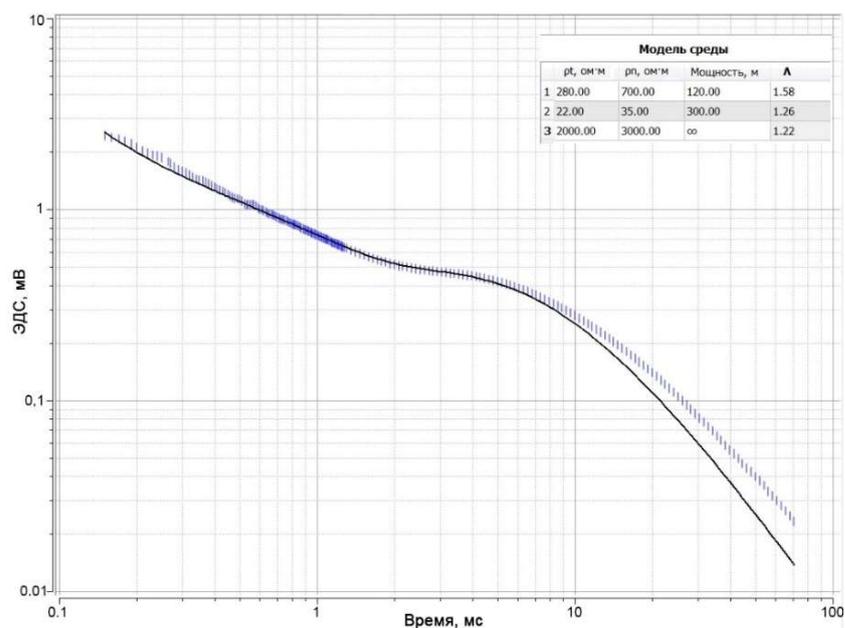


Рисунок 3.105 – Пример интерпретации данных ЗСб с установкой АВ-МН

С целью изучения геодинамических процессов, связанных с разрушительным землетрясением 2003 года, в полевом сезоне 2020 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 3.106 приведена схема размещения пунктов ВЭЗ и профилей ЭТ на местности. В 2020 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, а также крестовый ВЭЗ №№19-20 в зоне отсутствия нарушений.

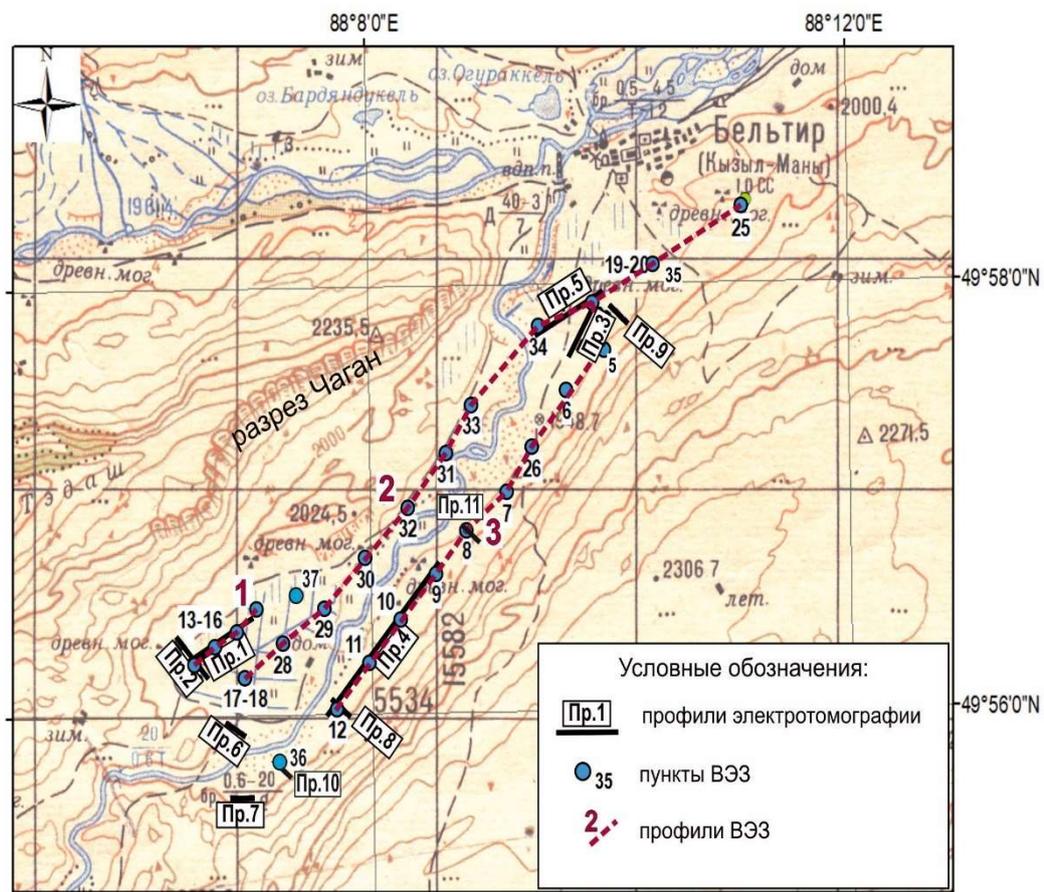


Рисунок 3.106 – Схема размещения пунктов ВЭЗ и профилей ЭТ в районе села Бельтир

### Аппаратура и методика измерений

Измерения методом ВЭЗ проводились симметричной градиентной четырехэлектродной установкой Шлюмберже (MN-AB). Схема установки представлена на рисунке 3.107. Размеры питающей линии AB/2 находятся в интервале значений 1.5 - 100 м.

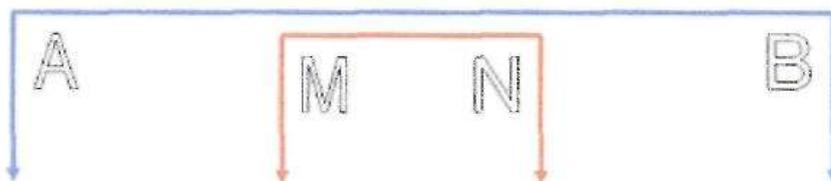


Рисунок 3.107 – Схема установки Шлюмберже

В таблице 3.7 показана система использованных разносов питающих и приемных электродов и геометрические коэффициенты для установок на данном участке.

Таблица 3.7 – Разносы питающих и приемных электродов, геометрические коэффициенты.

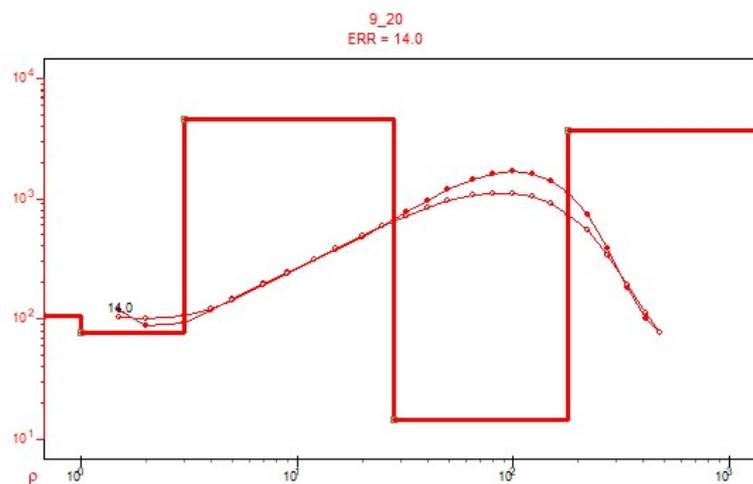
№ п/п	AB/2 (м)	MN/2 (м)	K	№ п/п	AB/2 (м)	MN/2 (м)	K
1	1,50	0.5	6,28	20	80,00	12	818.91
2	2,00	0.5	11,78	21	100,00	12	1290.15
3	3,00	0.5	27.49	22	123,00	12	1961.53
4	4,00	0.5	49.48	23	150,00	12	2926.39
5	5,00	0.5	77.75	24	180,00	12	4222.30
6	7,00	0.5	153.15	25	180,00	29	1709.40
7	9,00	0.5	253.68	26	220,00	12	6316.69
8	12,00	0.5	451.60	27	220,00	29	2576.05
9	15,00	0.5	706.07	28	275,00	29	4050.70
10	15,00	3	113.10	29	340,00	29	6215.96
11	20,00	0.5	1255.85	30	410,00	29	9059.64
12	20,00	3	204.73	31	410,00	100	2483.43
13	25,00	3	322.54	32	480,00	29	12434.15
14	32,00	3	531.45	33	480,00	100	3462.04
15	40,00	3	833.04	34	580,00	100	5127.08
16	50,00	3	1304.28	35	700,00	100	7539.52
17	65,00	3	2207.49	36	840,00	100	10926.46
18	65,00	12	534.20	37	1000,00	100	15550.88
19	80,00	3	3346.32				

Для проведения измерений методом ВЭЗ использовалась электроразведочная станция «СКАЛА-48» (см. раздел 1.5).

### Результаты по данным ВЭЗ

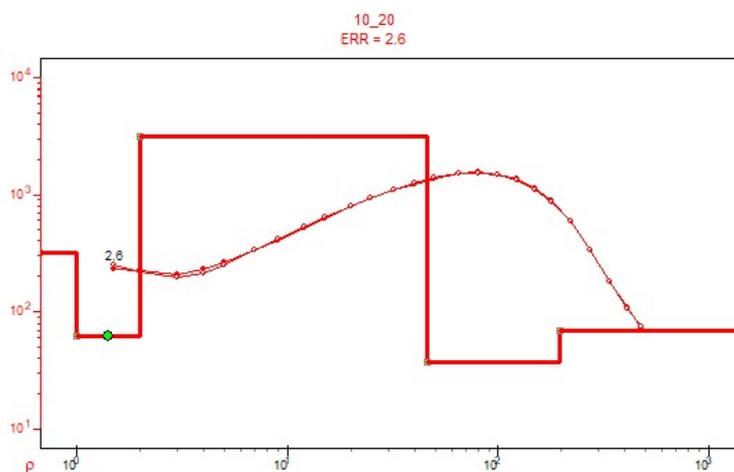
Для полигона «Бельтир» получена пятислойная модель: в самой верхней части присутствуют два маломощных низкоомных слоя, далее мощный слой аномально высокоомных отложений (более 5000 Ом.м), прослеживаемый практически на всех кривых ВЭЗ участка, эти породы в соответствии с априорной информацией отнесены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

На рисунках 3.108 – 3.119 приведены полевые кривые ВЭЗ за 2020 год и геоэлектрические модели, полученные по результатам решения обратной задачи в комплексе ZondIP.



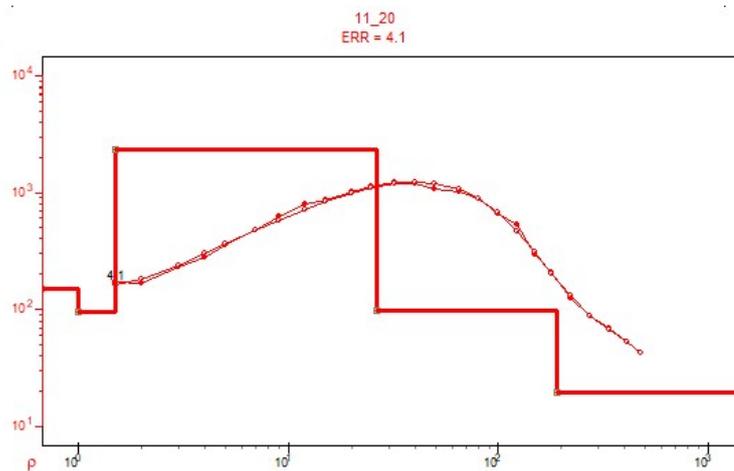
N	$\rho$	h	z
1	106.76	1	0/0
2	76.97	2	1
3	4641.59	25	3
4	14.55	150	28
5	3746.65		178

Рисунок 3.108 – Кривая ВЭЗ номер 9



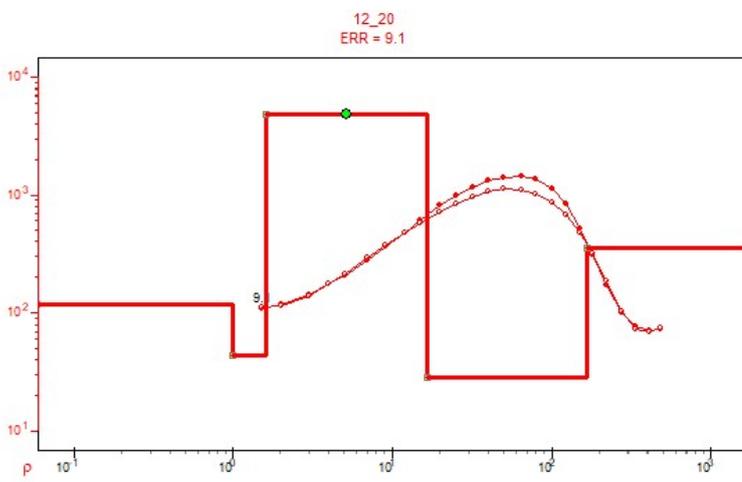
N	$\rho$	h	z
1	324.81	1	0/0
2	62.87	1	1
3	3189.81	44	2
4	37.47	150	46
5	68.74		196

Рисунок 3.109 – Кривая ВЭЗ номер 10



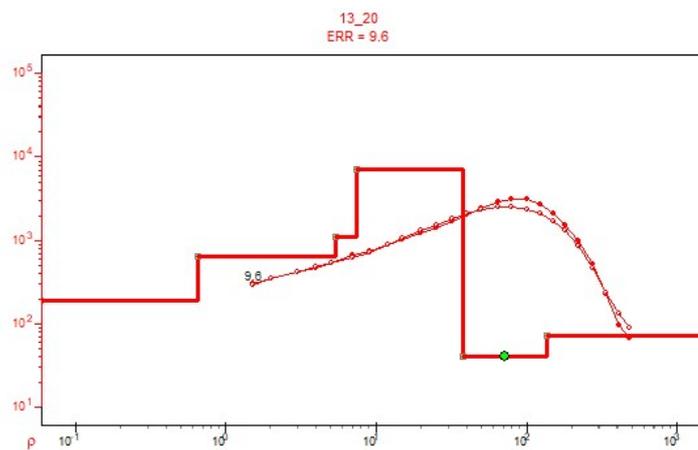
N	$\rho$	h	z
1	151.15	1	0/0
2	94.39	0.50	1
3	2320.68	25	1.50
4	98.32	165	26.50
5	19.68		191.50

Рисунок 3.110 – Кривая ВЭЗ номер 11



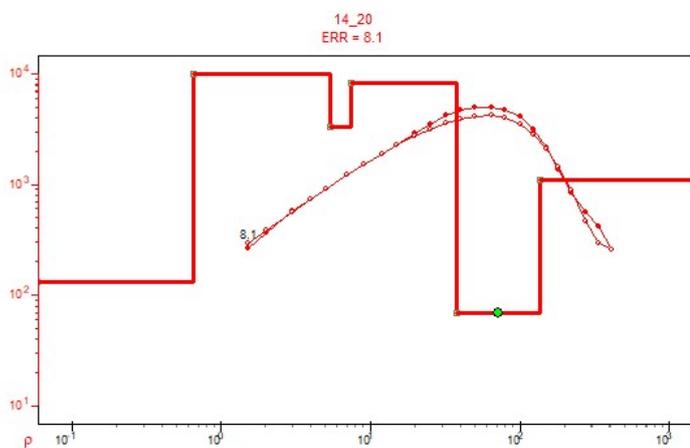
N	$\rho$	h	z
1	117.43	1	0/0
2	44.00	0.60	1
3	4896.91	15.00	1.60
4	28.16	150	16.60
5	361.53		166.60

Рисунок 3.111 – Кривая ВЭЗ номер 12



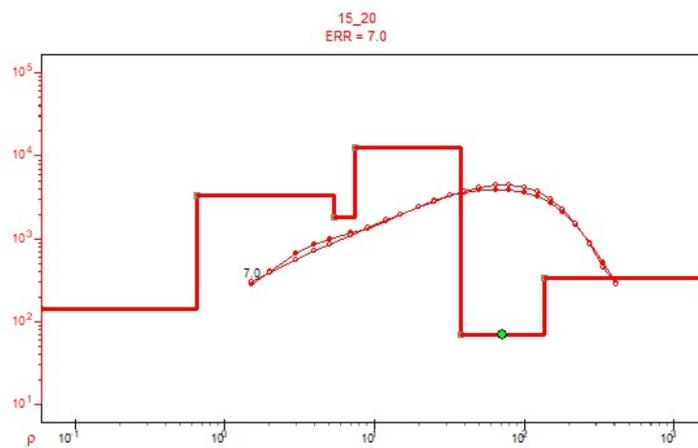
N	$\rho$	h	z
1	186.77	0.65	0/0
2	628.71	4.75	0.65
3	1113.04	2	5.40
4	7123.82	30	7.40
5	40.72	100	37.40
6	72.09		137.40

Рисунок 3.112 – Кривая ВЭЗ номер 13



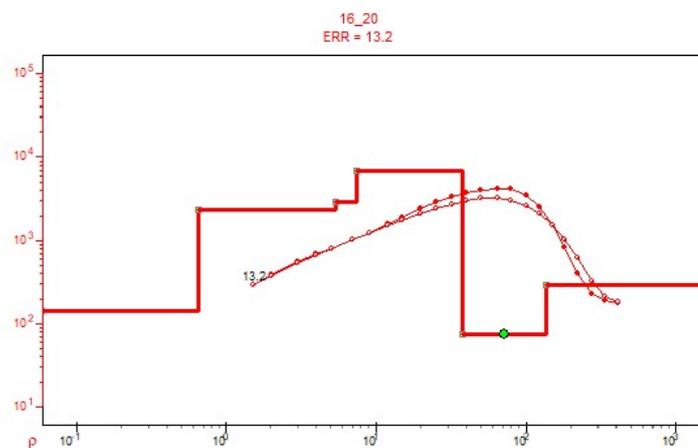
N	$\rho$	h	z
1	130.70	0.65	0/0
2	10000	4.75	0.65
3	3306.59	2	5.40
4	8365.28	30	7.40
5	68.74	100	37.40
6	1113.04		137.40

Рисунок 3.113 – Кривая ВЭЗ номер 14



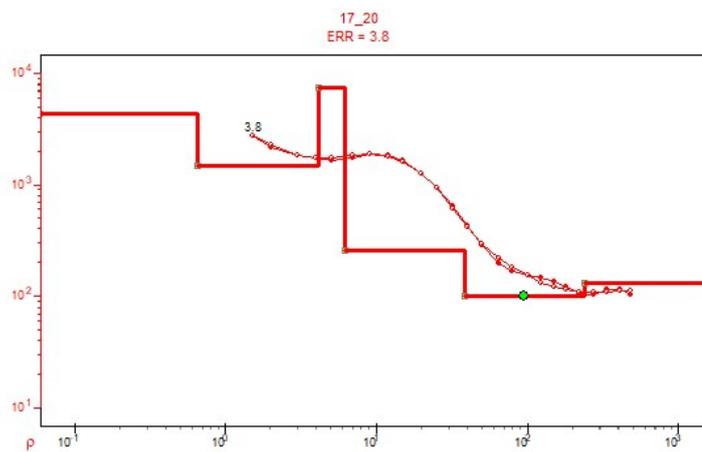
N	$\rho$	h	z
1	141.21	0.65	0/0
2	3346.17	4.75	0.65
3	1802.25	2	5.40
4	12315.14	30	7.40
5	70.40	100	37.40
6	330.66		137.40

Рисунок 3.114 – Кривая ВЭЗ номер 15



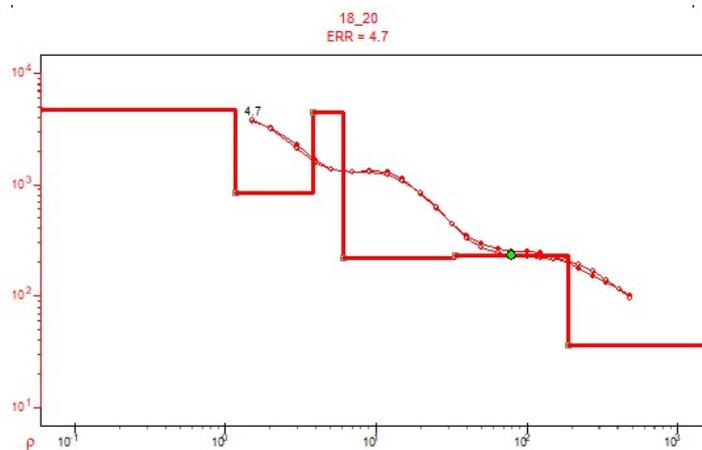
N	$\rho$	h	z
1	140.37	0.65	0/0
2	2327.69	4.75	0.65
3	2883.69	2	5.40
4	6792.68	30	7.40
5	73.83	100	37.40
6	286.66		137.40

Рисунок 3.115 – Кривая ВЭЗ номер 16



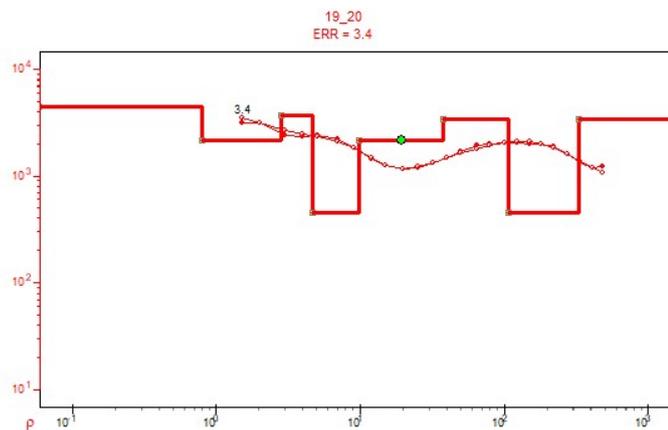
N	$\rho$	h	z
1	4399.58	0.65	0/0
2	1480.96	3.50	0.65
3	7515.69	2	4.15
4	257.54	32	6.15
5	100.00	200	38.15
6	130.70		238.15

Рисунок 3.116 – Кривая ВЭЗ номер 17



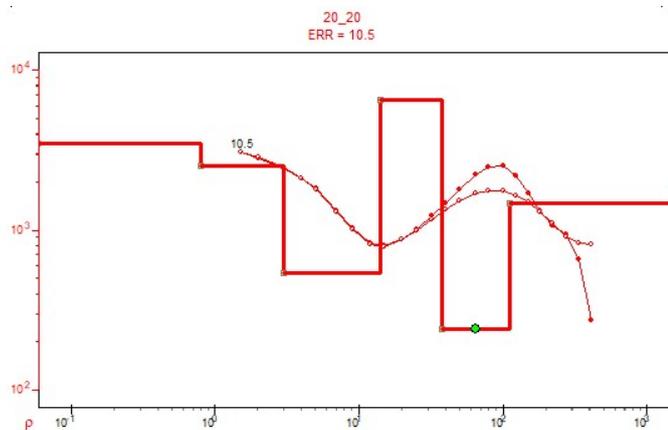
N	$\rho$	h	z
1	4725.18	1.16	0/0
2	836.53	2.65	1.16
3	4478.81	2.26	3.81
4	219.32	27.38	6.06
5	231.39	154.23	33.45
6	36.80		187.68

Рисунок 3.117 – Кривая ВЭЗ номер 18



N	$\rho$	h	z
1	4425.83	0.80	0/0
2	2167.29	2.00	0.80
3	3746.65	1.88	2.80
4	450.55	5.12	4.68
5	2167.29	28.00	9.80
6	3406.43	70	37.80
7	458.67	220.53	107.80
8	3426.76		328.33

Рисунок 3.118 – Кривая ВЭЗ номер 19



N	$\rho$	h	z
1	3467.78	0.80	0/0
2	2529.88	2.19	0.80
3	541.81	11.13	2.99
4	6515.59	23.68	14.12
5	241.23	74.06	37.80
6	1472.17		111.86

Рисунок 3.119 – Кривая ВЭЗ номер 20

По итогам интерпретации данных ВЭЗ за 2017-2020 гг была построена трехмерная модель с использованием пакета Zond (рисунок 3.120).

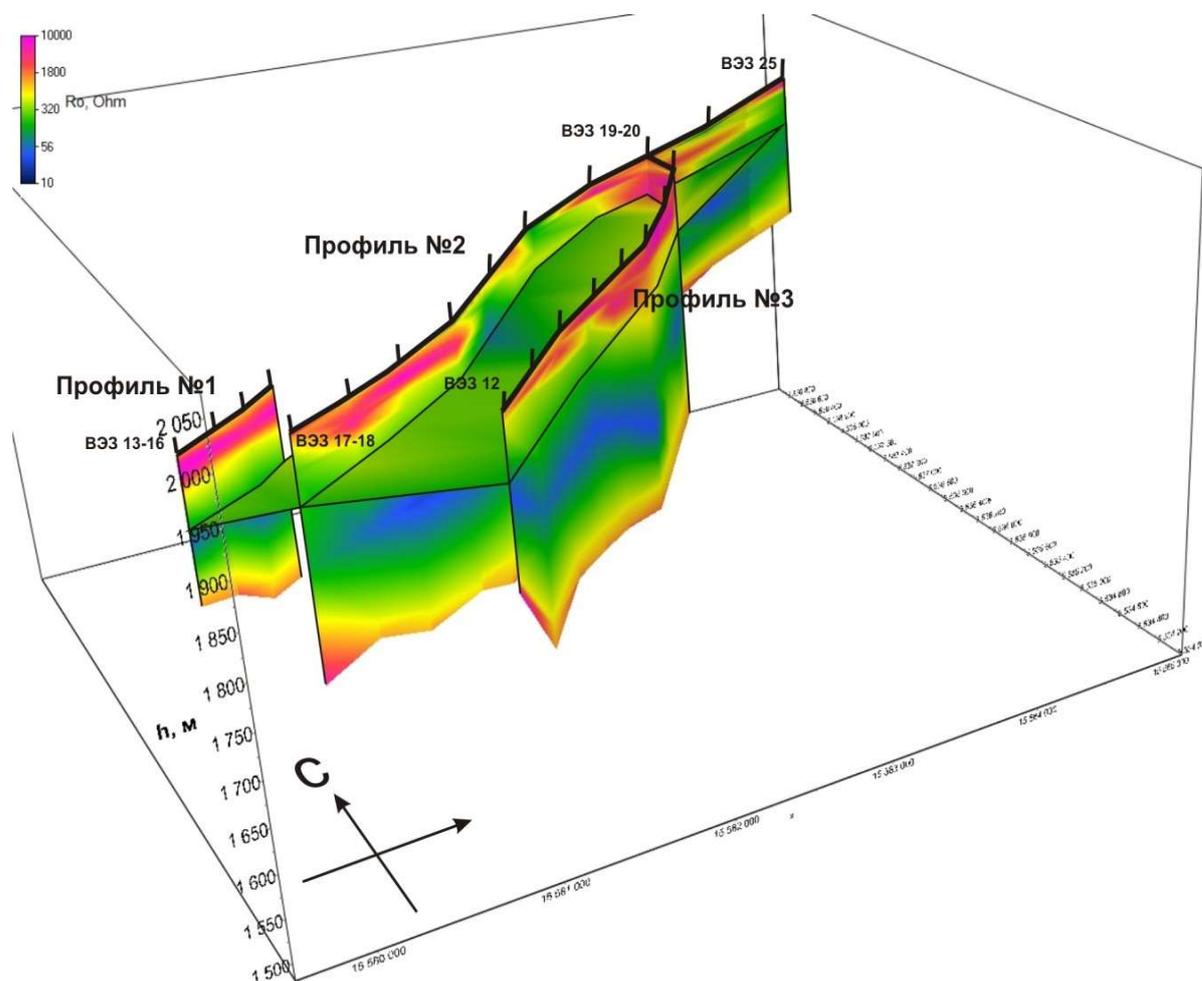


Рисунок 3.120 – Трехмерная геоэлектрическая модель по данным ВЭЗ в долине р. Чаган

На рисунке 3.120 показан горизонтальный срез геоэлектрической модели на уровне 60 м, линии профилей и пункты ВЭЗ. Модель характеризует общее строение участка исследования. Наблюдаются приподнятые на 80-120 м блоки относительно центральной части долины на северо-востоке и юго-западе. Верхняя часть разреза неоднородна, хорошо видны зоны распространения многолетнемерзлых пород с УЭС выше 10000 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, построены геоэлектрические разрезы по профилям наблюдений и трехмерная модель участка исследования (использована адаптированная программа моделирования, инверсии, визуализации Zond). Получены геоэлектрические параметры крупной разломной зоны, разделяющей тектонические блоки. Пополнена база данных.

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

В таблицах 3.8 – 3.10 приведены значения  $\Lambda$  за все годы измерений. Анализ данных 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 коэффициент имеет стабильное значение близкое к единице, таким образом, анизотропия и её вариации здесь фактически отсутствуют.

Таблица 3.8 – Коэффициенты анизотропии для кругового ВЭЗ 13-16 в зоне трещин.

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

Таблица 3.9 – Коэффициенты анизотропии для крестового ВЭЗ 17-18 в зоне трещин.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
$\Lambda_{17-18}$	1.84	1.36	1.20	1.62	1.50	1.36	1.40	1.35	1.33	1.27	1.18	0.93	0.99	1.04	0.8	0.74	

Таблица 3.10 – Коэффициенты анизотропии для крестового ВЭЗ 19-20 вне зоны трещин.

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

На рисунке 3.121 представлены графики значений  $\Lambda$ .

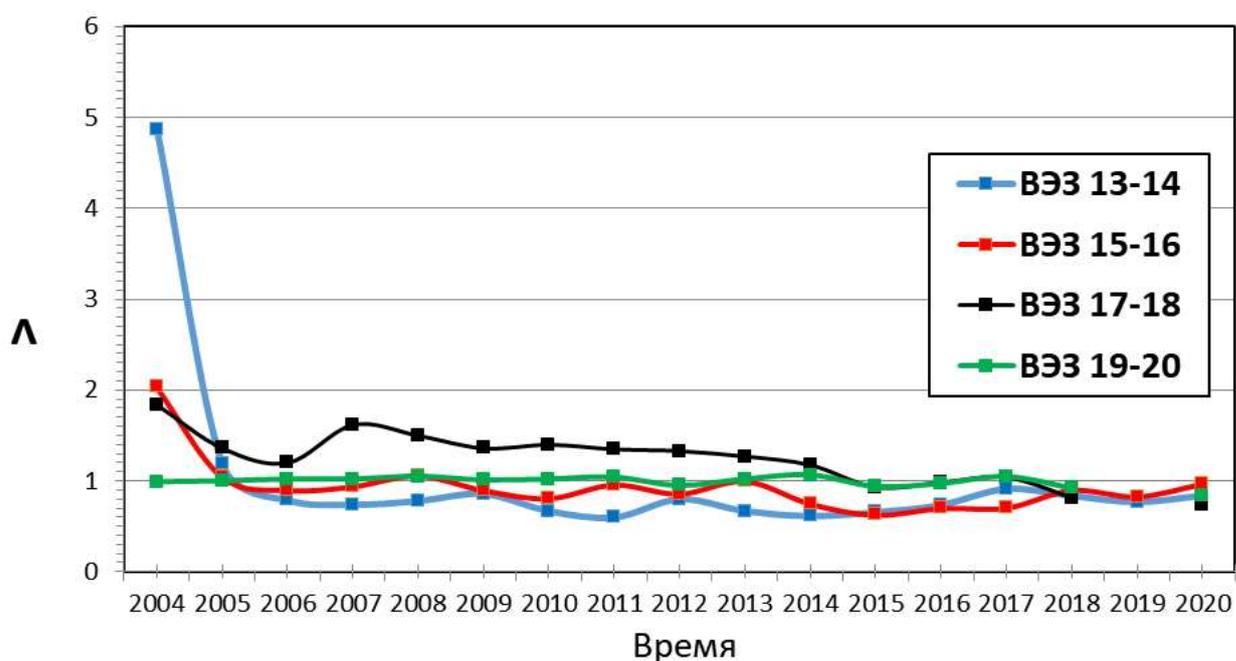


Рисунок 3.121 – Графики значений  $\Lambda$  за все годы измерений

По данным многолетних измерений методом ВЭЗ построены контурные диаграммы распределения  $\rho_k$  для кругового ВЭЗ №№13-16. На рисунке 3.122 приведены диаграммы за 2004, 2017, 2018 и 2020 года.

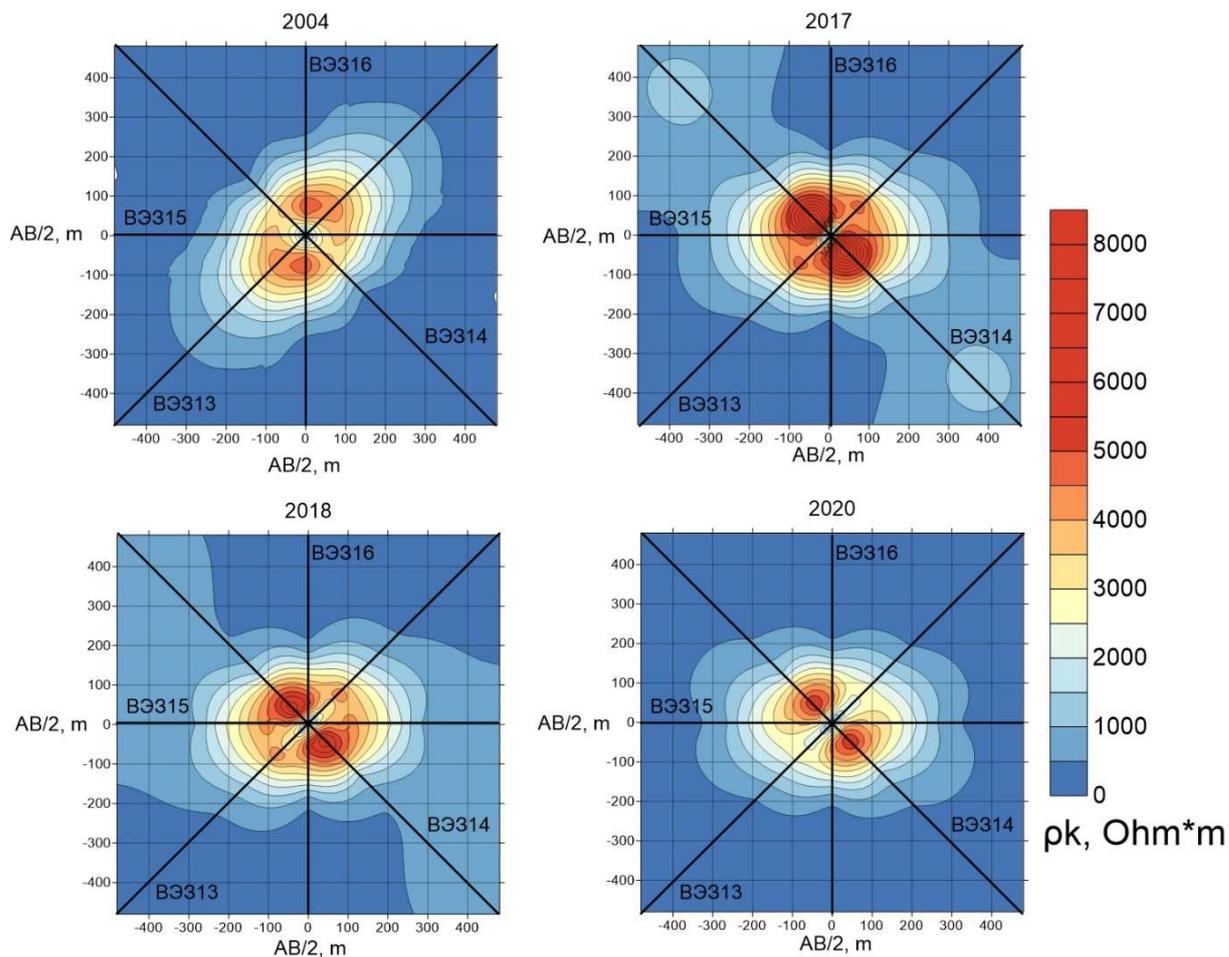


Рисунок 3.122 – Контурные диаграммы для кругового ВЭЗ в зоне видимых трещин.

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

Анализ диаграмм  $\rho_k$ , 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  $\rho_k$  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.

Измерения с использованием новых модификаций электроразведочной аппаратуры ЗС в высокосейсмичных впадинах Горного Алтая.

### **Аппаратурная разработка «БАЙКАЛ 512»**

#### **Объект разработки**

Электроразведочная система наблюдений в составе программно-измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований.

#### **Актуальность разработки**

Нестационарные электромагнитные зондирования показали свою высокую эффективность и заняли достойное место в комплексе работ по изучению осадочного чехла. Осложнения, с которыми приходится иметь дело можно разделить на две группы. К первой следует отнести геологические факторы, затрудняющие исследование осадочного чехла – соляную тектонику, трапповый магматизм, разрывные нарушения, сложную морфологию терригенных и карбонатных коллекторов. Вторая группа – это сложные условия рельефа и климата, наличие интенсивных промышленных электромагнитных помех. Также важную роль играет возрастание стоимости электроразведочных работ в сложных условиях и при повышении пространственной плотности наблюдений.

Таким образом, требовалась разработка современной многоканальной регистрирующей аппаратуры, создание измерительных систем с высокой мобильностью, точностью измерения, с возможностью эффективной организации наблюдений с повышенной пространственно-временной плотностью в условиях густой залесенности и сложного рельефа местности. Актуальной являлась разработка технологий сбора и математической компьютеризированной обработки информации для условий высокого уровня электромагнитных помех вблизи промышленных объектов.

#### **Задачи разработки**

Разработка измерительного комплекса для нестационарных электромагнитных зондирований на основе мобильных регистрирующих систем с высокой пространственной плотностью наблюдений, арифметическим шагом дискретизации и записью всех накоплений в цифровом виде; разработка программного обеспечения для регистрации, обработки сигналов, подавления помех, интерпретации.

#### **Цель разработки**

Повышение достоверности и качества геофизических данных, увеличение информативности нестационарных электромагнитных зондирований путем создания измерительного комплекса на основе современной элементной базы.

## **Краткий обзор современной аппаратуры для нестационарных электромагнитных зондирований**

Успешное внедрение метода ЗС в практику геофизических исследований Российской Федерации связано с рядом успешных аппаратурных разработок. Следует отметить станции серий «Цикл» («Цикл-1», «Цикл-2», «Цикл-Микро», «Цикл-5» «Цикл-7» «Цикл-8»); «Импульс» («Импульс-Ц» «Импульс-Д» («Импульс-13»)) разработки СНИИГГиМС (г. Новосибирск), имеющие развитые средства накопления и подавления помех. Одним из примеров аппаратуры с записью всех реализаций сигналов является станция ЦЭС-МГД разработки СибОКБ. За последние годы в связи с развитием цифровых технологий регистрации получили развитие электроразведочные станции ТЭС-24 (г. Саратов), AGE-XXL (Круко+ГеоНефтеГаз, г. Москва). Из иностранных разработок в области регистрирующей аппаратуры для структурных модификаций метода нестационарных электромагнитных зондирований хотелось бы выделить разработки канадской фирмы Phoenix Geophysics – комплекс V6A, американской – Zonge, немецкую систему LOTEM.

Отдельное внимание заслуживает аппаратура серии «Байкал» (совместная разработка Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН и Сибирского филиала ФИЦ ЕГС РАН)

### **Принципы работы и основные компоненты регистрирующей системы «Байкал 512»**

Основные особенности системы регистрации для нестационарных электромагнитных зондирований:

- одновременная регистрация сигналов становления электромагнитного поля от нескольких приемников поля (возможно использование приемников любых типов – петля, линия и др.) пространственно отдаленных друг от друга;

- расположение усилительных трактов и аналого-цифрового преобразователя непосредственно у приемной петли, что позволяет избавиться от проблемы передачи аналоговых сигналов, и тем самым повысить качество записываемого материала и помехозащищенность измерителя;

- высокоточная настраиваемая система синхронизации источника тока и измерительной системы на основе GPS;

- небольшие габариты и масса полевых модулей обеспечивают мобильность измерительного комплекса, позволяют располагать приемные петли в стороне от дорог и организовывать наблюдения в широкой пространственной полосе в условиях пересеченного рельефа. Регистрирующая система, состоящая из неограниченного набора модулей, позволяет выполнять сложные площадные и профильные наблюдения с высокой пространственно-временной плотностью;

- программный комплекс, созданный с учетом эксплуатации прежней версии программного обеспечения для аппаратуры БАЙКАЛ МЭРС Т, обеспечивает получение, обработку и представление данных на всех этапах работы. Входящие в него программы обладают удобным унифицированным графическим интерфейсом.

### **Содержание разработки**

Центральным узлом электроразведочной станции является одноканальный цифровой модуль 24 битовой геофизической электромагнитной измерительной системы «Байкал 512 (модульная)». Разработан следующий вариант прибора для различных частотных диапазонов, (диапазоны ЗС) собранный в одном корпусе:

Частотный диапазон (ЗС)	0.01-512 000 Гц
-------------------------	-----------------

К модулю подключаются датчики электрического и/или магнитного поля как традиционные: линия, одновитковая или многовитковая рамка, так и датчики, собранные по технологии тонких магнитных пленок.

Модуль «Байкал 512» эксплуатируется в качестве автономной системы или как часть массива модулей, в котором каждый блок синхронизируется при помощи встроенных приемных устройств спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS

### **Основные технические преимущества:**

Высокое качество данных благодаря 24-битной битной технологии аналого-цифрового преобразования.

Ультранизкие характеристики шума менее 0.2 мкВ.

Малый температурный дрейф входного напряжения смещения и входного тока смещения.

Возможность автономной эксплуатации или эксплуатации в многоканальной сетевой системе.

Высокая точность синхронизации нескольких автономных систем с помощью спутниковых навигационных систем.

Совместимость как с семейством датчиков, традиционно используемых в методах ЗС, так и с новыми разработками на основе технологии тонких магнитных пленок.

Компактная, легкая, водонепроницаемая конструкция повышенной прочности.

Широкий рабочий диапазон температур: от -30°C до +60°C.

Изготовлено пять опытных образцов одноканального электроразведочного модуля (ЭМ) «Байкал 512».

Таблица 3.11 – Технические характеристики модуля «Байкал 512».

Параметр	Ед.	Значение
Количество каналов	шт.	1
Разрядность данных	бит	24
Тип входов		Дифференциальный
Частота дискретизации FD	выб/сек	128000, 256000, 512000
Полоса частот (-3дБ)	Гц	0 - 230000
Максимальное входное напряжение (дифф.) при G=1	В	± 2.5 (± 12.5 с аппаратным делителем)
Коэффициент преобразования	нВ/дискр	196 ± 1%
Число эффективных разрядов при FD = 512000	бит	>16.5
Тип энергонезависимой памяти		MicroSD
Стабильность частоты внутреннего генератора (-20 - +60 °С)		± 3 * 10 <sup>-7</sup>
Точность привязки времени	мкс	± 1
Питание регистратора	В	10 – 28 * <sup>2)</sup> Постоянного тока
Потребляемая мощность * <sup>1)</sup> , Режим «ожидание» Режим «запись»	Вт	< 1.0 < 2.0
Интерфейс с ПК для установки режима и считывания данных		USB 2.0 FS, Ethernet 10/100
Протоколы ethernet		FTP, Telnet
Диапазон рабочих температур.	°С	-30 ÷ +60
Внешний размер корпуса регистратора	мм.	170x80x180
Масса регистратора	кг.	2,2

Внешний вид аппаратуры «Байкал 512» приведен на рисунке 3.123.



Рисунок 3.123 – Внешний вид регистратора «Байкал 512»

## Результаты

Проведены натурные испытания опытного образца ЭМ «Байкал 512».

Оценена эффективность многоканальной электромагнитной системы для задач выделения сложно построенных геологических объектов.

Разработана оригинальная технология многокомпонентной электроразведки на основе комплекса электромагнитных зондирований Земли с использованием контролируемых и естественных источников.

Создано программное обеспечение для обработки и интерпретации данных нестационарных электромагнитных зондирований.

Проведены тестовые измерения электромагнитных полей.

Сравнение процессов измерений становления поля аппаратурой «Байкал МЭРС Т», «Байкал ВЧ» на физической модели тестирования

Для проверки гипотез, расчетных программ и тестирования оборудования часто используется физическое моделирование, основанное на тех или иных принципах подобия. Например, при физическом моделировании процессов индуктивной электроразведки используется следующий критерий подобия:  $\omega\mu\sigma L^2 \equiv const$ , которое для Зондирования Становлением можно записать, как  $\frac{\mu\sigma L^2}{t} \equiv const$ , где L – это эффективные размеры моделей и измерительных установок.

Для Зондирования Становлением обычно используется физическое моделирование на пластинах, известное как модель S-плоскость. В качестве среды используется тонкий лист немагнитного металла. Такая модель хорошо считается аналитически и достаточно точно описывается трансформациями Сидорова в кажущуюся удельную проводимость  $Stau(t)$ .

Общий вид физической модели и схема системы представлена на рисунке 3.124.

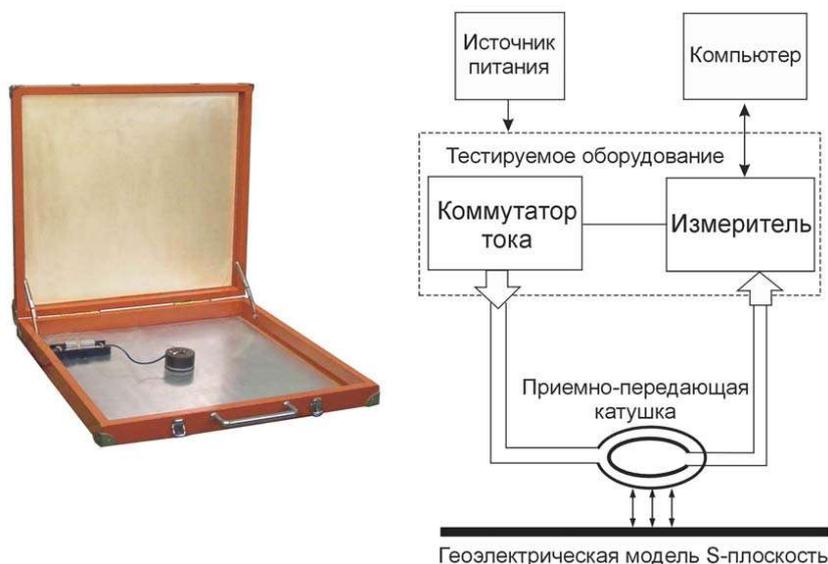


Рисунок 3.124 – Общий вид физической модели и схема системы измерений

Сравнение измерений на модели S-плоскость для приборов Байкал приведены на графиках (рисунки 3.125 и 3.126). Видно, что высокочастотный «Байкал 512» измеряет раньше и более устойчив к помехам за счёт больших длин интеграторов. За счет большей частоты дискретизации, например можно увидеть на процессах становления время проникновения поля в медную пластину. Для этого генераторную и измерительную катушки надо поместить по разные стороны от пластины.

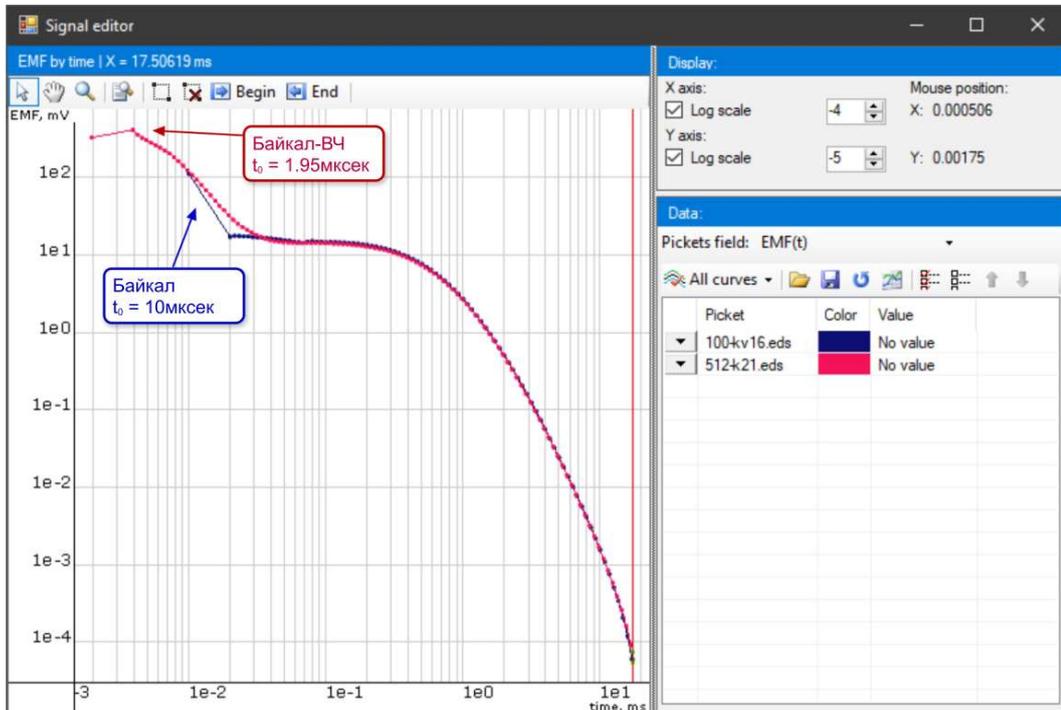


Рисунок 3.125 – ЭДС на модели S-плоскость

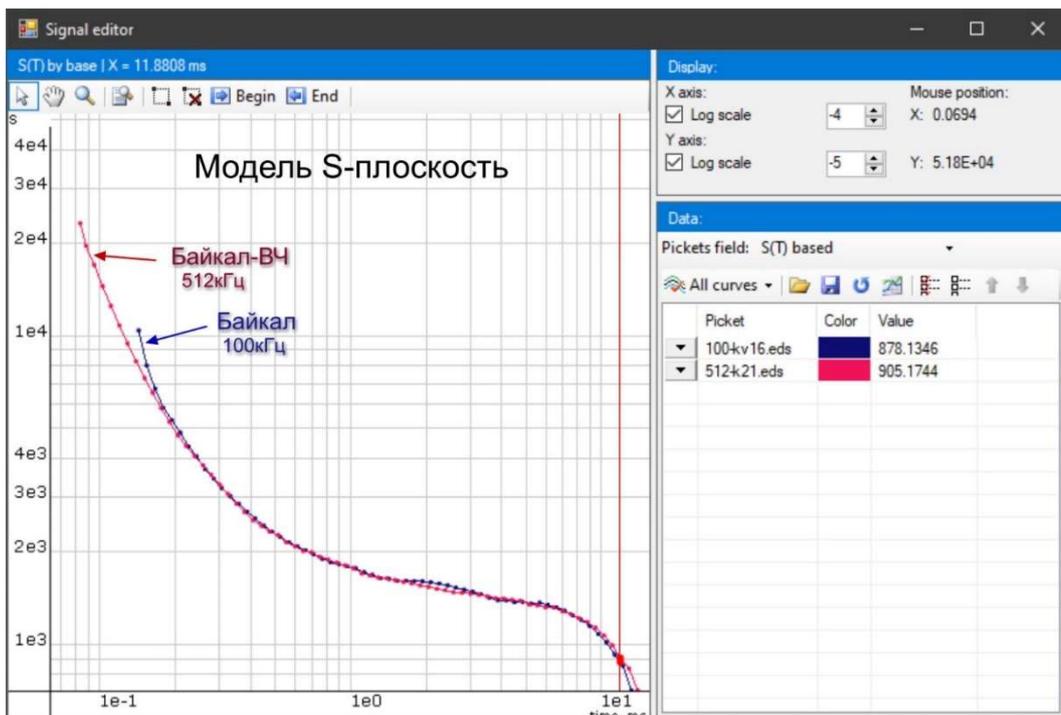


Рисунок 3.126 – Трансформация Stau

## Электроразведочные измерения методом ЗС в Чуйской впадине Горного Алтая

В полевой период 2020 г. был проведен эксперимент по регистрации процесса становления поля на ПК 134 двумя комплектами измерительной аппаратуры.

В данной точке был проведен эксперимент с регистрацией переходного процесса становления поля аппаратурой «Байкал 512» с частотой оцифровки 512 кГц и «Байкал МЭРС-Т» с частотой оцифровки 100 кГц.

Параметры установки излучения и регистрации сигнала становления поля в эксперименте были следующие: генераторная петля ГП 500x500 м, измерительная петля ИП 200x200 м пассивная, измерения осуществлялись на двух уровнях токового импульса в генераторной петле: большой порядка 18.0÷25.0 А и малый порядка 2.5÷3.1 А. Регистрация проводилась на двух коэффициентах усиления на приёмной петле (Кус. 1; 16)

Результаты сопоставления зарегистрированных процессов становления поля двумя комплектами измерительной аппаратуры с разными значениями частот оцифровки приведены на рисунках 3.127 и 3.128.

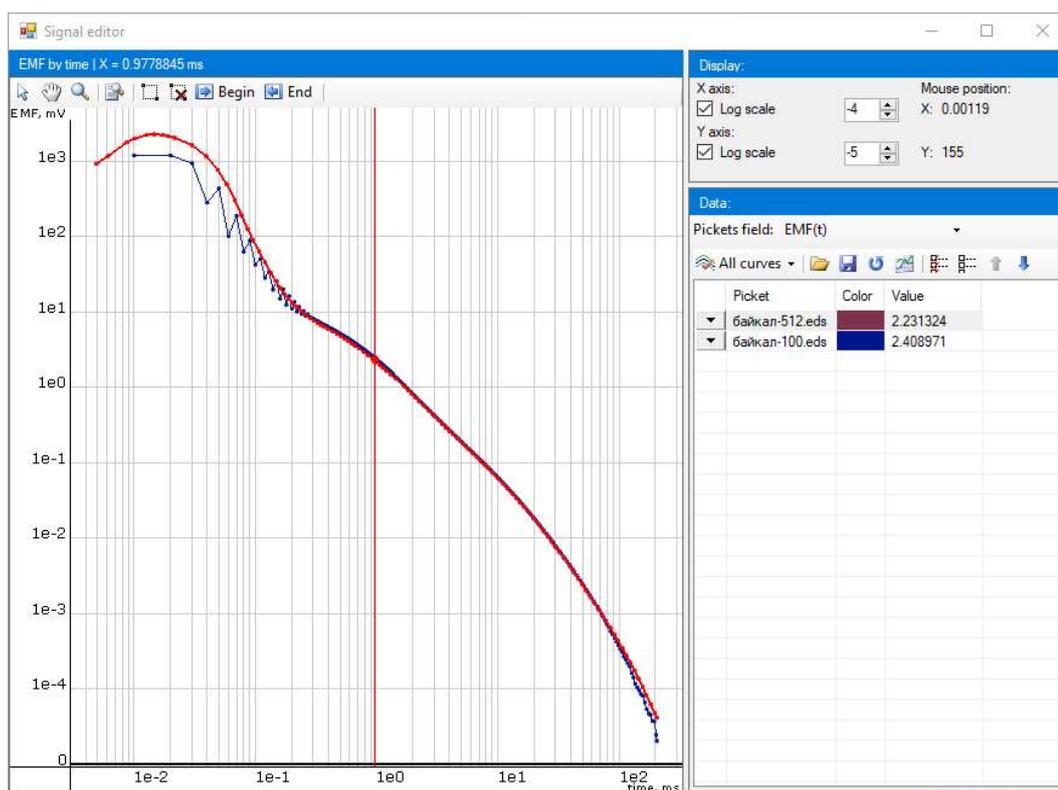


Рисунок 3.127 – ПК134 (ГП500x500 ИП200x200) Измеряемые процессы ЭДС «Байкал МЭРС-Т» - синяя кривая, и «Байкал 512» - красная кривая

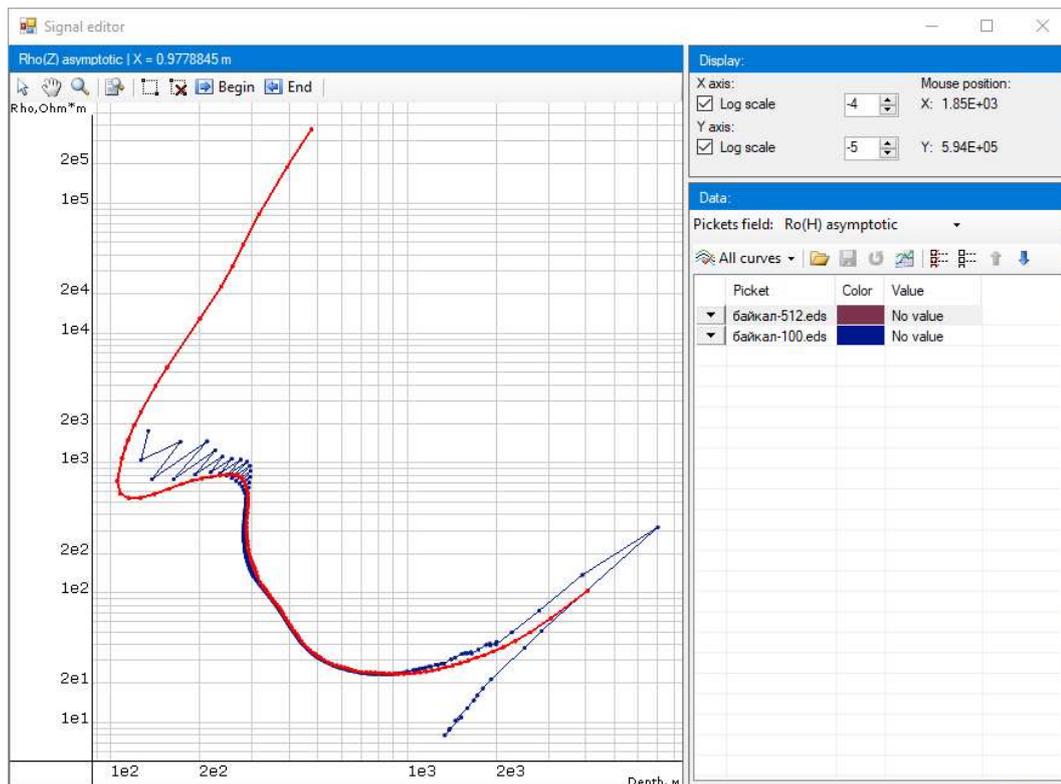


Рисунок 3.128 – ПК134 (ГП500х500 ИП200х200). Трансформанты полупространство  $\text{Rotau}(h)$ . «Байкал МЭРС-Т» - синяя кривая, и «Байкал 512» - красная кривая

Анализ сравнения процессов регистрации позволяет сделать следующие выводы:

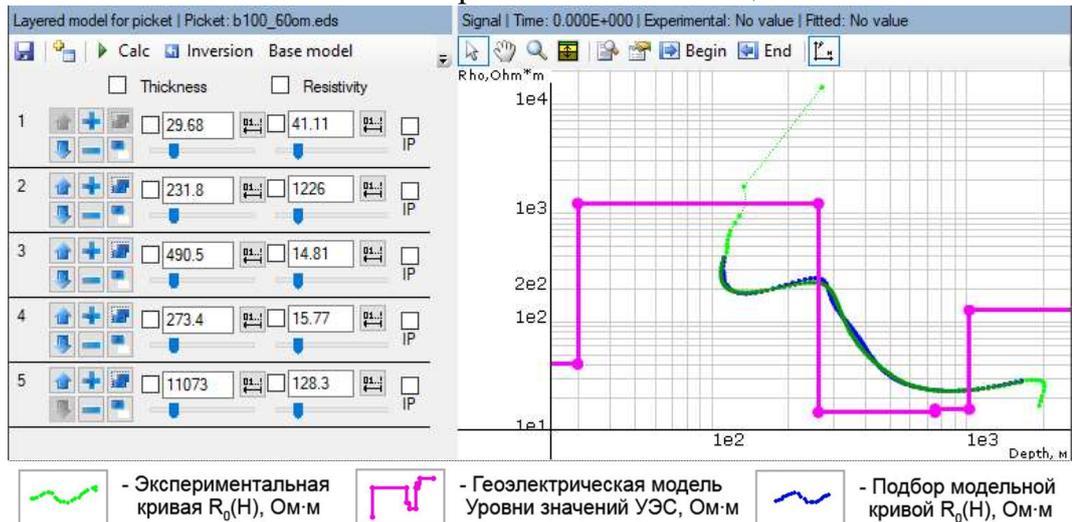
- начальное время регистрации аппаратурой «Байкал 512» составляет 1.95 мкс, что дает возможность улучшить детализацию верхней части геологического разреза при построении геоэлектрической модели.

- в интервале времен регистрации до 200 мкс аппаратурой с частотой оцифровки 100 кГц наблюдается колебательный процесс, что связано с параметрами работы АЦП. На зарегистрированном процессе становления поля аппаратурой с частотой оцифровки 512 кГц данных осцилляций нет.

- в поздней стадии становления поля на временах порядка 200 – 300 мс аппаратура с частотой оцифровки 512 кГц более уверенно отражает глубинную часть геологического разреза.

На рисунке 3.129 показано рассчитанное по данным регистрации переходного процесса распределение УЭС (удельное электрическое сопротивление) осадочного чехла до глубин залегания фундамента. Измерения проводились аппаратурой с частотой оцифровки 100 кГц и 512 кГц. Как можно видеть из расчета геоэлектрических моделей (1-D инверсия) сравниваемой аппаратуры расчленение разреза до опорного горизонта аппаратурой «Байкал 512» более детально. Также более достоверно рассчитываются параметры опорного горизонта.

## 1-D инверсия Байкал 100кГц



## 1-D инверсия Байкал 512кГц

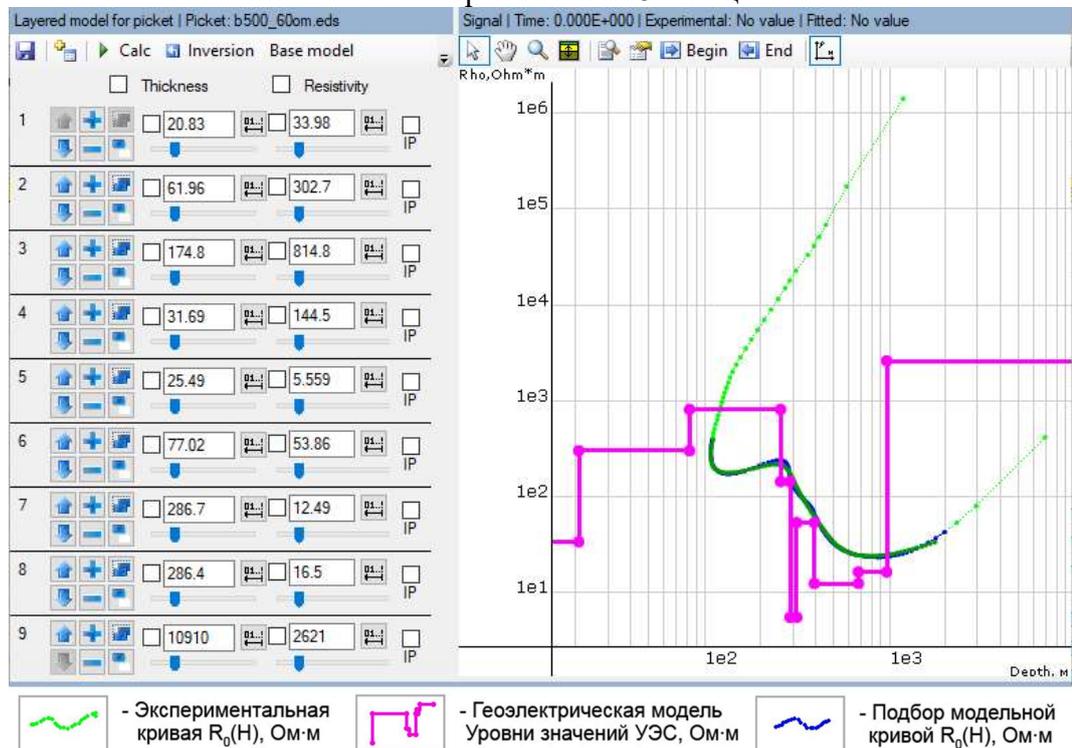


Рисунок 3.129 – Рассчитанное по данным регистрации переходного процесса распределение УЭС осадочного чехла до глубин залегания фундамента

1. Частота оцифровки 512 кГц позволила более достоверно зарегистрировать процесс становления ЭДС переходного процесса в интервале времен 0.002 мс-0.2мс.
2. В интервале времен с 0.2 мс – 100 мс погрешность регистрации процессов становления ЭДС переходного процесса находится в интервале меньше 1%.
3. В поздней стадии регистрации на времени более 100 мс уровень регистрации с частотой оцифровки 512 кГц составляет  $+1.00 \times 10^{-6}$  мВ, что значительно лучше уровня регистрации с частотой 100 кГц ( $5.004 \times 10^{-6}$  мВ). Уровни сигналов нормированы на силу тока и приведены к значениям 1 А.

## **Выводы**

В 2020 году выполнен значительный объем полевых наблюдений в сейсмоактивном регионе Горного Алтая и, таким образом, существенно дополнена база полевых данных.

Дальнейшее улучшение параметров регистрирующей аппаратуры и методики проведения регулярных наблюдений повышает качество интерпретации и анализа данных, позволяет получить более точные оценки вариаций удельного сопротивления, особенно для глубоких горизонтов разреза.

Проведенные лабораторные и полевые сравнительные измерения с модернизированной электроразведочной аппаратурой с расширенным частотным диапазоном «Байкал 512» показали более высокий уровень достоверности регистрации сигнала становления в расширенном частотном диапазоне.

За счет измерения слабых сигналов на поздних временах становления достигнута максимальная глубинность метода ЗС в геоэлектрических условиях впадин Горного Алтая и получены глубины до фундамента на всех участках измерений Чуйской впадины по данным этого метода.

Рассчитаны параметры вариаций коэффициента электрической анизотропии за весь период аппаратурных наблюдений как для метода становления электромагнитного поля (ЗС), так и для вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшее достижение СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 году состоит в совершенствовании комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов (КОМЭСК МС), как элемента УНУ ФИЦ ЕГС РАН, который дал возможность получить следующие уникальные научные результаты:

1. Разработана концепция системы мониторинга сейсмических шумов в городах и вблизи крупных промышленных объектов. Исследованиями показано, что в сейсмическом шуме содержится отклик колебаний различных объектов, расположенных на расстоянии от сейсмической станции. ФИЦ ЕГС РАН обладает мощным инструментом для его изучения – сетью из высокочувствительных широкополосных сейсмостанций, непрерывные записи с которых поступают в обрабатывающие центры и хранятся там неограниченное время. Научившись выделять из шума сигналы, связанные с колебаниями определенного объекта и изучив их взаимосвязи, можно по записям сейсмической станции контролировать работу данного объекта. В 2020 году проанализированы записи с нескольких станций («Москва», «Дубки», «Иркутск», «Новосибирская ГЭС», «Мамакан», «Харино»). Установлено, что с использованием разработанных ранее алгоритмов и приемов интерпретации, использованных при расшифровке причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, со станций можно получать информацию аналогичную полученной со станции «Черемушки»: следить за вибрациями мощного оборудования, за изменениями собственных частот зданий и сооружений, за колебаниями крупных природных объектов и т.д.

2. В работе приведен опыт модернизации сейсмической антенны, разрабатываемой СЕФ ФИЦ ЕГС РАН с 2019 г., как инструмент для изучения природы микросейсм вызванных под влиянием различных техногенных или природных источников, и их причинно-следственной связи. Представлены результаты работ по оптимизации параметров одиночных приборов регистрации сейсмических данных (пара регистратор – сейсмоприемник), для получения более качественного сигнала: проведена оценка характеристик различных типов сейсмоприемников – регистраторов, для их дальнейшего включения в работу антенны, рассмотрены показания одиночных приборов с различных мест установки. Описана система мониторинга, включающая 50 точек наблюдения. По показаниям записей с сейсмической антенны выделен набор колебаний, источниками которых являются техногенные воздействия работающего оборудования (воздушные компрессоры гиперзвуковой установки ИТПМ СО РАН, турбины Новосибирская ГЭС и т.п.). Показана возможность использования сейсмической антенны для мониторинга сейсмических событий на примере зарегистрированных колебаний, вызванных землетрясениями. Проведены опытные работы по

резонансному приему сигналов. Выполнены работы по изучению верхней части разреза в районе расположения антенны.

Начаты исследования по изучению строения верхней части разреза методами электроразведки, получен предварительный геоэлектрический разрез на участке размещения сейсмической антенны.

3. На примере крупнейшей в России арочно-гравитационной дамбы Саяно-Шушенской ГЭС развивается способ дистанционного мониторинга собственных частот по данным непрерывных сейсмологических наблюдений. С использованием архивных данных станции «Черемушки», расположенной в 4.4 км от плотины Саяно-Шушенской ГЭС, обнаружены долговременные (с 2001 по 2020 гг.) интегральные увеличения значений частот до 0.03-0.05 Гц. Данные изменения предположительно связаны с процессами упрочнения материалов плотины и/или основания, на которых в 1996-2003 гг. производились ремонтные работы и с процессами последующей адаптации плотины к своей статической работе.

4. Исследованы записи сейсмостанции «Харино» до и после схода оползня 18.07.2020 г на Елбашинском отвале Колыванского месторождения антрацита. Анализ данных космических снимков и сейсмологических записей позволил высказать предположения о вероятной причине возникновения и развития оползня, связанной с его сильным обводнением.

5. Выполнена предварительная обработка сейсмограмм с увеличенной длительностью записи (до 23 с) от пневмоисточников на 60-км участке сейморазведочного профиля в нижнем течении р. Лена. Показано, что современная технология речных сейморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части земной коры, но и по всей ее мощности, включая поверхность Мохоровичича. В результате проведения экспериментальных полевых работ прошлых лет вдоль русла р. Лена, Витим и Нижняя Тунгуска, на профилях общей длиной около 2700 км, получен и хранится в архивах значительный объем цифровых сейсмических данных, которые могут быть использованы для получения новых сведений о глубинном строении неизученных ранее территорий.

6. В 2020 году выполнен значительный объем полевых наблюдений в сейсмоактивном регионе Горного Алтая и, таким образом, существенно дополнена база полевых данных. Улучшения параметров регистрирующей аппаратуры и методики проведения регулярных наблюдений повысили качество интерпретации и анализа данных, позволили получить более точные оценки вариаций удельного сопротивления, особенно для глубоких горизонтов разреза. Проведенные лабораторные и полевые сравнительные измерения с модернизированной электроразведочной аппаратурой с расширенным частотным диапазоном «Байкал 512» показали более высокий уровень достоверности регистрации сигнала становления в

расширенном частотном диапазоне. За счет измерения слабых сигналов на поздних временах становления достигнута максимальная глубинность метода ЗС в геоэлектрических условиях впадин Горного Алтая и получены глубины до фундамента на всех участках измерений Чуйской впадины по данным этого метода. Рассчитаны параметры вариаций коэффициента электрической анизотропии за весь период аппаратных наблюдений как для метода становления электромагнитного поля (ЗС) так и для вертикального электрического зондирования (ВЭЗ).

По результатам выполнения научно-исследовательских работ в 2020 году сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН было опубликовано 3 статьи в ведущих международных рецензируемых научных изданиях (Web of Science), 8 статей – в изданиях, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.) (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., Еманов А.А., Белинская А.Ю. Метеороид "Челябинск" (Взгляд сейсмолога) // Доклады Академии наук. 2013. Т. 452. № 3. С. 326.
3. Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения. М.: Наука. – 1975. – 152с.
4. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Еманов А.А., Белинская А.Ю. Геофизические наблюдения во время пролета метеороида "Челябинск" // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 3. С. 516-522.
5. Еманов А.Ф., Селезнёв В.С., Кузьменко А.П., Гриценко С.А., Сабуров В.А., Данилов И.А., Бах А.А. Детальные инженерно-сейсмологические исследования зданий и сооружений. В кн.: Методы изучения, строение и мониторинг литосферы. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 1998. С.61-72
6. Селезнёв В.С., Кузьменко А.П., Еманов А.Ф., Сабуров В.А., Барышев В.Г., Данилов И.А., Бах А.А. Возможности и результаты инженерно-сейсмологического обследования зданий и сооружений. В кн.: Методы изучения, строение и мониторинг литосферы. Новосибирск. Изд-во СО РАН, 1998. С.98-104.
7. Yang, Z., Le, Wang. Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies. Journal of intelligent material systems and structures. 2010. 21(3). Pp. 309–319. DOI: 10.1177/1045389X09350332
8. Кузьменко А.П., Бортников П.Б., Сабуров В.С. Контроль технического состояния бетонных плотин по динамическим характеристикам их колебаний // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2007. – Т. 248. – С. 64–76.
9. 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-технич. конф.: сб. докладов и выступлений (Санкт-Петербург, 20-22 октября, 2016 г.). – СПб: Издательство АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева». – 2017. – С. 55-60.
10. Саранцев М.И. Определение собственных частот колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным инженерно-сейсмометрических наблюдений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. – № 283. – С. 72-81.
11. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Бах А.А., Кречетов Д.В. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища // В сборнике: Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырёва. – 2014. – С. 182-186.
12. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Брыксин А.А. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение RU 2461847 С2, 20.09.2012.
13. Интервью с исполнительным директором АО «Сибирский Антрацит» Сергеем Коломниковым. Электронный ресурс. <https://ksonline.ru/380333/sergej-kolomnikov-my-dejstvovali-otkryto-i-operativno> (последнее обращение 13.11.2020).
14. Карта горючих полезных ископаемых. Новосибирская область. Сибирский федеральный округ. Электронный ресурс ФГБУ «ВСЕГЕИ» [https://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/sfo/novosibirskaya\\_obl/27\\_gorpi.jpg](https://www.vsegei.ru/ru/info/gisatlas/sfo/novosibirskaya_obl/27_gorpi.jpg) (последнее обращение 11.11.2020).
15. Маркус Бат. Спектральный анализ в геофизике. – Москва. – «Недра». – 1980г. – 535с.

16. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Сысоев А.П., Бабушкин С.М., Кашун В.Н., Брыксин А.А., Лисейкин А.В. Речная сейсморастворка на востоке России. В сборнике: Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края. Материалы научно-практической конференции. – 2007. – С. 143-146.
17. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год». [Электронное издание]. – СПб.: ВСЕГЕИ. – 2013. – 94 с. URL: <http://www.vsegei.com/ru/info/seismic/> (дата обращения: 21.05.2020).

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1 Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2020 году

Сведения о выполнении количественных показателей индикаторов эффективности фундаментальных научных исследований:

Индикатор	Единица измерения	2020 г	
		План	Фактическое исполнение
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в международной информационно-аналитической системе научного цитирования Web of Science и Scopus	единиц	3	3
Количество научных публикаций в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.)	единиц	8	8
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности (патентов), зарегистрированных в России	единиц	0	0
Количество научных монографий, сборников, справочников, атласов, каталогов	единиц	0	0

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

1. *Kolesnikov, Yu, I, Fedin, K., V, Ngomayezwe, L.* Compression waves reflection from the low-velocity azimuthally anisotropic medium: a physical model study // *Geophysical Journal International*. – V. 221, N 2. – 2020. – P. 1320–1326. doi: 10.1093/gji/ggaa031
2. *Hsu, T.-Y., Valentino, A., Liseikin, A., Krechetov, D., Chen, C.-C., Lin, T.-K., Wang, R.-Z., Chang, K.-C., Seleznev, V.* Continuous structural health monitoring of the Sayano-Shushenskaya Dam using off-site seismic station data accounting for environmental effects // *Measurement Science and Technology*. – 2020. – V. 31, N 1. doi: 10.1088/1361-6501/ab393c
3. *Solovyev, V.M., Salnikov, A.S., Seleznev, V.S., Chechelnskiy V.V., Liseikin A.V., Galeva N.A.* The Features of the Deep Velocity Structure of the Trans-Baikal Section of the Central Asian Fold Belt from the Seismological and DSS Data (Alignment of the 1-SB Reference Profile) // *Russ. J. of Pac. Geol.* – 2020. – V. 14. – P. 434–446. doi: 10.1134/S1819714020050073

Научные публикации в журналах, индексируемых в российских и международных информационно-аналитических системах научного цитирования (Web of Science, Scopus, MathSciNet, Российский индекс научного цитирования, Google Scholar, European Reference Index for the Humanities и др.):

4. *Liseikin A.V., Seleznev V.S., Adilov Z.A.* Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam // *Magazine of Civil Engineering*. – 2020. – V. 96, N 4. – P. 15-26. doi: 10.18720/MCE.96.2
5. *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 // *Российский сейсмологический журнал*. – 2020. – Т. 2, № 3. – С. 22–33. doi: 10.35540/2686-7907.2020.3.02

6. Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Бабушкин С.М. Строение Уймонской впадины Горного Алтая по данным нестационарных электромагнитных зондирований // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2020. – №3(43). – С. 66-76. doi: 10.20403/2078-0575-2020-3-66-76
7. Liseikin, A.V., Seleznev, V.S., Adilov, Z.A. Seasonal Changes in the Parameters of the Normal Modes of the Chirkey Hydroelectric Power Plant Dam According to the Standing Waves Method // Power Technol Eng. – 2020. – V. 53. – P. 681–686. doi: 10.1007/s10749-020-01138-6
8. Murav'ev, O.A., Seleznev, V.S., Gromyko, P.V., Rybin D.V. Spectral Analysis of Pressure Fluctuations in the Water-Conducting Channel of the Turbines and the Resulting Vibrations of Building Structures of Service Units of the Building of the Sayano-Shushenskaya HPP // Power Technol Eng. – 2020. – V. 53. – P. 649–654. doi: 10.1007/s10749-020-01133-x