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

УДК 550.34

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФИЦ ЕГС РАН,

д-р техн. наук

_____Ю.А. Виноградов

"____"_____2026 г.

ОТЧЕТ

о результатах исследований

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

за 2025 год

Ответственный исполнитель,
директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН,
канд. геол.-мин. наук _____А.В. Лисейкин

Новосибирск 2026

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель научного направления ФИЦ ЕГС РАН, д-р. геол.-мин. наук	25.02.2026 подпись, дата	В.С. Селезнев (разделы 1-8)
Отв. исполнители:		
Директор СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, канд. геол.-мин. наук	25.02.2026 подпись, дата	А.В. Лисейкин (разделы 1, 2, 3, 4.1, 4.5, 6, 7)
Ведущий инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН д-р. геол.-мин. наук	25.02.2026 подпись, дата	Н.Н. Неведрова (раздел 4.6)
Исполнители:		
Научный сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	П.В. Громыко (разделы 4.2, 4.3)
Научный сотрудник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	И.В. Коковкин (разделы 4.4, 4.6)
Младший научный сотруник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	Е.Э. Пархоменко (раздел 4.1)
Младший научный сотруник СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	П.В. Пономарев (раздел 4.6)
Ведущий инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	С.М. Бабушкин (разделы 2.3, 4.6)
Ведущий инженер СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	А.А. Болдарев (раздел 4.6)
Ведущий программист СЕФ ФИЦ ЕГС РАН	25.02.2026 подпись, дата	В.П. Гаврилов (раздел 4.6)
Нормоконтроль	25.02.2026 подпись, дата	А.А. Брыксин

РЕФЕРАТ

Отчет содержит 128 с., 93 рис., 14 табл., 44 источн., 1 прил.

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

Объект исследования – зарегистрированные с использованием уникальной научной установки поля малоамплитудных геофизических сигналов от различных источников, таких как: работающее крупное промышленное оборудование, колеблющиеся на собственных частотах здания и инженерные сооружения, искусственные источники возбуждения упругих и электромагнитных волн в недрах Земли. Цель работы – развитие и внедрение технологий, позволяющих исследовать опасные процессы, возникающие при техногенном воздействии на геологическую среду, устойчивость техногенных сооружений в связи с сейсмическим риском. Основные результаты следующие. В ходе анализа собственных частот здания Дворца культуры (г. Норильск) установлено, что с мая 2023 г. отмечается повышение частот относительно прошлых лет, что связано с увеличением жесткости конструкции здания после строительно-ремонтных работ. Разработана технология, позволяющая по данным значений собственных частот колебаний железнодорожных конструкций оценивать их технического состояния во время эксплуатации. На полигоне «Кольцово» (Новосибирская область) с помощью сети сейсмического мониторинга была успешно протестирована система дистанционного обнаружения техногенных источников (стрелкового оружия, БПЛА и транспортных средств). Ее способность скрытно идентифицировать объекты на значительных расстояниях по характерным частотным признакам открывает перспективы применения в охране объектов, промышленном мониторинге и военных задачах. В результате анализа динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС зафиксированы аномальные изменения частот в периоды максимального наполнения водохранилища, указывающие на развитие структурных нарушений. Впервые по малоамплитудным сигналам получено полное вертикальное сечение земной коры по профилю протяженностью 170 км, проходящему через складчато-надвиговую зону сочленения Ангаро-Ленской моноклизы и Бодайбино-Патомской складчатой системы. Показана корреляция между сейсмической активностью и изменениями геоэлектрических параметров горных пород по данным ежегодных (с 2007 по 2023 гг.) наблюдений на геодинамическом полигоне «Бельтир» (Горный Алтай), из чего следует возможность применения электромагнитного мониторинга для прогноза землетрясений. В зонах сопряжения Горловского прогиба (Новосибирская область) с соседними региональными геологическими структурами изучены вариации удельных электрических сопротивлений (УЭС) и коэффициентов анизотропии и прослежена их корреляция с сейсмическими событиями. Выполнены детальные электроразведочные профили в районах мощных юрских отложений Доронинской и Бобровской впадин, в результате чего выявлены разломные контакты прибортовых структур. Локализованы разломы типа надвигов и тектонические уступы.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ....4

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ....6

1 Введение....8

2 Регистрирующая часть элемента УНУ ФИЦ ЕГС РАН – комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов....12

2.1 Сведения об аппаратуре для регистрации микросейсмических колебаний и методиках наблюдения....12

2.2 Мобильный аппаратно-программный комплекс регистрации и передачи в реальном времени сейсмических данных....25

2.3 Сведения об аппаратуре для электромагнитных исследований....28

3 Обрабатывающая часть УНУ....40

3.1 Аппаратный комплекс Центра обработки данных....40

3.2 Программно-алгоритмическая часть....42

4 Результаты геофизических исследований....47

4.1 Мониторинг собственных частот Дворца культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»....47

4.2 Способ контроля целостности объектов железнодорожной инфраструктуры методом инженерно-сейсмического мониторинга....56

4.3 Разработка способа локализации и дистанционного контроля техногенных источников сейсмического сигнала....62

4.4 Возможность определения раскрытия трещины плотины Саяно-Шушенской ГЭС .70

4.5 Построение разрезов земной коры по малоамплитудным отраженным волнам речной сейсморазведки....77

4.6 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области....99

4.6.1 Данные вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) для оценка вариаций геоэлектрических параметров на геодинамическом полигоне «Бельтир»....99

4.6.2 Изучение структур Горловской впадины соосными и многоразностными установками с установлением характера влияния вызванной поляризации на глубинное распределение геоэлектрических неоднородностей....101

4.6.3 Объем полевых электроразведочных исследований, выполненных в 2025 г. ..115

5 Сведения о внешнем взаимодействии 116
5.1 Перечень действовавших в отчетном году соглашений/договоров об оказании возмездных услуг 116
6 Показатели производственной деятельности 117
6.1 Использование результатов в научной работе 117
6.1.1 Публикации с упоминанием УНУ 117
6.1.2 Использование данных УНУ в темах НИР 118
6.1.3 Результаты интеллектуальной деятельности (Форма_РИД) 118
6.1.4 Защищенные в отчетном году докторские и кандидатские диссертации, подготовленные с использованием УНУ 119
6.2 Структура кадрового состава 119
6.3 Финансовые затраты на содержание УНУ 119
7 Заключение 120
8 Список использованных источников 122
ПРИЛОЖЕНИЕ А Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 году 127

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

В настоящем отчете применяются следующие сокращения и обозначения.

ФИЦ ЕГС РАН и его филиалы:

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

Другие сокращения:

АРУ	–	автоматическое регулирование усиления
АЦП	–	аналого-цифровой преобразователь
АЭС	–	атомная электростанция
БПЛА	–	беспилотный летательный аппарат
ВЭЗ	–	вертикальное электрическое зондирование
ВЧР	–	верхняя часть разреза
ГК	–	генераторный контур
ГСЗ	–	глубинное сейсмическое зондирование
ГТИ	–	генератор токовых импульсов
ГЭС	–	гидроэлектростанция
ЗС	–	зондирование становлением поля
ЗСБ	–	зондирование становлением поля в ближней зоне
ИК	–	измерительный контур
ИНГГ	–	Институт нефтегазовой геологии и геофизики
КОМЭСК МС	–	комплекс мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов
КТСЗ	–	Колывань-Томская складчатая зона

ЛВС	–	локальная вычислительная сеть
ММП	–	многолетнемерзлые породы
МОВ	–	метод отраженных волн
МОГТ	–	метод общей глубинной точки
напр.	–	например
НИР	–	научно-исследовательская работа
НИЦ	–	научно-исследовательский центр
ОГТ	–	общая глубинная точка
ООО	–	общество с ограниченной ответственностью
ОПВ	–	общий пункт возбуждения
ОПП	–	общий пункт приема
ПАО	–	публичное акционерное общество
ПВ	–	пункт возбуждения
пгт.	–	поселок городского типа
ПК	–	персональный компьютер; пикет
п.н.	–	пункт наблюдения
ПО	–	программное обеспечение
ПП	–	пункт приема
ПР	–	профиль
р.	–	река
РЖД	–	Российские железные дороги
рп.	–	рабочий поселок
СО РАН	–	Сибирское отделение Российской академии наук
ССМ	–	станция сейсмического мониторинга
СХД	–	системы хранения данных
СШ ГЭС	–	Саяно-Шушенская гидроэлектростанция
УВБ	–	уровень верхнего бьефа
УНУ	–	уникальная научная установка
УЭС	–	удельное электрическое сопротивление
ЦОД	–	центр обработки данных
шт.	–	штук

1 Введение

Отчет содержит информацию о выполнении Государственного задания № 075-00604-25 на проведение Сейсмологическим филиалом Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук» исследовательских работ в 2025 году.

Исследования СЕФ ФИЦ ЕГС РАН выполнялись по темам НИР: № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору» (руководитель д.г.-м.н. В.С. Селезнев), № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений» (руководитель д.т.н. А.Ф. Еманов), № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» (руководитель д.т.н., чл.-корр. РАН А.А. Маловичко) и № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных» (руководитель к.т.н. П.Г. Бутырин).

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



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

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

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

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

Основные объекты исследований КОМЭСК МС:

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

Исследования включают в себя: интерпретацию экспериментальных данных сейсмических колебаний, полученных в плотине, машинном зале гидроэлектростанций и в их окрестности (на удалениях до 30 км) при различных режимах работы оборудования, на основе создаваемых алгоритмов разделения общего поля микросейсмических колебаний по источникам и анализе связей между работой гидроагрегатов и параметрами сейсмических воздействий от них на конструкции ГЭС; интерпретацию экспериментальных данных метода стоячих волн, полученных на зданиях и сооружениях; обработку и анализ данных мониторинга длительно идущих малоамплитудных сейсмических сигналов, источником которых являются шумы крупных городов; обработку и интерпретацию данных, полученных при речных сейсмо- и электроразведочных исследованиях; интерпретацию вариаций электромагнитных полей.

Протяженность отчетного периода с 1 января по 31 декабря 2025 года.

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

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

Отчет состоит восьми разделов, включая введение, заключение и список использованных источников.

Во **втором** 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.

Третий 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.

Четвертый раздел отчета посвящен результатам исследований, выполненных СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 г.

В **пятом** разделе представлен перечень действовавших в отчетном году соглашений/договоров об оказании возмездных услуг.

В **шестом** разделе описывается показатели производственной деятельности филиала.

Содержание работ в 2025 г.:

Развитие экспериментальных методов регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов на инженерных сооружениях и в грунтах. В рамках совершенствования технологии проводится анализ собственных частот Дворца культуры (г. Норильск), в ходе которого отмечается повышение частот относительно прошлых лет, что связано с увеличением жесткости конструкции здания. Разрабатывается технология, позволяющая по данным значений собственных частот колебаний железнодорожных конструкций

производить оценку их технического состояния во время эксплуатации. На полигоне «Кольцово» (Новосибирская область) с помощью сети сейсмического мониторинга тестируется система дистанционного обнаружения техногенных источников - стрелкового оружия, БПЛА и транспортных средств. Она может быть применена при охране объектов, промышленном мониторинге, а также военных задачах.

Контроль технического состояния зданий и сооружений по собственным колебаниям. При помощи сейсмостанции «Филиал» фиксируются аномальные изменения частот в периоды максимального уровня наполнения водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС, которые могут указывать на развитие структурных нарушений. По малоамплитудным сигналам получено полное вертикальное сечение земной коры по профилю протяженностью 170 км, проходящему через складчато-надвиговую зону сочленения Ангаро-Ленской моноклизы и Бодайбино-Патомской складчатой системы.

Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области. Продолжено изучение Горловского прогиба и смежных, ограничивающих прогиб структур (Колывань-Томской складчатой зоны, Салаира), с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами. Полученные в результате интерпретации данных ЗСБ геоэлектрические модели позволяют определить характеристики отложений от дневной поверхности до глубин ~ 400 м, а также строение разломных зон. Это дает возможность обоснованно выбрать участок для регулярных наблюдений за развивающейся сейсмичностью. Изучены юрские грабен-синклинальные бассейны, Доронинская, Бобровская впадины, наложенные на структуры Горловского прогиба. Проведено сопоставления сейсмологических и геоэлектрических данных ВЭЗ на полигоне «Бельтир», видна хорошая корреляция между сейсмической активностью и геоэлектрическими параметрами.

В **приложении А** к отчету приводится список публикаций сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 году.

2 Регистрирующая часть элемента УНУ ФИЦ ЕГС РАН – комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов

2.1 Сведения об аппаратуре для регистрации микросейсмических колебаний и методиках наблюдения

Регистрация сейсмических колебаний на различных промышленных объектах (напр. на ГЭС) проводится в непрерывном режиме в ряде точек наблюдения, образуя сейсмическую сеть и включает регистрацию колебаний при различных режимах работы оборудования (напр., гидроагрегатов). Пример реализованной схемы наблюдений в теле плотины и машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС приведены на рисунках 2.1-2.2. Регистрация сейсмических колебаний проводится в пунктах наблюдения, расположенных на различных уровнях плотины и машинного зала вдоль оси каждого из исследуемых гидроагрегатов. Устанавливается, в среднем, 14-16 точек наблюдения: 5 точек регистрации располагается в теле плотины на разных высотных уровнях вдоль водовода испытуемого гидроагрегата. Кроме этого, для анализа привлекаются данные с ближайших станций локальной сейсмологической сети (пример приведен на рисунке 2.3).

Каждый пункт наблюдения в теле плотины и машинном зале ГЭС состоит из трехкомпонентных сейсмоприемников и автономных сейсмических регистраторов серии «Байкал», датчики-акселерометры типа A1738, CMG-5T и датчики-велосиметры типа GS-20DX, GS-ONE. Регистраторы устанавливаются в точках измерений в непосредственной близости от сейсмических датчиков, производится запись в непрерывном или старт-стопном режимах (по таймеру или критериям). При этом регистраторы синхронизуются по времени с помощью сигнала GPS, что гарантирует одновременность записи колебаний в разных точках наблюдения. Общий вид комплекта аппаратуры и используемых сейсмических датчиков приведен на рисунке 2.4, характеристики – в таблицах 2.1-2.3.

Необходимо пояснить, что выбор датчика для регистрации определяется характеристиками сейсмических колебаний в месте его установки. Так, опыт проведения исследований на ГЭС показал, что датчики-акселерометры типа A1738, успешно применяемые при регистрации на зданиях и большинстве инженерных сооружений, оказались непригодными (записи бракованные) для исследований в условиях шумовой обстановки машинного зала ГЭС. Поэтому дополнительно проводится регистрация с другими типами датчиков, с целью получить кондиционные записи: 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].

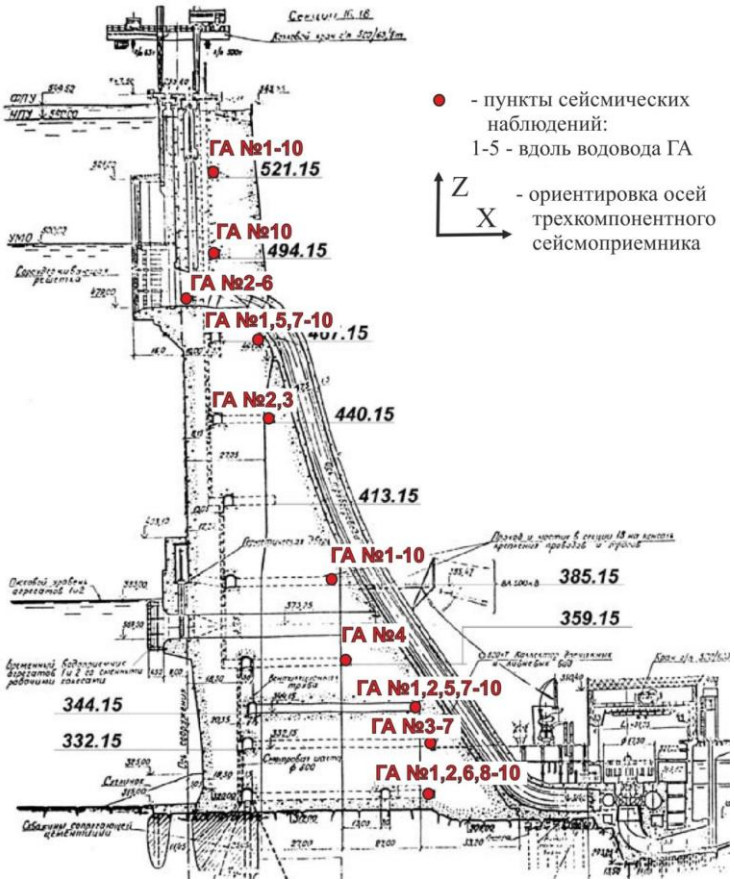


Рисунок 2.1 – Пример реализованной схемы сейсмических наблюдений в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС вдоль оси каждого из гидроагрегатов

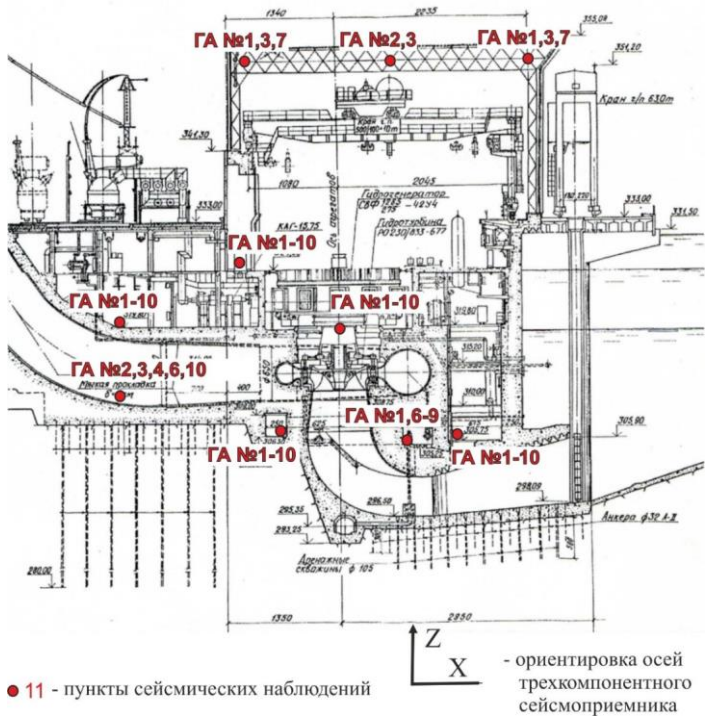


Рисунок 2.2 – Пример реализованной схемы сейсмических наблюдений в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС возле каждого из гидроагрегатов

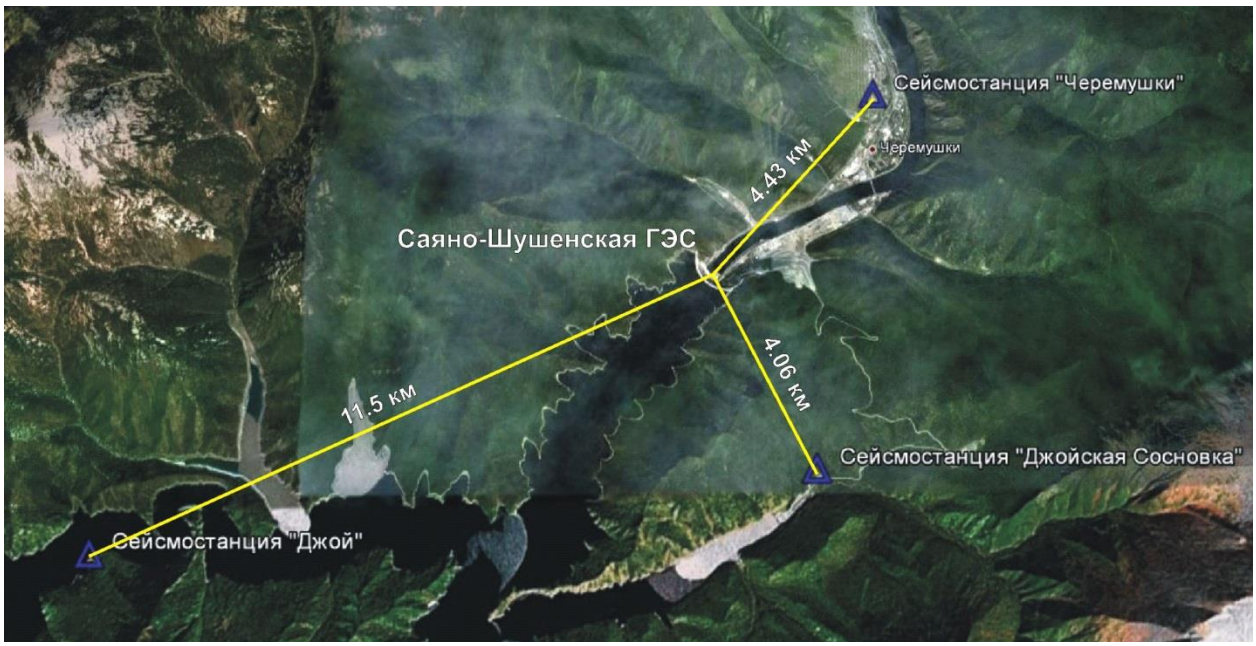


Рисунок 2.3 – Схема сейсмических наблюдений на станциях сейсмологической сети «Черемушки», «Джой» и «Джойская Сосновка» (собственник ПАО «РусГидро»)

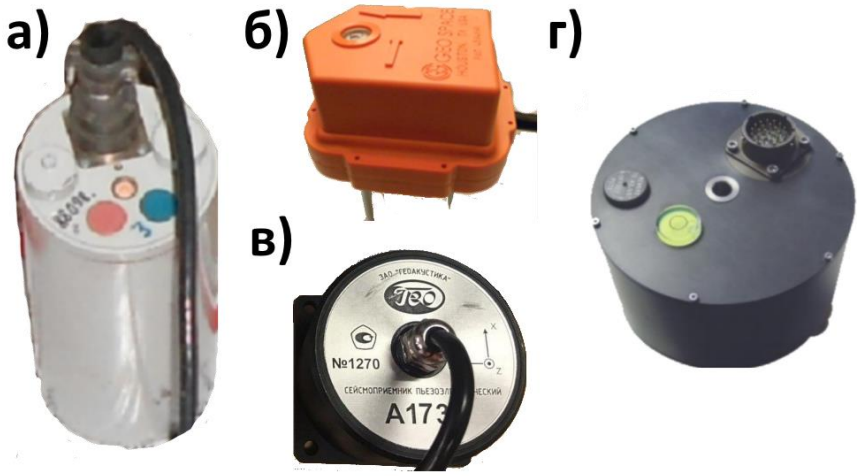


Рисунок 2.4 – Пример регистрирующей аппаратуры: (а) сейсмический регистратор Байкал-АСН; (б) акселерометр А1738; (в) велосиметр GS-20DX; (г) акселерометр CMG-5T

Таблица 2.1 – 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), Г ц	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	±2*10-7
12	Диапазон рабочих температур, °С	-30 - +60

Таблица 2.2 – 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 Г ц - в диапазоне 0.4 - 300 Гц - в диапазоне 300 - 400 Г ц	 не более -3 не более ± 1 не более -3	 3
5	Допускаемая относительная погрешность коэффициента преобразования, % - в диапазоне 0.1 - 1 Гц - в диапазоне 1 - 100 Гц - в диапазоне 100 - 400 Гц	 ± 10 ± 4 ± 10	 ± 10
6	Максимальное измеряемое гармоническое ускорение (эффективное значение), мсек-2	5	19.6
7	Интегральный шум в диапазоне частот от 0.2 до 400 Гц, не более, мсек-2	210-5	-
8	Максимальный уровень выходного сигнала, В	±5	±20
9	Тип питания	двухполярное	двухполярное
10	Напряжение питания, В	± (12 ± 2)	± (12 ± 2)

Таблица 2.3 – Краткие технические характеристики датчиков–велосиметров

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

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

Регистраторы «Байкал-АСН» (рисунок 2.5), разработанные в ФИЦ ЕГС РАН (Сибирское отделение), 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 (или внешний аккумулятор).

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 2.4.



Рисунок 2.5 – Автономные трехканальные регистраторы «Байкал-АСН»

Таблица 2.4 – Основные характеристики регистраторов «Байкал-АСН»

Параметр	Ед	Значение
1	2	3
Количество каналов		4 (3)
Разрядность данных	бит	24
Тип входов		Дифференциальный
Входной импеданс		24 кОм || 4700 пФ
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 приведенный 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
Объем энергонезависимой памяти.	Гб	2 (опц. до 32)
Стабильность внутреннего генератора (-20 - +60 ºС)	с	 $\pm 2*10^{-7}$
Точность привязки времени Внешний GPS Встроенный GPS	мкс	 ± 2 ± 1
Питание регистратора внешнее внутреннее	В	 10 – 28 Постоянного тока 3 (2*1.5 В 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.	ºС	-30 ÷ +60
Масса регистратора	кг	1.0 (2.5)

Регистраторы серии «Байкал» в силу своей автономности и компактности применяются при организации систем наблюдения на зданиях и сооружениях практически любой конфигурации. На рисунках 2.6-2.9 показаны примеры установки сейсмических регистраторов и схемы сейсмических наблюдений, реализованные на практике.

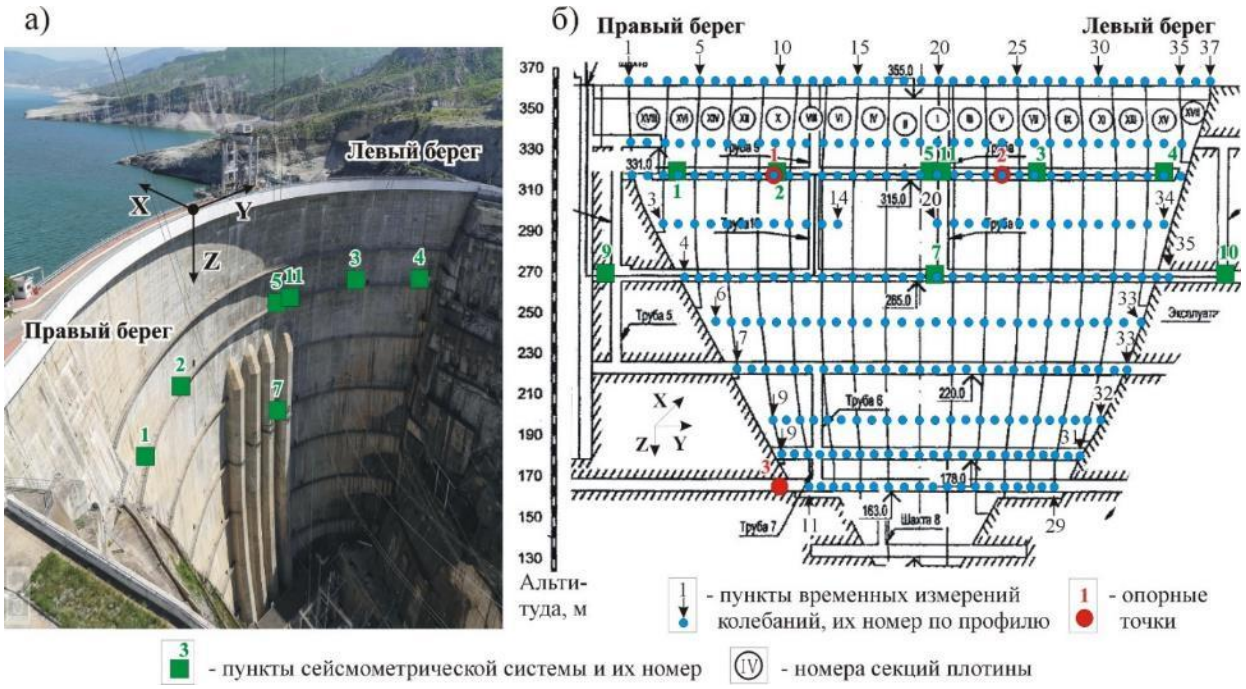


Рисунок 2.6 – Внешний вид плотины Чиркейской ГЭС с пунктами постоянной сейсмометрической системы (а) и схема временно реализованных сейсмических наблюдений с регистраторами «Байкал-АСН» (б)



Рисунок 2.7 – Примеры установки регистраторов «Байкал-АСН» с датчиками-велосиметрами GD-10 в плотине Чиркейской ГЭС

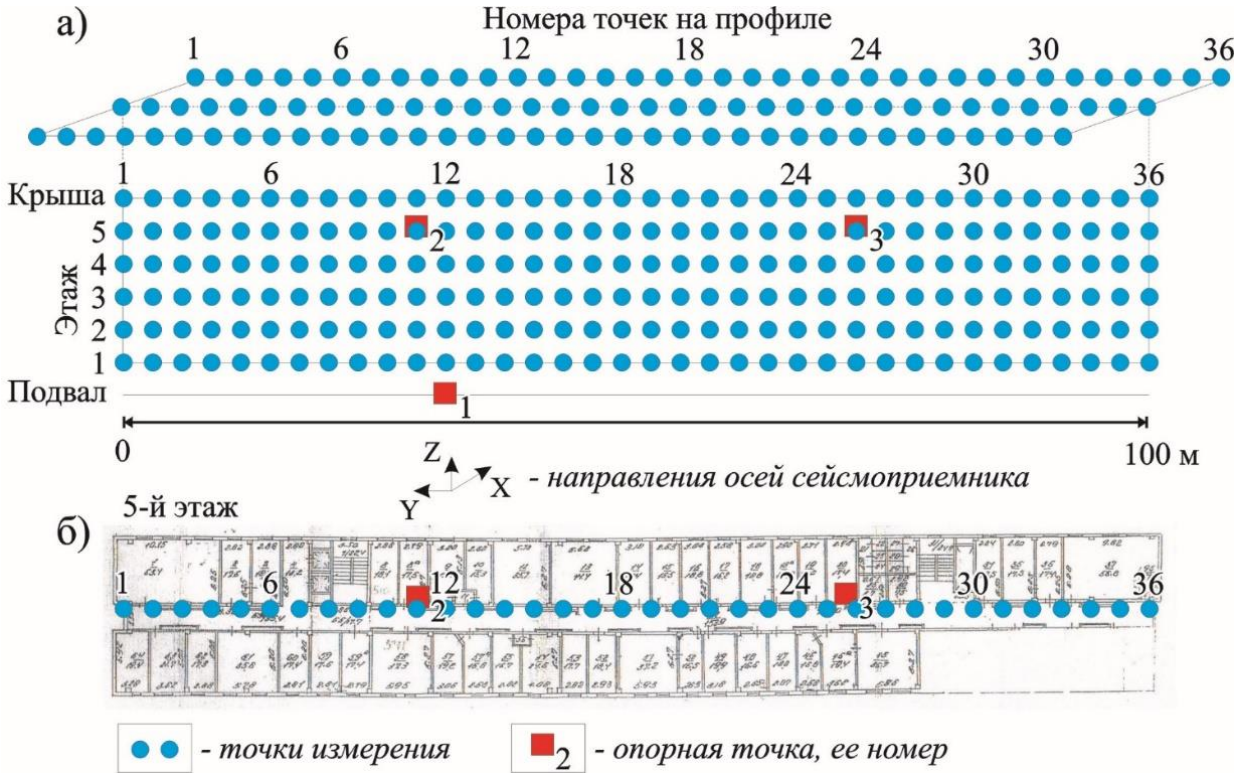


Рисунок 2.8 – Пример схемы наблюдений при регистрации микросейсмических колебаний жилого здания. (а) – общая; (б) – по профилю на 5-м этаже

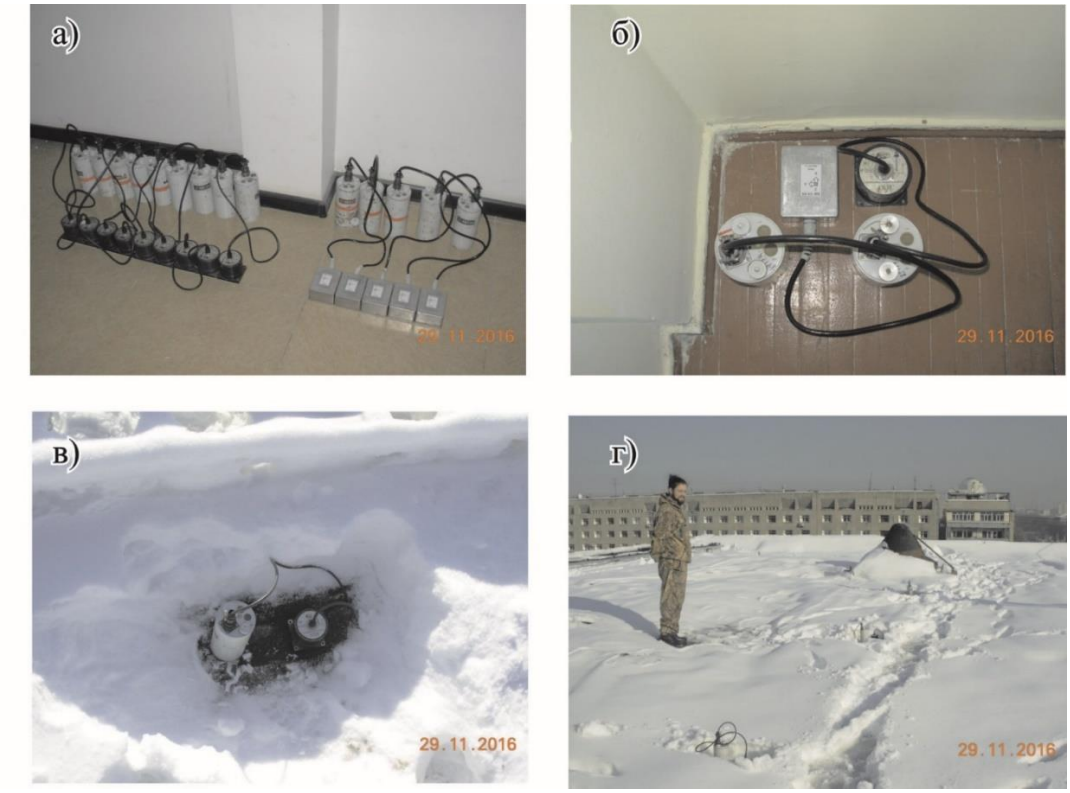


Рисунок 2.9 – Фотографии процесса проведения измерений на здании при помощи регистраторов «Байкал-АСН», датчиков-акселерометров А1638 и велосиметров GD-10: (а) – тест на идентичность; (б) – установка аппаратуры в опорной точке № 3; (в, г) – проведение измерений на крыше здания

С целью определения влияния различных факторов на собственные колебания зданий, силами СЕФ ФИЦ ЕГС РАН устанавливаются стационарные сейсмические станции на зданиях, расположенных в г. Новосибирске и области (рисунок 2.10, таблица 2.5).

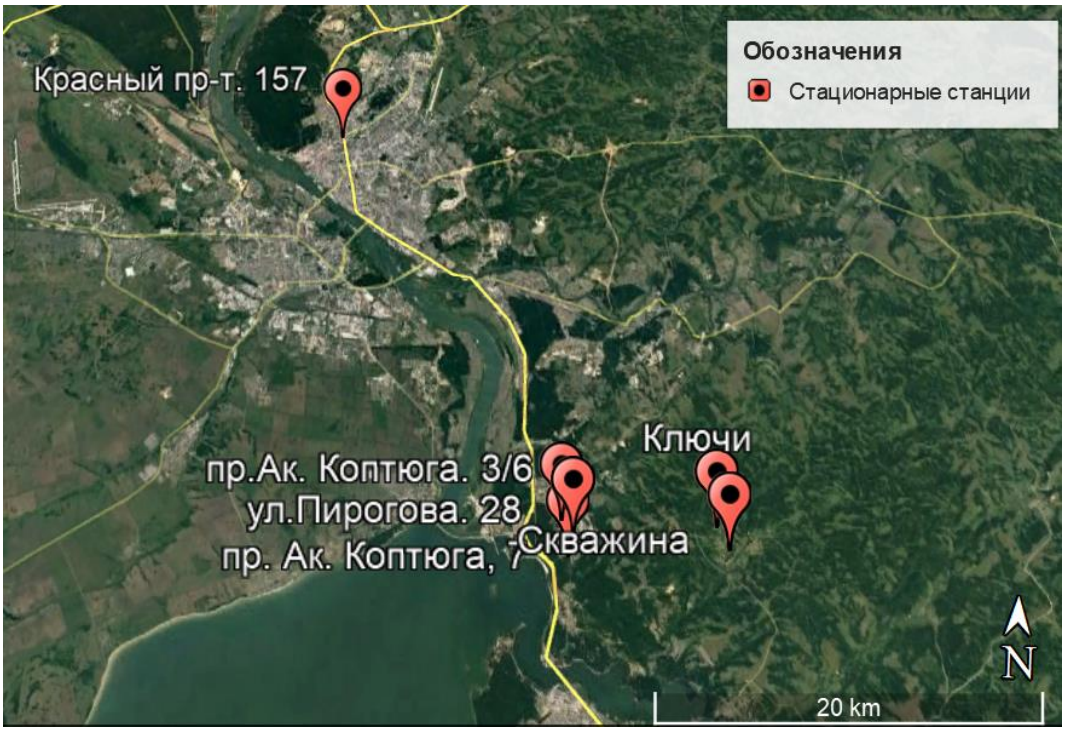


Рисунок 2.10 – Расположение стационарных сейсмостанций, установленных в зданиях Новосибирской области

Таблица 2.5 – Сведения о стационарных сейсмических станциях СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, установленных в 2025 г.

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

Сейсмическое оборудование станции также состоит из регистратора сейсмических сигналов и велосиметра. Для электроснабжения оборудования использовано подключение USB-порта с питанием от электрической сети, в качестве резервного питания (в случае

отключения электричества в сети) используются элементы питания, установленные в регистраторе. Станции с типом регистратора «Байкал-8», оборудованы микрокомпьютером для хранения, сбора и передачи сейсмических данных, а также предоставления возможности удаленного контроля оборудования сейсмостанции. Сбор данных со станций с типом регистратора «Байкал-7» производится в ручном режиме, при считывании USB-флэш накопителя. Полученные данные поступают в центр сбора и хранения данных.

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

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

Для регистрации малоамплитудных сейсмических сигналов при изучении строения недр Земли в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН также используются автономные трех- и четырехканальные регистраторы семейства «Байкал» с сейсмоприемниками различного типа. Регистраторы «Байкал-7» разработаны и произведены совместно с ООО НППГА «Луч», и по функциональным возможностям аналогичны регистраторам «Байкал-АСН» (рисунок 2.11). Вместе с тем, приборы «Байкал-7» отличаются более современной элементной базой. Каждый регистратор представляет собой портативный герметизированный модуль 4-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 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).

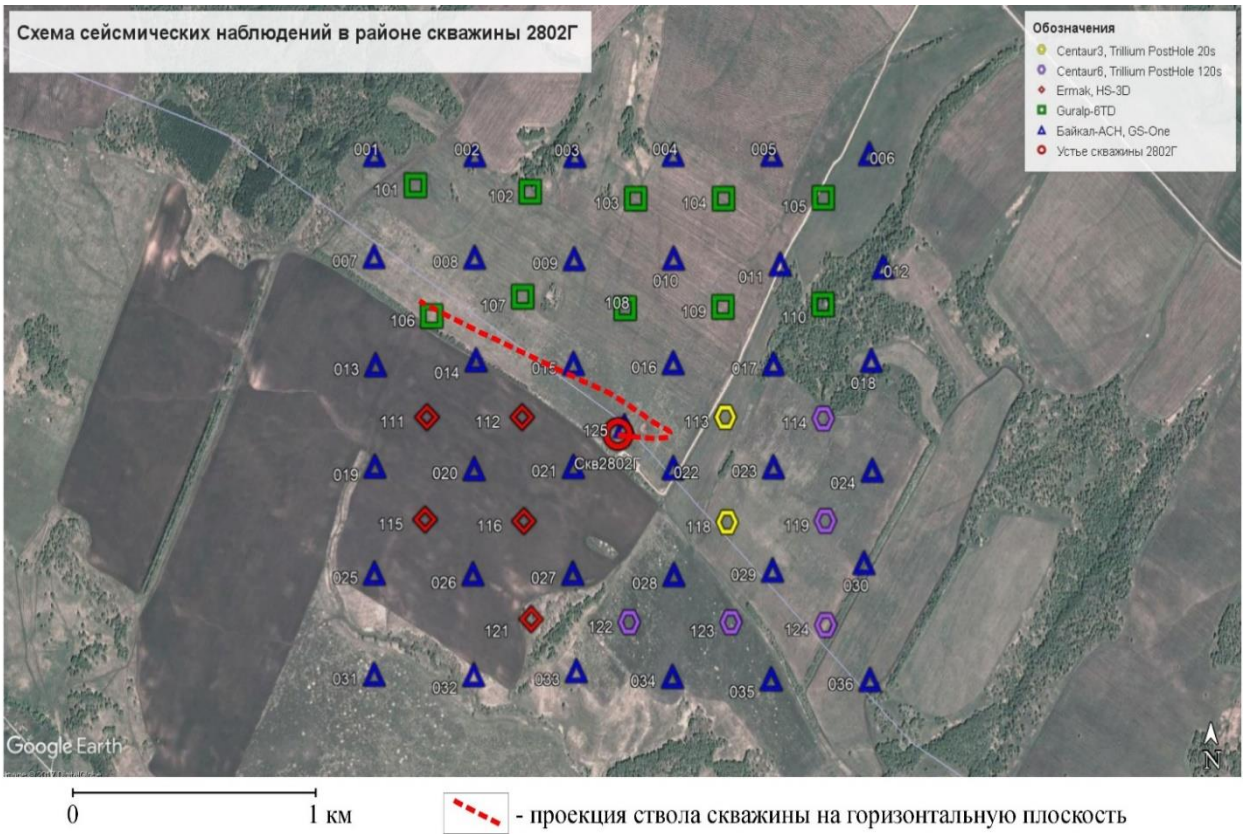
Регистраторы «Байкал-АСН» и «Байкал-7» в силу своей автономности и компактности применяются при организации сейсмических систем наблюдения

практически любой конфигурации. На рисунках 2.12 - 2.13 показаны примеры установки сейсмических регистраторов и схемы сейсмических наблюдений, реализованные на практике при проведении сейсморазведочных исследований.



Рисунок 2.11 – Автономные трехканальные регистраторы «Байкал-7»

а)



б)



Рисунок 2.12 – Реализованная схема наблюдений (а) и пример установки регистратора «Байкал-АСН» с трехкомпонентным сейсмоприемником GS-One при выполнении сейсмических исследований на Бавлинском месторождении (республика Татарстан, 2017 г.)

а)



б)

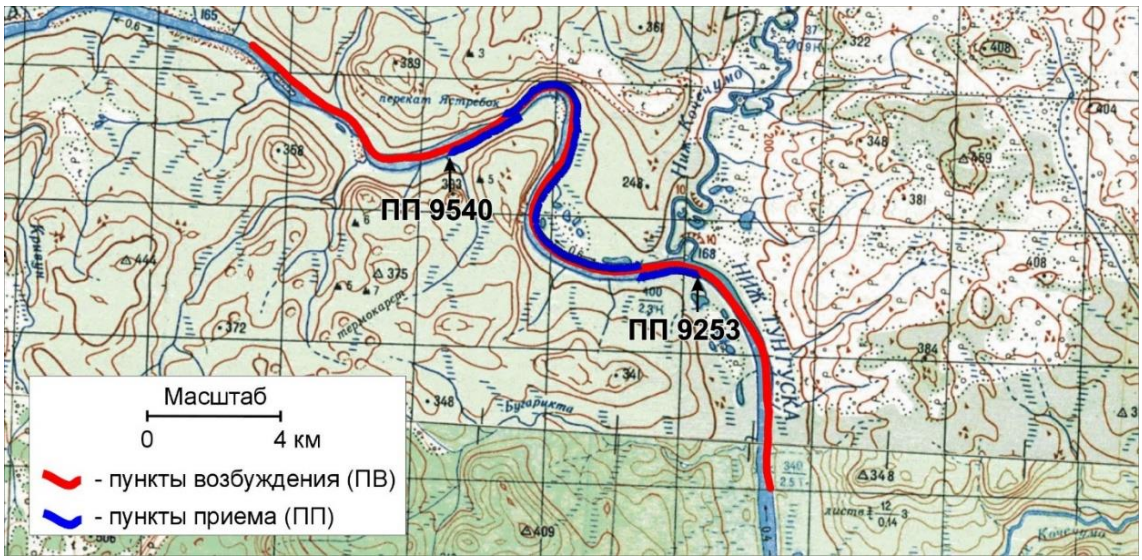


Рисунок 2.13 – Установка сейсмической аппаратуры «Байкал-АСН» с сейсмическими косами и сейсмоприемниками GS-20DX для проведения теста на идентичность (а) и схема опытных работ (б) при речных сейсморазведочных исследованиях (р. Нижняя Тунгуска, 2012 г.)

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

В научно-производственной деятельности Сейсмологический филиал ФИЦ ЕГС РАН эксплуатирует «Мобильный аппаратно-программный комплекс 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 2.14.

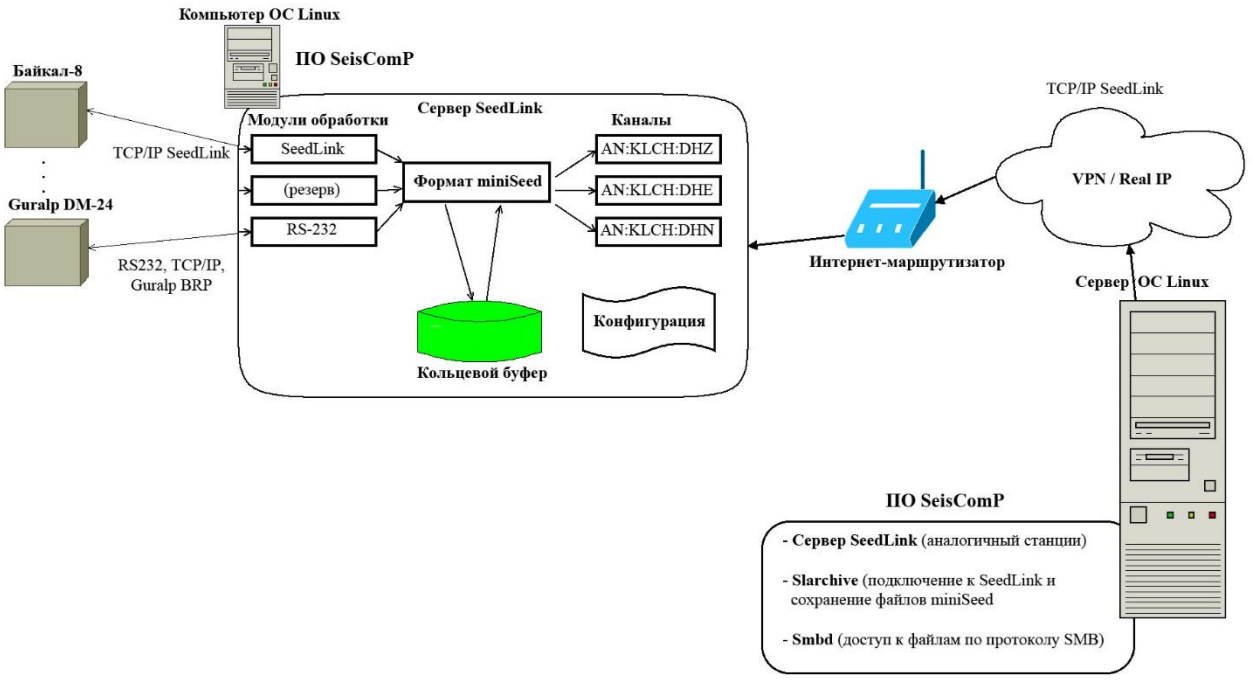


Рисунок 2.14 – Архитектура разработанного Комплекса

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

– сейсмического датчика (GD-4.5, GS-One LF и др.);

– 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 2.15) работает под управлением ОС Seismobian, разработанной на базе стандартного дистрибутива Linux (RaspiOS). В операционную систему включены средства, позволяющие:

– организовать туннель (VPN) между микрокомпьютером и центром сбора данных;

– проводить сбор данных с регистратора;

– обеспечивать временное (циклическое) хранение собранных данных во внутренней памяти;

– по запросу основного сервера VPN передавать накопленные данные в центр сбора данных.



Рисунок 2.15 – Микрокомпьютер Raspberry Pi

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

Основной сервер VPN, так же выполняющий роль центра сбора данных, установлен в серверном помещении СЕФ ФИЦ ЕГС РАН (совместно с АСФ ФИЦ ЕГС РАН) и построен на базе системного блока под управлением ОС Linux. Сервер обеспечивает непрерывный

опрос микрокомпьютеров, доступных в туннелях VPN по протоколу seedlink, и формирует файловую структуру данных, полученных с сейсмостанций, в формате miniseed.

Доступ к серверу и запрос данных возможны как с помощью ПО Seisgram2K (для получения волновых форм в режиме реального времени), так и стандартными средствами протокола SMB для изучения архивных данных (рисунок 2.16).

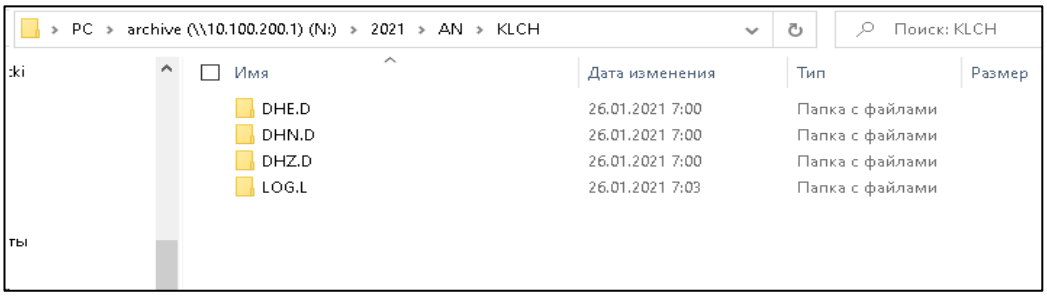


Рисунок 2.16 – Доступ к архиву данных (ОС Windows 10, OpenVPN)

На сервере организован специальный web-сервис, который позволяет отслеживать поступление данных (задержки буферизации и актуальность информации) в режиме реального времени (рисунок 2.17):

"СЕФ ФИЦ ЕГС РАН"

Real-time stations

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

Latencies:

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

"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	2026-02-17 03:41:19.00	41.4 s	2026-02-17 03:41:20.01	40.4 s	1.0 s
KLCH 0A.DHE	2026-02-17 03:41:59.22	1.2 s	2026-02-17 03:42:00.07	0.4 s	0.8 s
KLCH 0A.DHN	2026-02-17 03:41:59.35	1.1 s	2026-02-17 03:42:00.13	0.3 s	0.8 s
KLCH 0A.DHZ	2026-02-17 03:41:58.98	1.5 s	2026-02-17 03:42:00.06	0.4 s	1.1 s
KLCH 0B.DEE	2026-02-17 03:41:59.05	1.4 s	2026-02-17 03:42:00.07	0.4 s	1.0 s
KLCH 0B.DEN	2026-02-17 03:41:58.90	1.5 s	2026-02-17 03:42:00.06	0.4 s	1.2 s
KLCH 0B.DEZ	2026-02-17 03:41:58.46	2.0 s	2026-02-17 03:41:59.47	1.0 s	1.0 s

Latencies:

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

How to interpret these numbers?

Рисунок 2.17 – Монитор слежения доступности Комплекса

Внешний вид Комплекса на объекте приведен на рисунке 2.18.



Рисунок 2.18 – Комплекс в сборе

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

2.3 Сведения об аппаратуре для электромагнитных исследований

Уникальная научная установка

Элемент УНУ «Инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов» предназначен для изучения структур литосферы в пределах полигонов на территории Чуйской, Курайской и Уймонской котловин Алтайской горной системы и Горловского прогиба, расположенного между Колывань-Томской складчатой зоной (КТСЗ) и Салаирским антиклинорием Алтае-Саянской складчатой области в связи, как с возросшей сейсмической активностью, по данным сейсмологов с техногенной составляющей.

Уникальность аппаратуры и методики электромагнитного мониторинга

Представлена инструментальной системой (ИС), разработанной и созданной в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в рамках программ импортозамещения. Технические и программные инновационные решения, использованные при разработке ИС, обеспечили ей преимущества перед зарубежными аналогами по себестоимости, энергопотреблению, погрешностям измерений, экономичности. Себестоимость ИС в 10 и более раз ниже зарубежных аналогов. Невысокий уровень энергопотребления позволяет использовать ИС автономно с группой аккумуляторов. Разработанное схемное решение аналого-цифрового

преобразователя позволило достигнуть высокой точности измерений. Сервисная программа пользователя адаптирована для работы с любым коммуникационным оборудованием: компьютером, ноутбуком, планшетом, сотовым телефоном. Это делает инструментальную систему и серверный архив данных легко доступными.

Основные направления научных исследований, проводимых с использованием УНУ

– Создание геоэлектрических моделей для определения взаимосвязи современной геодинамики складчатых структур с возросшей сейсмической активностью как природной так техногенной;

– Определение степени влияния пространственно-временных вариаций геоэлектрических параметров (удельного электрического сопротивления, анизотропии, вызванной поляризации) на интенсивность опасных процессов (в т.ч. сейсмичность) в пределах Алтае-Саянской складчатой области и сопредельных территорий;

– Создание фундаментальных основ технологии средне- и краткосрочного прогноза землетрясений;

– Проведение геоэлектрического мониторинга на стратегически важных объектах (горнорудные разрезы), оценка связи сейсмического режима с геоэлектрическими параметрами, формирование базы данных.

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»

Состоит из 5 автономных приборов.

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

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

– Многокомпонентная регистрация в автономном режиме;

– Многокомпонентная регистрация в телеметрическом режиме.

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

Система МЭРС-Т имеет модульную структуру, состоящую из отдельных регистраторов. Каждый регистратор является 4-канальным прибором для сбора данных, при этом три низкочастотных канала (до 4 кГц) созданы на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 31 бита, и один высокочастотный канал (до 100 кГц) - на основе сигма-дельта АЦП с разрядностью 24 бита. В состав регистратора входит GPS модуль, который привязывает измеряемые данные к всемирному времени (UTC) не хуже 1 мкс, съемная флеш-карта SD с файловой системой FAT32. Регистратор имеет два интерфейса: Ethernet и RS-232. По Ethernet производится управления приборами, задание параметров работы, запуск регистрации (остановка), контроль состояния прибора, скачивание данных с флеш-карты, работа в режиме телеметрии. По RS-232 производится управление приборами, задание параметров работы, запуск регистрации (остановка), контроль состояния приборов. Полевые модули располагаются непосредственно у приемных петель (ПП). Предусмотрено четыре независимых входа для регистрации сигналов от разных секций приемной петли (отличающихся, например, количеством витков) и приемных линий 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 2.6. Внешний вид модуля регистратора приведен на рисунке 2.19, рабочее окно оператора с графическим отображением процесса регистрации сигнала на рисунке 2.20.

Таблица 2.6 – 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, приведенный ко входу	мкВ	< 0.2
Динамический диапазон	дБ	110 (ВЧ 100 кГц) 135 (НЧ 4 кГц)
Стабильность внутреннего генератора (-30 - +60 ºС)	с	2*10-7
Точность привязки времени Встроенный GPS	мкс	± 1
Объем энергонезависимой памяти.	Гб.	До 32 (флэш-карта)
Времена регистрации	с	0.00001÷64

Синхронизация работы приемников-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 2.19 – Измерительные модули «Байкал МЭРС-Т»

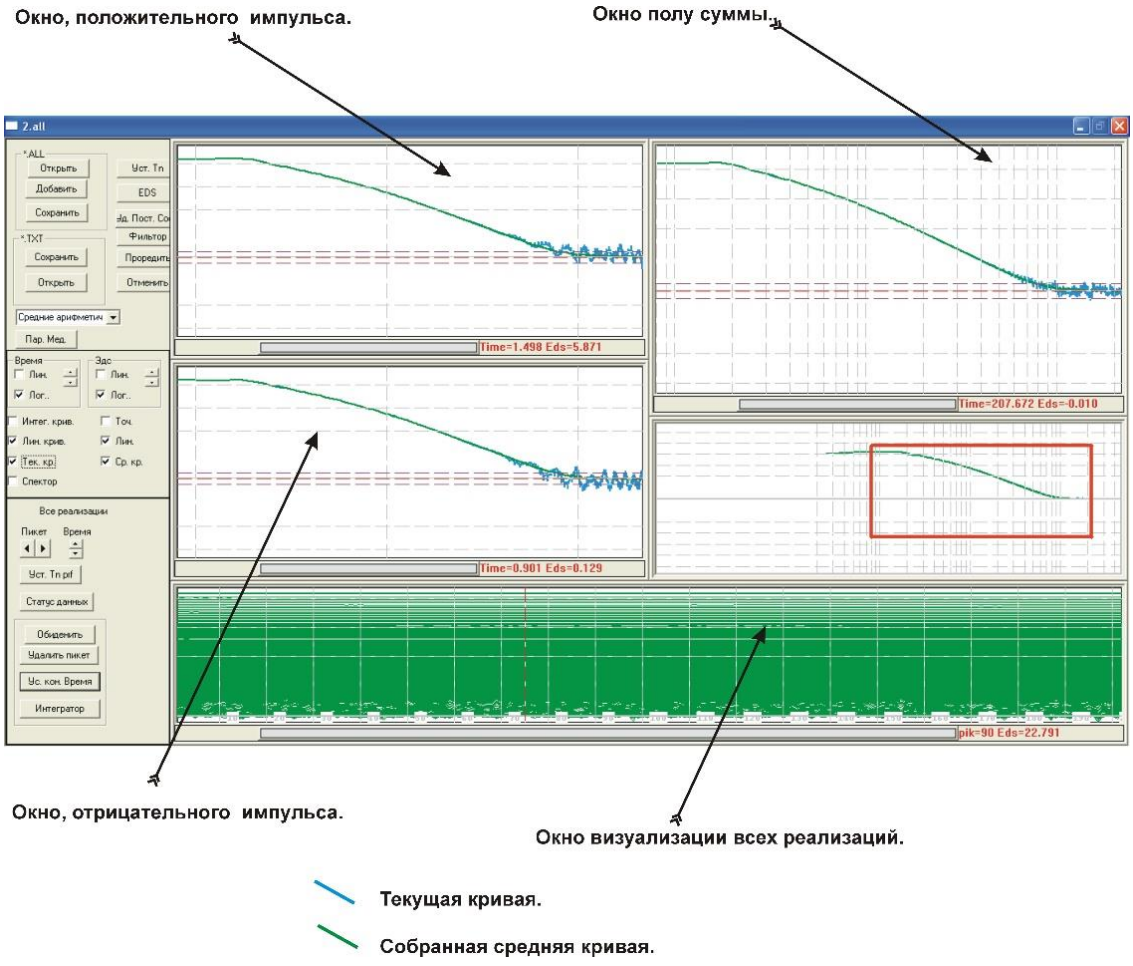


Рисунок 2.20 – Рабочее окно оператора, измеритель «Байкал МЭРС-Т»

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 2.7.

Таблица 2.7 – 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)	0.5 мкс
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 закрепленным источником	 до 1500 метров до 4000 метров
Формат записи параметров	внутренний
Внешний интерфейс	COM порт PC

Внешний вид генератора токовых импульсов (ГТИ 200), формы цифровых записей последовательности прямоугольных импульсов и характеристики фронта выключения отображены в виде графической информации в окне оператора (рисунки 2.21-2.23).



Рисунок 2.21 – Генератор токовых импульсов с амплитудой тока до 200 А

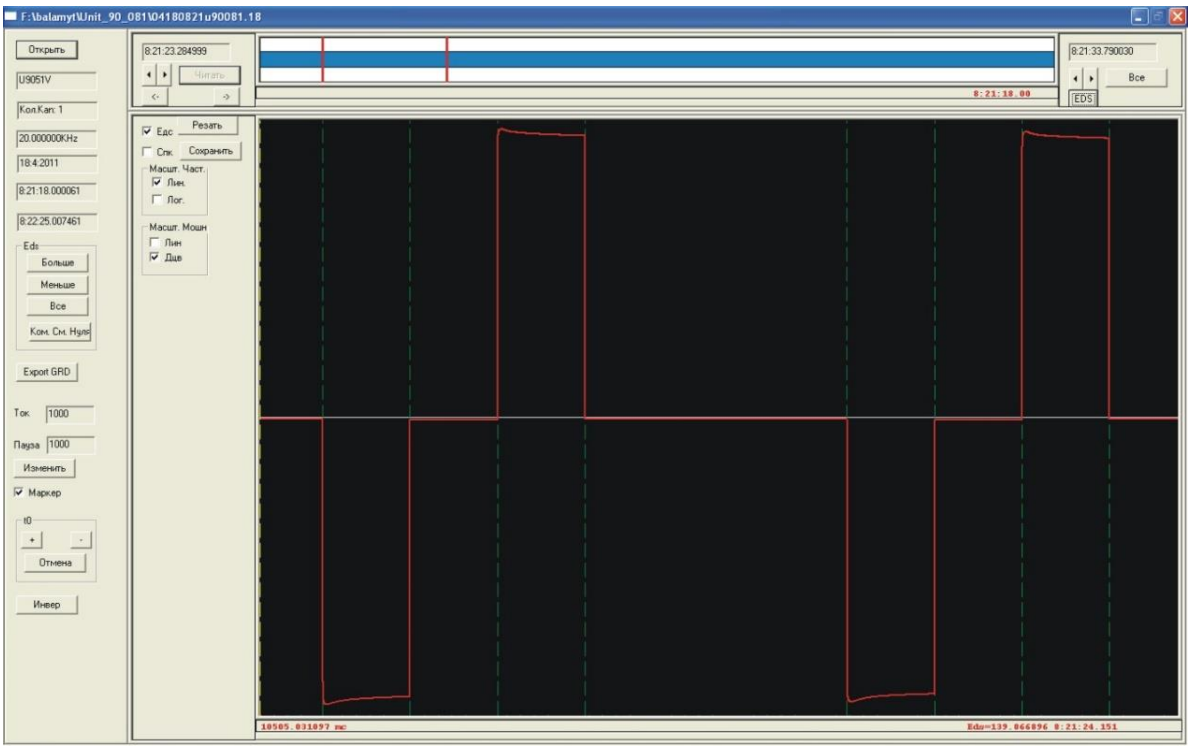


Рисунок 2.22 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись формы токовых импульсов

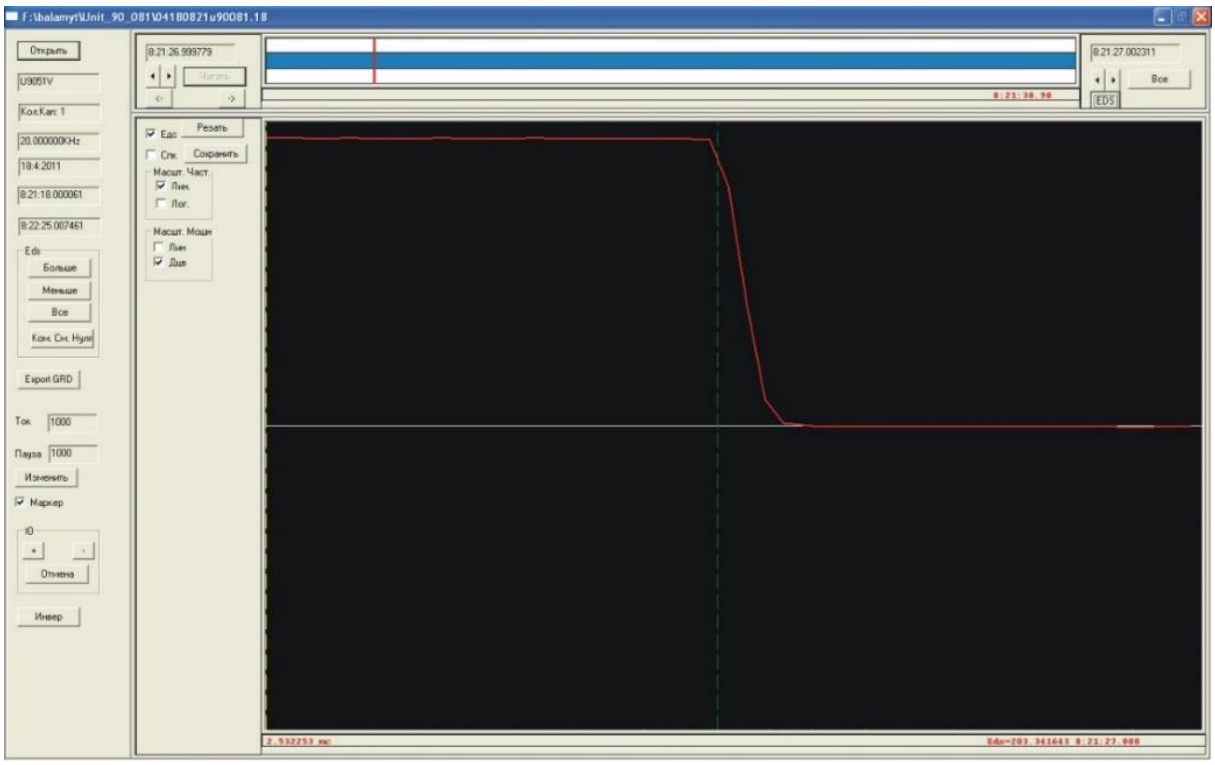


Рисунок 2.23 – Окно оператора, коммутатор тока, цифровая запись фронта выключения токового импульса

Многовитковая приемная рамка

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

Переносной датчик ЭМ-поля выполнен в виде круга на жестком каркасе площадью 1.28 м², число витков -96, индуктивность 0.71 мГн. Коэффициенты усиления: Кф = 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 2.24. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.8.



Рисунок 2.24 – Регистратор «Байкал МЭРС-Т» и приемная многовитковая рамка

Таблица 2.8 – Характеристики многовитковой приемной рамки

Параметр	Значение
Диаметр	1.277 м
Площадь (S)	1.28 м²
Число витков (n)	96
Индуктивность (L)	0.71 мГн
Коэффициент усиления (К 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 2.25). 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 2.25 – Аппаратура «Скала-48», внешний вид и пример полевых работ

Аппаратурное исполнение

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

Основа аппаратуры - микроконтроллер Philips NXP LPC2378 с ядром ARM7 и программируемая логическая матрица (ПЛМ) Xilinx Spartan-3E рисунок 2.26. 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 разъема. Дополнительно на панель выведены клеммы питающей и приемной 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.

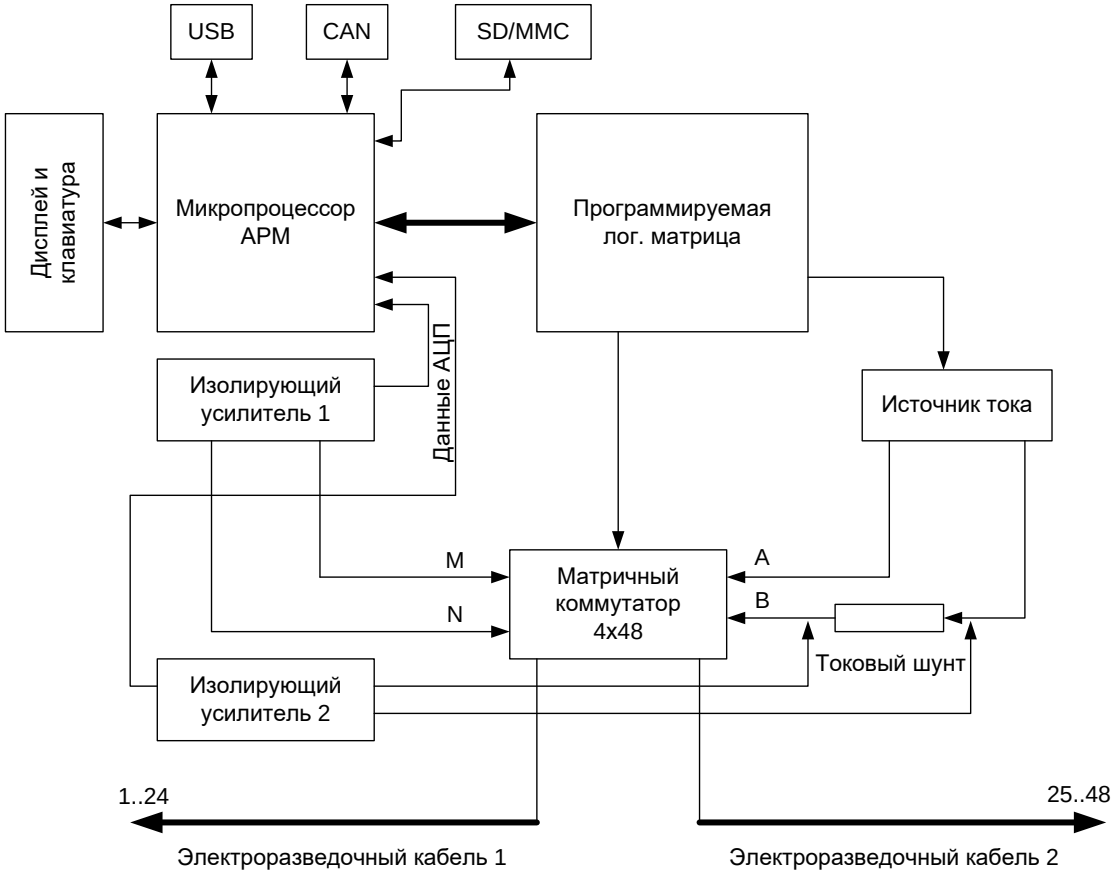


Рисунок 2.26 – Структурная схема аппаратуры «Скала-48»

Результаты измерения сохраняются на встроенной флэш-карте формата SD/MMC объемом до 4 Гб с файловой системой FAT32. Данные содержат полную информацию о токе, напряжении, относительном стандартном отклонении и используемой рабочей конфигурации. В аппаратуре реализована возможность выбора числа накоплений и времени интегрирования при измерениях.

Параметры аппаратуры

– Общие:

Количество электродов – 48

Внешнее питание – 12 В

Внутренний аккумулятор – 12 В, 7 Ач

Сенсорный экран – 12″, 240 x 128

Внутренняя память до – 2 Гб

Связь с ПК – USB 2.0

Степень защиты корпуса с закрытой крышкой – IP 67

Степень защиты корпуса с открытой крышкой – IP 54

Рабочая температура – от -20 до +40 °С

Габариты 420 x 340 x 230 мм

Вес 11 кг

– Измеритель:

Число измерительных каналов – 1

Входное сопротивление – 10 МОм

Ширина полосы пропускания – 20 Гц

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

Ослабление помех промышленной частоты 50, 60 ГЦ – 65 дБ

Точность измерения напряжения – 1 %

Разрядность АЦП – 24 бита

Защита от перенапряжения до – 1 кВ

– Внутренний генератор:

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

Выходной ток – 1 ÷ 2000 мА

Мощность максимальная – 200 Вт

Точность измерения тока – 1 %

Максимальное напряжение – 500 В

Защита от короткого замыкания – есть

– Технические средства:

Для выполнения исследований используются следующие измерительная техника, транспортные средства и оборудование, представленные в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Аппаратура и оборудование

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

3 Обрабатывающая часть УНУ

3.1 Аппаратный комплекс Центра обработки данных

Аппаратный комплекс центра обработки данных (ЦОД) с интегрированной программно-алгоритмической системой УНУ построен в виде масштабируемого сегмента локальной вычислительной сети (ЛВС) и состоит из нижеследующих 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 3.1).

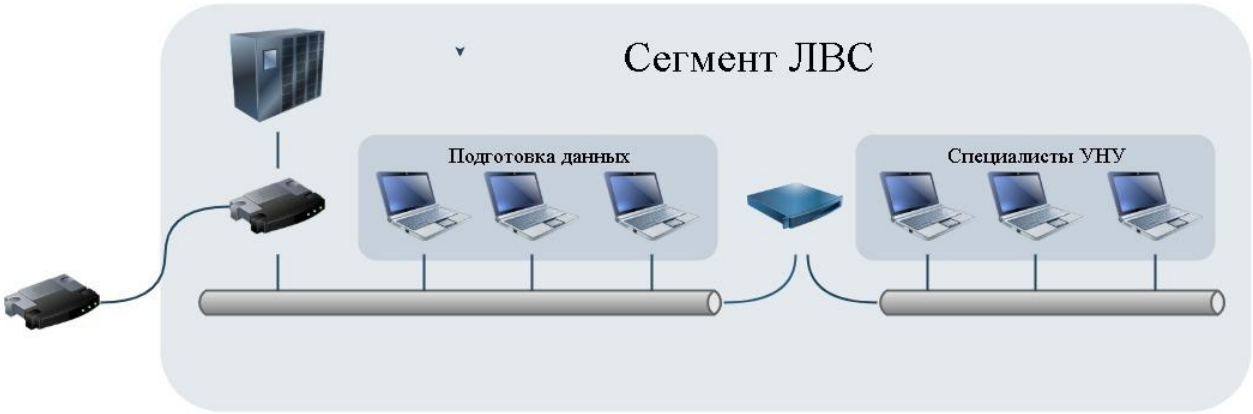


Рисунок 3.1 – Принципиальная схема построения сегмента ЛВС

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 3.2), 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.

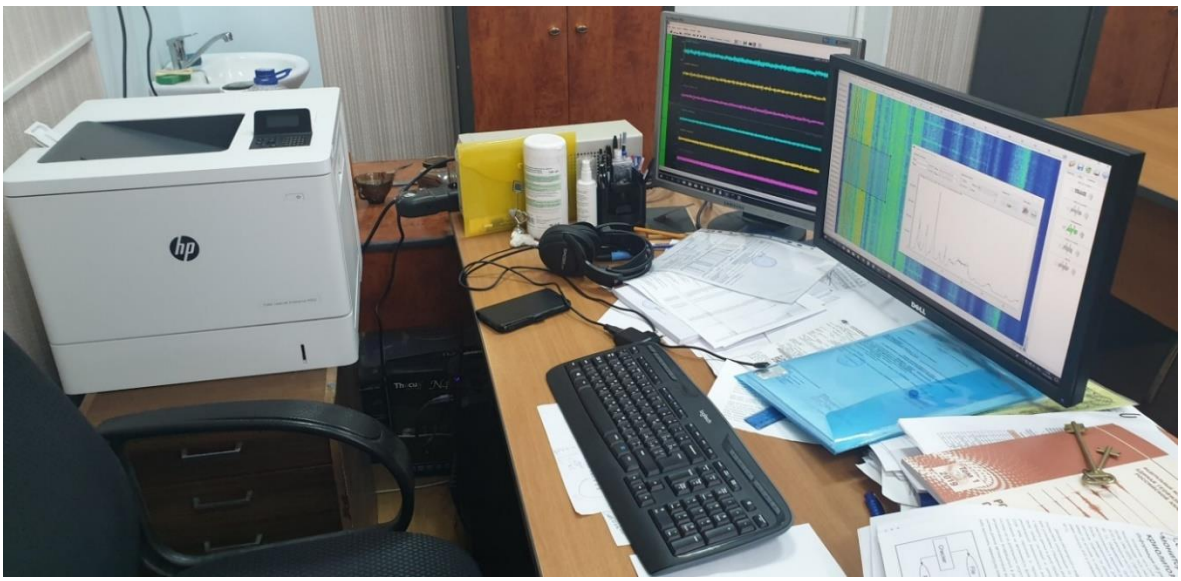


Рисунок 3.2 – Рабочее место специалиста УНУ, анализ и обработка данных

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 3.3), так и быстро разворачивать в передвижном варианте, например, на речных судах.



Рисунок 3.3 – Ядро аппаратной части ЦОД в серверной СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

В мобильном (передвижном) варианте ЦОД УНУ может быть развернут, без учета дополнительных рабочих станций специалистов, практически в любом помещении (рисунок 3.4).

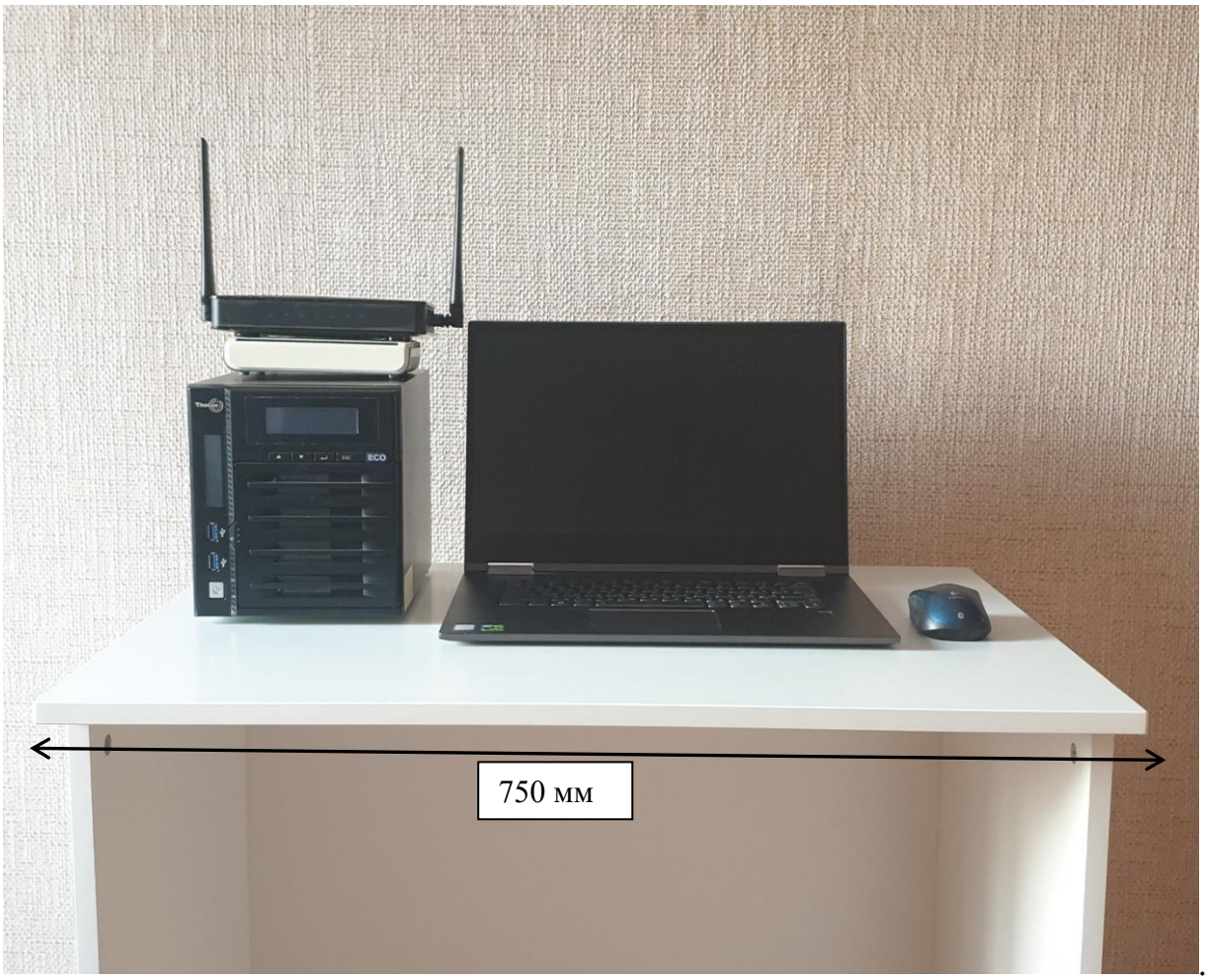


Рисунок 3.4 – Узлы ядра аппаратной части ЦОД в передвижном варианте УНУ

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».

3.2 Программно-алгоритмическая часть

Программы для обработки и интерпретации сейсмических сигналов

Программа «SpectrumSeism»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

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

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

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

Последняя версия программы и дата: 0.6.4 (16.04.2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 3.5.

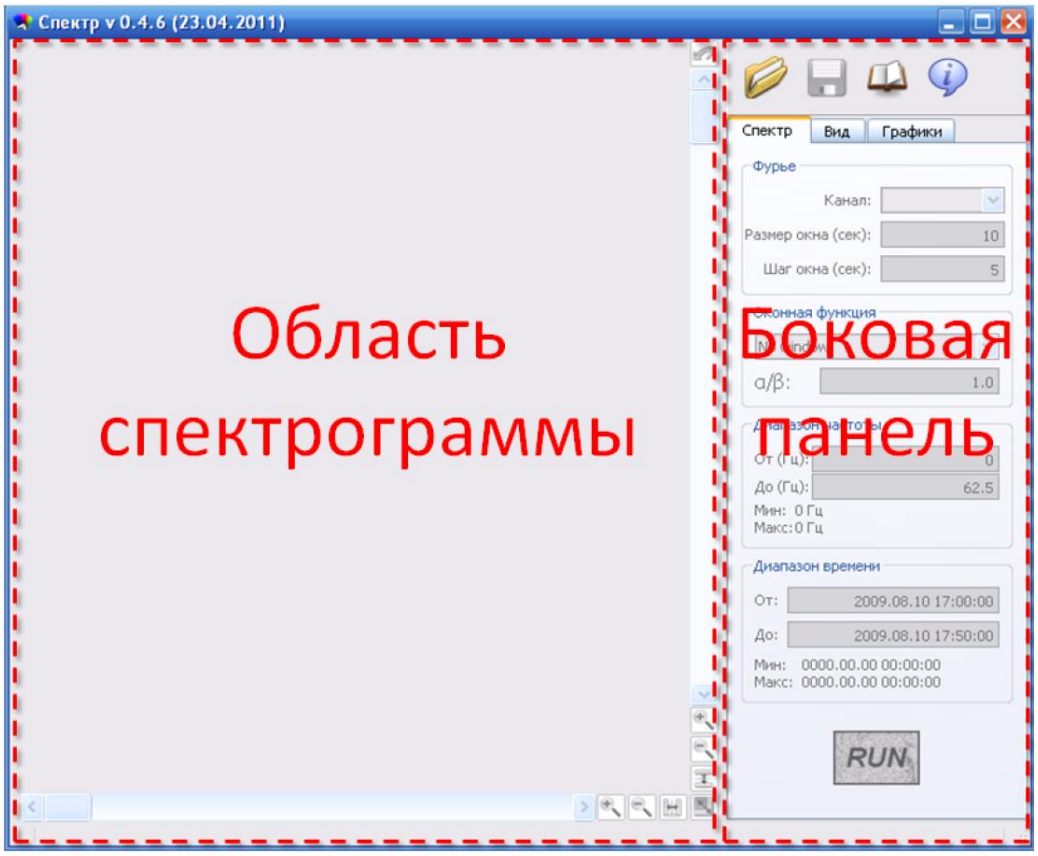


Рисунок 3.5 – Главное окно программы «Spectrum»

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, Poca-A, MiniSeed

Форматы выходных файлов: Vibr2, Байкал-10, Poca-A, MiniSeed, txt (результат пикировки)

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

Последняя версия программы и дата: 0.4 (25.01.2016)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 3.6.

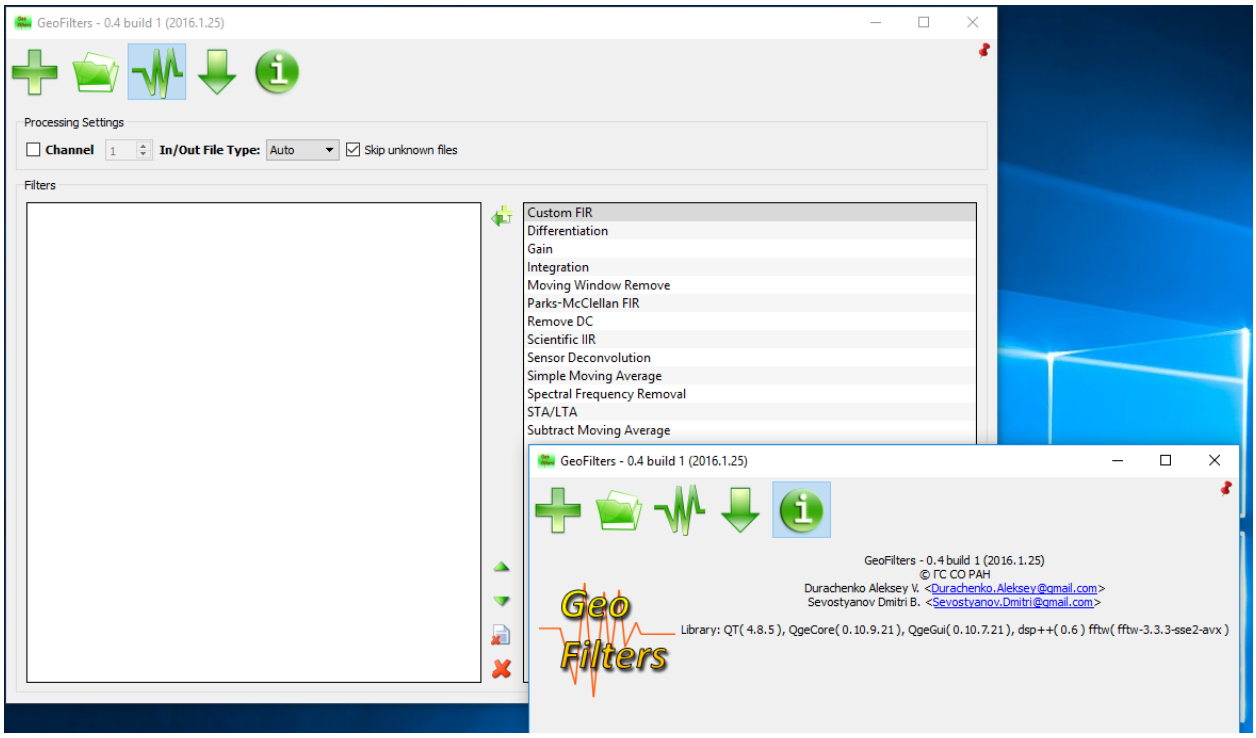


Рисунок 3.6 – Главное окно программы «GeoFilters»

Программа «SSlicer»

Разработчик: СЕФ ФИЦ ЕГС РАН

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

Форматы входных файлов: Байкал-10

Форматы выходных файлов: SEGY

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 SEGY.

Последняя версия программы и дата: 1.0.1 (03.07.2018)

Вид главного окна программы приведен на рисунке 3.7.

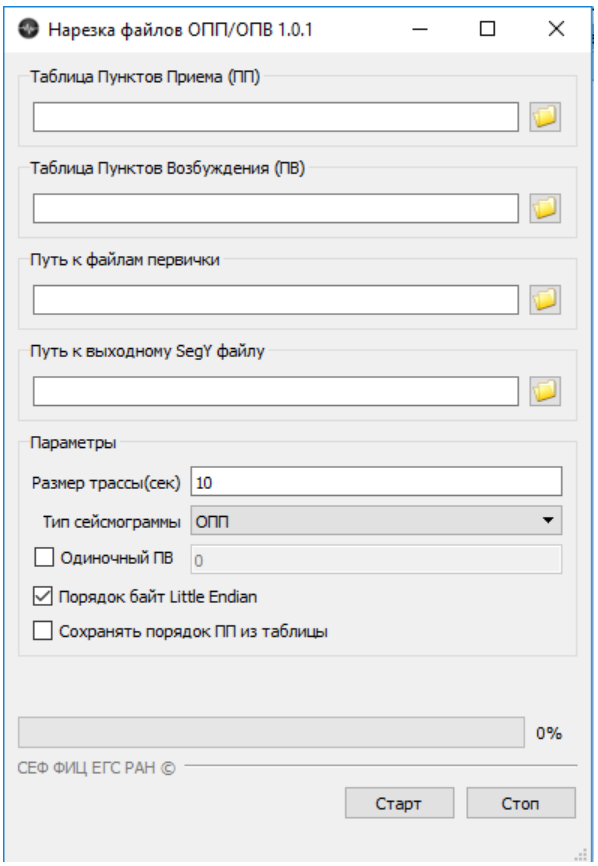


Рисунок 3.7 – Главное окно программы «SSlicer»

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, SEGY, 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 3.8.

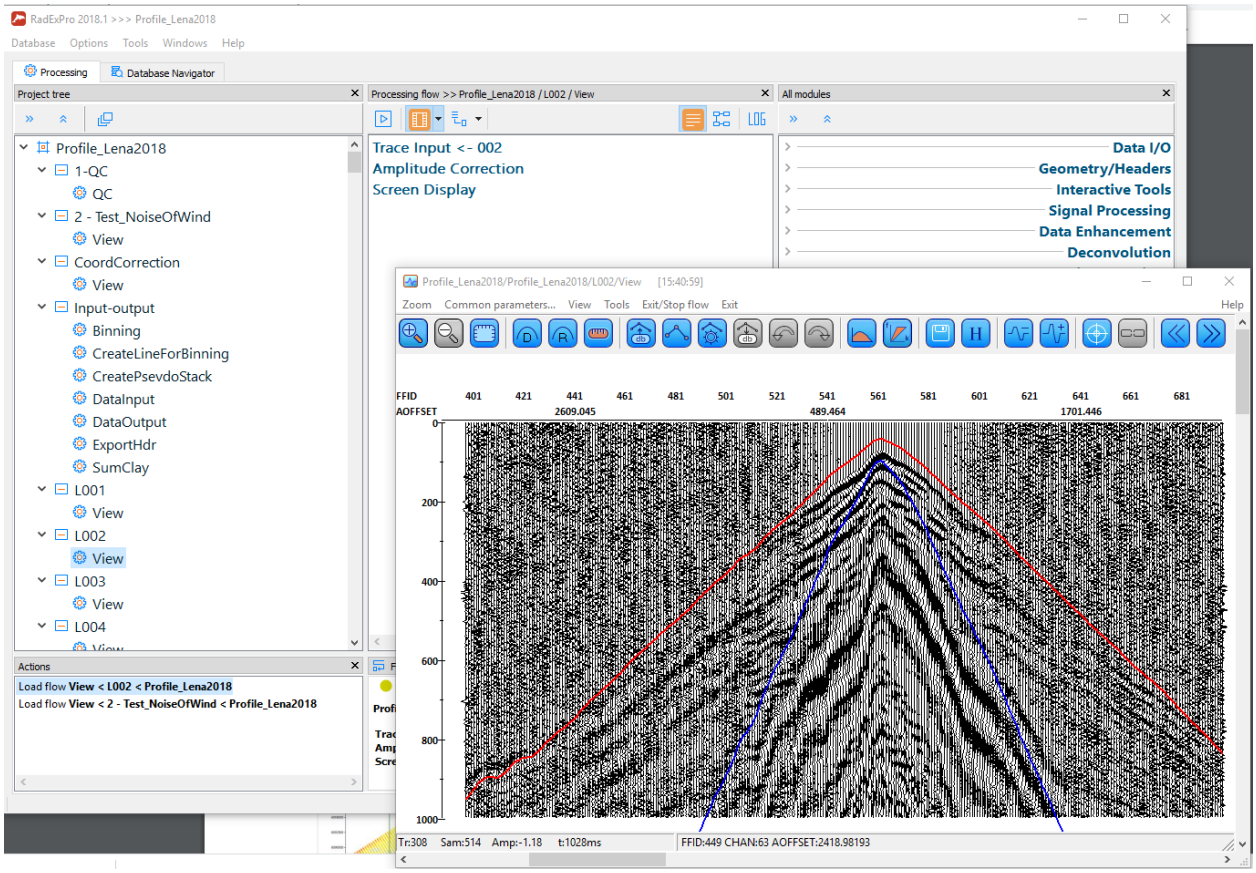


Рисунок 3.8 – Главное окно программы «RadexPro»

Программы для обработки и интерпретации электромагнитных сигналов

Сведения о программно-алгоритмических средствах, используемых при обработке и интерпретации данных электромагнитных сигналов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – 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

4 Результаты геофизических исследований

4.1 Мониторинг собственных частот Дворца культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель»

Общеизвестно, что в последние десятилетия зона распространения многолетнемерзлых пород, охватывающая более половины территории Российской Федерации, сокращается в связи с тенденцией к изменению климата, связанной с глобальным потеплением. Обеспечение безопасности сооружений на многолетнемерзлых грунтах осложнено изменением их физико-механических свойств при замерзании и оттаивании. Такие эффекты, как неравномерные осадки, морозное пучение и термокарст, могут привести к деформации и разрушению расположенных на них зданий и инженерных сооружений.

Контроль безопасности сооружений на многолетнемерзлых грунтах традиционно базируется на данных геотехнических исследований для выявления и предупреждения возможных аварийных ситуаций, связанных с изменением физического состояния грунтов. Одним из рациональных путей обнаружения начавшихся разрушительных процессов в зданиях и сооружениях в период длительной эксплуатации является использование методик, основанных на мониторинге частот их собственных колебаний. Подавляющим числом исследователей эти частоты определяются при Фурье-анализе материалов регистрации сейсмического шума на сооружении. Такие методики активно развиваются как в Российской Федерации, так и за рубежом. В целом, они базируются на том, что, при неизменном физико-техническом состоянии здания и его фундамента, такие параметры, как: размеры, масса, жестокость конструкции и граничные условия в основании, остаются неизменными. Из чего следует ожидать и неизменность частот собственных колебаний сооружения. Следовательно, при фиксировании изменений этих частот во времени, можно делать выводы о начале разрушительных процессов в здании или его основании в связи с изменением жесткости конструкции или граничных условий.

Однако исследования последних лет убеждают, что даже у исправных зданий, т.е. без признаков разрушений, частоты собственных колебаний могут существенно изменяться под влиянием внешних факторов. При отсутствии разрушений эти изменения обратимы – т.е. при устранении влияющего фактора, частоты возвращаются на первоначальный уровень. Например, детально изучены сезонные вариации частот плотин ГЭС при изменении уровня воды в водохранилище, достигающие 10 % [2],[3]; для мостов выявлены такого же порядка значительные колебания частот от температуры [4]-[8]; в зданиях и сооружениях на свайных фундаментах отмечаются существенные изменения частот в связи

с оттаиванием и промерзанием грунта вокруг свай [9],[10]. Перечисленное затрудняет процесс контроля безопасности здания или сооружения по частотам собственных колебаний, особенно если их фактические сезонные или суточные вариации существенно больше, чем изменения, вызванные появлением дефекта в его конструкции. Например, по расчетам, при появлении трещины в плотине Саяно-Шушенской ГЭС, частоты уменьшаются на 0.01-0.05 Гц, в то время как их сезонные колебания почти на порядок выше – 0.1-0.2 Гц [3].

Некоторые исследователи предлагают учитывать такие изменения частот за счет ввода специальных корректирующих функций (например, зависимостей частоты от уровня воды в водохранилище или частоты от температуры окружающего воздуха), эмпирически определяемых при аппроксимации данных мониторинга в период безаварийной эксплуатации сооружения. Однако использование такого подхода затруднено из-за неоднозначности полученных зависимостей, в связи с одновременным влиянием различных факторов внешней среды (например, уровня воды, температуры, промерзания или оттаивания конструкций) на частоты собственных колебаний сооружений [11]. Выход из этого затруднения видится в подробном анализе данных мониторинга за достаточно длительный период эксплуатации сооружения (от нескольких лет, а то и десятилетий) с достоверным выявлением всех существующих факторов влияния внешней среды на значения частот собственных колебаний для их учета с целью выявления изменений, связанных непосредственно с началом разрушения сооружения. Для обозначения таких изменений собственных частот в исследовании используется термин аномальные. В противовес этому, нормальными называются все обратимые изменения частот, вызванные только изменениями во внешней среде.

В исследовании выполняется обработка данных непрерывного мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного на аварийном здании Дворца культуры г. Норильска за более чем трехлетний период (с августа 2021 г. по декабрь 2024 г.), с определением регулярных (ежедневных) значений частот его собственных колебаний. На этом примере разрабатывается методика, учитывающая вариации таких частот от внешних факторов и позволяющая выделить аномалии, как индикаторы начавшихся разрушений конструкции и/или основания здания и/или сооружения, расположенного на многолетнемерзлых грунтах.

Объект исследования – Дворец культуры ЗФ ПАО ГМК «Норильский никель» (Российская Федерация, г. Норильск, Ленинский проспект, д. 9), построенный в 1965 г. (рисунок 4.1). Представляет собой возведенное в зоне многолетнемерзлых пород четырехэтажное здание шириной 48 м и длиной около 70 м, установленное на свайный

фундамент. С 2021 г. Дворец культуры закрыт на внеплановый ремонт и остается закрытым в настоящее время (2025 г.). В средствах массовой информации говорилось о проявлении неблагоприятных геологических условий территории – оттаивании вечномерзлого грунта, на который опирается часть здания, в результате чего строение поплыло и стало аварийно-опасным. Известно, что восстановительные работы по укреплению фундамента велись до 2023 г. [12].

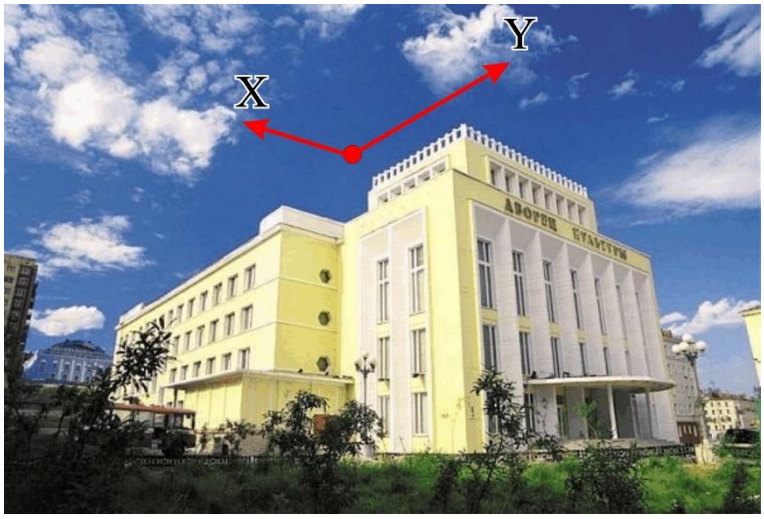


Рисунок 4.1 – Внешний вид исследуемого здания и схематическое изображение направления осей сейсмоприемников

В связи с описанными событиями, по заказу НИЦ «Экология» СО РАН силами Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН в здании Дворца культуры была установлена сейсмометрическая аппаратура «Байкал-8». С ее помощью, в период с августа 2021 г. по декабрь 2024 г., непрерывно регистрировался сейсмический шум в двух трехкомпонентных пунктах наблюдения на 1-м и 4-м этажах здания [13]. Определение частот собственных колебаний сооружения выполнялось по методике, разработанной в [14]. Суть ее состоит в следующем. На начальном этапе проводится исследование методом стоячих волн, результаты которого доказывают, что определяемые по локальным максимумам усредненных амплитудных спектров сейсмического шума частоты являются частотами собственных колебаний здания. На дату проведения исследования (21.08.2021 г.) было выделено 5 частот: 3.0, 3.7 и 4.7 Гц (для X-компоненты, соответствующей короткой оси здания) и 3.5, 5.2 Гц (для Y-компоненты, по длинной оси здания); по Z-компоненте стоячие волны не выявлены. Следующим шагом, с использованием специального программного обеспечения SpectrumSeism [15], выполняется регулярное (ежесуточное) определение частот собственных колебаний здания. Относительная точность таких определений, исходя из сопоставлений частот, определенных одновременно, но в разных пунктах наблюдения, составляет 0.5-1.0% [13].

Дальнейшие шаги заключаются в сравнительном анализе полученных временных рядов значений частот с данными мониторинга температур на метеостанции для определения нормальных изменений частот. Под нормальными изменениями частот подразумеваются изменения, вызванные влиянием на здание факторов внешней среды, таких как температурные изменения, которые влекут за собой изменения физических свойств конструкции сооружения, в связи с чем и происходит изменение его собственных частот. После учета таких факторов, возможно определение аномальных изменений частот собственных колебаний здания, вызванных внутренними изменениями в конструкции сооружения (предположительно разрушительными процессами).

Необходимо учитывать, что в ходе обработки непрерывных записей сейсмического шума велика вероятность столкнуться с рядом методических трудностей, существенно осложняющих интерпретацию динамики частот собственных колебаний. Так в данном исследовании суточные вариации значений собственных частот являлись ожидаемым, но важным для учета физическим явлением, обусловленным изменением динамических характеристик здания под влиянием внешних и внутренних факторов в течение суточного цикла. Поэтому, на примере данных 4-го этажа, был проведен сравнительный анализ среднесуточных значений собственных частот и их суточных вариаций ночь-день (рисунок 4.2).

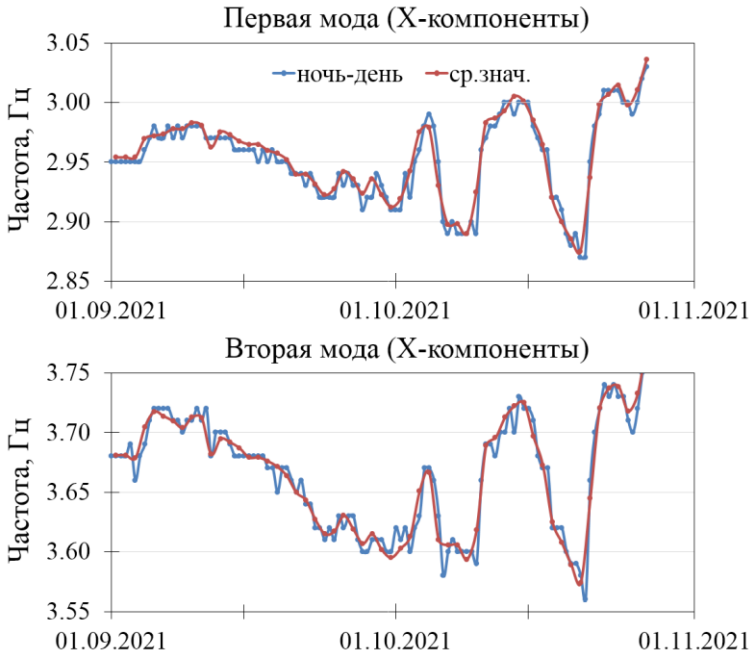


Рисунок 4.2 – Пример сравнения среднесуточных значений собственных частот здания Дворца культуры и их суточных вариации (день/ночь)

При положительных температурах (в летние периоды) наибольший нагрев и, соответственно, максимальные частоты обычно наблюдаются во второй половине дня.

Минимальные частоты – ранним утром, после ночного охлаждения. При отрицательных температурах (в зимние периоды) – все наоборот. Значение собственной частоты в течение одних суток может сильно меняться, в зависимости от конструкции здания, материалов и климата. В данном случае было выявлено, что среднесуточные значения собственных частот и их суточные вариации (день/ночь) имеют незначительные различия (меньше погрешности определения частот). Поэтому определение регулярных (ежедневных) значений частот проводилось по среднесуточным показателям.

Кроме того, значительные сложности вызвали возникновения высокоамплитудных техногенных помех (рисунок 4.3), спектральные максимумы которых были очень близки, а в отдельные периоды практически совпадали с частотами собственных колебаний сооружения, затрудняя их надежную идентификацию и отслеживание. Это явление требовало дополнительного анализа данных для выделения устойчивых трендов.

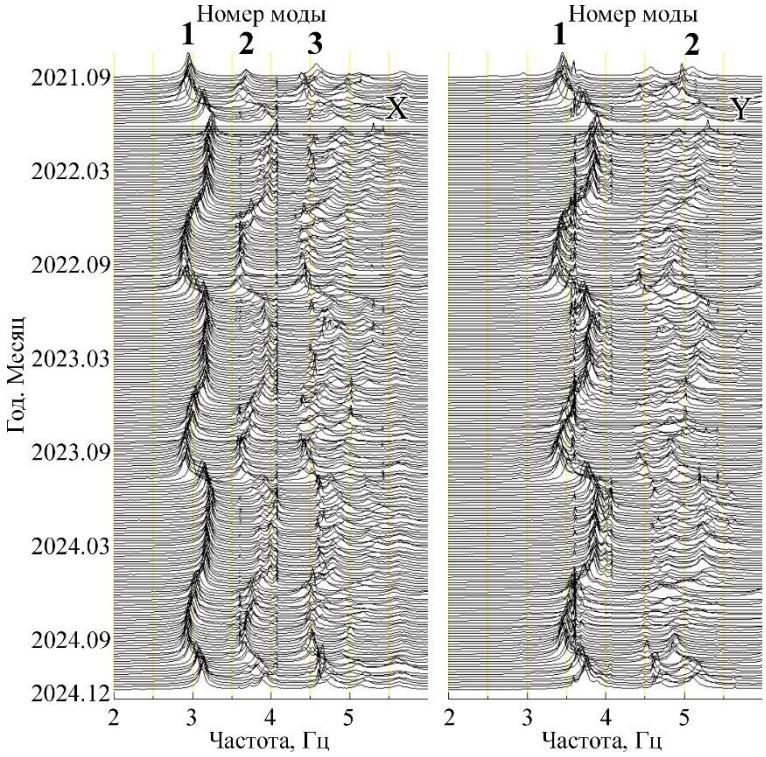


Рисунок 4.3 – Изменения усредненных (по 10 суток) спектров частот собственных колебаний здания (по компонентам X и Y) во времени в период с 01.09.2021 г. по 01.12.2024 г.

Еще одним неожиданным эффектом стало раздвоение (рисунок 4.4) одной из основных резонансных частот (вторая видимая мода по Y-компоненте), требующие дальнейшего анализа для установления его природы. Предположительно такое явление могло свидетельствовать о возникновении дополнительных мод колебаний вследствие локальных изменений жесткости конструкций или нелинейных взаимодействий.

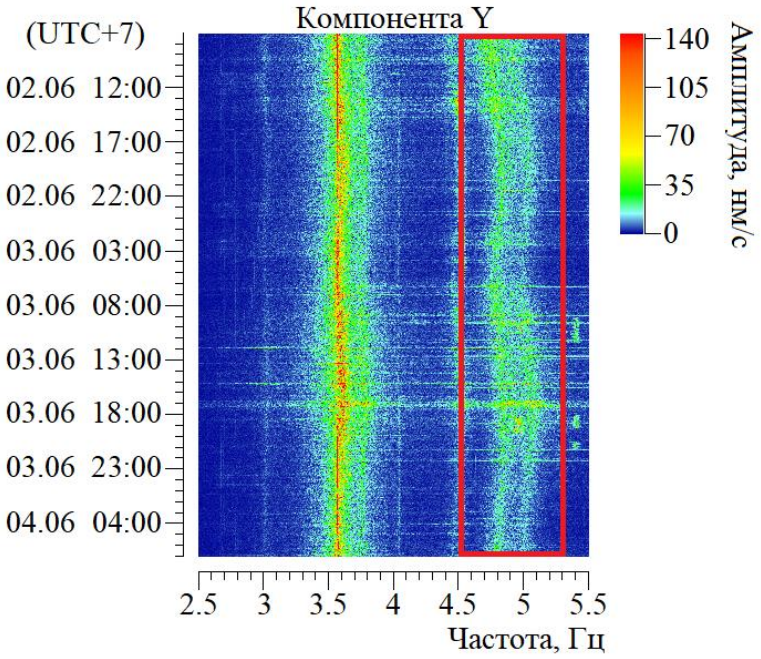


Рисунок 4.4 – Пример спектрограммы сигналов по компоненте Y с 02.06.2024 г. по 04.06.2024 г., в интервале от 2.5 до 5.5 Гц

Раздвоение частоты в конце весны – начале лета 2024 г. привело к отсутствию возможности дальнейшей обработки данных одной из наблюдаемых мод собственных колебаний, поскольку учет такого фактора требует разработки сложных дополнительных алгоритмов обработки и верификации данных для минимизации ошибок интерпретации.

В результате обработки записей сейсмического шума, зарегистрированного на аварийном здании Дворца культуры г. Норильска за более чем трехлетний период (с августа 2021 г. по декабрь 2024 г.), были получены значения частот низших мод собственных колебаний, соответствующих 5 частотам, выделенным методом стоячих волн.

Взаимосвязь между сезонными изменениями температуры и динамикой среднесуточных значений частот собственных колебаний здания (рисунок 4.5) демонстрирует четко выраженную годовую цикличность. Отмечается значительный, не характерный для зданий в теплой климатической зоне, сезонный разброс частот (в зимний период их значения выше на 11–18%, чем в летний). Эти периоды соответствуют времени промерзания и оттаивания грунта. При понижении температур в зимнее время (голубые интервалы на рисунке 4.5) грунт, в котором расположены сваи, полностью промерзает, вследствие чего увеличивается жесткость основания здания, следовательно, увеличивается и частота. Это подтверждает, что мониторинг собственных частот данным методом является эффективным инструментом для диагностики состояния сооружений со свайным фундаментом в криолитозоне.

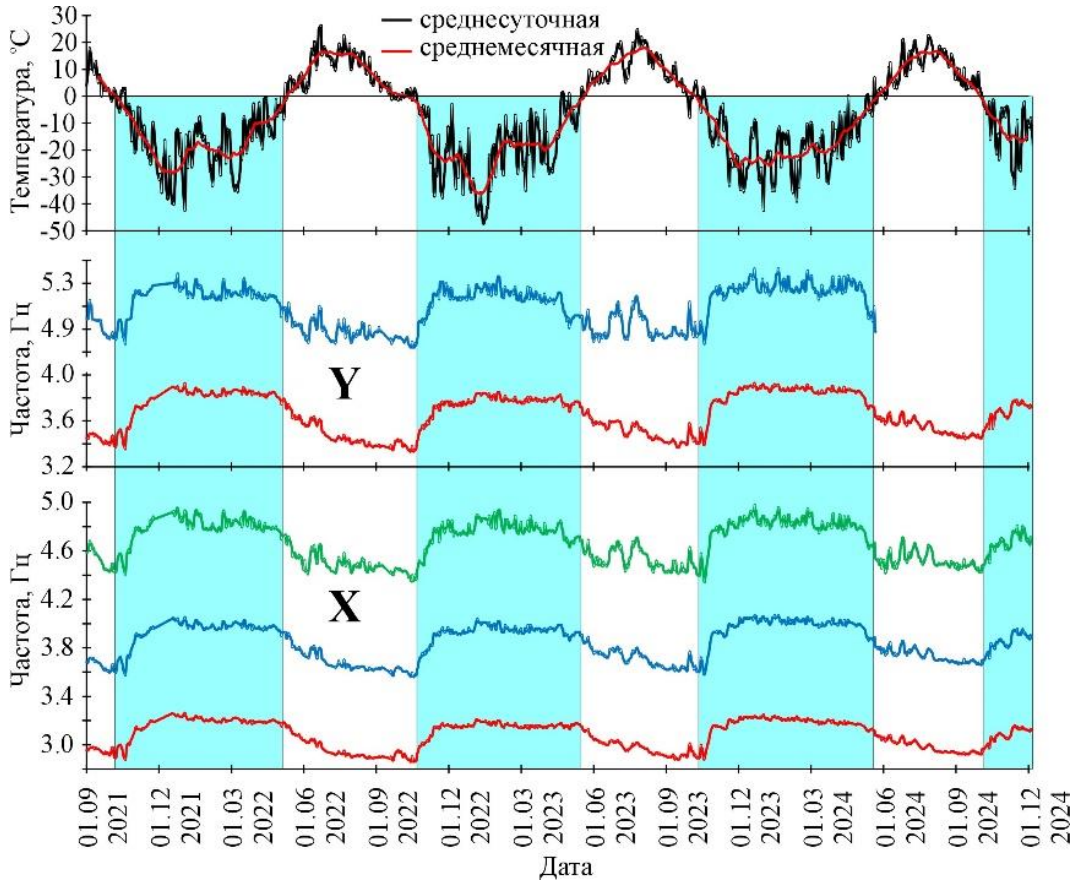


Рисунок 4.5 – Изменения среднесуточных значений температур и частот собственных колебаний здания (по компонентам X и Y) во времени в период с 01.09.2021 г. по 01.12.2024 г.

Анализ сезонных изменений собственных частот здания выявил сложные частотно-температурные зависимости. По периодам промерзания и оттаивания грунта судить о каких-либо изменениях частот с течением времени довольно трудно. Однако существуют сезонные периоды, когда частоты имеют довольно устойчивый характер: в зимнее время, после полного промерзания грунта в основании здания; и в летне-осеннее время, после полного оттаивания грунта.

В инженерной динамике сооружений частоты низших мод собственных колебаний являются стабильными параметрами, однозначно определяемыми характеристиками конструкции. В идеализированной модели, при отсутствии повреждений, эти частоты должны сохранять постоянство. Однако реальные данные мониторинга зафиксировали изменения значений частот (рисунок 4.6) при сравнении периодов устойчивости различных зимних и летних сезонов. Отчетливо наблюдается понижение собственных частот здания (обозначено красными стрелками), а затем рост из года в год (обозначено голубыми стрелками). Такая динамика свидетельствует о снижении жесткости конструкции сооружения, а затем о ее увеличении.

Результаты сопоставления частот на текущую дату, по сравнению с такими же датами предыдущего года (рисунок 4.7), говорят о происходящих изменениях технического состояния здания. Так, в период с августа 2022 г. по апрель 2023 г. отмечалось понижение значений частот (отрицательные значения на графике), что свидетельствует о снижении жесткости конструкции сооружения, предположительно из-за деградации многолетнемерзлых пород под фундаментом здания. Начиная с мая 2023 г., отмечается возрастание частот (положительные значения на графике), что связано с увеличением жесткости конструкции здания, которое, наиболее вероятно, произошло в результате проведения строительных работ по укреплению фундамента или ремонтных работ на здании.

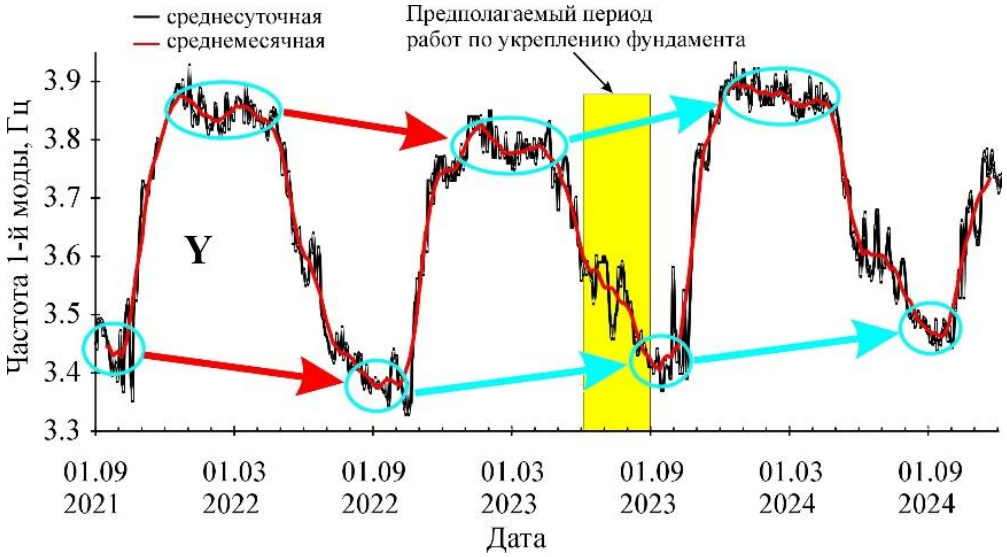


Рисунок 4.6 – Пример изменения значений частоты первой моды собственных колебаний здания (Y-компоненты) в периоды устойчивости

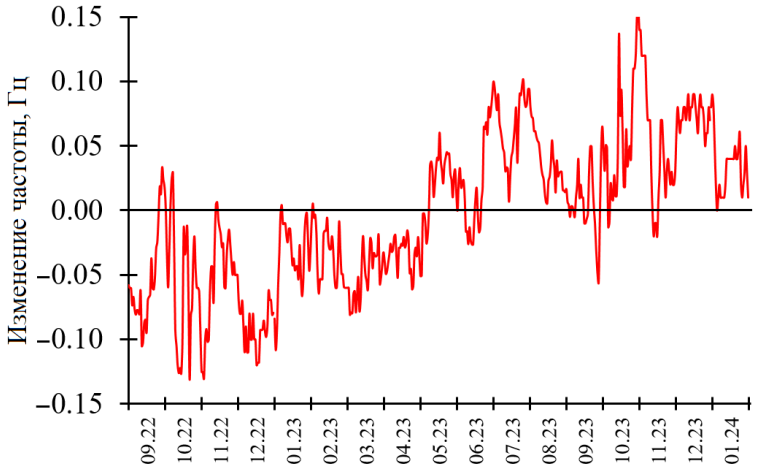


Рисунок 4.7 – Пример изменения частоты первой моды (X-компоненты) собственных колебаний здания по сравнению с предыдущим годом

Наблюдаемое в зимний сезон 2024-2025 гг. снижение значений собственных частот относительно аналогичного периода 2023-2024 гг. было интерпретировано как результат влияния климатических условий, а не изменения структурной целостности. Аномально мягкие температурные условия не способствовали промерзанию грунта, которое привело бы к повышению жесткости основания и, соответственно, росту частот колебаний. Поскольку мониторинг здания был завершен до наступления устойчивых отрицательных температур, полученные данные конца 2024 г. (рисунок 4.6) отражают переходный процесс, а не стабильное зимнее состояние. В связи с этим, указанный блок данных был признан нерепрезентативным для сравнительного анализа долгосрочной динамики и был исключен из общего анализа.

Указанное изменение частот собственных колебаний, отражающее увеличение жесткости конструкции здания, отчетливо прослеживается и на трехгодичной зависимости частот от среднесуточной температуры воздуха (рисунок 4.8). Несмотря на различие формы частотно-температурных зависимостей в диапазонах выше и ниже 0 °С, обе области демонстрируют согласованное повышение частот в зимние периоды после выполнения предполагаемых работ по усилению фундамента или ремонтных работ на здании. На графике это проявляется в систематическом смещении зимних регрессионных линий (2023/24 гг.) вверх относительно зависимостей предыдущих лет, тогда как летние точки за те же периоды группируются при более высоких значениях частоты по сравнению с предыдущими сезонами.

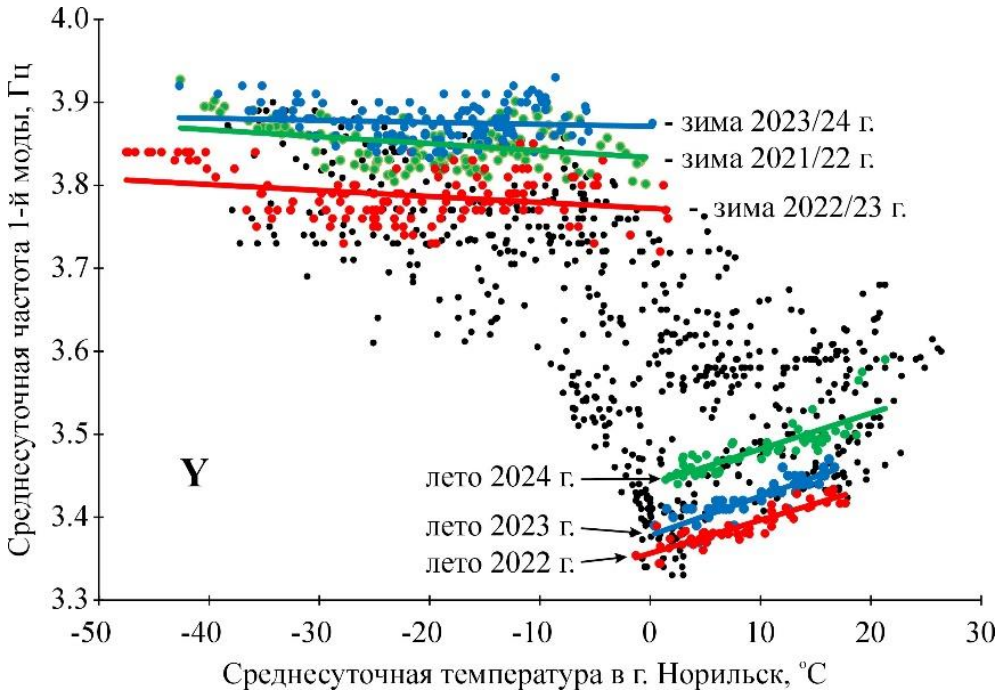


Рисунок 4.8 – Пример трехгодичной зависимости частоты первой моды собственных колебаний здания (Y-компоненты) при регистрации с 01.09.2021 г. по 01.12.2024 г.

Такое поведение свидетельствует о возможном долгосрочном изменении жесткостных характеристик системы здание–свайный фундамент–мерзлый грунт. В зимний период уплотнение и промерзание грунта приводят к стабилизации частот на высоком уровне, однако различие наклонов регрессионных линий для разных лет указывает на возможное изменение чувствительности частот к температурным колебаниям. В теплые сезоны также наблюдается повышение минимальных частот, что может отражать улучшение условий контакта свай с грунтом или перераспределение нагрузок после инженерного вмешательства. Совокупный анализ данных подтверждает, что мониторинг частотно-температурных зависимостей является эффективным инструментом для выявления долговременных изменений в состоянии сооружений со свайно-мерзлотными основаниями.

Завершен непрерывный трехгодовой (2021-2024 гг.) мониторинг микросейсмических колебаний аварийного четырехэтажного здания свайного типа, находящегося на многолетнемерзлых грунтах (г. Норильск). Анализ изменений частот собственных колебаний здания выявил, что значения частот (в периоды устойчивости) двух первых видимых мод собственных колебаний, начиная с 2023 г., ежегодно растут относительно аналогичных периодов предыдущего года. Такое характерное повышение частот отмечается, начиная с весны-лета 2023 г., что связано с увеличением жесткости конструкции здания, которое, наиболее вероятно, произошло в результате проведения строительных работ по укреплению фундамента или ремонтных работ на здании.

4.2 Способ контроля целостности объектов железнодорожной инфраструктуры методом инженерно-сейсмического мониторинга

Сложившаяся ситуация такова, что замена всех железнодорожных опор с высоким сроком эксплуатации, является дорогостоящим и нецелесообразным. Поэтому, на сегодняшний день, замена производится выборочно, с учетом оценки опор по степени дефектности. Для этого используют традиционные методы обследования контроля их целостности, включающие визуальные, акустические, радиоволновые, электрохимические способы диагностики и прочие [16]-[18]. Вышеупомянутые методы, как правило, по отдельности имеют существенные минусы (дороговизна оборудования, низкая точность, трудоемкие, влияние погодных условий на результат и т.д.) и требуют комплексного использования. Поэтому разработка новых методов обследования и мониторинга целостности состояния железнодорожных опор является актуальной задачей.

На сегодняшний день, в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН разрабатываются методы обследования и мониторинга физического состояния инженерных конструкций, позволяющие определять

значения их собственных частот, используя записи непрерывно регистрирующей сейсмостанции и, в случае обнаружения значительных отклонений их от эталонных значений, делать выводы о существующих деформациях [19],[20]. Данная работа основана на исследовании, проведенном на объектах железнодорожной инфраструктуры г. Новосибирск.

Основная задача исследования – разработка способа оценки технического состояния железнодорожных конструкций методом неразрушающего инженерно-сейсмического мониторинга.

Исследуемые объекты – элементы контактной сети, состоящие из железнобетонных опор, поддерживающих устройств (консоль), изоляторов и проводов контактной сети (контактный провод, несущий трос, усиливающий провод и пр.).

Обследование элементов контактной сети происходило в 2 этапа, на первом этапе были обследованы 2 опорных столба, подключенных в линию контакной сети (рисунок 4.9). Для определения динамических характеристик данных конструкций, вдоль каждого из исследуемых железнодорожных столбов было установлено по 3 точки измерения, равноудаленных друг от друга (порядка 1.2 м). Расположение сейсмоприемников X - поперек столба, вдоль ж/д путей, Y - поперек ж/д путей, Z - вдоль столба. В качестве источника возбуждения собственных колебаний конструкций использованы ударные воздействия малым грузом.



Рисунок 4.9 – Расстановка сейсмической аппаратуры на железнодорожных опорах, включенных в контакную сеть

На втором этапе было проведено обследование железнодорожных столбов разной степени деформации, отключенных от контакной сети (целая, со скрытой деформацией и полностью выведенная из эксплуатации опора) (рисунок 4.10). Для определения динамических характеристик данных конструкций, вдоль каждого из исследуемых

железнодорожных столбов было установлено 10 точек измерения, равноудаленных друг от друга (порядка 1.2 м). Расположение сейсмоприемников X - поперек столба, Y - вдоль, Z - поперек столба. В качестве источника возбуждения собственных колебаний конструкций использованы ударные воздействия малым грузом.

Каждый пункт наблюдения состоит из автономного сейсмического регистратора («Байкал-7») [21] и трехкомпонентного сейсмоприемника (датчик скорости GD-4.5, GD-10) [22].



Рисунок 4.10 – Расстановка сейсмической аппаратуры на железнодорожных опорах, включенных в контактную сеть

Для обработки зарегистрированных данных использован метод построения спектрограмм, разработанный в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Данный метод позволяет преобразовывать запись сейсмических трасс в спектрограммы, которые позволяют определить, как меняется амплитудно-частотный состав записи с течением времени, и выделять из всей записи сигнал от источника определенной частоты (пример спектрограммы изображен на рисунке 4.10). Для получения количественных оценок строятся графики изменения амплитуд колебаний на фиксированных частотах по формуле:

$$A(\omega, t) = \frac{1}{T}\left|\int_{t-T/2}^{t+T/2} f(\tau) e^{-i\omega\tau}\, d\tau\right|, \qquad (4.1)$$

где f(τ) – зарегистрированный сейсмический сигнал, ω – частота, для которой строится график, t – текущее время, T – интервал времени (окно), в котором определяется амплитуда (в нашем случае окно T = 100 с, шаг окна 50 с).

На первоначальном этапе обработки данных был определен набор частот, связанных с колебаниями железнодорожной опоры, включенной в контактную сеть. На рисунке 4.11 представлены примеры спектрограммы и амплитудных спектров X-компонент записей (вдоль ж/д путей), полученных при ударных воздействиях по опоре. На спектрограмме хорошо видны амплитудные максимумы, связанные с собственными колебаниями системы опоры, поддерживающего устройства, изоляторов и проводов контактной сети.

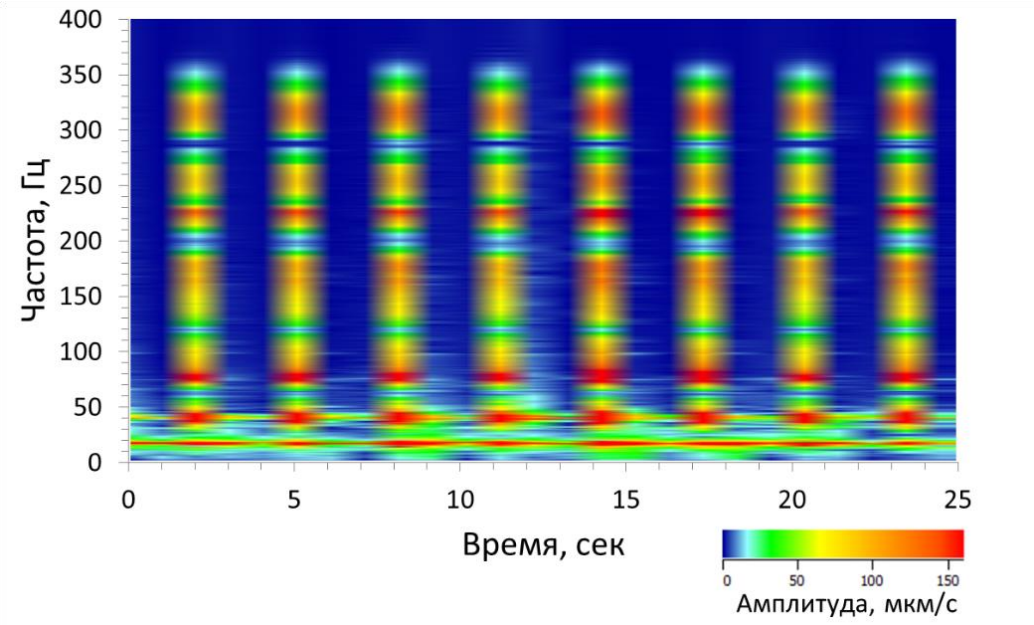


Рисунок 4.11 - Спектрограмма сейсмической записи, полученной при ударных воздействиях на железнодорожную опору, включенную в контактную сеть

На спектре (рисунок 4.12) виден набор низкодобротных колебаний на частотах 16; 39; 77; 99; 177; 218; 255 и 317 Гц. Картина спектра собственных колебаний довольно сложная, поскольку включает в себя суперпозицию колебаний различных элементов. Это накладывает необходимость проведения исследований, включающих в себя обследование конструкционных элементов (опор, консолей и т.д) как по отдельности, так и по различному типу деформаций.

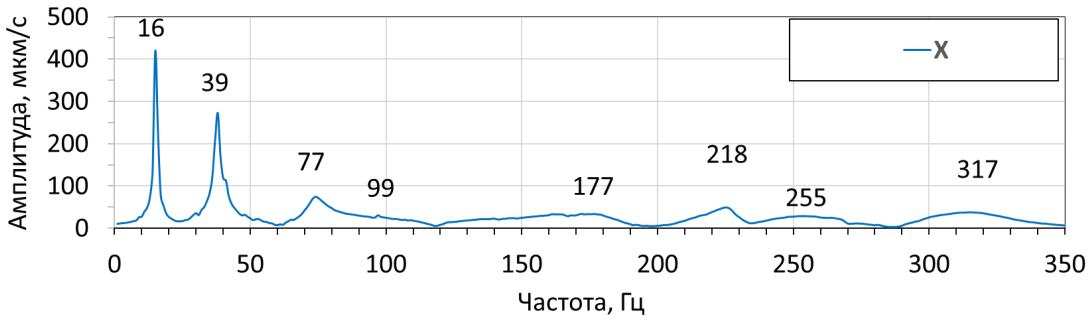


Рисунок 4.12 - Спектр сейсмической записи поперечных колебаний железнодорожной опоры, включенной в контактную сеть

В данной работе сотрудниками РЖД была предоставлена возможность сравнить состояние только железнодорожных опор с различным типом дефекта (целая, скрытая деформация, и полный износ опоры) (рисунок 4.10).

В грубом приближении железнодорожную опору можно представить как трубу, закрытую с одного конца. Тогда для опоры длинной порядка 11 м, скорости распространения волны в бетоне порядка (в зависимости от его состояния) 2500 - 4500 м/с,

первая мода собственных колебаний, согласно формуле 4.2, может находится в диапазоне от 56 до 102 Гц

$$f_n = \frac{v}{4\lambda} n, \tag{4.2}$$

где n-номер моды, f_n- собаственная частота, v – скорость распространения волны, λ- длина волны.

Соответственно, можно сделать вывод, что колебания с частотами 16 и 39 Гц относятся к элементам контактной сети (консоль провода и т.д.), а колебания, характеризующие колебания опор, находятся в более высокочастотной полосе.

На рисунке 4.13 представлены спектры сейсмических записей, полученных при ударных воздействиях на железнодорожных опорах с различным типом дефекта. Из рисунка хорошо видно, что, по мере развитии дефекта в конструкции, изменяется амплитудно-частный состав спектров зарегистрированных колебаний. На целом столбе хорошо выделяются основная мода колебаний (95 Гц) и кратные ей. При скрытой деформации столба изменяется значение частоты колебаний основной моды, и появляются колебания с частотами, близкими к модам собственных колебаний, вероятно это связано с отражением волн от границы дефекта. При рассмотрении спектров колебаний полностью дефектного столба, видно полное изменение в амплитудно-частотном составе записи. Данное поведение может является основным критерием для оценки целостности конструкции при введении его в эксплуатацию.

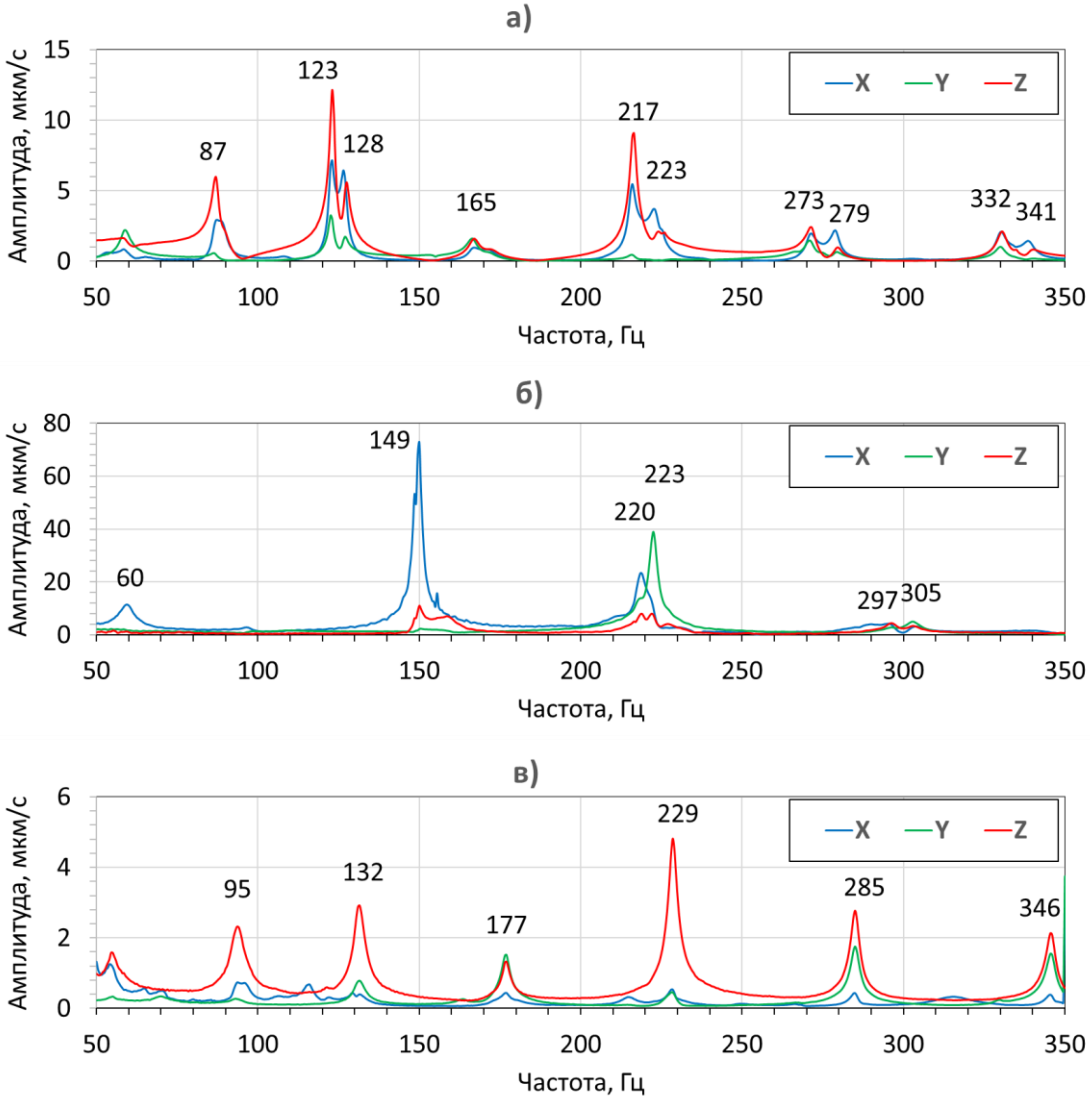


Рисунок 4.13 – Усредненные амплитудные спектры зарегистрированных колебаний, полученных с железобетонных опор. (а) - опора со скрытой деформацией, (б) - опора с дефектом структуры и износом бетона, (в) - целая опора

Результат, полученный при обследовании различного типа опор, показывает, что, при накоплении достаточной экспериментальной базы, возможно создание технологии своевременного фиксирования изменений динамических характеристик конструкций элементов контактной сети, посредством неразрушающего инженерно-сейсмологического мониторинга. Для этого необходимо: провести более детальное обследование различных элементов контактной сети и сравнить динамические характеристики целых и деформированных элементов. На основании этого определить критические значения собственных частот, свидетельствующие о формировании опасных деформаций.

В результате исследования разработана технология, позволяющая по данным значений собственных частот колебаний железнодорожных конструкций производить оценку их технического состояния во время их эксплуатации. Определено, что, по мере развитии дефекта в конструкции железнодорожных столбов, изменяется амплитудно-

частный состав спектров зарегистрированных колебаний. Показано, что, по мере развития дефекта на железнодорожном столбе, изменяется значение частоты колебаний основной и кратных ей мод, появляются колебания с частотами, отличными, но близкими по значению к модам собственных колебаний. При рассмотрении спектров колебаний полностью дефектного столба, наблюдается полное изменение амплитудно-частотного состава записи, связанного с изменением его химико-физических свойств конструкции.

Полученные экспериментальные данные о собственных колебаниях инженерных конструкций являются основой для верификации моделей, использующихся для расчета их сейсмостойкости, и являются важной информацией для систем инженерно-сейсмологического мониторинга.

4.3 Разработка способа локализации и дистанционного контроля техногенных источников сейсмического сигнала

Работа направлена на развитие методов обнаружения и локализации техногенных источников (таких как транспортные средства, промышленное оборудование, подрывные работы) с использованием сейсмических методов для решения ключевых задач в области безопасности, мониторинга и оптимизации промышленной деятельности.

Сейсмические методы предоставляют возможность дистанционного, скрытного и пассивного контроля обширных территорий, позволяя выявлять и классифицировать активность, часто недоступную для других средств наблюдения. В сфере охраны периметров критически важных объектов (промышленных, военных и др.) данная технология обеспечивает раннее предупреждение о несанкционированном приближении техники. На производстве ее применение позволяет выявлять аномальные вибрации, предшествующие выходу оборудования из строя, а также точно локализовывать источники взрывов в горнодобывающей отрасли или в условиях боевых действий.

Таким образом, совершенствование алгоритмов автоматического детектирования и точной локации источников сейсмических сигналов напрямую способствует повышению уровня безопасности, эффективности промышленных процессов и минимизации техногенных рисков. Для достижения этих целей в рамках исследования разрабатывается специализированная информационно-вычислительная система [23], предназначенная для выявления активных источников сигнала по данным мониторинга с сети удаленных сейсмических станций.

Фактический материал, методы исследования, программное обеспечение

В период с 29 по 2 октября 2025 г. на полигоне «Кольцово», рп. Кольцово, выполнялись эксперименты для дальнейшей оценки эксплуатационных характеристик

сейсмической сети мониторинга по обнаружению и локализации техногенных источников. В качестве объектов исследования были выбраны техногенные воздействия на среду от различных типов стрелковых огневых средств, беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), транспортных средств. Для регистрации сигналов от вышеупомянутых источников на полигоне была реализована сеть сейсмического мониторинга. Сведения об аппаратуре, установленной для регистрации, координаты пунктов регистрации приведены на рисунках 4.14-4.16 и в таблице 4.1.

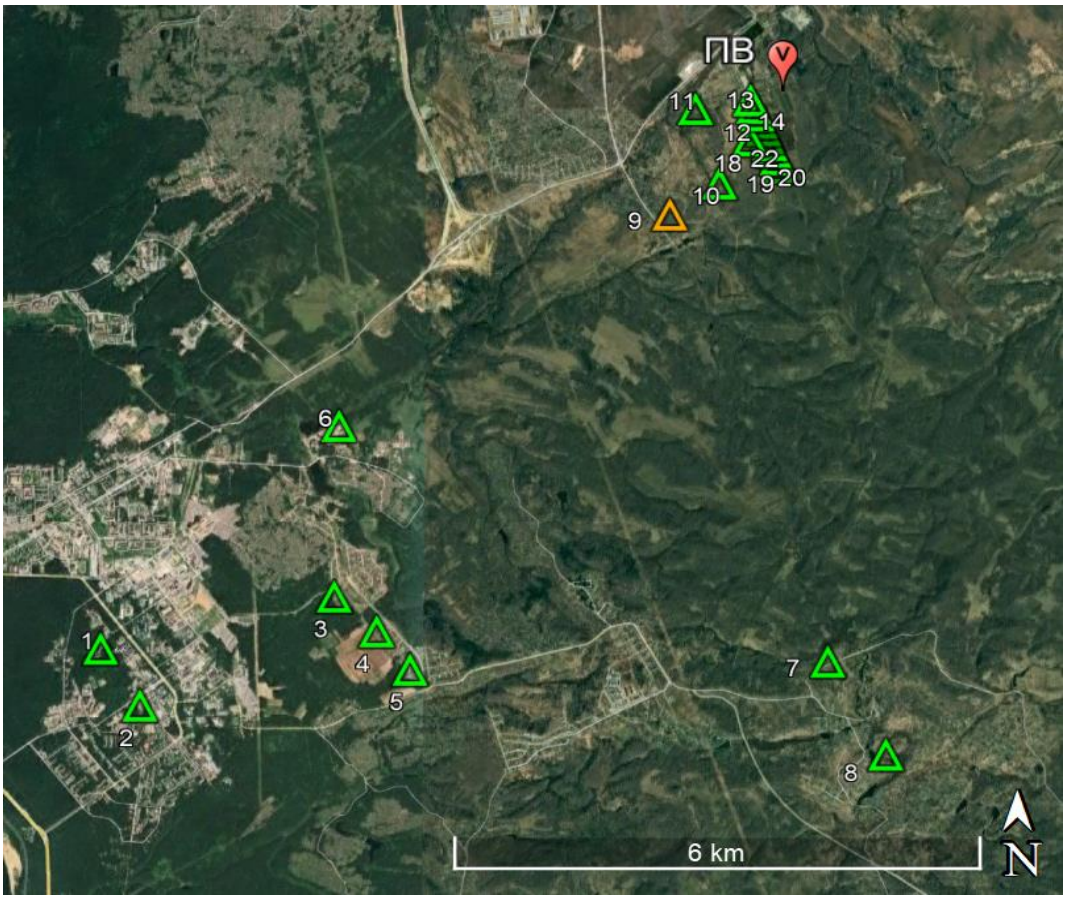


Рисунок 4.14 – Схема сейсмических наблюдений

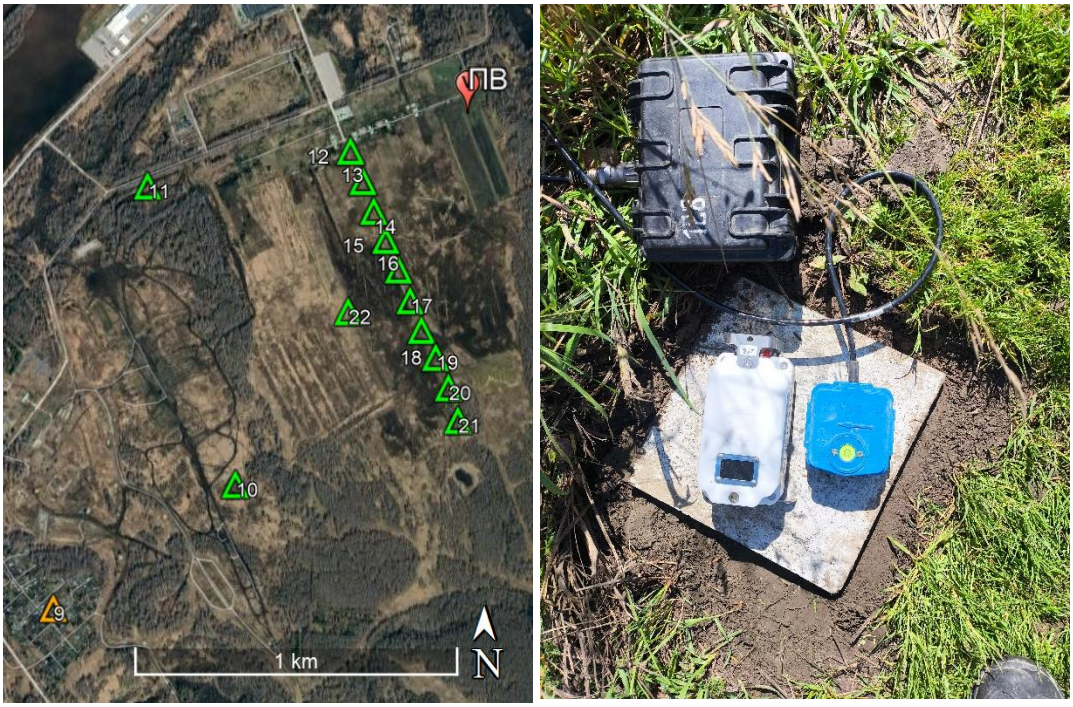


Рисунок 4.15 – Схема сейсмических наблюдений полигоне «Кольцово», рп. Кольцово (слева), и пример установки сейсморегистрирующей аппаратуры (справа)

Сеть сейсмического мониторинга, состоит из следующих компонент:

– Трехкомпонентные полевые станции сейсмического мониторинга на базе регистраторов серии «Байкал» (разработка ФИЦ ЕГС РАН), DR-24 (ИНГГ СО РАН) и сейсмоприемников типа GS-20DX, GS-One, GD-10, GD-4.5 [21],[22],[24]. Ориентация датчиков X – направлена на север, Y – запад, Z – вертикально. Частота дискретизации аналого-цифрового преобразователя регистраторов составляет до 2 кГц, что означает по теореме Котельникова (Найквиста-Шеннона) максимальную частоту регистрации сейсмических и акустических данных до 1000 Гц.

– Система передачи данных мониторинга в реальном времени [25];

– Обрабатывающий модуль, состоящий из сервера и 2-х компьютеров, расположенных в лабораторных условиях помещений СЕФ ФИЦ ЕГС РАН.

Обработка данных производится в ручном режиме с использованием программного обеспечения «SpectrumSeism» [15], разработанного в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН. Программа позволяет создавать 2D-спектрограммы, а также спектры на указанной трассе. Поддерживаются следующие форматы данных: miniSeed, vibr2, «Роса» и «Байкал». Благодаря использованию современных алгоритмов, программа позволяет обрабатывать большие объемы данных, реализована возможность быстрого анализа зависимости амплитуды частоты от времени, с любой заданной точностью.

Таблица 4.1– Сведения о пунктах сейсмических наблюдений

№	Сейсмическая станция			Дата открытия [-закрытия], переноса	Координаты			Vs30, м/с	Способ установки датчика
	Название Name	Тип			φ, °N	λ, °E	h, м		
		Рег.	Датчик						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	128	Байк-7	GS-20DX	03.09.2025	54,8514	83,0981	168		Приямок
2	SEF	Байк-8	GD-4.5	03.09.2025	54,8451	83,1050	170		Постамент (2 этаж)
3	KZBS	Байк-8	GD-4.5	03.09.2025	54,8573	83,1395	208		Постамент (2 этаж)
4	60	Байк-7	GS-20DX	03.09.2025	54,8534	83,1470	205		Приямок
5	15	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,8491	83,1529	203		Приямок
6	IMVG	Байк-8	GS-20DX	03.09.2025	54,8764	83,1403	168		Приямок
7	225	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,8500	83,2270	210		Приямок
8	KLCH	Байк-8	GD-10	03.09.2025	54,8396	83,2373	197		Свая
9	PLGN	Байк-8	GS-20DX	03.09.2025	54,9001	83,1990	204		Приямок
10	46	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,9035	83,2078	200		Приямок
11	222	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,9119	83,2035	195		Приямок
12	240	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9128	83,2133	185		Приямок
13	232	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9120	83,2139	185		Приямок
14	120	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9111	83,2145	186		Приямок
15	115	Байк-7	GS-20DX*	03.09.2025	54,9103	83,2150	186		Приямок
16	117	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9095	83,2156	187		Приямок
17	93	Байк-7	GS-20DX*	03.09.2025	54,9086	83,2162	185		Приямок
18	79	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9078	83,2168	186		Приямок
19	67	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9071	83,2174	185		Приямок
20	31	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9062	83,2181	187		Приямок
21	27	Байк-7	GD-4.5*	03.09.2025	54,9053	83,2185	185		Приямок
22	221	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,9083	83,2132	189		Приямок
ПВ	208	Dr-24	GS-One	03.09.2025	54,9139	83,2190	180		Приямок

* Пункты сейсмических наблюдений № 12-21 также оснащены высокочувствительными микрофонами, подключенными к 4-му каналу регистраторов.



Рисунок 4.16 – Сейсморегистрирующая аппаратура

Перед проведением измерений, проводилось тестирование аппаратуры на идентичность. Для этого все приборы были помещены в одну точку и проведена одновременная регистрация микросейсмических колебаний в течение 10 минут (рисунок 4.16). Данная процедура необходима как для проверки работоспособности измерительных каналов, так и для введения поправочных коэффициентов к характеристикам датчиков, если таковые обнаружатся. Результаты теста показали, что различия в амплитудах сигналов, записанных разными регистраторами, составили, в среднем, 5% (но не более 10%), что лежит в пределах погрешностей приборов. Соответствующие поправки были вычислены и учтены в обработке. Следует отметить, что для выравнивания амплитудно-частотных характеристик к показаниям применялась функция деконволюции [1].

Характеристики источников и предварительные результаты:

– Стрелковое оружие

Для каждого из типов стрелкового оружия (тяжелый пулемет, пулемет, автомат) последовательно производились по 5-10 одиночных выстрелов через ~10 с вдоль линии расстановки ССМ.

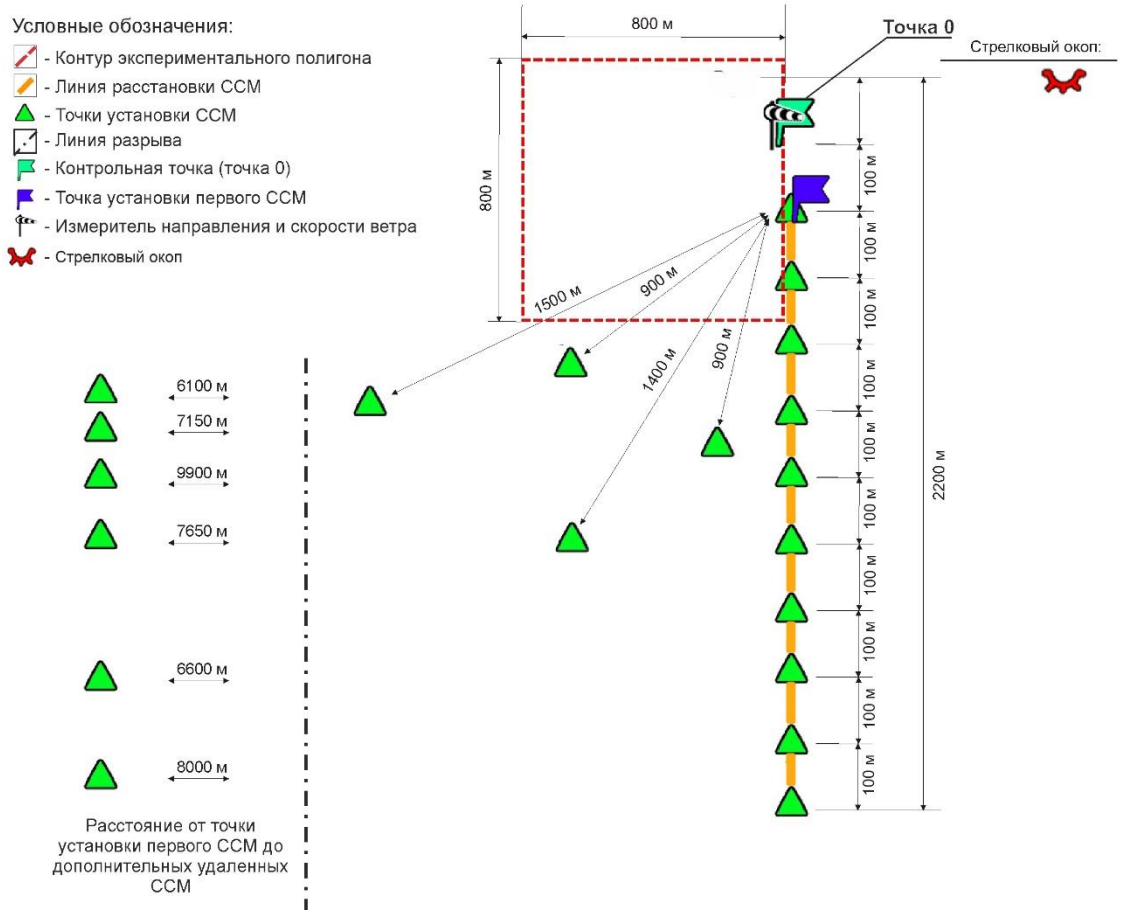


Рисунок 4.17 – Схема задания стрелкового подразделения

На рисунке 4.17 представлен пример спектрограммы и трасс сейсмических записей установленных вблизи источников сейсмических сигналов. На рисунке хорошо видны выстрелы каждого из типов стрелкового оружия 9 - для тяжелого, по 8 - для среднего и легкого. Выстрелы осуществлялись с паузой ~ 10 сек. В результате анализа сейсмических данных дальность обнаружения данных сигналов составила 1360 м для тяжелого, 726 м среднего 608 м дальнего.

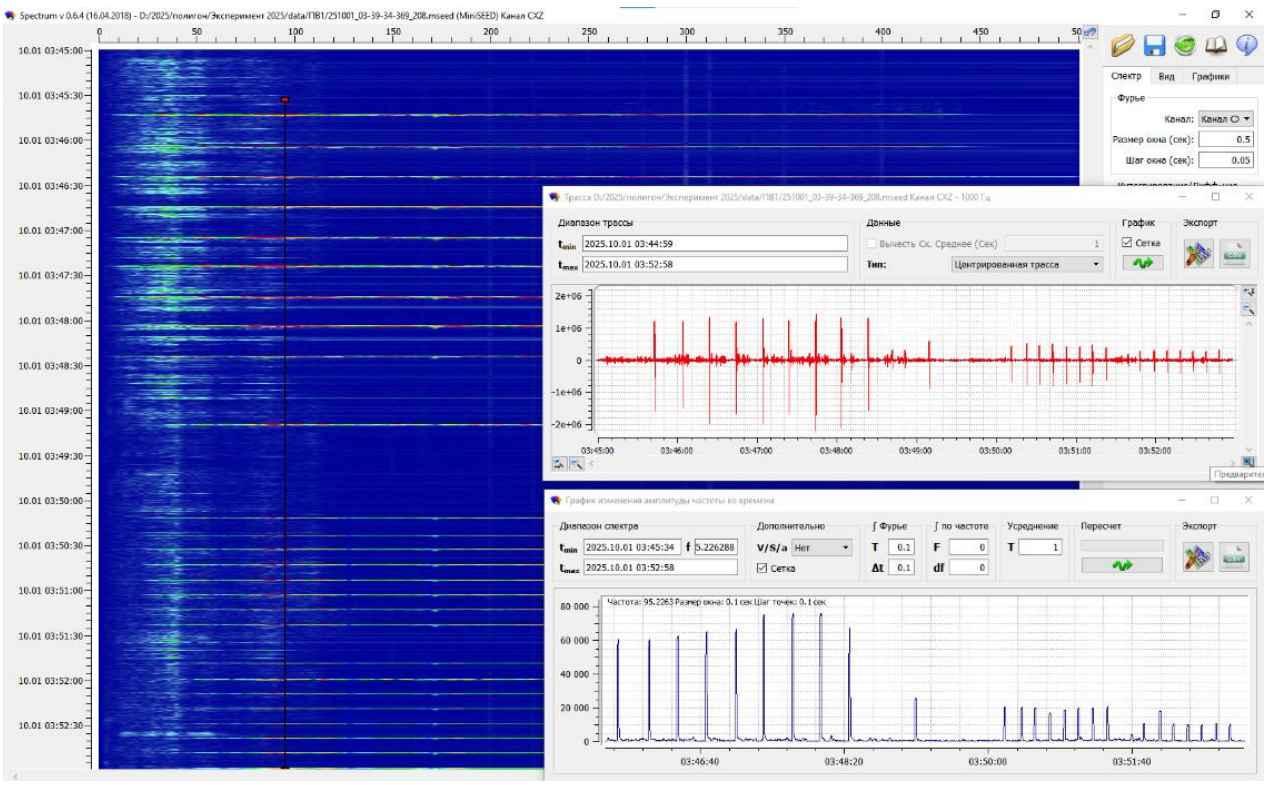


Рисунок 4.18 – Спектрограмма и трассы сейсмических записей установленных вблизи источника сейсмических сигналов, построенных в программе SpectrumSeism

– Беспилотные летательные аппараты (далее БПЛА)

В течение 30 минут осуществлялось полетное задание двумя типами БПЛА малым и грузовым, с подвешенным на него грузом 3 кг - три круга над полигоном вдоль расставленных станций сейсмического мониторинга (ССМ) (см. схему 4.19), первый круг возвращение в исходную тоску в 50 метрах от станций, второй круг вдоль станций и возвращение в 100 метрах от станций.

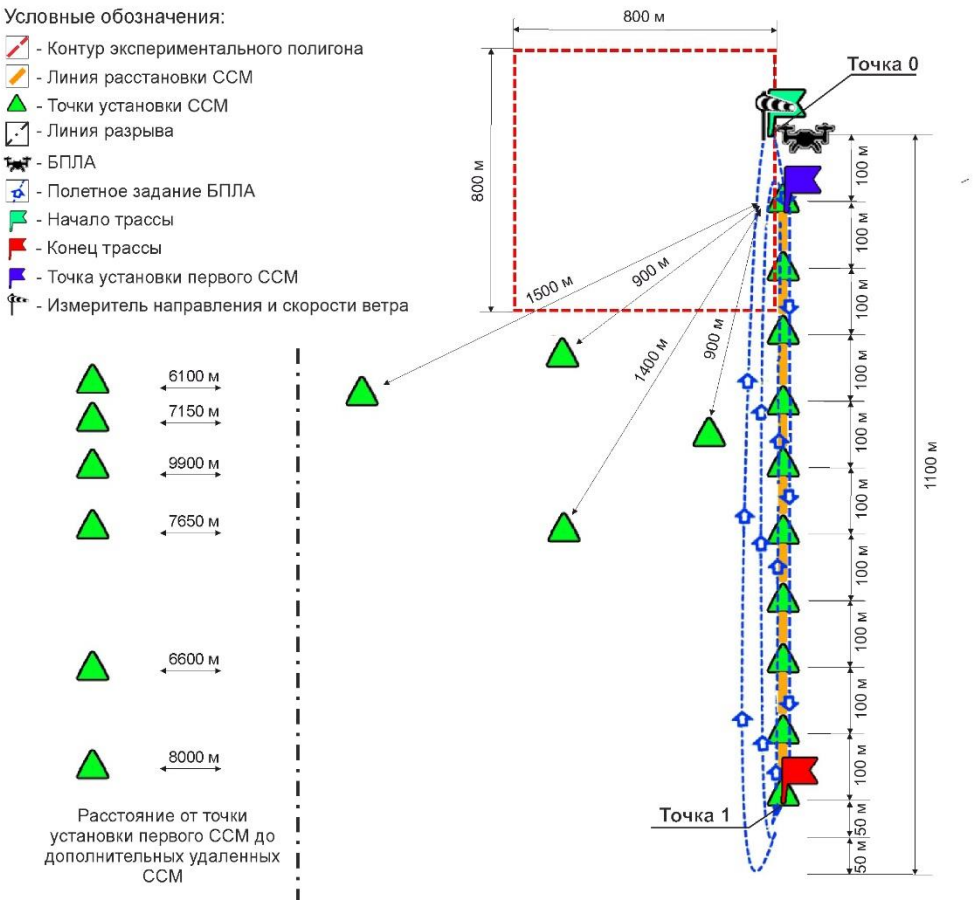


Рисунок 4.19 – Схема полетное задание БПЛА

На рисунке 4.20 представлен пример спектрограмм записей микрофона,

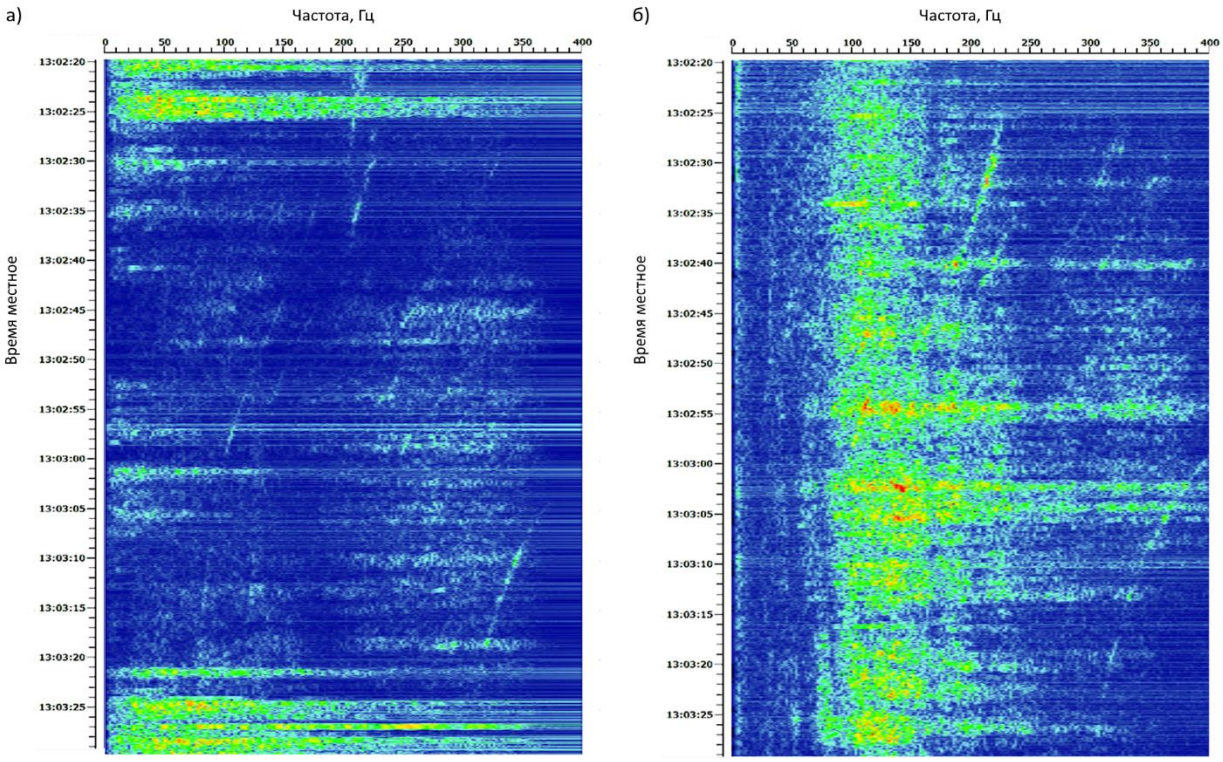


Рисунок 4.20 – Спектрограмма записи с датчика, установленного вблизи источника сейсмических сигналов (а) в п.н.12 и на удалении 1100 м в п.н.11 (б)

установленного вблизи источника сейсмических сигналов и сейсмического датчика, установленного на удалении 1100 м. На рисунке хорошо видны колебания с изменяющейся частотой от 100 до 250 Гц, данная частота является оборотной частотой двигателей БПЛА. Показано, что высокочувствительные сейсмические датчики способны регистрировать удаленный БПЛА на расстояния более чем 1100 м.

– Транспортные средства

Последовательно заводились различные типы транспортных средств (легкогабаритные – 2 тонны и тяжело габаритные – 13 тонн), работа на разных режимах: 5 минут на холостых оборотах, 5 минут на 1000 оборотах в минуту, после чего транспорт осуществлял перемещение по кольцевой трассе полигона (~3000 м).

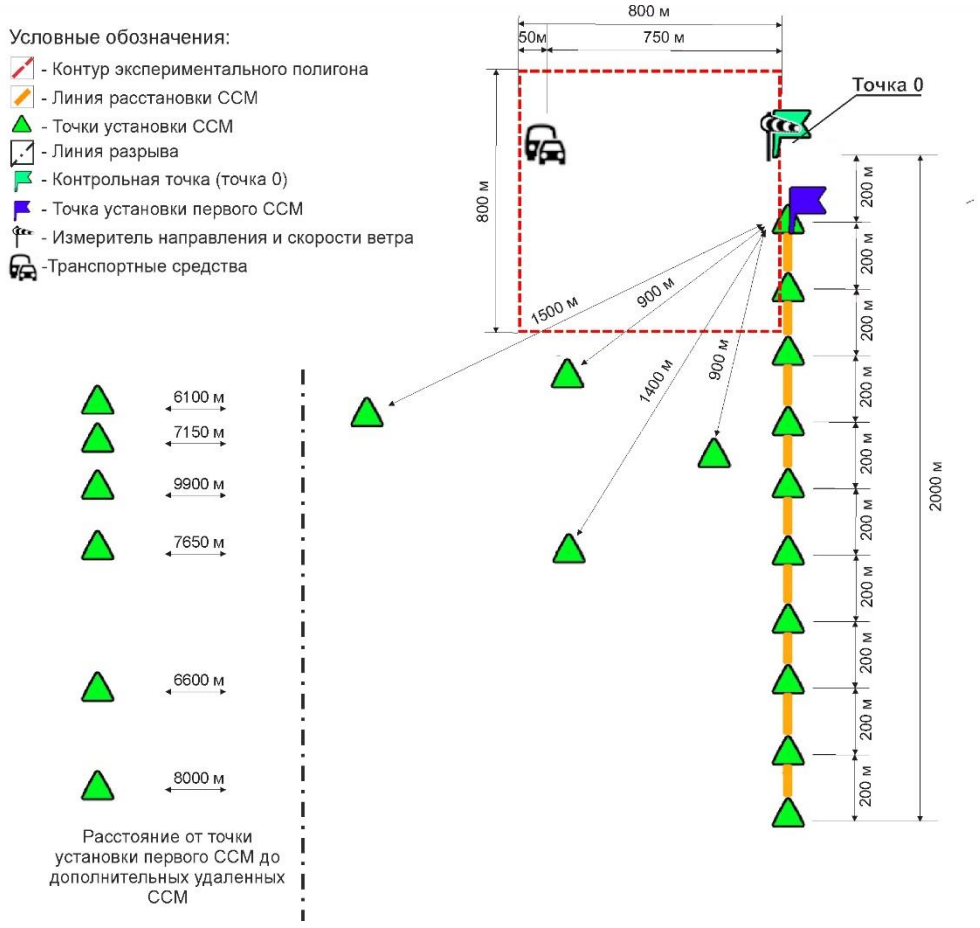


Рисунок 4.21 – Схема задания транспортных средств

На рисунке 4.22 представлен пример спектрограмм записей с сейсмического датчика, установленного на удалении 100 м от источника сигнала. На рисунке хорошо видны колебания с изменяющейся частотой порядка 16 - 17 Гц, данная частота является оборотной частотой двигателей транспортного средства и соответствует 960-1000 об/мин. В результате анализа зарегистрированных данных удалось выделить колебания транспортного средства на удалении до 600 м.

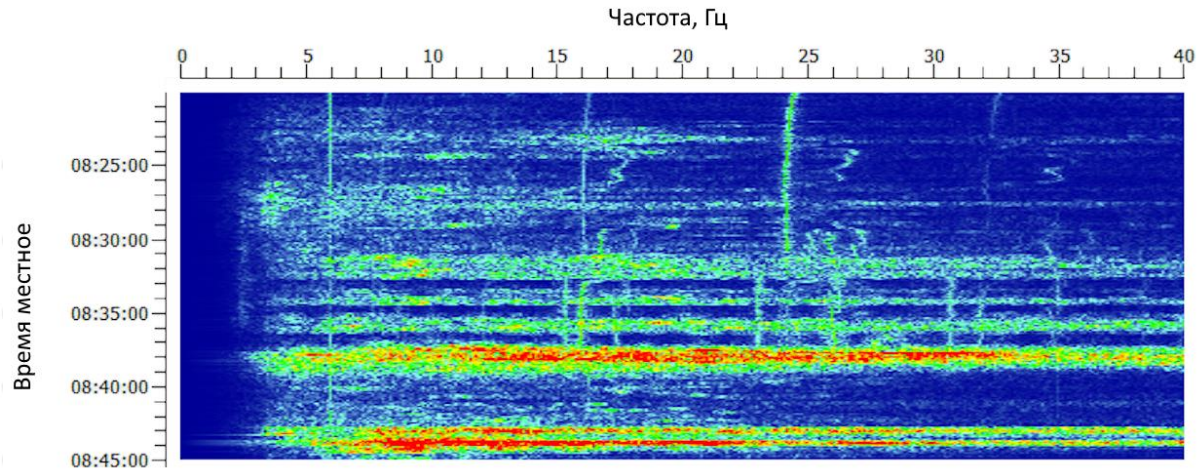


Рисунок 4.22 – Спектрограмма записи с датчика, установленного вблизи источника сейсмических сигналов

4.4 Возможность определения раскрытия трещины плотины Саяно-Шушенской ГЭС

Эксплуатация крупных гидротехнических сооружений, таких как плотины гидроэлектростанций, сопряжена с рисками возникновения структурных нарушений различной природы и масштаба. Традиционные методы диагностики состояния конструкций преимущественно основываются на визуальном осмотре квалифицированными специалистами и периодическом инструментальном обследовании отдельных элементов сооружения. Однако, подобные подходы обладают рядом существенных недостатков и ограничений. Во-первых, существует значительная вероятность того, что развивающиеся повреждения могут остаться незамеченными на ранних стадиях, особенно если они локализованы в труднодоступных зонах конструкции или представляют собой внутренние дефекты материала. Во-вторых, традиционные методы имеют принципиальные ограничения в аспекте выявления скрытых дефектов, таких как внутренние трещины в теле бетона, зоны деградации материала или нарушения контакта на границе плотина-основание. В-третьих, учитывая внушительные размеры современных гидротехнических конструкций и их сложную пространственную геометрию, полномасштабное детальное обследование может потребовать значительных временных затрат, финансовых ресурсов и привлечения большого количества специализированного персонала. В данном контексте особый интерес представляет метод диагностики, основанный на изучении динамических характеристик сооружения. Данный подход является перспективным с точки зрения технической реализуемости и экономически эффективным в долгосрочной перспективе [19]. Ключевое преимущество метода заключается в возможности дистанционной диагностики состояния объекта на основе информации, регистрируемой с помощью сейсмологических станций, которые могут быть

расположены на значительном удалении, достигающем нескольких километров от самой плотины [26].

Основная концепция заключается в том, что любые дефекты или повреждения в структуре конструкции неизбежно влияют на ее основные физико-механические характеристики, такие как общая и локальная жесткость, распределение массы. Эти изменения, в свою очередь, приводят к вариациям в значениях частот собственных колебаний исследуемого объекта.

Собственные колебания гидротехнических сооружений могут быть вызваны различными естественными факторами, включая микросейсмическую активность, ветровые нагрузки, а также техногенными источниками, такими как работа турбогенераторного оборудования и технологические процессы. Таким образом, для выявления структурных нарушений необходимо отслеживание вариаций этих частот для выделения значимых отклонений от их средних значений. Подобные аномальные отклонения могут служить индикатором развития структурных нарушений в объекте и являться основанием для проведения детального инженерного обследования.

Объектом текущего исследования является Саяно-Шушенская ГЭС, одна из крупнейших по установленной мощности гидроэлектростанция не только в России, но и в мире. Расположена она на реке Енисей, на границе Республики Хакасия и Красноярского края. Учитывая большую значимость этого сооружения для энергосистемы и потенциальные риски, связанные с нарушением его эксплуатации, обеспечение контроля его состояния становится важной задачей. Именно с этой целью в 2024 году, на расстоянии трех километров от плотины, была установлена трехкомпонентная сейсмологическая станция «Филиал». Датчики станции ориентированы на север (N), восток (E) и вертикально (Z).

По данным, полученным со станции «Филиал», построены среднесуточные усредненные амплитудные спектры колебаний по восточной (E) компоненте в частотном диапазоне 1-3 Гц за 2024 (рисунок 4.23) и 2025 год (рисунок 4.24). Выбор такого частотного интервала для анализа обусловлен наличием в нем наиболее интенсивных мод собственных колебаний плотины, а также существенным возрастанием уровня шумов и различных помех техногенного происхождения на более высоких частотах, что значительно снижает отношение сигнал/шум и делает эти частоты менее пригодными для надежной идентификации собственных мод колебаний. Полученные графические представления были сопоставлены с данными об изменении уровня воды в Саяно-Шушенском водохранилище (уровень верхнего бьефа, УВБ), который является одним из ключевых эксплуатационных параметров гидротехнических сооружений.

Представленные рисунки демонстрируют выраженную обратную корреляцию между уровнем наполнения водохранилища и частотами собственных колебаний плотины, сверху отмеченные цифрами, означающие моды колебаний плотины. Данные частоты, соответствуют максимумам усредненных спектров микросейсмических записей, которые демонстрируют тенденцию к снижению при наполнении водохранилища и увеличению при его сработке (снижению уровня воды). Такая закономерность может объясняться изменением массы объекта за счет присоединенной массы воды. На представленных рисунках также четко идентифицируются стационарные монохроматические (узкополосные) сигналы, которые не связаны с собственными модами колебаний плотины. Помеха на частоте 1.3 Гц, вероятно, связана с внешним техногенным источником и оборотная частота вращения турбогенератора ГЭС, составляющую 2.381 Гц.

На графиках усредненных спектров частоты третьей моды (приблизительно 1.6 Гц) и четвертой моды (приблизительно 2 Гц) колебаний плотины достаточно хорошо определяются по пикам в спектре и надежно прослеживаются во времени на протяжении всего периода наблюдений. Поэтому именно вариации этих двух мод были выбраны для детального анализа в рамках данного исследования.

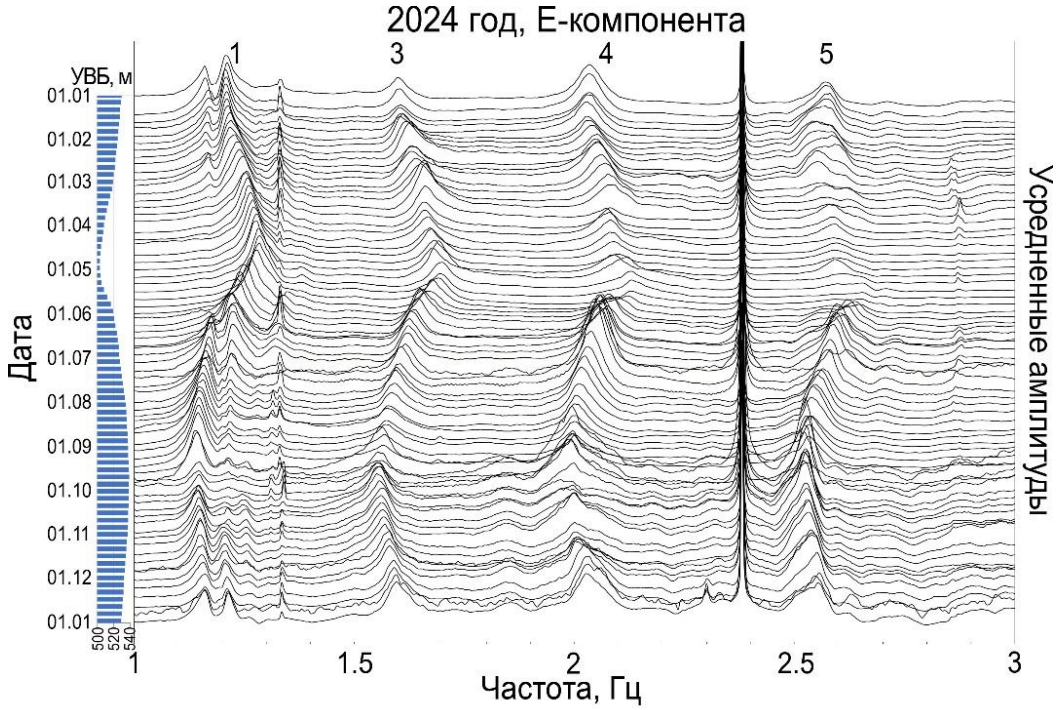


Рисунок 4.23 – Графики усредненных за 5 суток спектров со станции «Филиал» за 2024 г. Синим цветом нанесен уровень наполнения водохранилища СШ ГЭС (УВБ), сверху цифрами указаны моды колебаний

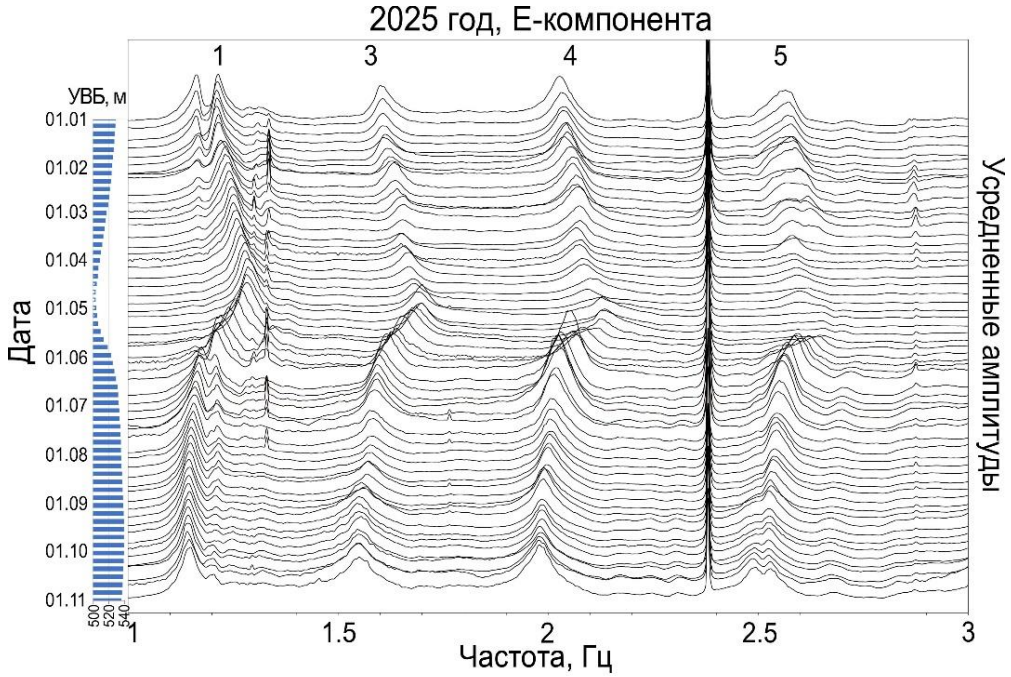


Рисунок 4.24 – Графики усредненных за 5 суток спектров со станции «Филиал» за 2025 г. Синим цветом нанесен уровень наполнения водохранилища СШ ГЭС (УВБ), сверху цифрами указаны моды колебаний

Для количественной оценки влияния различных факторов на динамические характеристики плотины были построены графики зависимости частот собственных колебаний от уровня наполнения водохранилища (УВБ) и температуры окружающей среды (рисунки 4.25-4.26). Анализ проводился отдельно для каждого года наблюдений (2024 и 2025), а также для каждой из исследуемых мод колебаний (3-я и 4-я). Для данных 2024 года дополнительно была построена первая производная функции наполнения водохранилища по времени, которая отражает скорость изменения гидростатической нагрузки на плотину.

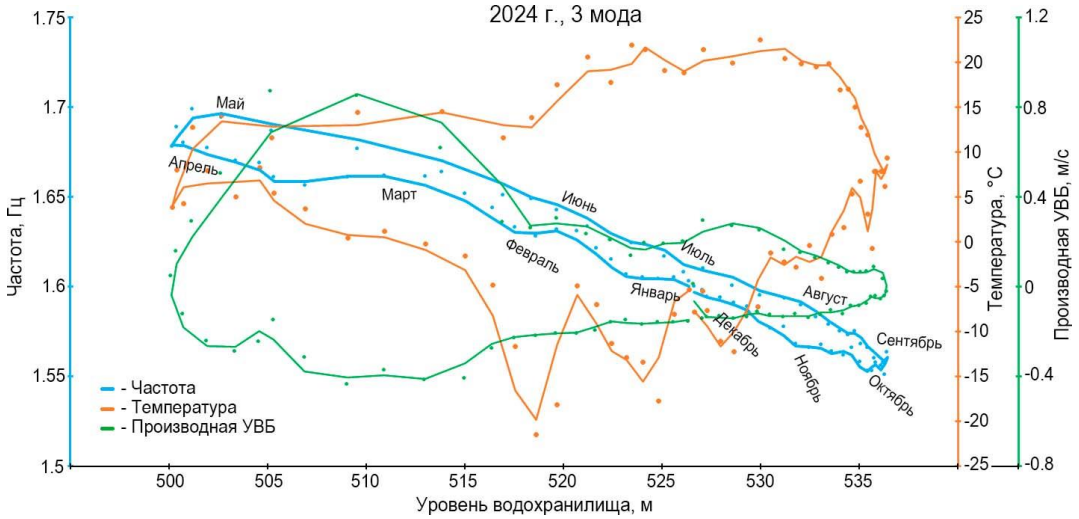


Рисунок 4.25 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ), температуры воздуха и первой производной уровня водохранилища, 2024 год, 3-я мода, E-компонента

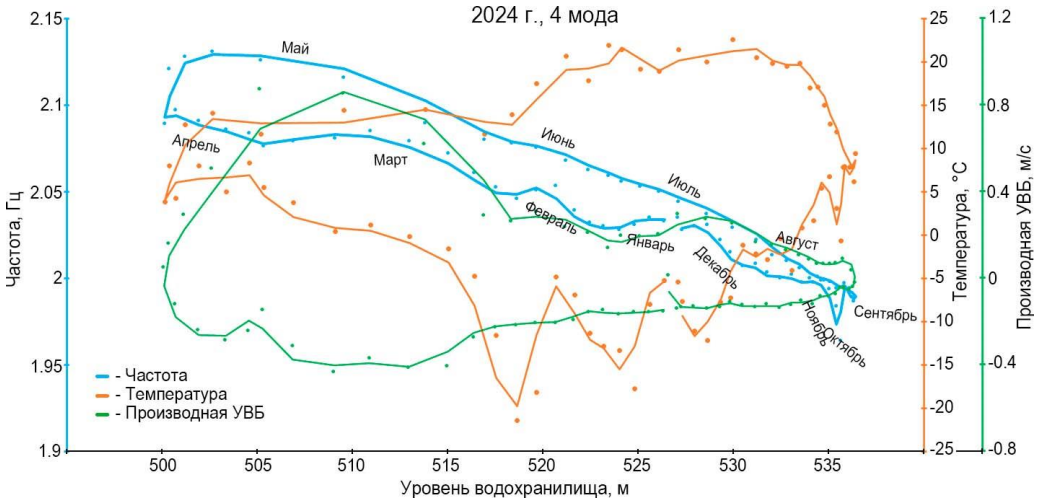


Рисунок 4.26 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) температуры воздуха и первой производной уровня водохранилища, 2024 год, 4-я мода, E-компонента

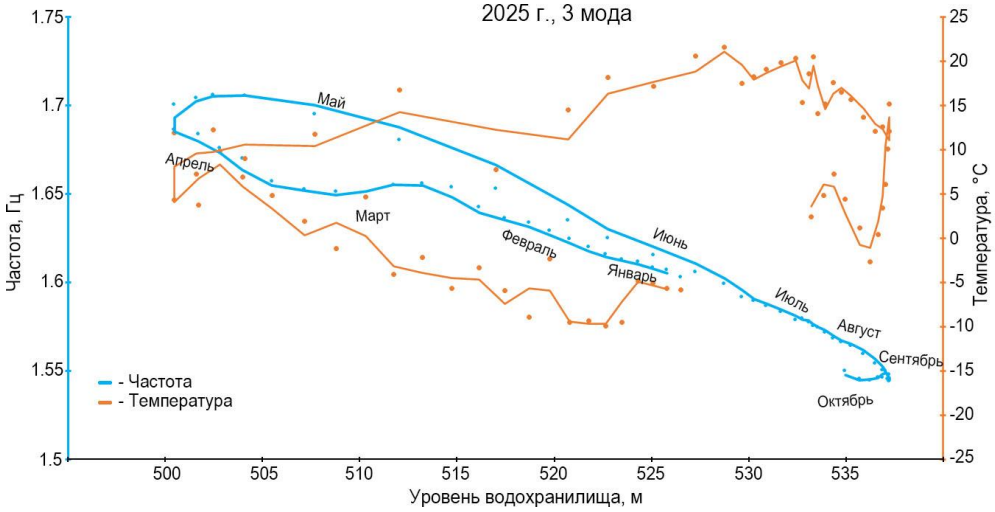


Рисунок 4.27 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры, 2025 год, 3-я мода, E-компонента

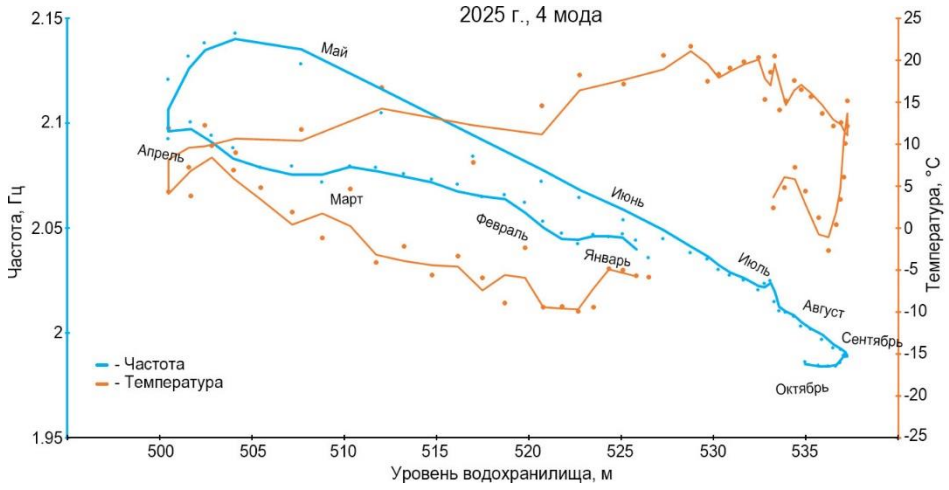


Рисунок 4.28 – Зависимость частоты собственных колебаний плотины от уровня верхнего бьефа (УВБ) и температуры, 2025 год, 4-я мода, E-компонента

На представленных графиках хорошо видно, что, при одинаковых уровнях воды в периоды заполнения и сработки водохранилища, наблюдаются различные значения собственных частот, т.е. частота при одном и том же уровне водохранилища в момент наполнения меньше, чем при его сработке. На данные значения может оказывать влияние множество факторов, таких как температурный эффект или эффект насыщения (промокание) бетона плотины. К примеру, если рассмотреть уровень водохранилища на отметке 505 м, нижнее значение частоты соответствует апрелю, а верхнее маю, то же самое справедливо и для температуры. Таким образом, можно предположить, что с повышением температуры наблюдается увеличение собственной частоты колебаний плотины, однако одновременно на данный процесс может влиять и эффект постепенного насыщения бетона водой. Необходимо отметить, что введение в анализ производной функции наполнения (скорости изменения уровня) не привнесло существенной дополнительной информации для интерпретации наблюдаемых закономерностей.

Согласно имеющимся данным, факты раскрытия трещин фиксировались в периоды достижения максимальных отметок наполнения водохранилища, когда гидростатическая нагрузка на конструкцию достигает своих пиковых значений. В связи с этим, наибольший интерес для диагностики структурного состояния представляет не весь диапазон изменения уровня воды, а именно область, где он максимален.

При детальном анализе графиков, особенно для данных 2024 года (рисунок 4.26), для четвертой моды колебаний наблюдается нетипичное поведение частоты в период максимального наполнения водохранилища. Характер этой аномалии отличается от регулярных сезонных вариаций и может быть связан с процессом раскрытия или развития трещин в теле плотины СШ ГЭС. Физический механизм данного явления заключается в том, что раскрытие трещины локально снижает жесткость конструкции в определенной зоне. Это приводит к изменению распределения напряжений и, как следствие, к аномальному изменению собственных частот колебаний, причем различные моды могут реагировать на локальное повреждение по-разному, в зависимости от расположения трещины.

Однако следует подчеркнуть, что установить однозначную причинно-следственную связь между наблюдаемыми частотными аномалиями и конкретными структурными нарушениями на основании только имеющейся информации не представляется возможным. Это обусловлено тем, что в рассматриваемый период времени на объекте могли производиться ремонтно-восстановительные работы, что также могло повлиять на динамические характеристики конструкции.

Более наглядное представление корреляционных связей между частотами собственных колебаний плотины для третьей и четвертой моды и уровнем наполнения водохранилища, а также температурой окружающей среды, представлены на рисунке 4.29.

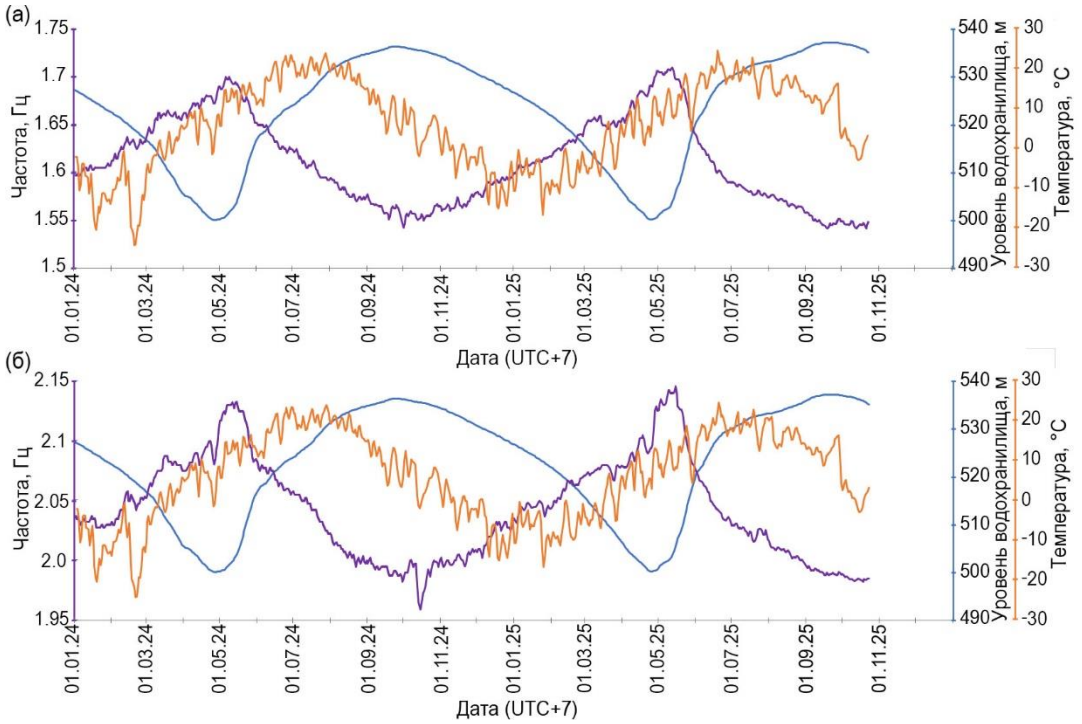


Рисунок 4.29 – График корреляции частоты собственных колебаний плотины СШ ГЭС (фиолетовый цвет) с уровнем водохранилища (синий цвет) и температурой (оранжевый цвет), на примере 3-й моды (а) и 4-й моды колебаний (б), по данным за 2024-2025 годы, E-компонента

На графиках также отчетливо проявляется корреляция между частотами собственных колебаний и уровнем водохранилища. В то же время влияние температурного фактора на частоту собственных колебаний СШ ГЭС проявляется менее однозначно. На протяжении всего периода наблюдений, начиная с 2024 года, не удается выделить устойчивой корреляционной связи между температурой и частотой. Отдельные локальные максимумы на кривой температуры иногда совпадают с кратковременными подъемами частоты, однако таким же образом можно наблюдать и противоположную взаимосвязь или отсутствие выраженной реакции.

Для данных 2024 года, в период максимального наполнения водохранилища и, следовательно, наибольшей нагрузки на конструкцию плотины, четко проявляется отмеченное выше нетипичное поведение частоты, наиболее выраженное для четвертой моды колебаний. Данная аномалия, выделяющаяся на фоне общего тренда, коррелирующего с уровнем водохранилища, может быть интерпретирована как возможный индикатор раскрытия трещины в критической зоне плотины.

Подобные нетипичные вариации частот в периоды максимальной нагрузки могут служить индикаторами структурных нарушений, хотя также требуют учета влияния внешних факторов и ремонтных работ на плотине. Подобный подход открывает перспективы для автоматизированного мониторинга гидротехнических объектов, повышая безопасность их эксплуатации.

Для достоверной интерпретации результатов мониторинга важно наличие полной и актуальной информации о всех проводимых ремонтных и восстановительных работах на объекте. Отсутствие такой информации может привести к неверной интерпретации наблюдаемых изменений динамических характеристик, когда, например, изменение частоты вследствие ремонта может быть ошибочно принято за признак нового повреждения, или, наоборот, реальное структурное нарушение может быть списано на известные ремонтные работы.

4.5 Построение разрезов земной коры по малоамплитудным отраженным волнам речной сейсморазведки

Специалистами ФИЦ ЕГС РАН около двух десятков лет совершенствуется технология речной сейсморазведки МОГТ-2D с установкой на берегу реки автономной 24-разрядной аппаратуры «Байкал», регистрирующей сейсмические сигналы непрерывно, в отличие от традиционных кабельных донных или наземных систем регистрации (с получением ограниченных во времени сейсмограмм). При этом, возбуждение упругих волн осуществляется пневмоисточниками «Малыш» [27],[28], предназначенными для работы в условиях малой глубины водоема (1-3 м). Зарегистрированные сигналы от сгруппированных по 10 шт. пневмоисточников позволяют выделять отраженные от границ в верхней части земной коры волны при 200-300-кратном их суммировании для получения сейсмических разрезов. Так, для получения вертикального сечения земной коры в нижнем течении р. Витим в 2019 г. выполнялись речные сейсмические наблюдения по профилю длиной около 170 км, проходящему через зону сочленения Ангаро-Ленской моноклизы и Бодайбино-Патомской складчатой системы. Причем сейсмический разрез верхней части земной коры (до глубины около 10 км) получен по сейсмограммам, ограниченным как по времени (10 с), так и по удалениям источник-приемник (8 км), а средняя и нижняя ее части остаются неизученными [29].

Сейсмические разрезы земной коры широко используются для решения задач геодинамики (при построении геодинамических моделей развития территорий), выявления тектонических нарушений, лежат в основе районирования территории с выявлением подвижных областей (складчатых поясов) и относительно стабильной платформы, при

выборе методов и параметров методик проведения более детальных поисковых и прогнозных работ с учетом связи между строением верхней, средней и нижней частей земной коры [30]. Специалисты знают, что разрез земной коры на больших глубинах (в десятки километров) определяется в основном по результатам геофизических методов исследования, причем наиболее детальные и достоверные разрезы получают по данным метода глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) на преломленных и отраженных волнах. В России этот метод активно развивается в 70-80-е годы XX века [31], однако на сегодня объем финансирования этих запредельно дорогих исследований значительно сокращен. Наиболее полная информация о разрезах земной коры территории России в систематизированном виде содержится в Атласе опорных геолого-геофизических профилей [32]. Вместе с тем, территории протяженностью в сотни километров остаются не исследованными методами глубинного сейсмического зондирования. Одним из рациональных путей построения разрезов средней и нижней частей земной коры, несомненно, является переобработка архивных материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки (МОГТ-2D) с использованием сейсмограмм увеличенной длительности на примере рек Лена, Витим, Нижняя Тунгуска в Восточной Сибири [33].

Исследования методом ОГТ-2D проводились специалистами сибирских филиалов ФИЦ ЕГС РАН в 2000-2006 гг. на реках Западной Сибири (Обь, Вах, Енисей). Методика речной сейсморазведки в эти годы отличалась незначительно от традиционной двухсудовой морской сейсморазведки, при которой одно судно используется для раскладки донной сейсмической косы, а другое – для буксировки по сейсмическому профилю пневмоисточников, принцип работы которых основан на выбросе объема сжатого воздуха в воду. Отличие – в существенно меньшей глубине водоема, чем при морских исследованиях, в связи с чем пневмоисточники модифицируются уменьшением объема камеры для сжатого воздуха, с одной стороны, и их группированием – с другой (пневмоисточники «Малыш», производитель ООО «Пульс») [28],[34]. Опыт применения регистрирующей аппаратуры на р. Лене в Восточной Сибири (2007 г.) показал, что в условиях рек с каменистым дном, быстрым (более 0.5 м/с) течением и, как следствие, наличием водоворотов и перекатов, уровень помех при регистрации отраженных волн на донные сейсмические косы на несколько порядков выше, чем при регистрации в спокойной воде или в реках со слабым течением. В связи с этим, с 2007 г. регистрирующая аппаратура заменяется на автономные регистраторы «Байкал» с широким динамическим диапазоном, разработанные в ФИЦ ЕГС РАН и выпускаемые малыми сериями [35], которые устанавливаются вдоль речного профиля на берегу реки, а запись сигналов осуществляется в непрерывном режиме. При этом используются высокочувствительные (80 В/(м/с))

сейсмоприемники GS-One с собственной частотой 10 Гц. Специальные исследования на сейсморазведочном профиле по р. Нижняя Тунгуска (2013 г.) подтвердили эффективность такого решения – амплитуда сейсмического шума при регистрации на берегу на 2-3 порядка ниже, чем при регистрации на дне реки [29].

Особенностью разработанной в 2007 г. специалистами сибирских филиалов ФИЦ ЕГС РАН методики речной сейсморазведки является независимость (бескабельность) функционирования возбуждающей и регистрирующей частей сейсмической аппаратуры. При этом сейсмические регистраторы записывают упругие колебания земной поверхности в непрерывном режиме, а их работа, как и пневмоисточников, синхронизируется во времени с помощью систем ГЛОНАСС и GPS. Полученные материалы в виде набора данных (времена возбуждения волн, интервалы времен регистрации, последовательность установки регистраторов на профиле) оформляются в виде таблиц. Эти таблицы используются для формирования из непрерывных записей регистраторами «Байкал» сейсмограмм, аналогичных получаемым стандартными многоканальными сейсморазведочными станциями. Алгоритм действий обработчика данных реализован в специальном программном обеспечении SSlicer [36]. При этом длительность формируемых сейсмограмм определяется геологическим заданием и составляет, при традиционной разведке на нефть и газ, от 6 до 10 с, что обеспечивает получение сейсмических разрезов только верхней части земной коры до глубины порядка 10 километров.

Период между сейсмическими возбуждениями в речной сейсморазведке, как правило, составляет 20-25 с и обусловлен необходимостью нагнетания сжатого воздуха в пневмоисточники. Поскольку запись сейсмических сигналов непрерывна, то это позволяет по имеющимся первичным материалам формировать сейсмограммы значительно большей, чем 10 с, длительности, вплоть до периода между сейсмическими возбуждениями. Отраженные от глубинных границ земной коры, включая поверхность Мохоровичича, продольные волны, полученные методом ГСЗ в Восточной Сибири, находятся на временах меньших, чем период между возбуждениями, – до 13-15 с [37]. Следовательно, при использовании сейсмограмм с большим временем регистрации отраженных волн можно без существенных затрат строить сейсмические разрезы, дополненные средней и нижней частями земной коры на участках отработки речных сейсморазведочных профилей.

Однако при использовании источника возбуждения упругих волн, предназначенного для получения сечения только верхней части земной коры, амплитуда волн, отраженных от границ средней и нижней частей земной коры, несомненно, будет ниже, а значит корректность построения сейсмических разрезов по таким материалам остается под вопросом. Из анализа материалов речной сейсморазведки, выполненной по аналогичной

методике на 60-километровом участке профиля по р. Лена в 2018 г., следует, что волны, отраженные от границ средней и нижней частей земной коры, выделяются на временном разрезе по специальной методике [33]. Этому способствует, как широкий динамический диапазон 24-разрядных регистраторов «Байкал» и их высокая чувствительность, обеспечивающая регистрацию сигналов с амплитудой на два порядка ниже уровня сейсмического шума, так и увеличение до нескольких тысяч кратности суммирования сигналов (в отличие 200-300-й кратности при речной сейсморазведке на нефть и газ). Последнее достигается увеличением в несколько раз размеров площадки суммирования (бина) и вовлечением в обработку трасс с увеличенным удалением источник-приемник до 10-15 км (в отличие от традиционных 4-8 км). Следовательно, материалы, полученные при речной сейсморазведке на р. Витим, также могут быть успешно использованы для построения сейсмических разрезов средней и нижней частей земной коры.

В исследовании предлагается новый, малозатратный способ построения по архивным данным разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным отраженным волнам. Способ апробируется по материалам речного профилирования методом ОГТ-2D протяженностью 170 км в нижнем течении р. Витим, включающим зону сочленения Ангаро-Ленской моноклизы и подвижной Бодайбино-Патомской складчатой системы, верхние горизонты коры которых на всем протяжении профиля представлены сложнодислоцированными комплексами пород с широким проявлением разрывных, в том числе надвиговых деформаций.

Актуальность предложенной методики сейсмических исследований, на примере рассматриваемого региона, заключается в том, что полученные данные о глубинном строении позволят построить обоснованную геодинамическую модель развития территории, увязанную с металлогенической специализацией региона на промышленное золото, железистые кварциты, месторождения высококачественного мусковита, что позволит выйти на новый уровень прогнозных построений.

Фактический материал и его предварительная обработка

Исходный материал получен в 2019 г. при полевых сейсморазведочных исследованиях в нижнем течении р. Витим, выполненных сотрудниками НППГА «ЛУЧ» с привлечением специалистов СЕФ ФИЦ ЕГС РАН по методике, разработанной в сибирских филиалах ФИЦ ЕГС РАН и опробованной ранее на р. Лене в Восточной Сибири [38]. Речной сейсморазведочный профиль протяженностью 170 км является продолжением наземного опорного профиля 1-СБ-Восточный, проходит вдоль р. Витим от п. Мама до пгт. Пеледуй по территории, мало изученной ранее методами глубинного сейсмического зондирования (рисунок 4.30). В тектоническом плане профиль проходит через зону

сочленения подвижного Центрально-Азиатского складчатого пояса и Сибирской платформы, при этом пересекает в направлении с юга на север переходную зону между подвижной Бодайбино-Патомской складчатой системой и Ангаро-Ленской моноклизой.

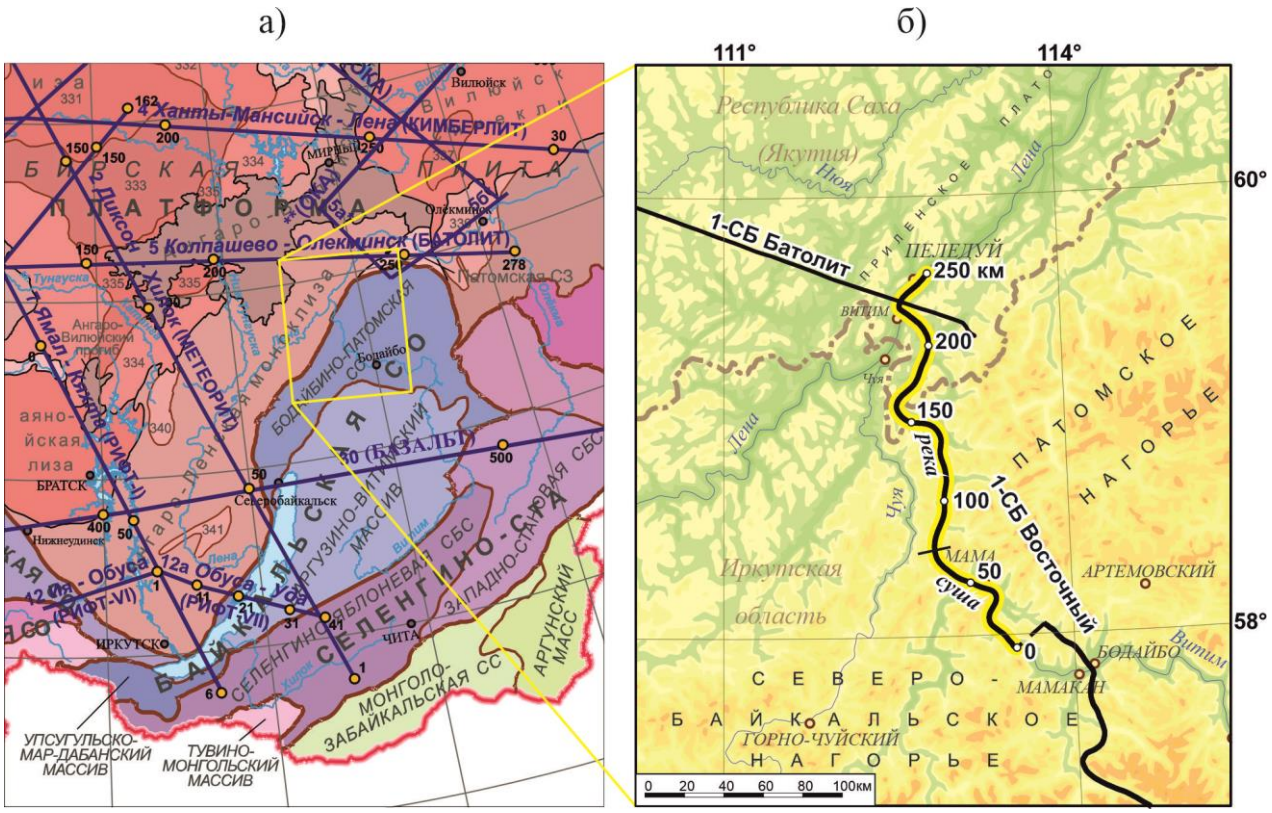


Рисунок 4.30 – Схема опорных профилей ГСЗ [32] (а) и схема опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ-Восточный (дополненного участком речных сейсморазведочных работ) на физико-географической основе (б)

Для построения разреза верхней части земной коры используются данные профилирования методом ОГТ-2D с характеристиками, представленными в таблице 4.2. Из табличных данных видно, что сейсмограммы ограничены по длительности (10 с) в связи с тем, что геологическое задание не ориентировано на получение разрезов средней и нижней частей земной коры, для которого необходимы сейсмограммы большей длительности.

Разработанная специалистами сибирских филиалов ФИЦ ЕГС РАН методика речных сейсморазведочных исследований на примере работ по р. Витим предусматривает использование автономных регистраторов «Байкал», настроенных на непрерывную запись и устанавливаемых вдоль профиля на берегу реки. При этом временной интервал между возбуждениями составляет 23 с, т.е. фактически регистрируются сигналы до соответствующих времен от начала возбуждения. Особенность способа геофизической съемки в том, что возбуждающая и регистрирующая системы не связаны между собой. Поэтому операторы программируют сейсмические регистраторы на запись в непрерывном режиме с момента установки на профиле до снятия с профиля. Длительность записи на

разных регистраторах варьируется в связи с тем, что регистраторы устанавливают и снимают с профиля неодновременно. Следовательно, и количество зарегистрированных возбуждений, и спектр расстояний между пунктами возбуждения и пунктами приема также различаются от регистратора к регистратору. Работа регистраторов синхронизируется во времени с помощью систем ГЛОНАСС и GPS так же, как и работа пневмоисточников. По набору табличных данных (времена возбуждения упругих волн, интервалы времен регистрации, последовательность установки регистраторов на профиле) приводятся в однозначное соответствие время срабатывания группы источников возбуждения и время начала полезной записи сигнала на каждом из автономных регистраторов. Для формирования сейсмограмм, аналогичных получаемым традиционными многоканальными сейсморазведочными станциями, разработано специальное программное обеспечение SSlicer [36]. Отличием является то, что формируются не традиционные сейсмограммы общего пункта возбуждения, а сейсмограммы общего пункта приема (ОПП), что не влияет на результат обработки данных методом ОГТ.

Таблица 4.2 – Основные характеристики систем возбуждения упругих волн и их регистрации при речной сейсморазведке методом ОГТ-2D на р. Витим в 2019 г.

Система возбуждения упругих волн		
1.	Тип источника	Пневмоисточник «Малыш»
2.	Количество источников в группе, шт.	8-10
3.	Заглубление источников, м	1.5-2.0
4.	Расстояние между пунктам возбуждения (ПВ) - среднее, м - не более, м	 19 25
5.	Интервал между возбуждениями, с	23
Система регистрации		
1.	Регистрирующая аппаратура	«Байкал-7»
2.	Система наблюдения	Комбинированная
3.	Количество активных каналов	640
4.	Кратность перекрытия (номинальная/минимальная)	320/224
5.	Расстояние между пунктами возбуждения (ПВ) и пунктами приема (ПП) - минимальное, м - максимальное, м	 0-250 8000
6.	Длина записи, с	10
7.	Шаг дискретизации, мс	2
8.	Расстояние между ПП, м	25
9.	Тип сейсмоприемника	GS-One

Алгоритм действий обработчика первичных материалов, реализованный в специальном программном обеспечении SSlicer, состоит в следующем (рисунок 4.31). Прежде всего формируется набор данных в виде таблиц, состоящих из параметров системы возбуждения упругих волн (порядковый номер ПВ, дата и время возбуждения, координаты ПВ) и системы регистрации (номер ПП, физический номер регистратора, дата и время начала и конца записи, координаты ПП). На вход программного обеспечения SSlicer подаются эти таблицы и первичные записи во внутреннем формате регистраторов «Байкал», включающие серии сигналов от пневмоисточников. Также задается длительность формируемой сейсмограммы. На выходе программного обеспечения обработчик получает сейсмограммы общего пункта приема в традиционном формате SEGY.

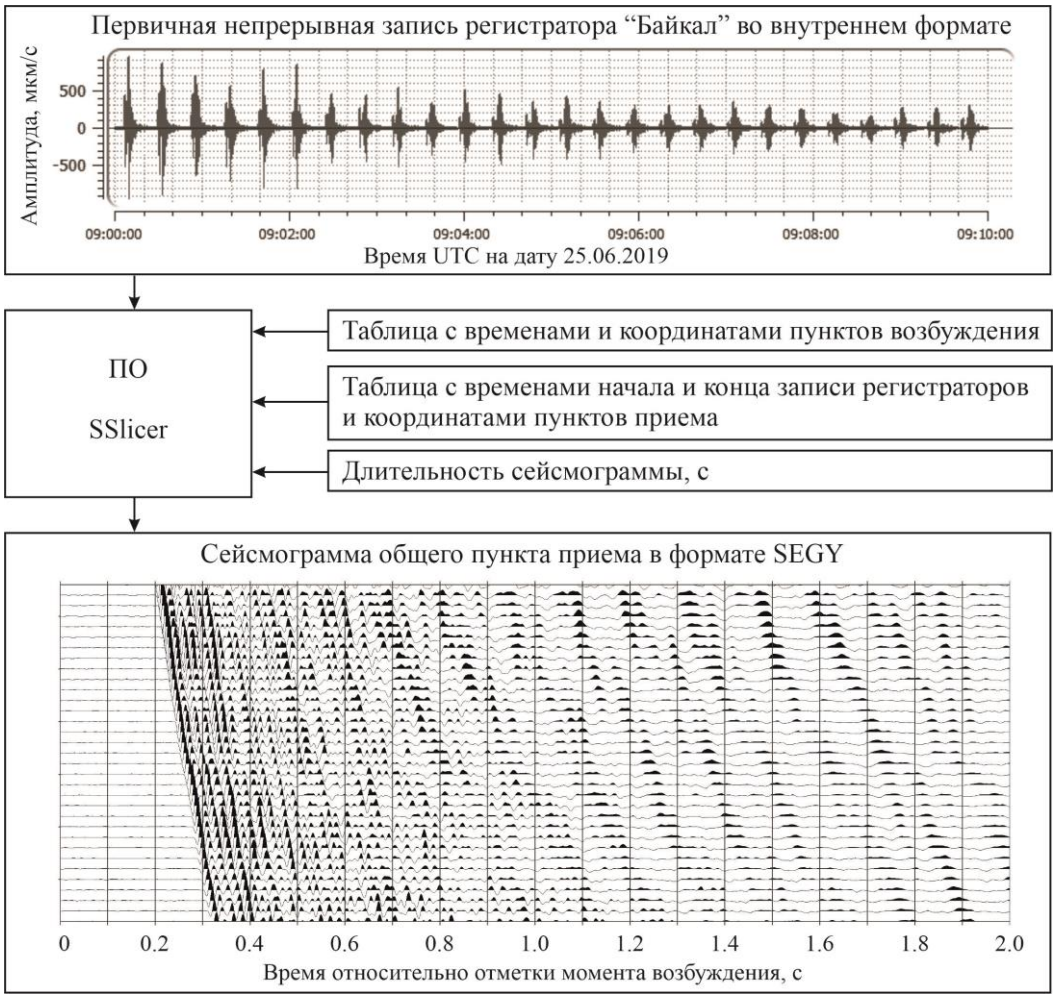


Рисунок 4.31 – Схема действий обработчика материалов с использованием программного обеспечения SSlicer для формирования сейсмограмм общего пункта приема из непрерывных сейсмических записей регистратора «Байкал»

Длительность формируемых по материалам речного профилирования сейсмограмм задается пользователем и ограничена только интервалом между возбуждениями, составляющим 23 с (таблица 4.2). Отраженные волны от глубинных слоев земной коры, включая поверхность Мохоровичича, по данным исследований методом ГСЗ в Восточной

Сибири, находятся на временах до 13–15 с [37], т.е. значительно меньших, чем интервал между возбуждениями. Следовательно, по сформированным сейсмограммам с увеличенным до 23 с временем регистрации можно построить сейсмический разрез средней и нижней частей земной коры.

В результате обработки архивных (2019 г.) материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ-2D по р. Витим сформированы в традиционном формате SEGY 7272 сейсмограммы общего пункта приема (ОПП) с записью упругих волн от пневмоисточников, каждая из которых включает, в среднем, 1135 трасс длительностью 23 с. При этом расстояние между пунктами приема составляет 25 м, а между пунктами возбуждения, в среднем, 19 м. Формирование сейсмограмм выполняется поэтапно:

Отбраковка некондиционных записей из-за обрыва цепи сейсмического канала.

Формирование негеометризованных (т.е. не привязанных к системе координат) сейсмограмм ОПП с трассами от всех зарегистрированных возбуждений, включая повторные.

Импорт сейсмограмм в специализированное программное обеспечение «RadExPro» (разработанное ООО «ДЕКО-ГЕОФИЗИКА СК», г. Москва) для присвоения и проверки введенных координат путем сопоставления времен вступлений упругих волн, прослеживающихся на сейсмограммах, и соответствующим им теоретическим годографам.

Экспорт геометризованных сейсмограмм в файлы формата SEGY для их углубленной обработки с построением сейсмических разрезов в любых других программах.

Из визуального анализа сформированных сейсмограмм следует, что в волновом поле лишь на небольших временах (до 3-4 с) прослеживаются сейсмические волны: прежде всего, преломленные или рефрагированные волны в первых вступлениях, прямые волны в воде, а также менее интенсивные отраженные волны. Однако на больших временах (до 13-15 с), где по результатам предыдущих исследований [37] ожидаются вступления продольных отраженных волн от границ средней и нижней частей земной коры, включая границу Мохоровичича, каких-либо регулярных волн не отмечается. Это объясняется недостаточной мощностью использованного пневматического источника возбуждения упругих волн, разработанного и предназначенного для исследования лишь верхней части земной коры. Как следствие, амплитуда отраженных волн значительно ниже амплитуды сейсмического шума. Выделение таких малоамплитудных сигналов возможно только их многократным суммированием, повышающим отношение сигнал/шум. Перед углубленной обработкой большого количества сейсмограмм (требующей больших временных и материальных затрат) выполняется экспресс-обработка данных с получением предварительного временного разреза. Основная ее задача – доказать, что в первичных

материалах зарегистрированы полезные сигналы в виде малоамплитудных отраженных волн от границ в средней и нижней частях земной коры, которые могут быть выделены на временных разрезах в результате многократного суммирования.

Прежде всего оценивается чувствительность используемой сейсмической аппаратуры, а именно регистраторов «Байкал» и сейсмоприемников GS-One. Из сопоставления спектров сейсмического шума (зарегистрированного в условиях, приближенных к полевым наблюдениям) и аппаратурного шума (зарегистрированного при горизонтальном положении вертикального сейсмоприемника) следует, что амплитуда первого (составляющего 100-200 нм/с в интервале частот 7-20 Гц) выше второго (0.6 нм/с) более чем на два порядка (рисунок 4.32). Значит, чувствительности используемой аппаратуры достаточно для регистрации малоамплитудных сигналов с амплитудой, как минимум, до 100 раз ниже амплитуды сейсмического шума. Однако для выделения на временных разрезах таких слабых сигналов, отношение сигнал/шум требуется повысить в соответствующее число раз за счет увеличения кратности их суммирования.

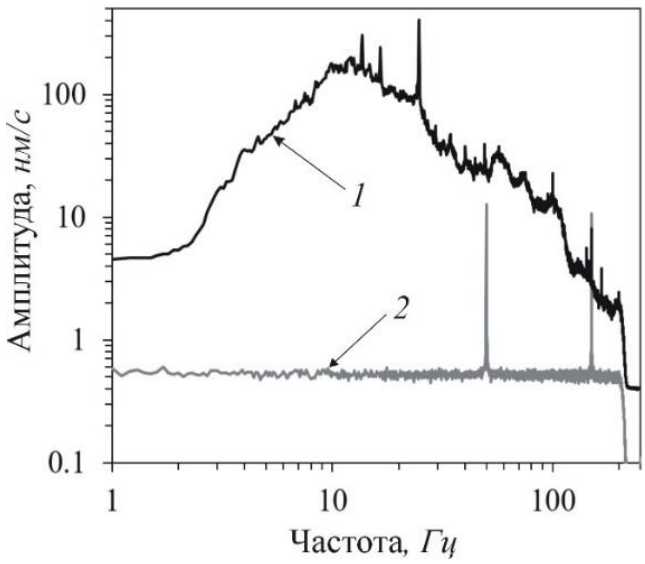


Рисунок 4.32 – Соотношение усредненных амплитудных спектров сейсмического (1) и аппаратурного (2) шума при регистрации аппаратурой Байкал-7 с вертикальным сейсмоприемником GS-One

Высокая кратность достигается, во-первых, за счет вовлечения в обработку дополнительных сейсмических трасс с увеличенными расстояниями ПП-ПВ (до 10-15 км вместо 8 км). Однако привлечение таких данных увеличивает кратность только до средних значений – 600, вместо кратности 320 по геологическому заданию на изучение верхней части земной коры (рисунок 4.33). Вместе с тем, для повышения отношения сигнал/шум, например, в 100 раз, кратность суммирования необходимо увеличить в 10000 раз. Во-вторых, существенно кратность можно повысить за счет увеличения площади бина. При обработке данных сейсморазведки на нефть и газ (при построении временных разрезов

верхней части земной коры), размер бина по направлению вдоль профиля традиционно задается равным половине интервала между пунктами приема (12.5 м). При этом его ширина (по направлению поперек профиля) достигает 3-4 км из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (рисунок 4.34). Криволинейностью профиля объясняется и неравномерность кратности суммирования сигналов вдоль линии профиля: при повороте русла реки неизбежно происходит сгущение пунктов приема (увеличение их количества на единицу длины профиля). Для выделения волн, отраженных от границ в средней и нижней частях земной коры, размер бина вдоль профиля следует существенно увеличить, что и приведет к соответствующему увеличению кратности суммирования сигналов. Однако увеличение площади бина не только повысит кратность, но и одновременно приведет к уменьшению детальности временного разреза. Поэтому, при обработке данных, необходимо подбирать оптимальное значение его размеров, соответствующее кратности суммирования, необходимой для выделения малоамплитудных волн, отраженных от границ в нижней и средней частях земной коры.

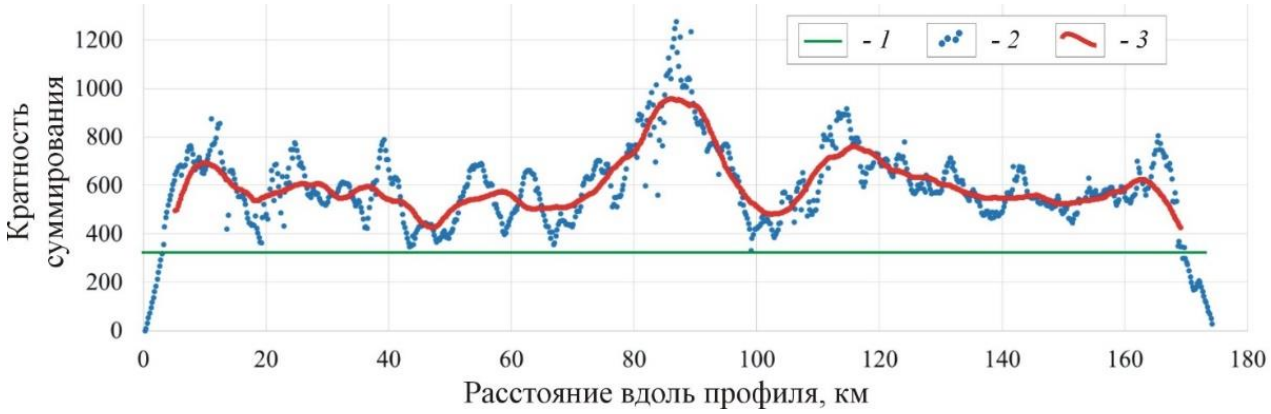


Рисунок 4.33 – Кратность суммирования сигналов в зависимости от расстояния по профилю по результатам обработки архивных материалов сейсморазведки методом ОГТ-2D по р. Витим в 2019 г. (размер бина 12.5х3000 м). 1 – требуемая кратность по геологическому заданию при изучении верхней части земной коры; 2 – фактическая кратность (количество средних точек в пределах каждого бина); 3 – усредненные значения фактической кратности

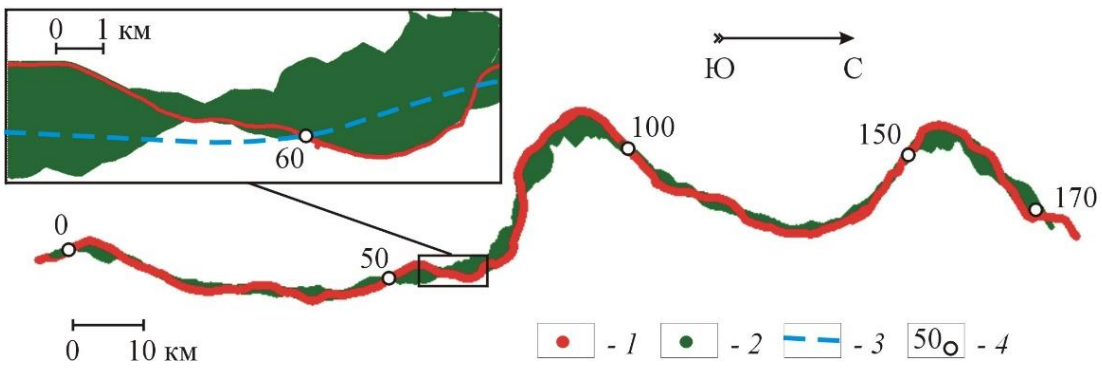


Рисунок 4.34 – Схема сейсмического профиля. 1 – пункты возбуждения; 2 – средние точки; 3 – траверс-линия; 4 – отметки расстояния вдоль профиля, км

Как уже отмечалось, речной сейсморазведочный профиль проходит через территорию, мало исследованную глубинным сейсмическим зондированием. Ближайший профиль, по данным которого известны скорости упругих волн в земной коре и глубина до границы Мохоровичича, – 1-СБ-Восточный [39], где глубина последней меняется в пределах 44-46 км, а эффективная скорость отраженной волны ($V_{отг}$) – 6.45-6.50 км/с. С учетом этих данных составляются скоростные модели и рассчитываются сейсмограммы продольных волн, отраженных от границы Мохоровичича (видимая частота волны выбрана равной 10 Гц) в моделях с пониженным (глубина 44 км, скорость 6.45 км/с) и повышенным (глубина 46 км, скорость 6.50 км/с) значениями мощности земной коры (рисунок 4.35). По расчетным сейсмограммам видно, что времена пробега волн, отраженных от границы Мохоровичича, составляют 13-14 с. Значит, вступления продольных волн, отраженных от границ в средней и нижней частях земной коры, находятся на меньших временах.

Из-за малых удалений источник-приемник по сравнению с глубиной до границ в средней и нижней частях земной коры и, в особенности, границы Мохоровичича лучи отраженных волн почти вертикальные (рисунок 4.35а), что затрудняет определение значения эффективной скорости. Так, при удалении источник-приемник до 10 км и частоте сигнала в 10 Гц, вариации скорости $V_{отг}$ в пределах 6-7 км/с, различие кинематических поправок за счет разной кривизны годографов не превышает четверти видимого периода сигнала (рисунок 4.35б). Таким образом, основное ограничение разрабатываемого способа, с учетом специфики имеющихся материалов, состоит в невозможности определить значение эффективной скорости для отраженных от границ средней и нижней частей земной коры волн. Кроме этого, не представляется возможным учесть в должной мере искажающие эффекты, обусловленные криволинейностью и трехмерностью рельефа отражающих границ.

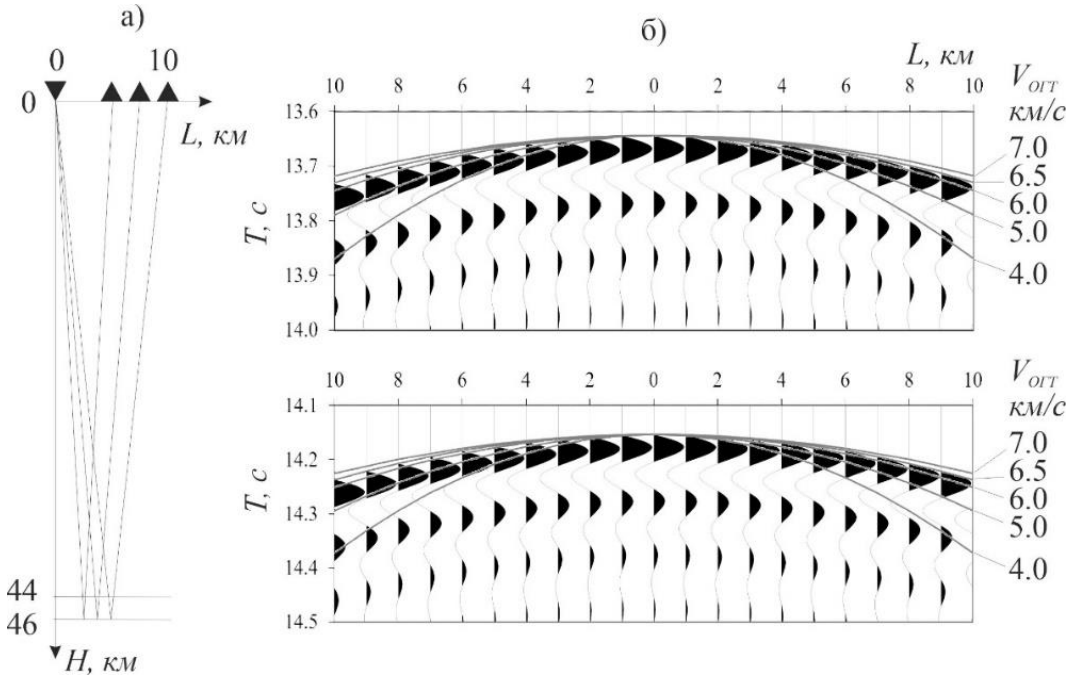


Рисунок 4.35 – Лучевая схема (а) и рассчитанные сейсмограммы (б) отраженных от границы Мохоровичича продольных волн для однослойных однородных моделей земной коры

Как отмечалось выше, в зарегистрированном волновом поле отраженные от границ в средней и нижней частях земной коры волны не прослеживаются. Хотя регистрирующая аппаратура характеризуется достаточной чувствительностью для возможного выделения малоамплитудных отраженных волн многократным (до десятков тысяч раз) их суммированием. Для доказательства, что эти волны регистрируются аппаратурой, выполняется экспресс-обработка сейсмограмм с построением предварительного временного разреза. При этом, обработка выполняется с упрощенными параметрами в силу объективных причин, а именно: отсутствуют детальные данные о скоростном строении среды в пределах профиля; подбор эффективных скоростей затруднен, так как максимальное расстояние источник-приемник в несколько раз меньше глубинности исследования; амплитуда отраженных волн низкая, а значит анализ их волнового поля затруднен. Экспресс-обработка проводится поэтапно. Во-первых, сортировка сейсмических трасс (т.е. бинирование) выполняется с площадок размером 800х3000 м, при этом средняя кратность суммирования волн высокая и составляет 20000-40000 раз. Столь высокая кратность при экспресс-обработке выбрана не случайно: отношение сигнал/шум повышается более чем в 100 раз, следовательно, даже слабые сигналы по амплитуде, сопоставимые с амплитудой аппаратурного шума, предположительно выделяются на временном разрезе. Во-вторых, сейсмограммы обрабатываются полосовым фильтром с полосой пропускания 5-10 Гц, которая определяется путем подбора. В-третьих, к сейсмограммам традиционно применяется процедура автоматического регулирования

усиления (АРУ), при которой подавляются ухудшающие отношение сигнал/шум высокоамплитудные помехи. И, наконец, последним этапом вводятся кинематические поправки: они вычисляются по скоростной модели, определенной по ближайшему профилю 1-СБ-Восточный [39]. Результатом такой экспресс-обработки является временной разрез (рисунок 4.36), из которого видно, что на временах 11.0-13.7 с прослеживаются волны с частотой около 7-8 Гц, предположительно отраженные от границ в нижней части земной коры. Граница на временах в 13.5-13.7 с, ниже которой не отмечается отраженных волн, предположительно является границей Мохоровичича. Так, при средней скорости продольных волн в земной коре 6.5 км/с, глубина до нее составит около 44 км, что согласуется с результатами, полученными методом ГСЗ на ближайшем профиле 1-СБ-Восточный [39].

Таким образом, результаты экспресс-обработки подтверждают, что в первичных материалах речного профилирования методом ОГТ-2D, выполненного в 2019 г. по р. Витим, зарегистрированы полезные сигналы в виде малоамплитудных отраженных волн от границ в средней и нижней частях земной коры, которые выделяются на временных разрезах в результате многократного суммирования. Далее предлагается углубленная обработка материалов речной сейсморазведки методом ОГТ-2D по р. Витим, а именно с использованием подготовленных сейсмограмм с увеличенными до 23 с длительностями и до 10-15 км удалениями источник-приемник.

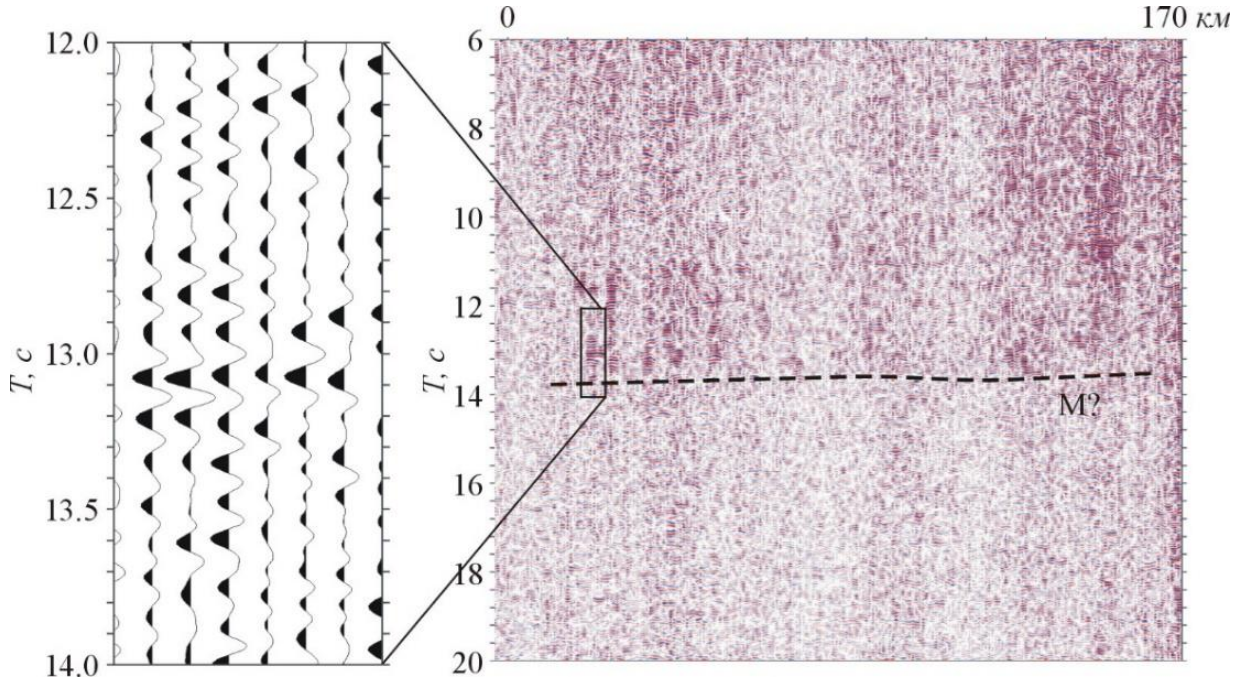


Рисунок 4.36 – Временной разрез при экспресс-обработке архивных материалов речной сейсморазведки по р. Витим. На врезке показан увеличенный фрагмент разреза. Пунктирной линией отмечена предполагаемая граница Мохоровичича

Обработка данных с получением временного разреза на полную мощность земной коры

Сейсмические материалы, полученные методом ОГТ-2D на р. Витим с увеличенными удалением источник-приемник (до 10-15 км) и временем регистрации (до 23 с), обрабатывались на основе технологий, разработанных и применяемых в течение длительного времени к материалам опорных геолого-геофизических профилей, характеризующимся высокой гетерогенностью среды, повышенными скоростями и слабым уровнем сигнала [40],[41]. Для верхней слоистой среды (0-2 с) учитывался опыт обработки Е.В. Мосягиным с соавторами, по материалам речной сейсморазведки на реках Восточной Сибири (Нижняя Тунгуска, Лена и ее притоки) [29],[42]. При этом решались две основные задачи: получение новой информации о глубинном строении земной коры (на всю ее мощность) вдоль линии речного профиля и дополнение важными сведениями северного наземного фрагмента опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ-Восточный, отработанного в 2014-2016 гг. (ОАО «ВНИИГеофизика» - «Спецгеофизика» ОАО «Росгеология» по договору с ФГУП «СНИИГГиМС»).

Специфика решаемых задач наложила определенные ограничения на применяемую последовательность процедур обработки речных сейсмических данных, которая была, по возможности, унифицирована с графом обработки сухопутных вибрационных глубинных сейсмических материалов и ориентирована на повышение информативности сейсмического разреза в глубинной его части. При этом, верхней части разреза (ВЧР), соответствующей осадочному чехлу, было уделено меньшее внимание, обусловленное требуемой масштабностью выходной информации.

Обработка данных речной сейсморазведки от обработки наземных материалов глубинного МОВ-ОГТ отличается рядом особенностей, обусловленным, главным образом, методикой проведения полевых сейсмических работ. К таковым относятся: большой объем исходных данных, криволинейность трассы профиля, несовпадение положения линий приема и возбуждения, нерегулярность системы наблюдений и относительно высокий уровень фона помех различного рода.

Как правило, речная сейсморазведка отличается от наземных работ аналогичного масштаба увеличенным объемом первичных сейсмических материалов. Полный набор исходных сейсмограмм, полученных на р. Витим (длина речного профиля – 170 пог. км), насчитывает 9 043 236 трасс с длиной записи 23 с и дискретностью 2 мс, что эквивалентно наземному участку опорного профиля 1-СБ-Восточный с кратностью 100 и протяженностью порядка 2250 пог. км, или региональному сухопутному профилю с кратностью наблюдений 160 и протяженностью не менее 1400 пог. км. Без привлечения

производительных вычислительных мощностей и максимально возможного использования параллельных вычислений процесс обработки таких данных может занимать неоправданно много времени.

Одной из особенностей речного сейсмического профиля, наиболее критичной в плане обработки и интерпретации получаемых материалов, является криволинейность его маршрута, которая естественным образом определяется кривизной русла реки. В этом плане р. Витим не сильно отличается от прочих извилистых, активно меандрирующих рек Восточной Сибири, поэтому, при задании схемы бинирования сейсмических трасс, использовалась технология, предназначенная для профилей с произвольной геометрией (Crooked Line 2D Binning). Технология базируется на построении кривой (траверсной линии), вдоль которой осуществляется разбиение облака срединных точек на прямоугольные площадки (бины) с заданным шагом между их центрами, длиной (вдоль) и шириной (в крест линии профиля). Наиболее существенные вопросы возникают при выборе траверсной линии и размеров бинов.

В самом простом варианте траверс-линия строится в автоматическом режиме путем аппроксимации облака срединных точек кривой с учетом задаваемых обработчиком правил, из которых наиболее важными являются: диапазон используемых удалений источник-приемник и длина окна осреднения срединных точек. На практике полученная в автоматическом режиме траверс-линия требует ручного редактирования узлов с учетом геометрии съемки. При этом, обработчику необходимо найти некое компромиссное решение, которое удовлетворяло бы двум основным условиям: максимально возможная приближенность линии бинирования к линиям приема и возбуждения, и, по возможности, отсутствие участков резкого изменения направления траверс-линии.

По сути, траверсная линия определяет геометрическое положение трасс сейсмического разреза, а также является интерпретационной линией, относительно которой строится геолого-геофизическая модель. Поэтому важно, чтобы она проходила как можно ближе к топографической трассе профиля. Особенно это актуально для самой верхней части разреза МОВ-ОГТ, в построении которой задействуются сейсмические трассы в ограниченном диапазоне удалений ПВ-ПП, и в гораздо меньшей степени – для глубинной. При интерпретации сейсмического разреза учитываются ориентировка пересекаемых линией профиля на поверхности геологических структур, их строение и состав слагающих структуры пород. Неправильно выбранная, сильно сглаженная траверсная линия на наиболее криволинейных участках профиля будет проходить на большом расстоянии от линии полевых наблюдений, что может привести к искажению размеров и геометрии прослеживаемых на поверхности геологических структур, пересекаемых профилем, а в

особенно неблагоприятных условиях – к их полному игнорированию при интерпретации. На рисунке 4.37 показана гипотетическая ситуация, когда неверно заданная по центру области срединных точек линия бинирования проходит на отдалении от тектонического нарушения, дважды пересекаемого трассой профиля.

С другой стороны, выбранная траверсная линия не должна иметь резких изломов, так как в этом случае на сопредельных участках ориентация бинов сильно различается, их площадки начинают перекрываться с внутренней стороны излома и расходиться на значительные расстояния – с внешней. Как следствие – кратность ОГТ на данном участке профиля становится еще более невыдержанной, а срединные точки, расположенные в окрестностях центральной оси излома с внешней его стороны, оказываются исключены из обработки, так как не попадают ни в один бин (рисунок 4.38). В итоге, на разрезе в верхней его части появляются зоны мнимого отсутствия полезной сейсмической записи, которые могут быть устранены только путем выбора более плавно изгибающейся траверсной линии.

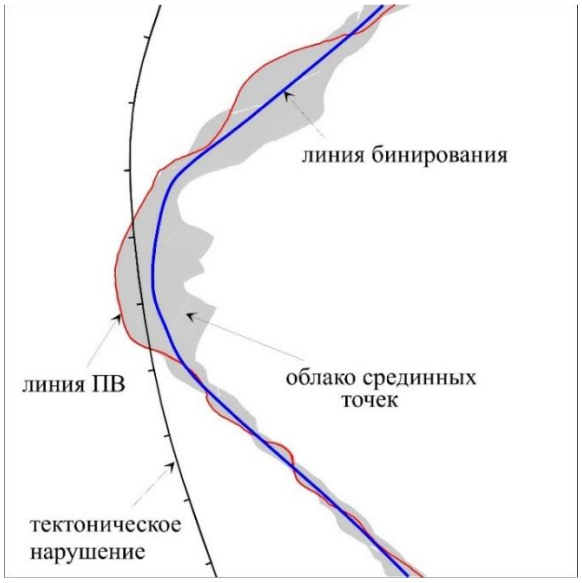


Рисунок 4.37 – Пример задания траверсной линии по центру облака срединных точек, в результате чего игнорируются геологические объекты, пересекаемые линией профиля

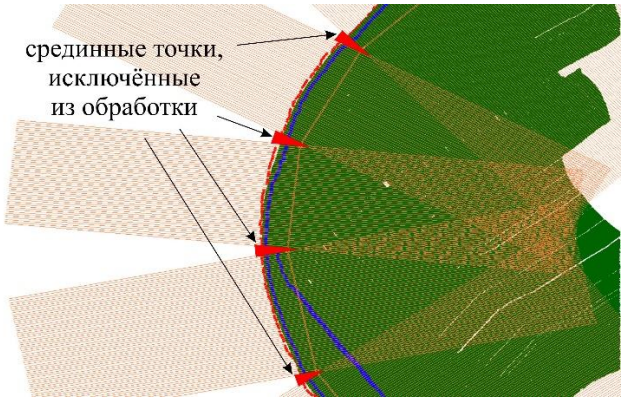


Рисунок 4.38 – Пример непреднамеренного исключения из обработки ближних к ПВ сейсмических трасс при резких изломах траверсной линии

Не менее важным, чем выбор траверсной линии, является вопрос выбора размеров площадок бинов. Несомненно, чем больше площадь бина, тем выше кратность и статистический эффект суммирования. Однако последнее справедливо только для субгоризонтального залегания отражающих границ, что не является типичной ситуацией для района исследований. Наоборот, разрез осадочного чехла в сечении профиля характеризуется сложным складчато-надвиговым строением с преобладанием крутопадающих не конформных границ. Для кристаллической коры также не характерна субгоризонтальная ориентация отражателей. В этом случае увеличение продольного и поперечного размера бинов может привести к ухудшению прослеживаемости отражений с большими углами наклона вследствие несинфазного суммирования сейсмических трасс, попадающих в пределы одной площадки. Поэтому размеры бина подбираются путем тестирования на представительном участке профиля с учетом поставленных геологическим заданием задач.

При традиционной наземной сейсморазведке, продольный размер бина вдоль линии профиля обычно выбирается равным половине интервала пунктов приема. В речной сейсморазведке применяется обращенная система наблюдений с формированием сейсмограмм общего пункта приема. Шаг пунктов возбуждения при этом – неравномерный, так как зависит от скорости движения судна, буксирующего пневмоисточники. На речном профиле по р. Витим средняя величина интервала между ПВ составила 19 м. При обработке верхней части разреза размер бина вдоль линии профиля составляет 12.5 м, однако для построения сейсмического разреза, освещающего строение земной коры на всю ее мощность, такая детальность исследований является избыточной. На рисунке 4.39а показаны фрагменты временных не мигрированных разрезов, полученных при разной ширине площадки бина. Как видно из рисунка, уже при поперечном размере бина, равном 50 м, прослеживаемость серии наклонных отражений в верхней части разреза (0-2 с) значительно ухудшается. Дальнейшее увеличение размера площадки бина приводит к практически полному исчезновению наклонных отражателей во всем диапазоне времен регистрации и существенному искажению волнового поля в целом.

Поперечный размер бина в меньшей степени оказывает влияние на пространственную разрешающую способность сейсмического разреза. Недостаточно большая ширина площадок может приводить к потере полезной информации на участках сильной кривизны профиля (рисунок 4.39б). С другой стороны, увеличение поперечного размера бина до 3000 м не оказывает заметного влияния на разрешающую способность записи и степень прослеживаемости отражений. Таким образом, по результатам

выполненного тестирования была выбрана схема бинирования с размером площадок 25х3000 м.

Следует отметить, что вопрос выбора траверсной линии и размера бина в условиях криволинейного профиля носит дискуссионный характер и, очевидно, должен рассматриваться с учетом решаемых геологических задач для конкретных сейсмогеологических условий.

При выполнении полевых сейсмических работ на р. Витим, пункты приема располагались на суше, а возбуждения – в воде, что определило несовпадение линий ПП и ПВ из-за невозможности судна двигаться на выдержанном расстоянии от приемной линии. Как следствие, на зарегистрированных сейсмических данных отсутствуют ближние (от 0 до 200-400 м) удаления, что, с одной стороны, не позволяет с достаточной точностью контролировать по зарегистрированным сейсмограммам корректность описания геометрии наблюдений, а с другой – создает определенные трудности для расчета статических поправок по преломленным волнам в первых вступлениях. Поэтому для устранения статических сдвигов, обусловленных неточностями определения планового положения ПП и ПВ, а также неоднородностью условий приема, использовались разрезы ОПП, ОПВ (общего пункта возбуждения) и корреляционная автостатика по преломленным волнам.

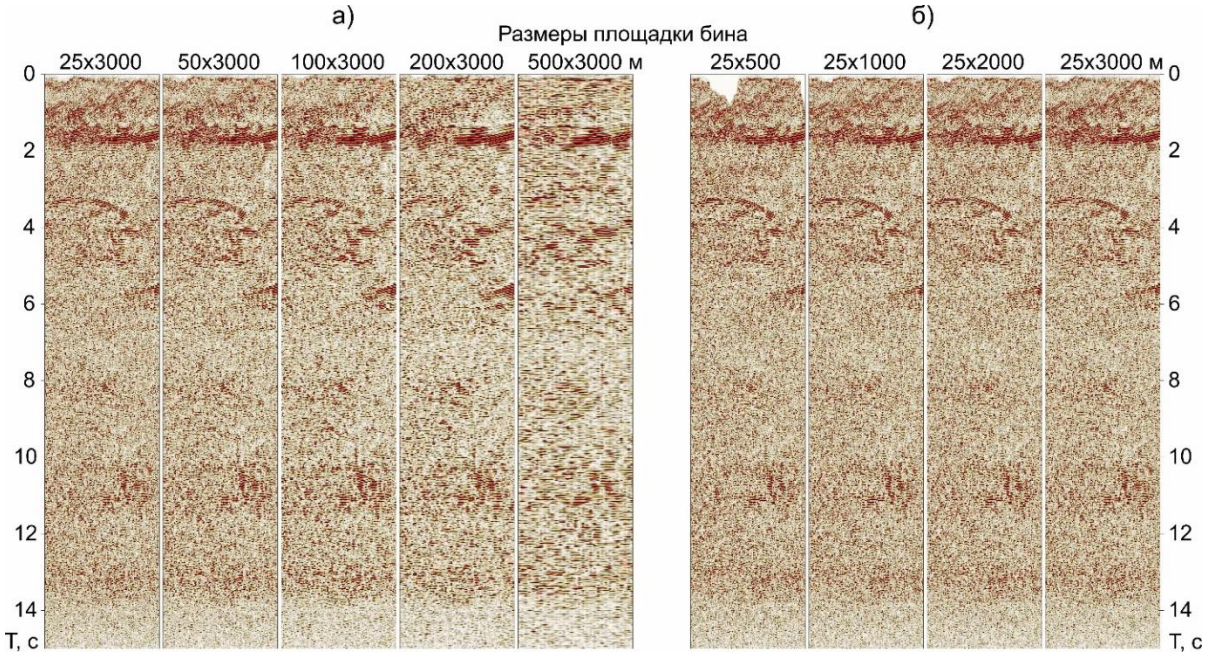


Рисунок 4.39 – Фрагменты временных не мигрированных разрезов при разном продольном (а) и поперечном (б) размере бина

Значительное внимание при обработке уделялось подавлению помех разного рода, присутствующих на зарегистрированных сейсмограммах. Это как нерегулярные (преимущественно ветровые и вызванные течением воды), так и коррелируемые (поверхностные волны, звуковая волна, шумы от двигательной установки судна-буксира)

помехи различной интенсивности. В качестве решения по подавлению высокоамплитудных нерегулярных помех применялись процедуры, подавляющие их в частотно-временной области по сейсмограммам в разных сортировках (ОПП, ОПВ и ОГТ) с различной пространственной апертурой. Для подавления линейных волн-помех использовалась система двумерных фильтров.

Методика наблюдений при речных сейсмических исследованиях отличается от сухопутных работ методом ОГТ крайней нерегулярностью. Если, при проведении работ на суше, шаг между пунктами возбуждения и приема выдержанный и не должен выходить за рамки установленных допусков, то при речных работах эти два параметра могут варьировать в широком диапазоне значений. Как следствие – зарегистрированные сейсмограммы характеризуются невыдержанностью распределения трасс по удалениям, одни диапазоны удалений могут включать избыточное количество трасс, а другие – недостаточное. Это неизбежно сказывается на эффективности процедур обработки, которые не учитывают реальные величины расстояний между соседними трассами в пределах одной сейсмограммы (например, фильтрация линейных волн-помех в FK-области, вычитание кратных волн и т.д.) и может создавать неблагоприятные условия для подбора скоростей суммирования. Для интерполяции неравномерно распределенных сейсмических данных на регулярную сетку применялась процедура F-K реконструкции, в рамках которой осуществляется поиск такого решения на регулярной, заданной обработчиком, сетке, которое наилучшим образом соответствует исходным нерегулярным данным при обратном преобразовании Фурье. На рисунке 4.40 показаны фрагменты сейсмограммы ОГТ до и после регуляризации, а также – графики удалений сейсмических трасс. Как видно, после применения процедуры регуляризации распределение трасс в пределах сейсмограмм по удалениям выровнялось, что создало благоприятные условия для последующего подавления линейных волн-помех перед окончательным суммированием.

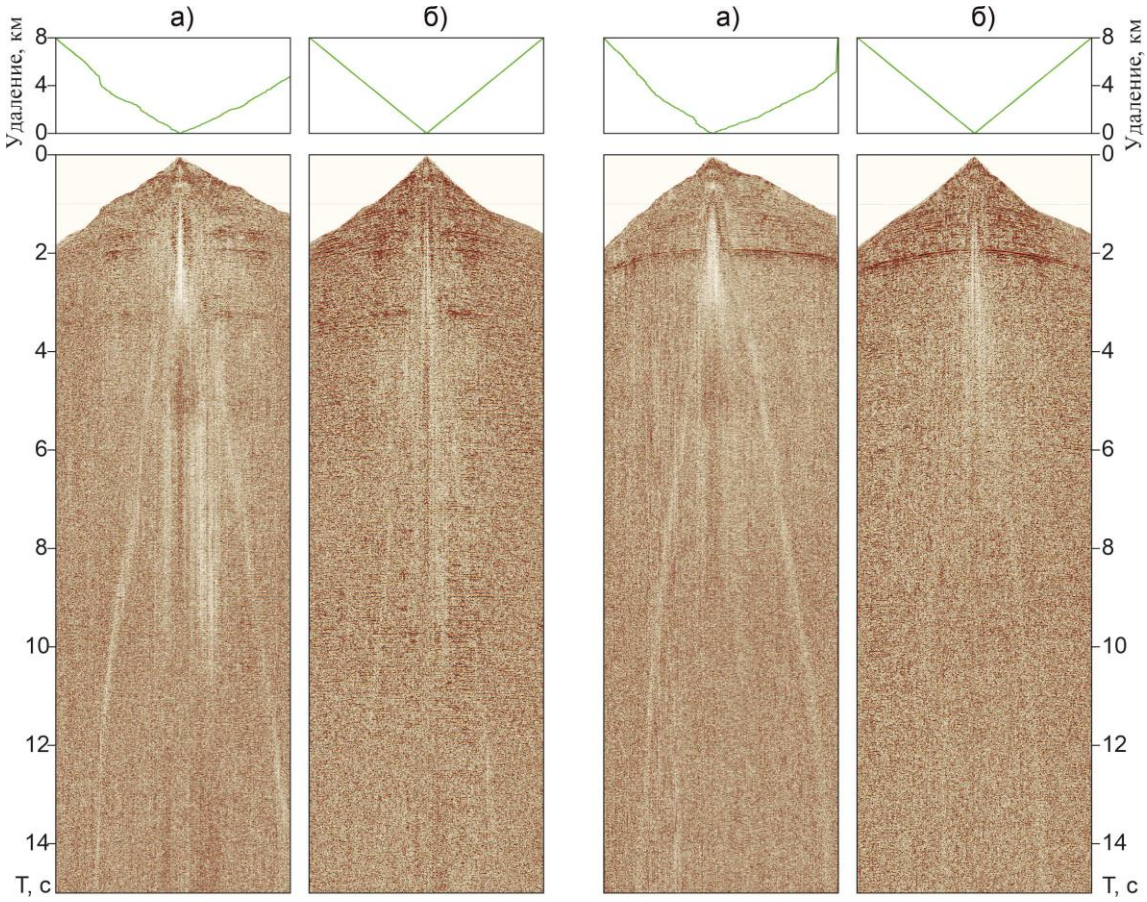


Рисунок 4.40 – Фрагменты сейсмограмм ОГТ до (а) и после (б) применения процедуры регуляризации сейсмических данных

Полученные результаты

Обработка речных материалов с акцентом на глубинный интервал сейсмической записи после увязки с данными по северному наземному фрагменту опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ-Восточный показывают хорошую сходимость волновых полей во всем временном интервале (рисунок 4.41). Композитный сейсмический разрез иллюстрирует подобие волновых полей, характеризующих структуру консолидированной коры по динамической выразительности отражений, их количеству, протяженности интервалов прослеживания и характеру залегания в зоне стыковки двух профилей. Волновая картина на уровне поверхности раздела кора-мантия (40-42 км) также свидетельствует о существовании достаточно четкой границы на всем протяжении речного профиля. Построенный композитный сейсмический разрез показывает, что, несмотря на различные методико-технологические приемы, используемые при производстве работ на суше и р. Витим, в результате обработки получены надежные фактические данные о глубинном строении земной коры, морфологии и глубине залегания границы раздела кора-мантия в сечении профиля, несмотря на сложное сочетание структурного ансамбля по всей коре.

Построенный композитный профиль позволяет сделать ряд заключений о глубинном строении области сочленения Бодайбино-Патомской складчатой системы и Ангаро-Ленской моноклизы Сибирской платформы. Дополнительно к сопоставлению привлечены полученные ранее материалы ГСЗ, включающие сейсмические разрезы на P- и S-волнах и распределения вторичных параметров среды (отношения *Vp/Vs*, коэффициент Пуассона, фиктивная скорость *K**) [39],[43]. Мощность земной коры по разрезу ОГТ составляет около 40 км в центральной части профиля и в северном его окончании и незначительно погружается (до 42-44 км) в южной части. По характеру отражения структур земной коры в разрезе можно выделить два блока – южный и северный, с границей между ними в районе пикетов 125-150 км. В северной части на разрезе выделяется лишь верхняя кора и зона перехода кора/мантия с практически горизонтальным залеганием отражающих горизонтов; в целом, этот фрагмент разреза в значительной степени коррелирует с образами большого числа платформенных разрезов, полученных методом ОГТ. Южный блок на значительной части представлен серией отражающих площадок разной контрастности и ориентировок от горизонтального залегания до наклонного с углами до 45° (участок пикетов 20-50 км), что отражает его сдвиговую структуру. Зона сочленения блоков полупрозрачная в разрезе ОГТ на глубинах 5-25 км в районе пикетов 120-140 км; на сейсмотомографическом разрезе [43] она представлена наклонной зоной пониженной скорости продольных волн с северо-запада на юго-восток с значениями в 5.8-5.9 км/с. В глубинном трассировании этой наклонной зоны сочленения блоков на уровне границы Мохоровичича отмечается зона перехода от повышенных значений граничной скорости продольных волн в 8.3-8.4 км/с на участке Ангаро-Ленской моноклизы к пониженным значениям в 8.0-8.2 км/с в складчатой Бодайбино-Патомской зоне [43]. Чрезвычайно контрастный в разрезе ОГТ на участке X=80-120 км блок по всей толще земной коры Бодайбино-Патомской складчатой зоны в сейсмическом разрезе ГСЗ отражается как блок с повышенными значениями скорости продольных волн до 6.3-6.4 км/с уже в верхней части коры; он также выражается в пониженных значениях отношений *Vp/Vs*, коэффициента Пуассона и повышенным модулем сдвига, что свидетельствует о напряженном состоянии земной коры складчатой зоны области взаимодействия с Сибирским кратоном.

Приведенная предварительная геолого-геофизическая интерпретация полученной сейсмической модели речного участка профиля 1-СБ-Восточный показывает, что она достаточно качественно отражает элементы глубинного строения на всю мощность земной коры, позволяя выделить ее структурно-вещественные неоднородности, провести их геологическую интерпретацию и надежно увязать с наземными участками сейсмических профилей 1-СБ-Восточный и 1-СБ «Батолит». На сейсмическом разрезе прослеживаются

комплексы фундамента Сибирской платформы, что позволит решить давний вопрос, вызывающий острую дискуссию – где проходит погруженная граница платформы. В этом плане вызывает интерес строение земной коры в районе пикетов 30-75 км, где в средней ее части ярко проявлена зона сейсмической полупрозрачности. Ограничивающая ее зона повышенного уровня сигнала резко поднимается на север к поверхности, а аналогичная зона в нижней коре, наоборот, опускается к границе с мантией. Аналогичное строение отмечается на восточной окончание Сибирской платформы по опорному профилю 3-ДВ [44].

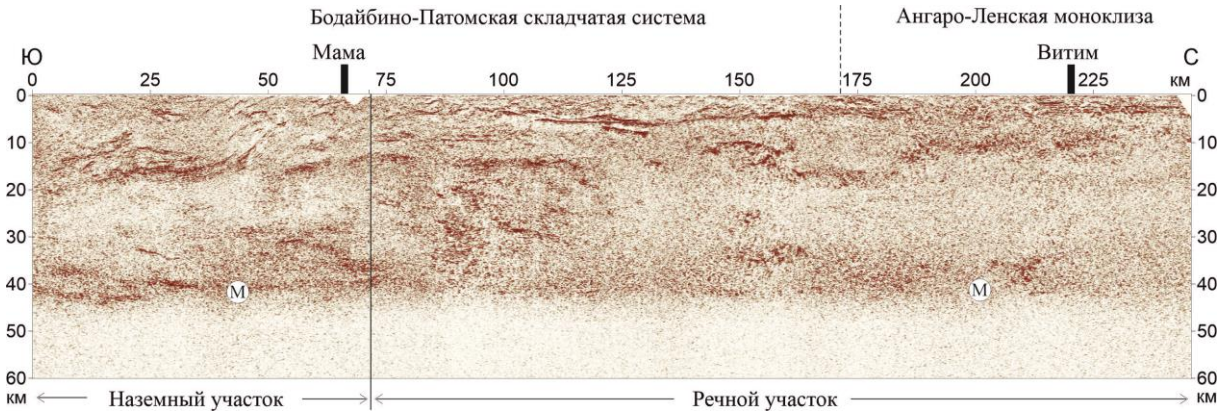


Рисунок 4.41 – Композитный (наземный и речной участки) сейсмический глубинный разрез ОГТ по опорному профилю 1-СБ-Восточный

Заключение

Результаты исследования дали возможность нарастить опорный геолого-геофизический профиль 1-СБ-Восточный речным Витимским фрагментом (170 пог. км). Получены данные о глубинном строении территории, где затруднено, в силу орфографических условий, проведение сухопутных глубинных сейсмических работ методом ОГТ. Ранее, при создании сети опорных профилей, не использовались материалы речной сейсморазведки. Проведенное исследование обосновывает возможность использования материалов речной сейсморазведки (малозатратных по сравнению с традиционными, специально организованными работами методом глубинного ОГТ) на современном этапе развития геофизической аппаратуры и методик обработки сейсморазведочных данных. Этому способствует сочетание ряда факторов. Во-первых, технология полевых сейсморазведочных исследований, созданная и реализованная специалистами ФИЦ ЕГС РАН, включает непрерывную регистрацию сейсмических сигналов, сохраняемую в виде цифровых архивов. Это позволяет формировать сейсмограммы, увеличенной во времени длительности (до 23 с), заведомо большей, чем времена пробега продольных волн, отраженных от любой из границ в земной коре вплоть до границы Мохоровичича. Во-вторых, высокая чувствительность 24-разрядной

аппаратуры «Байкал», в сочетании с сейсмоприемником GS-One, позволяет регистрировать малоамплитудные (до двух порядков ниже амплитуды сейсмического шума) сигналы отраженных волн, возбужденных относительно слабым (предназначенным для определения структуры только верхней части земной коры) пневматическим групповым источником «Малыш». Выделение столь слабых сигналов становится возможным за счет многократного (до нескольких тысяч) суммирования трасс, отсортированных при увеличенной в несколько раз площади бина.

Предложенный подход может быть использован для получения предварительной (и относительно дешевой) информации о глубинном строении земной коры по профилям, которые будут выполнены методом речной сейсморазведки ОГТ-2D. Для этого необходимо использовать сейсмическую аппаратуру с достаточной чувствительностью и регистрировать сейсмограммы с увеличенной длительностью во времени, а расстояние источник-приемник привести в соответствие с предполагаемой глубинностью исследования.

4.6 Геоэлектрические исследования в Алтае-Саянской складчатой области

4.6.1 Данные вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) для оценка вариаций геоэлектрических параметров на геодинамическом полигоне «Бельтир»

По опубликованным сейсмологическим данным за 2003-2023 гг. Чуйское землетрясение 2003 г. сопровождается длительным до сих пор не завершенным афтершоковым процессом, во время которого активные периоды чередуются с затишьями. При повышении сейсмической активности происходят сейсмические события разного энергетического класса, включая достаточно крупные, с магнитудами 4-5 и более. В качестве характеристик сейсмичности из опубликованных каталогов были получены данные о числе землетрясений и количестве выделившейся сейсмической энергии в районе исследований за каждый год.

Сейсмические события выбирались исходя из эмпирического уравнения регрессии:

$$0.9K - 3 \cdot lg\, R - 0.5 = 0, \qquad (4.3)$$

где K – энергетический класс землетрясения, R – эпицентральное расстояние (расстояние от эпицентра до пункта наблюдения ВЭЗ).

Кроме того, учитывались особенности построения сейсмологических сетей в разные годы наблюдений, так как уровень представительности каталогов землетрясений в разные годы менялся. В данной работе учитывались землетрясения с $M > 2$. В результате из каталогов землетрясений за 2003-2023 гг., в которых содержится более 23000 событий, по

приведенному выше критерию были выбраны 395 событий рисунок 4.42. Число сейсмических событий из выборки в районе исследований значительно варьируется год от года: от 0-2 событий в периоды затишья (2011, 2014-2017, 2023), до 5-13 в активные периоды (2010, 2013, 2021).

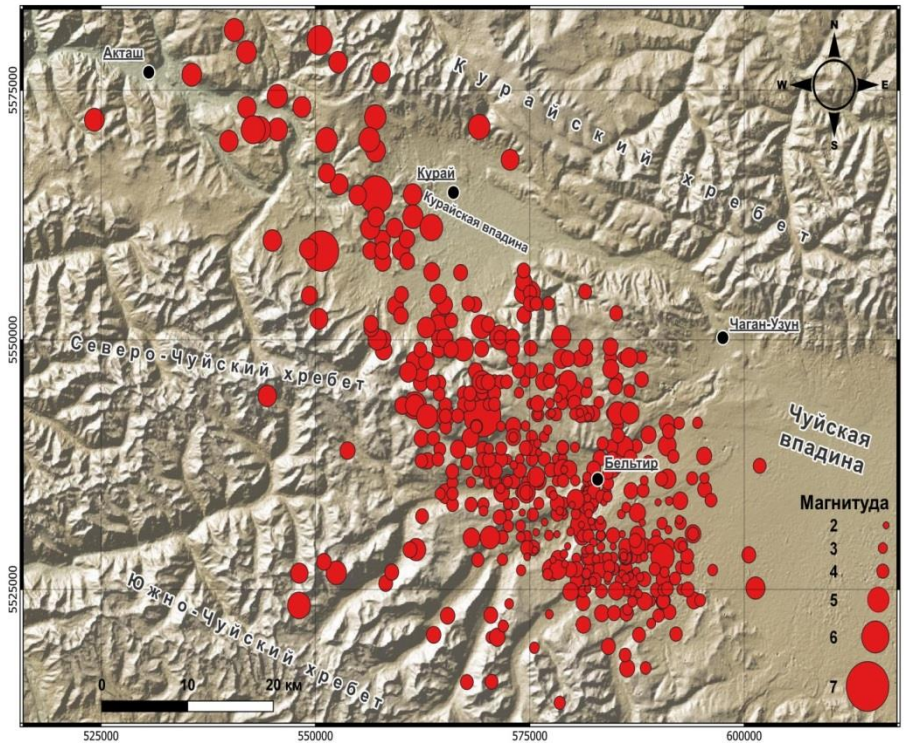


Рисунок 4.42 – Карта выбранных сейсмических событий в районе исследований за 2003-2023 гг.

Для совместного анализа с данными геоэлектрики использовано количество сейсмической энергии. Нижняя часть рисунка 4.43 характеризует динамику изменений удельного электрического сопротивления разреза с течением времени по данным ВЭЗ №9. Решение обратной задачи проводилось с широким привлечением геологических и скважинных данных для обоснования стартовой модели. Этот пункт регулярных наблюдений находится в зоне развития ММП. Хорошо видна реакция геоэлектрических горизонтов разреза на изменение сейсмической активности. В частности, периоды ее уменьшения в 2011, 2015 и 2023 годах увеличивается УЭС ММП (выделены оттенками красного цвета), и напротив, когда активность возрастает (2012, 2018-2019 гг.) ее УЭС уменьшаются.

Проведенное сопоставление данных на рисунке 4.44 демонстрирует корреляцию между сейсмической активностью и геоэлектрическими параметрами пород. Это позволяет сделать вывод о возможности применения электромагнитного мониторинга для отслеживания возможных сейсмических событий.

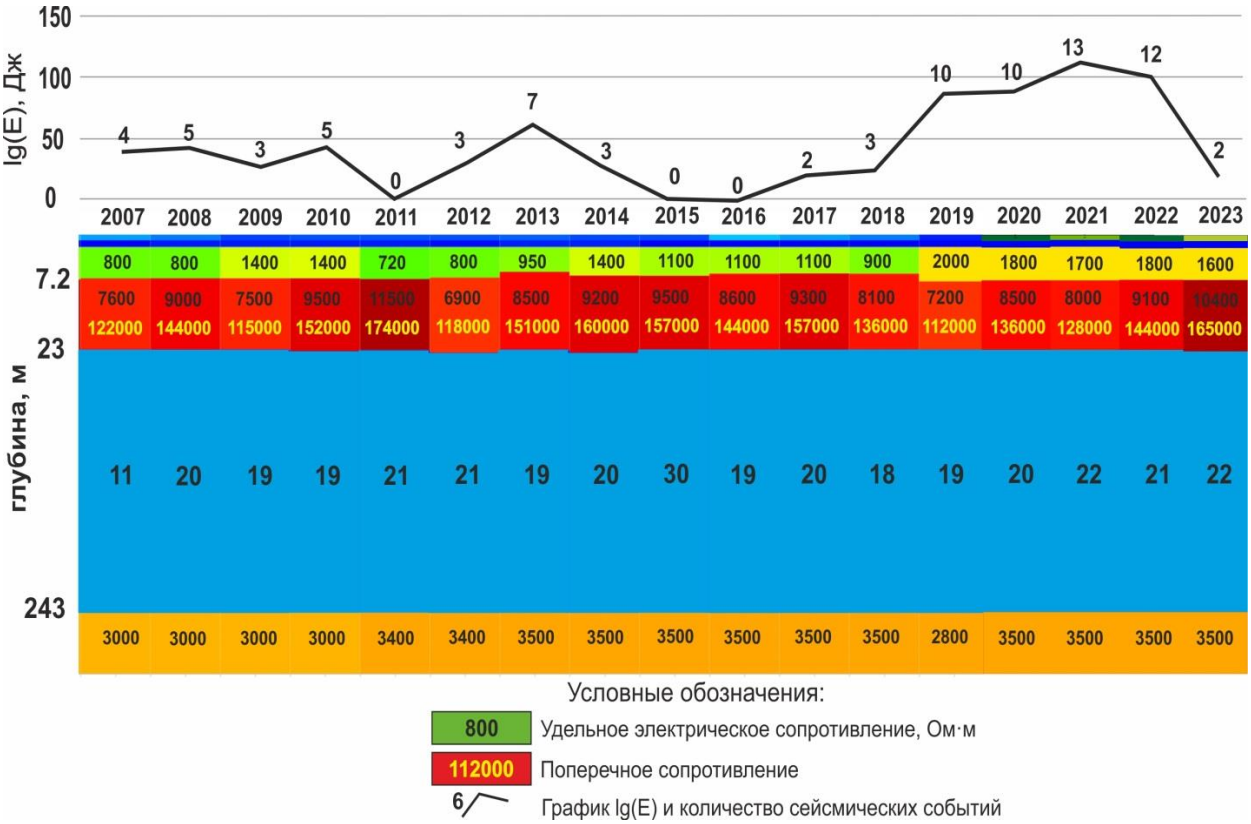


Рисунок 4.43 – Сопоставление количества сейсмической энергии с геоэлектрическими параметрами модели ВЭЗ № 9 за 2007-2023 годы измерений в районе исследования. На графике lg(E) указано количество событий

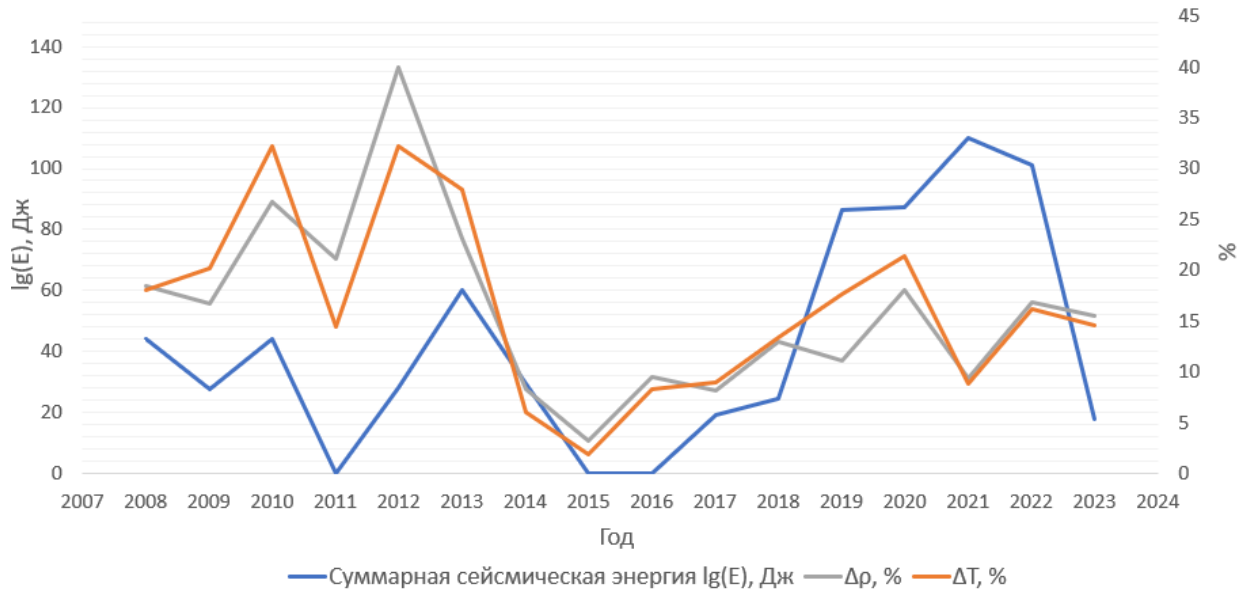


Рисунок 4.44 – Сопоставление количества сейсмической энергии с геоэлектрическими параметрами модели ВЭЗ № 9 за 2007-2023 годы

4.6.2 Изучение структур Горловской впадины соосными и многоразностными установками с установлением характера влияния вызванной поляризации на глубинное распределение геоэлектрических неоднородностей

В 2025 году сотрудниками СЕФ ФИЦ ЕГС РАН продолжены работы по изучению геоэлектрического строения Горловской впадины с целью получения характеристик разломных структур и выбора оптимальных участков для мониторинга за происходящими сейсмическими процессами. На рисунке 4.45 приведен общий план работ за 2020, 2021, 2022, 2023, 2024 и 2025 года.

Горловская впадина находится на юго-востоке Новосибирской области между двумя крупными тектоническими структурами - Колывань-Томской складчатой зоной и северо-западной окраиной Салаира. Она вытянута в северо-восточном направлении вдоль правобережья р. Обь более чем на 120 км при небольшой ширине (в среднем 8-15 км) и характеризуется чередованием антиклинальных и синклинальных складок, осложненных складчатостью более мелких порядков, таких как впадины юрского периода Доронинской и Бобровской с присутствием локальных разломов. По геологическим данным впадина по простиранию ограничена с двух сторон системой региональных дизъюнктивов и надвинута на структуры Салаира, от которого ее отделяют с юго-востока на разных участках система надвигов и разломов.

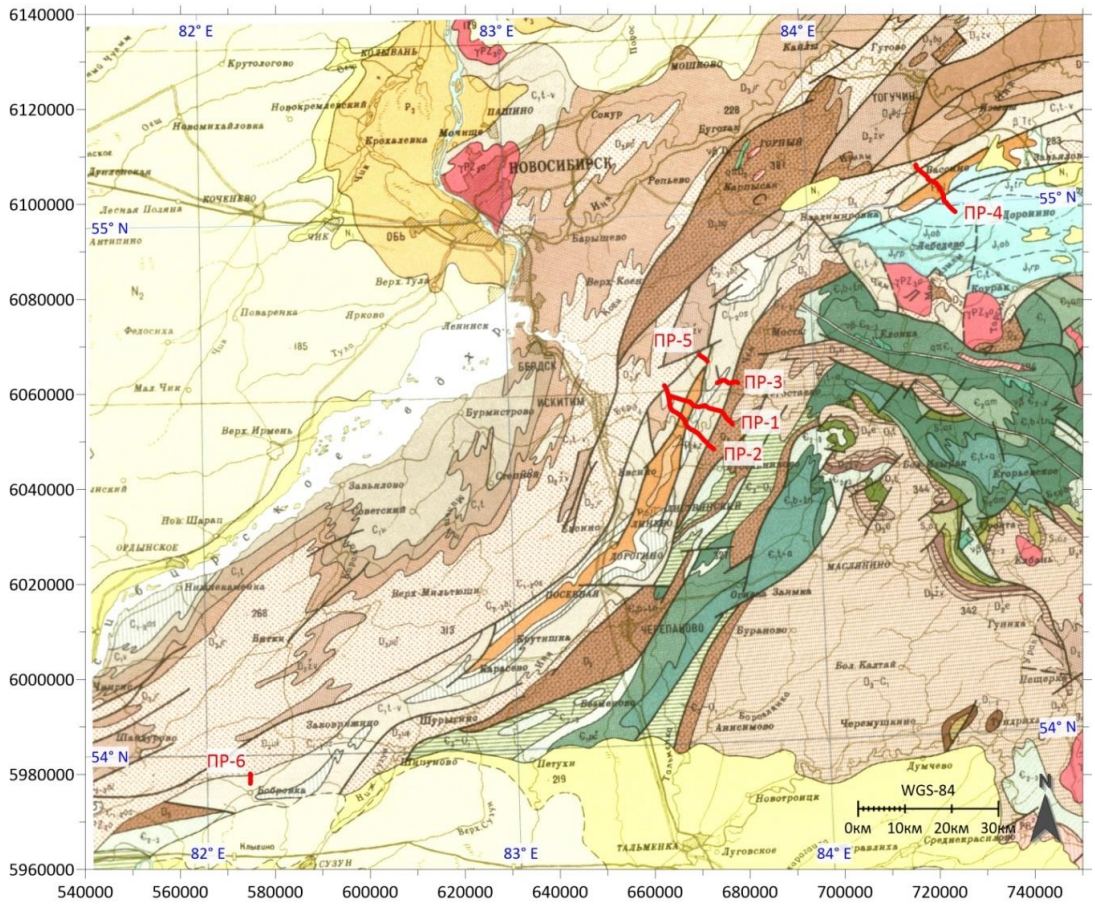


Рисунок 4.45 – Схема размещения пунктов ЗС по профилям ПР-1, ПР-2, ПР-3, ПР-5 в Горловском прогибе за 2020-2025 гг. ПР-4 и ПР-6 зоны контакта Доронинской и Бобровской впадин со структурами Горловского прогиба

Доронинская впадина

Наиболее крупная из юрских впадин района, она простирается с запада на восток примерно на 70 км, при максимальной ширине в 25 км и имеет площадь около 1000 км2, представляет собой типичный полуграбен, осадочное выполнение которого образует осложненную разломом структуру.

Детальный план полевых работ 2025 года по профилю ПР-4 в север-западном фрагменте зоны контакта Дорониской впадиной с породами пермского периода Горловской котловины приведен на рисунке 4.46. Проведена детальная съемка как соосными, так и дипольными установками (Q-q). Данный комплексный вид регистрации процессов становления поля был реализован с целью минимизации влияния эффекта вызванной поляризации. Детальный профиль с соосными и дипольными установками выполнялся в следующих режимах регистрации: размер генераторной петли составлял 100х100 м., размер приемной петли 50х50 м. Ток в генераторном контуре двухуровневый, минимальный порядка 6.0 А, максимальный 20 - 21 А. Объем работ 2025 года составил 57 пункта регистраций.

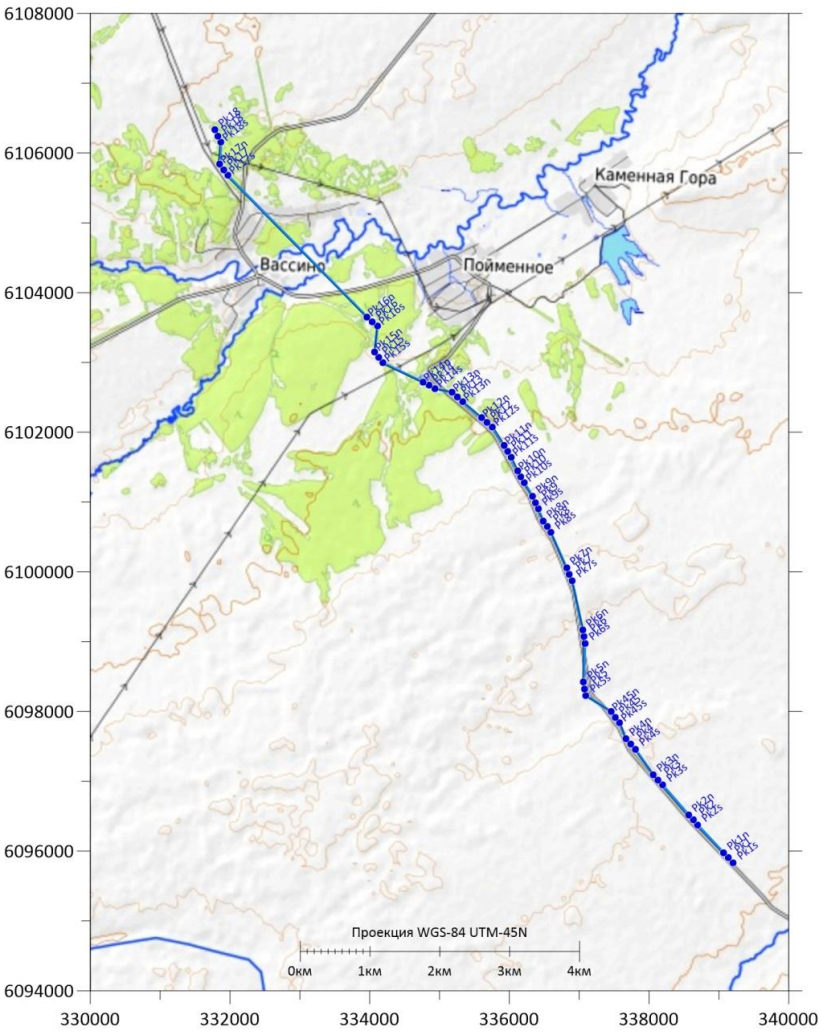


Рисунок 4.46 – Схема размещения пунктов ЗС, профиль ПР-4 (полевые работы 2025 года)

Интерпретация всего объема полевого материала

Обработка и интерпретация данных осуществлялась с помощью программных комплексов моделирования и инверсии EMS и ZondTEM1D.

На рисунке 4.47 приведены все первичные результаты регистраций становления поля во всех пунктах, как при соосных наблюдениях, так и дипольных.

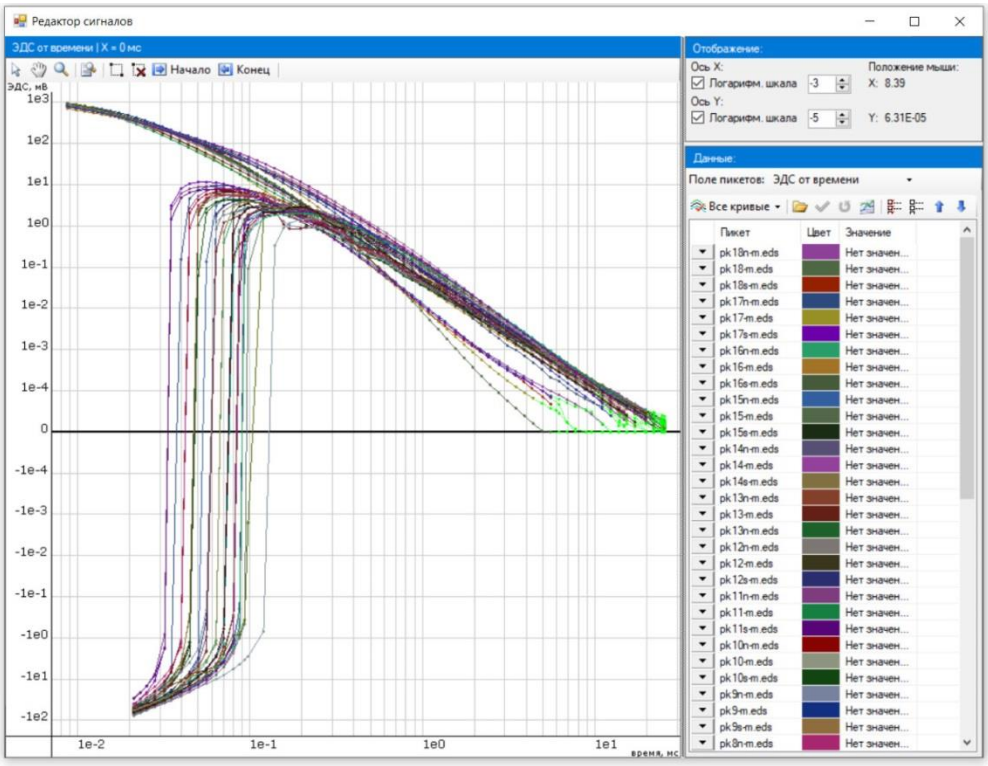


Рисунок 4.47 – Кривые становления электромагнитного поля с установкой ГК - 100х100 м, ИК - 50х50 м. Индекс кривой - номер пикета

Анализ первичной информации позволяет сделать следующие выводы:

1. Современная цифровая аппаратура и методика проведения работ позволили достичь уровней регистрации сигнала переходных процессов до значений до 2.0 × 10-5 мВ.

2. Временной интервал регистрации переходных процессов составляет от 0.01 мс до 100 мс.

Проведена обработка, рассчитаны и построены кривые ρ_τ (рисунок 4.48). Кривые ρ_τ характеризуют разную глубинность исследования и соответственно получены разные геоэлектрические модели.

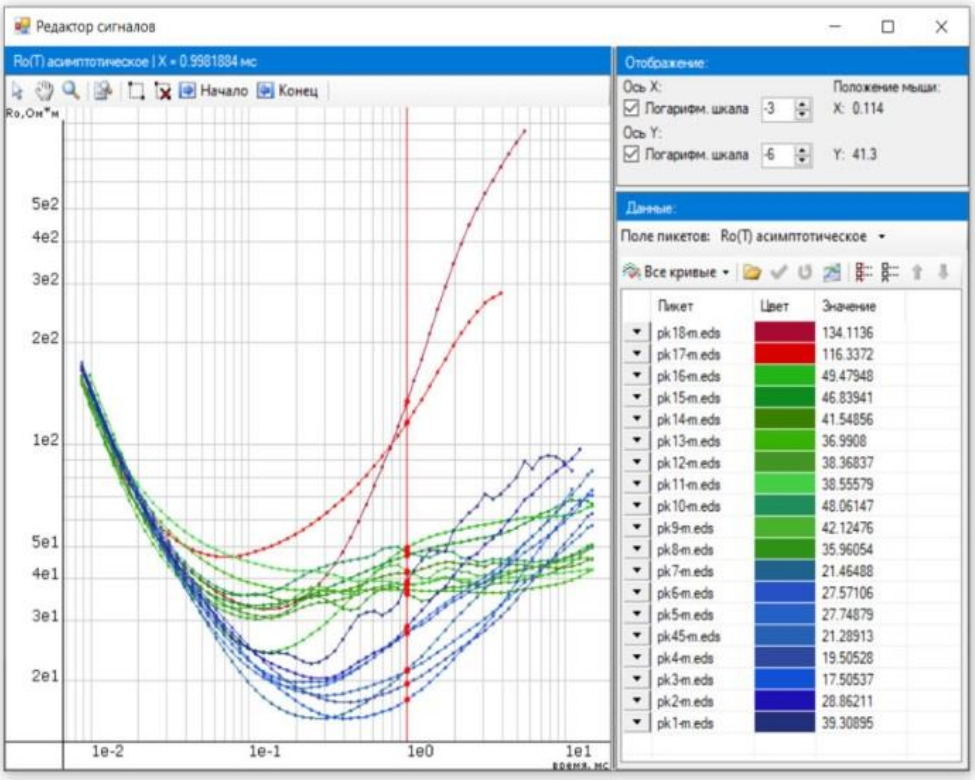


Рисунок 4.48 – Трансформанты сигнала - $\rho_\tau(t)$, регистрация установкой ГК - 100х100м, ИК -50х50 м. Индекс кривой - номер пикета

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

Анализ предварительной обработки (расчет $\rho_\tau(t)$) подтверждает правильность выбранных параметров регистрации, кривые $\rho_\tau(t)$ имеют явно выраженную правую восходящую ветвь с устойчивым выходом на опорный горизонт. Трансформанта $\rho_\tau(t)$ пикета ПК11 не имеет восходящей правой части, что говорит о низкоомных значениях УЭС глубинных горизонтов разреза.

Построение геоэлектрических моделей

По всем данным ЗС были получены геоэлектрические параметры в результате инверсии, построены геоэлектрические модели.

Примеры характерных геоэлектрических моделей по данным ЗС профиля ПР-4.

На рисунке 4.49 приведена геоэлектрическая модель для пикета р45 центральный участок юрских отложений (J_1tr). В результате инверсии получена десятислойная модель. Значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) в целом низкие и изменяются в интервалах от 10.42 Ом·м (четвертый низкоомны горизонт) до 109.5 Ом·м опорный горизонт пород кембрия ($\epsilon_{1\text{-}3}$).

На рисунке 4.50 приведена геоэлектрическая модель по данным ЗС (пикет р11) на участке профиля с породами пермского периода (P_1 bI). Модель соответствует низкоомным значениям УЭС, правая ветвь низкоомная, значения УЭС порядка 22.63 Ом·м.

На рисунке 4.51 приведена геоэлектрическая модель по данным ЗС (пикет р17) на участке профиля с породами девонского периода (D_3). Явно выражен опорный горизонт с высокоомными уровнями значений УЭС порядка 1793 Ом·м.

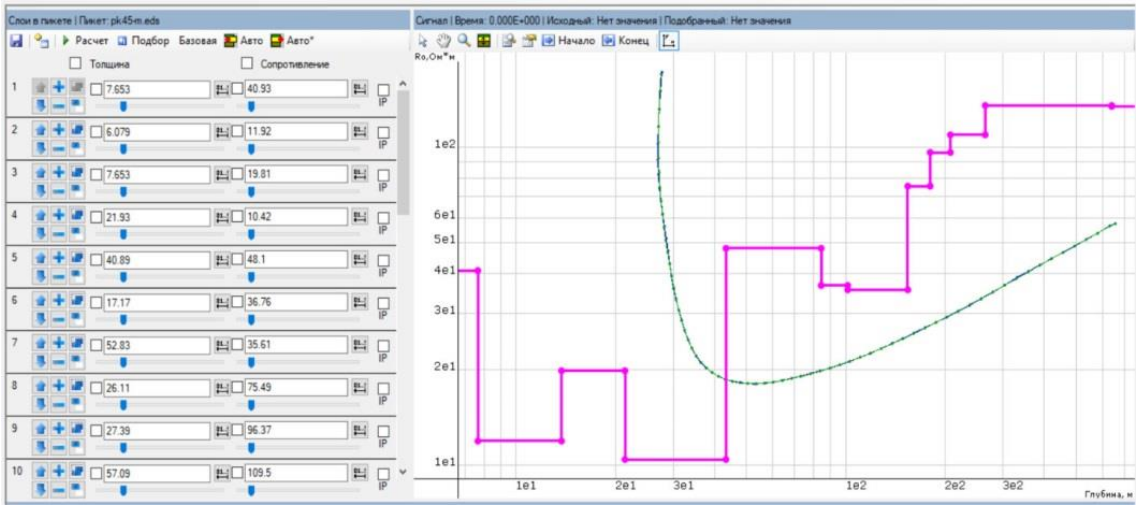


Рисунок 4.49 – Геоэлектрическая модель пикета р45

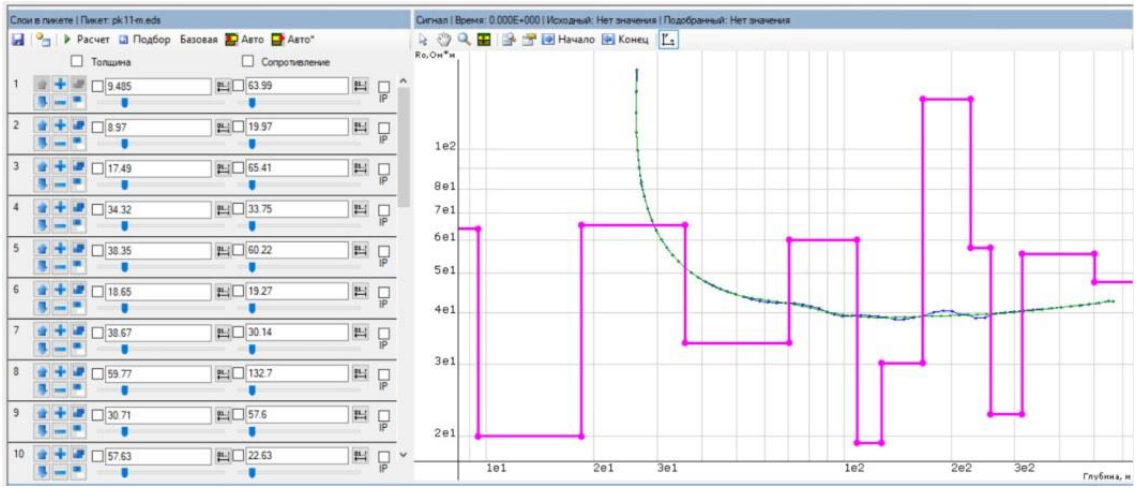


Рисунок 4.50 – Геоэлектрическая модель пикета р11

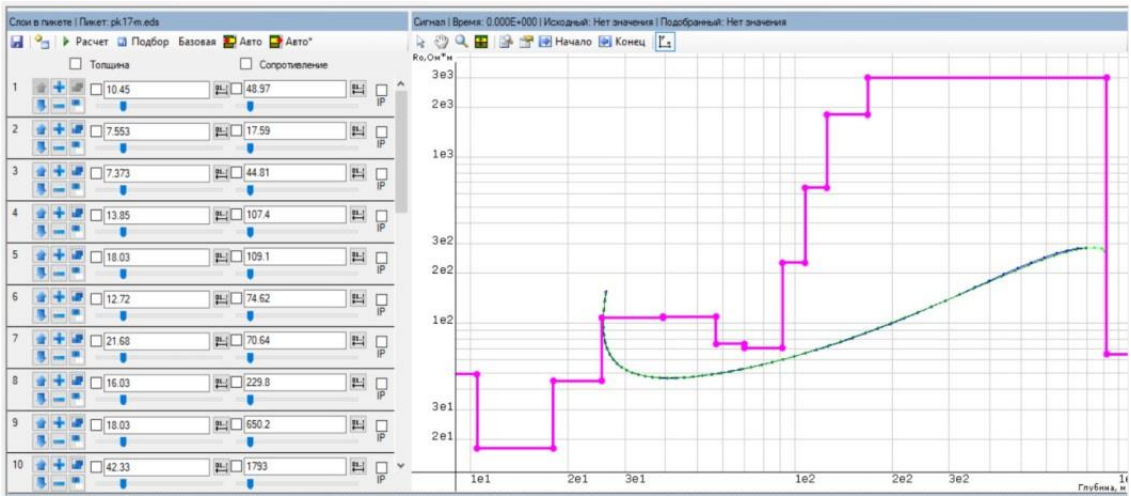


Рисунок 4.51 – Геоэлектрическая модель пикета р17

Построение геоэлектрического разреза

Геоэлектрический разрез по профилю ПР-4 (рисунок 4.52). Распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) варьируется в широком диапазоне от 10.0 Ом·м до 5000-8000 Ом·м.

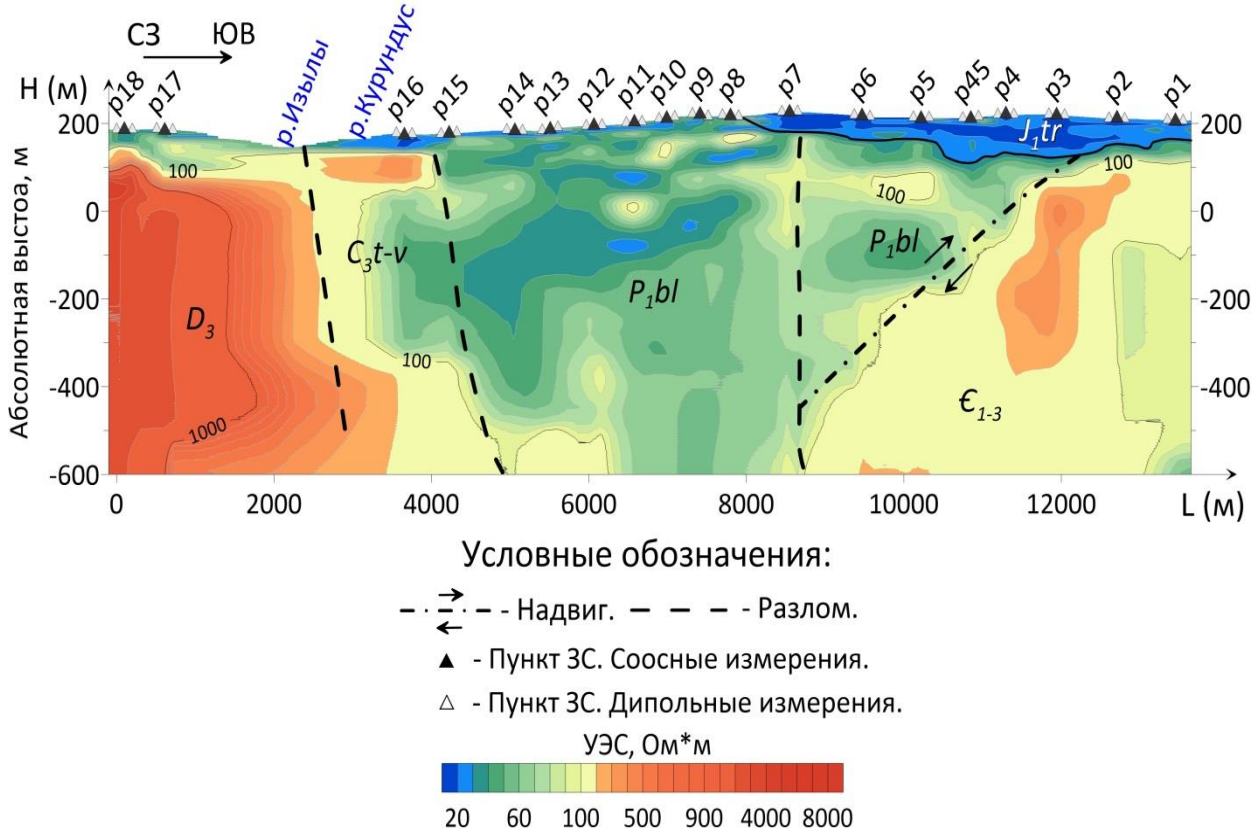


Рисунок 4.52 – Геоэлектрический разрез по профилю ПР-4. Измерения 2025 г.

Рассмотрим наиболее значимые результаты. По данным зондирований р15 - р18, в северо-западном участке профиля выделяются две области резкого изменения значений УЭС. Первая область выявлена в районе пикета р15, УЭС изменяется от 10 – 80 Ом·м до

УЭС 100 – 500 Ом·м. Эта область интерпретируется как зона контакта пород пермского периода P_1 bI) с породами карбона (C_3t-v). Вторая зона увеличения УЭС от значений 100 – 500 Ом·м до 4000 – 8000 Ом·м интерпретируется как зона контакта пород карбона (C_3t-v) с породами девонского периода (D_3). Данные геоэлектрические особенности разреза согласуются с априорными геологическими данными о наличии в этом месте разломов, ограничивающих впадину со стороны Колывань-Томской складчатой зоны. На разрезе разломы показаны штрих-пунктиром.

Центральный участок профиля p7 – p15 выполнен породами с УЭС в интервале 10.0 - 100 Ом·м интерпретируется как отложения пермского периода (P_1 bI). Общая мощность данных отложений превышает 800 метров. Особо стоит отметить низкооомные горизонты со значениями УЭС в10 – 20 Ом·м в интервале абсолютных высотных отметок от 200 метров до -200 метров. Эти отложения по значениям УЭС соответствует залеганию нижнепермских угольных пластов, что требует дополнительных исследований вплоть до проведения площадных работ ЗС.

Юго-восточный участок профиля p1 – p7 выполнен двумя геологическими структурами, которые слагают собственно породы Доронинской впадины юрского периода (J_1tr). Мощность отложений находится в интервале 50 – 100 метров, значения УЭС варьируются в интервале 10 – 30 Ом м. Вторую геологическую структуру данного участка профиля можно охарактеризовать как надвиг пород пермского периода (P_1 bI) на структуры Салаира выполненного породами палеозоя (PZ) кембрийского, ордовикского и силурийского периодов не расчленены. Эта зона содержит тектонические структуры типа надвиг и субвертикальный разлом.

В результате интерпретации выделены как проводящие зоны, так и высокоомные участки профиля ПР-4. Показана высокая степень корреляции основных геоэлектрических структур (тектонических нарушений) с геологическими данными (Геологическая карта N 44-18), рисунок 4.42).

Бобровская впадина

Бобровская впадина расположена на крайнем юго-западе КТСЗ. Она представляет собой субширотно ориентированную синклиналь (20 км в длину и 5–10 км в ширину), выполнена однотипным комплексом юрских терригенных пород и перекрытые осадочным, чехлом мощностью несколько сотен метров.

Детальный план полевых работ 2025 года по профилю ПР-6 приведен на рисунке 4.53. Проведена детальная съемка как соосными, так и дипольными установками (Q-q). Данный комплексный вид регистрации процессов становления поля был реализован с целью минимизации влияния эффекта вызванной поляризации. Детальный профиль с

соосными и дипольными установками выполнялся в следующих режимах регистрации: размер генераторной петли составлял 100х100 м., размер приемной петли 50х50 м. Ток в генераторном контуре двухуровневый, минимальный порядка 6.0 А, максимальный 20 – 21 А. Объем работ 2025 года составил 14 пункта регистраций.

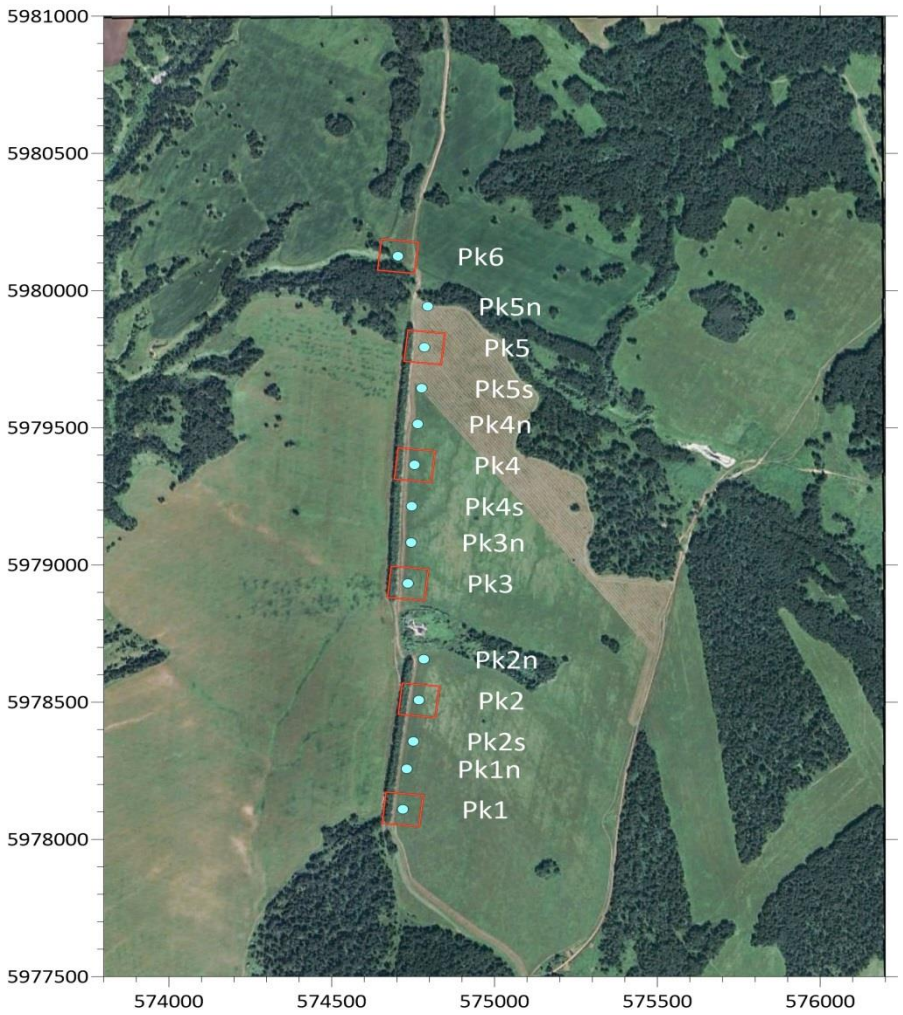


Рисунок 4.53 – Схема размещения пунктов ЗС, профиль ПР-6 (полевые работы 2025 года)

Интерпретация всего объема полевого материала

Обработка и интерпретация данных осуществлялась с помощью программных комплексов моделирования и инверсии EMS и ZondTEM1D.

На рисунке 4.54 приведены все первичные результаты регистраций становления поля во всех пунктах, как при соосных наблюдениях, так и дипольных.

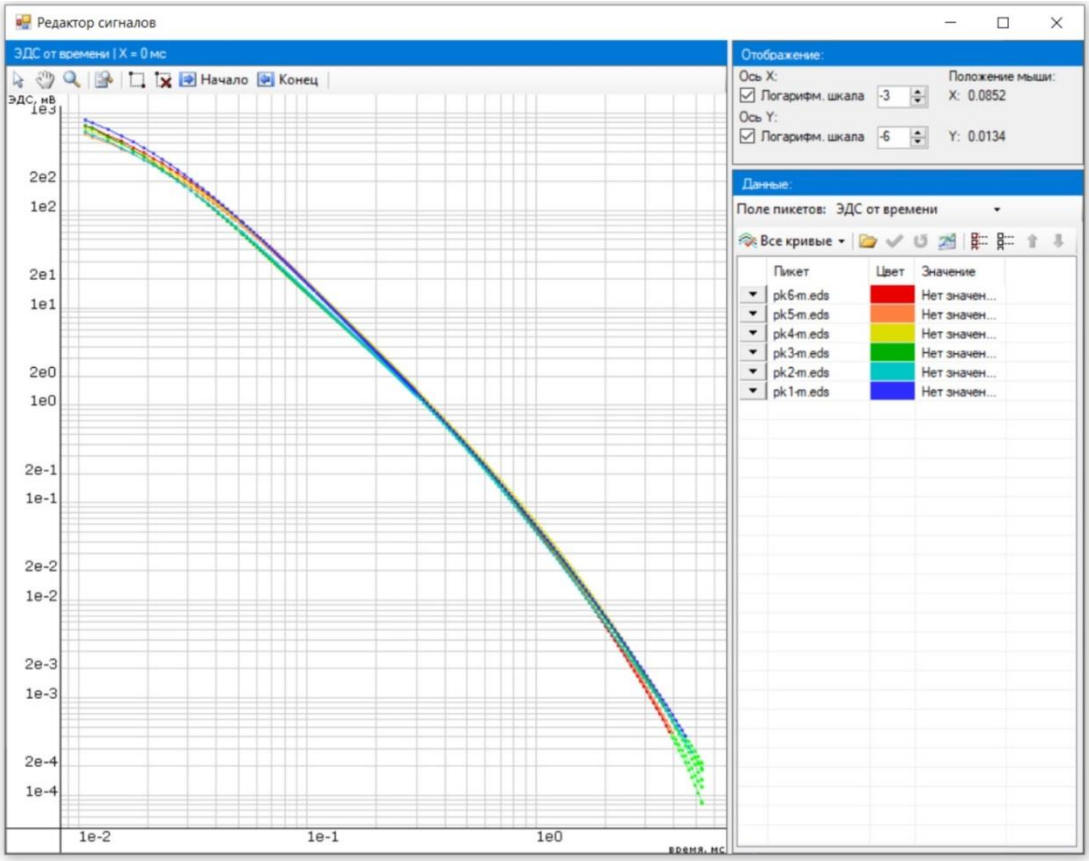


Рисунок 4.54 – Кривые становления электромагнитного поля с установкой ГК -100х100 м, ИК - 50х50м. Индекс кривой - номер пикета

Анализ первичной информации позволяет сделать следующие выводы:

1. Современная цифровая аппаратура и методика проведения работ позволили достичь уровней регистрации сигнала переходных процессов до значений до 2.0×10^{-5} мВ.

2. Временной интервал регистрации переходных процессов составляет от 0.01 мс до 100 мс.

Проведена обработка, рассчитаны и построены кривые ρ_τ рисунок 4.55. Кривые ρ_τ характеризуют разную глубинность исследования и соответственно получены разные геоэлектрические модели.

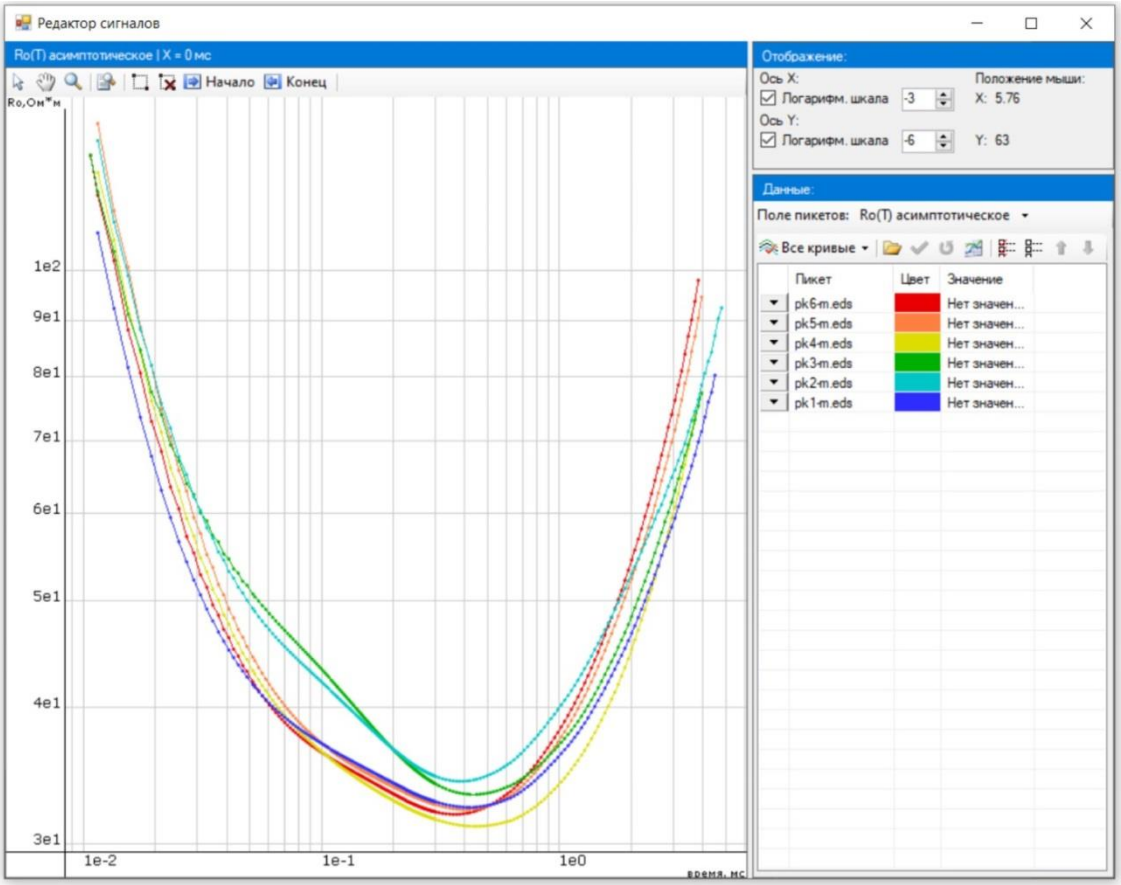


Рисунок 4.55 – Трансформанты сигнала - $\rho_\tau(t)$, регистрация установкой ГК - 100х100м, ИК - 50х50 м. Индекс кривой - номер пикета

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

Анализ предварительной обработки (расчет $\rho_\tau(t)$) подтверждает правильность выбранных параметров регистрации, кривые $\rho_\tau(t)$ имеют явно выраженную правую восходящую ветвь с устойчивым выходом на опорный горизонт.

Построение геоэлектрических моделей

По всем данным ЗС были получены геоэлектрические параметры в результате инверсии, построены геоэлектрические модели.

Примеры характерных геоэлектрических моделей по данным ЗС профиля ПР-6.

На рисунке 4.56 приведена геоэлектрическая модель для пикета Pk2 южного фрагмента профиля ЗС Бобровской синклинальной впадины. В результате инверсии получена семислойная модель. Значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) в целом низкие и изменяются в интервалах от 17.53 Ом·м (пятый низкоомны горизонт) до 119.5 Ом·м для современных четвертичных отложений. Кровля опорного высокоомного

горизонта пород девонского возраста (D_3) со значениями УЭС более 1000 Ом·м залегает на глубинах порядка 179 метров.

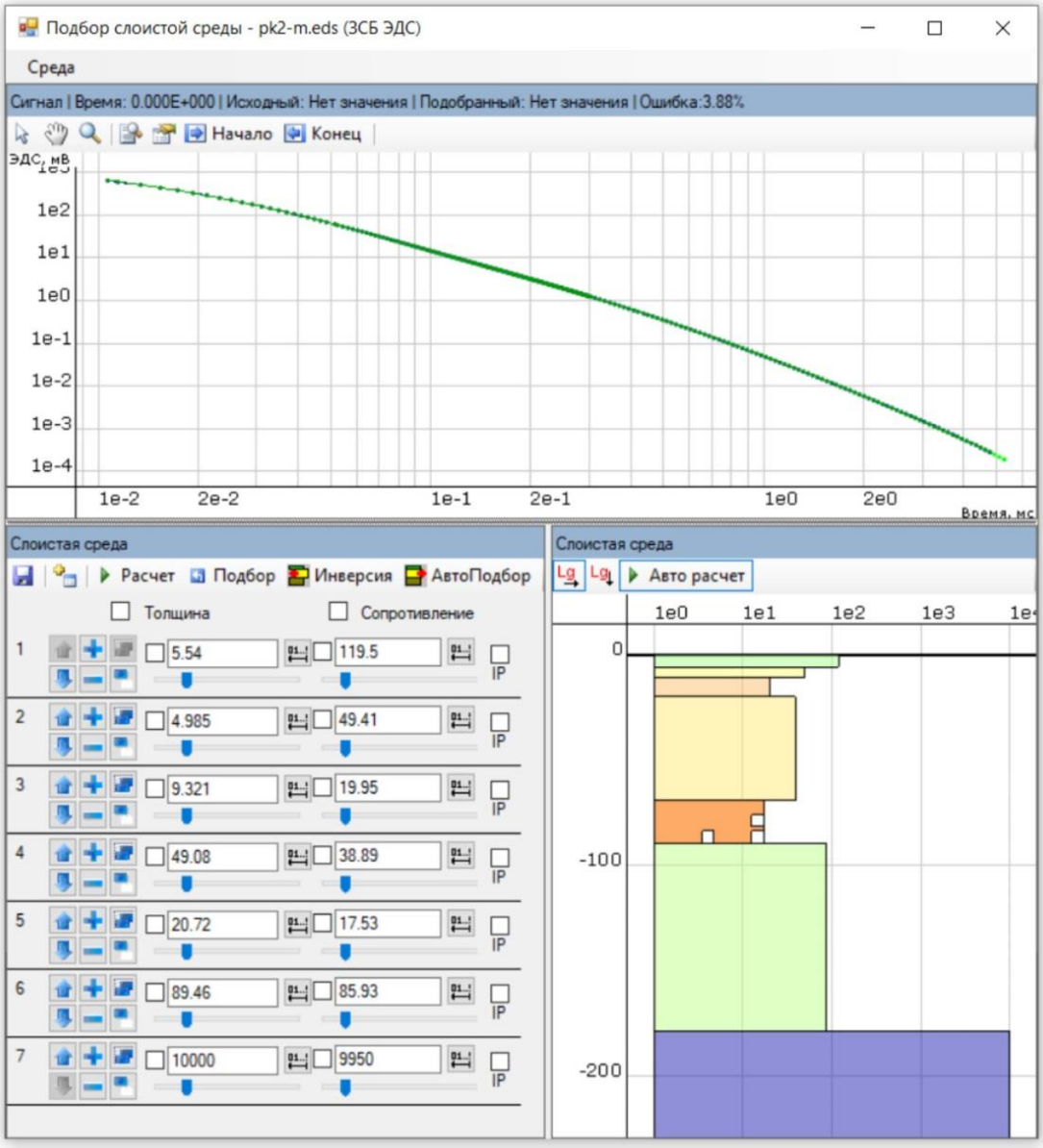


Рисунок 4.56 – Геоэлектрическая модель для пунктов Pk2

На рисунке 4.57 приведена геоэлектрическая модель для пикета Pk6 северного фрагмента профиля ЗС Бобровской синклинальной впадины. В результате инверсии получена семислойная модель. Значения удельных электрических сопротивлений (УЭС) в целом низкие и изменяются в интервалах от 8.298 Ом·м (пятый низкоомны горизонт) до 66.5 Ом·м для современных четвертичных отложений. Кровля опорного высокоомного горизонта пород девонского возраста (D_3) со значениями УЭС более 1000 Ом·м залегает на глубинах порядка 94 метров.

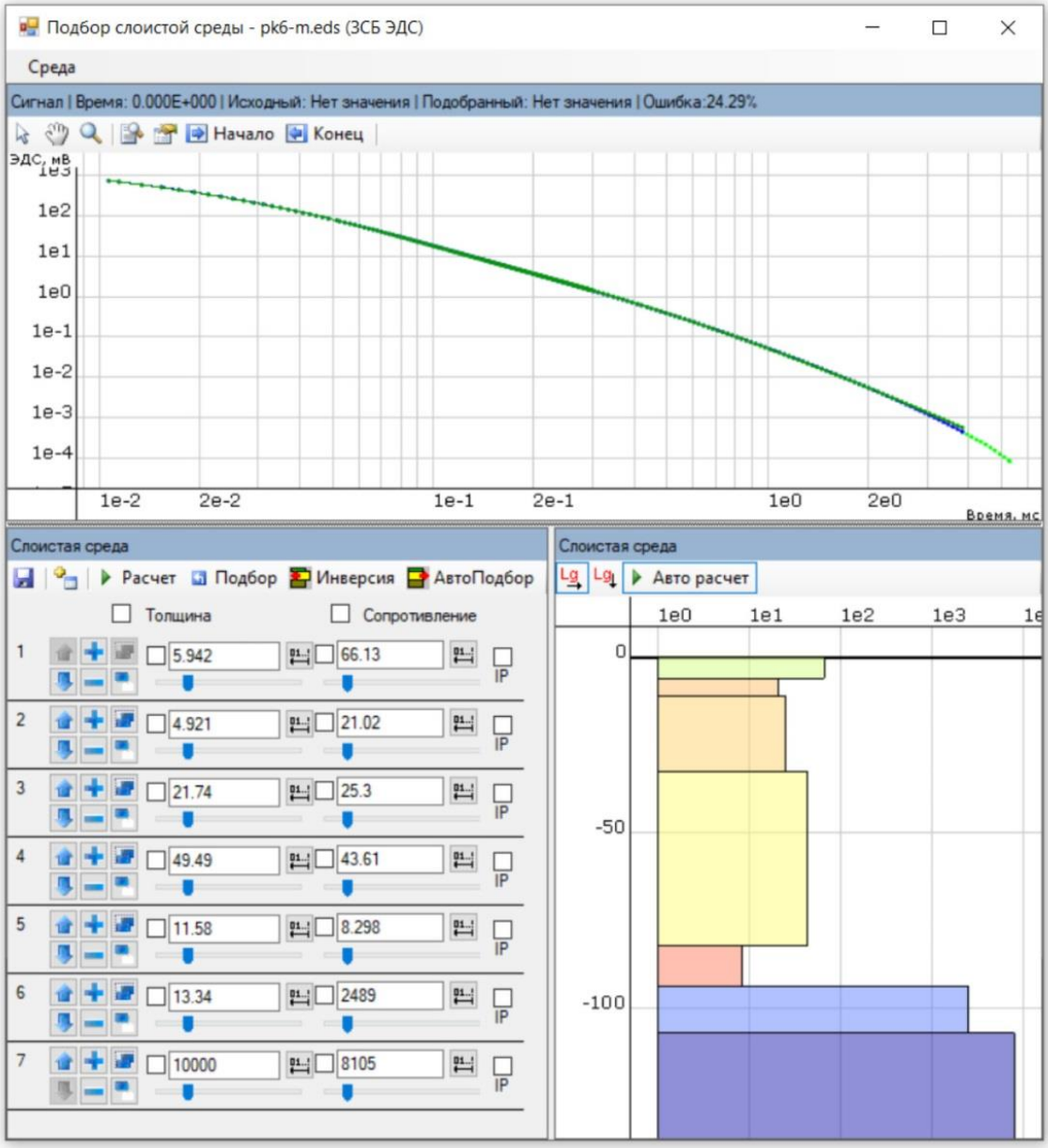


Рисунок 4.57 – Геоэлектрические модели для пунктов Pk6

Построение геоэлектрического разреза

Построен геоэлектрический разрез по профилю ПР-6 (рисунок 4.58). Распределение удельного электрического сопротивления (УЭС) варьируется в широком диапазоне от 10.0 Ом·м до 8000–9000 Ом·м.

В результате интерпретации выделены как хорошо проводящие горизонты нижней и средней юры (J_{1-2}) со значениями УЭС лежащих в интервале от 10 Ом·м до 50 Ом·м, так и горизонт нижнего карбона (C_1) интервал значений УЭС составляет пределы от 50 Ом·м до 1000 Ом·м. Опорный горизонт выполнен породами верхнего девона (D_3) со значениями УЭС более 1000 Ом·м.

Показана высокая степень корреляции основных геоэлектрических структур с геологическими данными (Геологическая карта N 44-18).

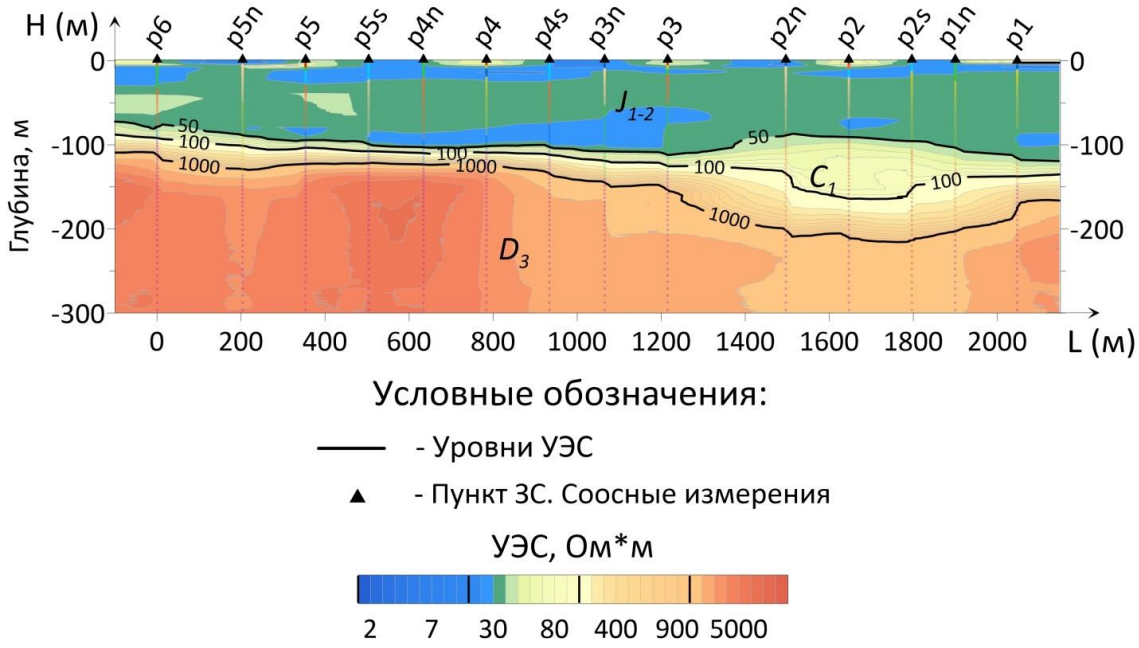


Рисунок 4.58 – Геоэлектрический разрез по профилю ПР-6

Анализ значений УЭС позволяет сделать следующие выводы:

– Достигнутая глубинность составляет ~ 300 метров;

– Мощность юрских отложений находится в интервале от 75 метров до 110 метров;

– Кровля опорного высокоомного горизонта повышается с глубин порядка 200 метров в северном направлении до значений глубин порядка 100-110 метров.

Выводы

В 2025 году выполнен значительный объем полевых наблюдений в зонах сопряжения Горловского прогиба с соседними региональными геологическими структурами.

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

Выполнены детальные профиля в районах мощных юрских отложений Доронинской и Бобровской впадин. Выявлены разломные контакты прибортовых структур. Локализованы разломы типа надвигов и тектонические уступы.

За счет измерения слабых сигналов на поздних временах становления достигнута максимальная глубинность метода ЗС в геоэлектрических условиях впадин и получены глубины до фундамента на всех участках.

4.6.3 Объем полевых электроразведочных исследований, выполненных в 2025 г.

Горловский прогиб

– Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Профильные работы (ПР-4), в зоне контакта с Доронинской впадиной.

Объем работ 114 физических наблюдений.

Район работ: Новосибирская область, Тогучинский район.

– Метод зондирования становлением поля (ЗС).

Профильные работы (ПР-6), Бобровская впадина.

Объем работ 28 физических наблюдений.

Район работ: Новосибирская область, Сузунский район.

5 Сведения о внешнем взаимодействии

5.1 Перечень действовавших в отчетном году соглашений/договоров об оказании возмездных услуг

В 2025 силами СЕФ ФИЦ ЕГС РАН выполнялись специальные инженерные изыскания по сейсмическому микрорайонированию площадки строительства объекта капитального строительства: «Создание принципиально нового перспективного источника, превосходящего по техническим характеристикам действующие и проектируемые международные источники синхротронного излучения, г. Протвино, Московская область» (№ 24-СИЛА-2024/ЗС от 18.11.2024). Сумма контракта – 1800 тыс. руб. (включая НДС), из них в 2025 г. выплачено 900 тыс. руб. Заказчик: общество с ограниченной ответственностью «Центр инжиниринга зданий и сооружений» (ООО «ЦИЗИС»).

Работы выполнены в соответствии с Техническим заданием, в полном объеме и в установленные сроки. А именно: подготовлены и установлены для непрерывной регистрации сейсмических сигналов в течение 70-ти дней три комплекта широкополосной аппаратуры Trillium Compact 120s и регистраторов Centaur в сооружениях, подготовленных Заказчиком. Полученные материалы с использованием собственного зарегистрированного программного обеспечения преобразованы в сейсмограммы смещений и переданы Заказчику. Однако в связи с необходимостью прохождения государственной экспертизы результатов исследований, сроки приемки работ (и окончательного расчета) перенесены на 2-й квартал 2026 г.

Кроме этого, в 2025 г. выполнялись исследования 2-го (заключительного) года по проекту гранта РНФ «Разработка методики контроля раскрытия трещины в теле плотины СШ ГЭС» (соглашение РНФ №24-27-00145 от 29.12.2023, руководитель д.г.-м.н. В.С. Селезнев). Сумма на 2025 г. – 1500 тыс. руб.

6 Показатели производственной деятельности

6.1 Использование результатов в научной работе

6.1.1 Публикации с упоминанием УНУ

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Заможняя Н.Г., Каширский А.Ю., Кунгурцев Л.В. Построение разрезов земной коры до границы Мохоровичича по малоамплитудным отраженным волнам речной сейсморазведки методом ОГТ-2D (р. Витим, зона сочленения Ангаро-Ленской моноклизы Сибирской платформы и Бодайбино-Патомской складчатой системы) // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 1. – С. 109–123. – DOI: 10.15372/GIG2024150.

   Liseikin A.V., Seleznev V.S., Soloviev V.M., Zamozhnyaya N.G., Kashirsky A.Yu., Kungurtsev L.V. Construction of Earth crust sections down to the Moho boundary based on low amplitude reflected waves of river seismic survey using CPD-2D method (Vitim River, junction zone of the Angara-Lena monocline of the Siberian platform and the Bodaibo-Patom folded system) // Russian Geology and Geophysics. – 2025. – V. 66, N 1. – P. 97–110. – DOI: 10.2113/rgg20244769.
2. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Дежнев В.Э., Лопатин Г.А. Разработка сейсмических методов для мониторинга геомеханического состояния Саяно-Шушенской ГЭС // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 2, – С. 247–256, – DOI: 10.15372/GiG2024155. – EDN: ESRESM.

   Kokovkin I.V., Seleznev V.S., Dezhnev V.E., Lopatin G.A. Development of seismic methods for monitoring the geomechanical condition of the Sayano-Shushenskaya HPP // Russian Geology and Geophysics. – 2025. – V. 66, N 2. – P. 224–233, DOI: 10.2113/RGG20244795
3. Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Кашубина Т.В., Галева Н.А., Шенмайер А.Е. Особенности глубинного строения верхней коры и минерагения в створе Сихотэ-Алиньского фрагмента опорного геолого-геофизического профиля 8-ДВ // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 11. – С. 1418-1433. – DOI:10.15372/GiG2025145.

   Solovyev V.M., Sal’nikov A.S., SeleznevV.S., Kashubina T.V., Galeva N.A., Shenmaier A.E. Deep structure of the upper crust and minerageny in the Sikhote-Alin fragment of the 8-DV reference geological-geophysical profile // Russian Geology and Geophysics. – V.66, N.11. – P. 1382–1396. – DOI: 10.2113/RGG20254901.
4. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э., Уколов Д.А. Оценка возможности выявления трещин в плотине Саяно-Шушенской ГЭС на основе детального анализа её собственных частот // Российский сейсмологический журнал. – 2025. – Т. 7, № 4. – С. 27–36. – DOI: 10.35540/2686-7907.2025.4.04. – EDN: KPZVNU.
5. Макаров А.А., Селезнев В.С. Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилюйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 365–375. – DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375
6. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э., Уколов Д.А. Дистанционное изучение плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе анализа частот собственных колебаний // Современное строительство и архитектура. – 2025. – Т. 66, №11. – DOI: 10.60797/mca.2025.66.5

Издания ФИЦ:

1. Макаров А.А., Куляндина А.С., Шибаев С.В., Селезнев В.С., Туктаров Р.М., Старкова Н.Н., Наумова А.В., Пересыпкин Д.М. Результаты детального сейсмического мониторинга. Техногенная сейсмичность угольной шахты «Денисовская» (Южная Якутия) // Землетрясения России в 2023 году. – Ежегодник. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 145–149.

Доклады на международных и всероссийских конференциях:

1. Макаров А.А., Селезнев В.С. Спектральные характеристики проходческих комбайнов (на примере шахты «Денисовская») // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 57.
2. Селезнев В.С. Дистанционный контроль состояния турбин ГЭС // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 83.
3. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Елагин С.А., Шенмайер А.Е. О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология. Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». – (г. Новосибирск, 21-22 мая 2025 г.) – Новосибирск: СГУГиТ, 2025. – Т. 2, № 3 – С. 132–139. – DOI: 10.33764/2618-981X-2025-2-3-132-139.
4. Коковкин И.В., Уколов Д.А, Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э. Возможность выявления структурных нарушений в бетонной плотине на основе мониторинга собственных частот // Современные техника и технологии в научных исследованиях: Сборник материалов XVII Международной конференции молодых ученых и студентов. (Бишкек, Киргизская Республика, 23-25 апр. 2025 г.) – Бишкек: НС РАН, 2025. – С. 208–212.
5. И.В. Коковкин, В.С. Селезнев, Е.Э. Пархоменко, Уколов Д.А. Возможность дистанционного изучения физического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Гидроэлектростанции в XXI веке. Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции. Саяногорск; Черемушки, 2025. С. 215-223.

6.1.2 Использование данных УНУ в темах НИР

1. Данные УНУ СЕФ ФИЦ ЕГС РАН использовались в следующих темах НИР:

2. № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору» (руководитель д.г.-м.н. В.С. Селезнев);

3. № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений» (руководитель д.т.н. А.Ф. Еманов);

4. № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» (руководитель д.т.н., чл.-корр. РАН А.А. Маловичко);

5. № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных» (руководитель к.т.н. П.Г. Бутырин).

6.1.3 Результаты интеллектуальной деятельности (Форма_РИД)

В 2025 г. не регистрировались.

6.1.4 Защищенные в отчетном году докторские и кандидатские диссертации, подготовленные с использованием УНУ

В 23.12.2025 г. директором СЕФ ФИЦ ЕГС РАН А.В. Лисейкиным защищена диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.6.9 – Геофизика по теме: «Обнаружение разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определение структуры земной коры с использованием малоамплитудных сейсмических сигналов».

6.2 Структура кадрового состава

Сведения о кадровом составе филиала приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Численность сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН на конец 2025 г.

Показатель	**Количество сотрудников по штатному расписанию, чел.**		**Количество сотрудников по договору подряда, чел.**
	По основному месту работы	**Совместители**	
1	2	3	4
Научные работники, в т.ч.:	**9**	**0**	**0**
— доктора наук, из них:	1	0	0
молодых, до 40 лет включительно:	0	0	0
— кандидаты наук, из них:	1	0	0
молодых, до 35 лет включительно:	0	0	0
— без ученой степени:	7	0	0
Инженерно-технический персонал, в т.ч.:	**15**	**4**	**0**
— доктора наук, из них:	0	1	0
молодых, до 40 лет включительно:	0	0	0
— кандидаты наук, из них:	0	0	0
молодых, до 35 лет включительно:	0	0	0
— без ученой степени:	15	3	0
ИТОГО:	**24**	**4**	**0**

6.3 Финансовые затраты на содержание УНУ

Сведения о финансовых затратах филиала на содержание УНУ приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Финансовые затраты СЕФ ФИЦ ЕГС РАН на содержание УНУ в 2025 г.

№	Вид затрат	Тыс. руб.
1	Командировки	133.2
2	Ремонт научного оборудования	542.0
3	Метрологическое обеспечение научного оборудования	-
4	Аттестация методик измерений, используемых в работе	-
5	Услуги сервисных центров по обслуживанию научного оборудования	-
6	Коммунальные услуги	366.3
7	Оплата труда операторов научного оборудования	8 415.7
8	Другие накладные расходы на содержание	233.4
	Общие затраты, связанные с деятельностью УНУ:	**9 690.7**

7 Заключение

В отчете приведены результаты научно-производственной деятельности СЕФ ФИЦ ЕГС РАН за 2025 год по научным проектам: № 122041500004-5 «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору», № 122041500001-4 «Эволюционная динамика земной коры Сибири и развитие сейсмотектонических процессов, предшествующих катастрофическим событиям, по данным мониторинга землетрясений», № 122040800176-9 «Проведение и совершенствование непрерывного интеллектуального сейсмологического, геофизического и геодинамического мониторинга на глобальном, федеральном и региональном уровнях» и № 122041500007-6 «Развитие открытых информационных ресурсов о землетрясениях на территории России и сопредельных стран, разработка интерактивных средств сбора, анализа и представления сейсмологических данных».

В отчетном периоде функционирование элемента УНУ ФИЦ ЕГС РАН, а именно, комплекса мониторинга электромагнитных и сейсмических малоамплитудных сигналов осуществлялось в обычном (штатном) режиме.

Основные результаты, полученные с использованием УНУ, следующие:

В ходе анализа собственных частот здания Дворца культуры (г. Норильск) установлено, что с мая 2023 г. отмечается повышение частот относительно прошлых лет, что связано с увеличением жесткости конструкции здания после строительно-ремонтных работ. Разработана технология, позволяющая по данным значений собственных частот колебаний железнодорожных конструкций оценивать их технического состояния во время эксплуатации. На полигоне «Кольцово» (Новосибирская область) с помощью сети сейсмического мониторинга была успешно протестирована система дистанционного обнаружения техногенных источников (стрелкового оружия, БПЛА и транспортных средств). Ее способность скрытно идентифицировать объекты на значительных расстояниях по характерным частотным признакам открывает перспективы применения в охране объектов, промышленном мониторинге и военных задачах. В результате анализа динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС зафиксированы аномальные изменения частот в периоды максимального наполнения водохранилища, указывающие на развитие структурных нарушений. Впервые по малоамплитудным сигналам получено полное вертикальное сечение земной коры по профилю протяженностью 170 км, проходящему через складчато-надвиговую зону сочленения Ангаро-Ленской моноклизы и Бодайбино-Патомской складчатой системы. Показана корреляция между сейсмической активностью и изменениями геоэлектрических параметров горных пород по данным ежегодных (с 2007 по 2023 гг.) наблюдений на геодинамическом полигоне «Бельтир»

(Горный Алтай), из чего следует возможность применения электромагнитного мониторинга для прогноза землетрясений. В зонах сопряжения Горловского прогиба (Новосибирская область) с соседними региональными геологическими структурами изучены вариации удельных электрических сопротивлений (УЭС) и коэффициентов анизотропии и прослежена их корреляция с сейсмическими событиями. Выполнены детальные электроразведочные профили в районах мощных юрских отложений Доронинской и Бобровской впадин, в результате чего выявлены разломные контакты прибортовых структур. Локализованы разломы типа надвигов и тектонические уступы.

8 Список использованных источников

1. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С.852–863.

2. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Адилов З.А., Ting-Yu H., Arygianni V. Особенности мониторинга собственных частот плотин гидроэлектростанций (на примере Чиркейской ГЭС) // Российский сейсмологический журнал. – 2019. – Т. 1, № 1. – С. 23–34.

3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Кречетов Д.В. Определение частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сейсмическим сигналам (на примере плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга 2001–2021 гг.) // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 2. – С. 32–50.

4. Moser P., Moaveni B. Environmental effects on the identified natural frequencies of the Dowling Hall Footbridge // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2011. – Vol. 25, № 7. – P. 2336–2357.

5. Westgate R. J., Koo K. Y., Brownjohn J. M. W. Environmental effects on a suspension bridge’s dynamic response // Proceedings of the 8th international conference on structural dynamics. – 2011. – P. 1763–1770.

6. Guang-Dong Z., Ting-Hua Y. A summary review of correlations between temperatures and vibration properties of long-span bridges // Mathematical Problems in Engineering. – 2014. – Vol. 2014. – P. 1–19.

7. Nguyen V.H., Mahowald J., Schommer S., Maas S., Zuerbes A. A study of temperature and aging effects on eigenfrequencies of concrete bridges for health monitoring // Engineering. – 2017. – Vol. 9. – P. 396–411.

8. Cheynet E., Snæbjornsson J., Jakobsen J.B. Temperature Effects on the Modal Properties of a Suspension Bridge // Dynamics of Civil Structures. Proceedings of the 35th IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics 2017. – Springer: River Publishers. – 2017. – Vol. 2. – P. 87–93.

9. Цветков Р. В., Гусев Г. Н. Исследование изменения собственных частот сваи при оттаивании окружающего грунта // Успехи кибернетики. – 2024. – Т.5, №4. – С. 110–115.

10. Корепанов В.В., Цветков Р.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2014. – № 2. – С. 153–167.

11. Aihemaiti A., Todorovska M.I., Trifunac M.D., Cruz L., Lin G., Cui J. The effects of the environmental conditions on the modal frequencies, damping ratios and curvatures of a 50-story skyscraper // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. – 2026. – Vol. 200, Part B. – P. 109801.

12. Знание.Вики: Дворец культуры комбината (Норильск) [Электронный ресурс]. – URL: https://znanierussia.ru/articles/Дворец_культуры_комбината_(Норильск)?ysclid=micwyplqnh933874345 (дата обращения 20.10.2025).

13. Косякина Е.Э., Лисейкин А.В., Громыко П.В., Селезнев В.С. Контроль технического состояния зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах по изменению частот собственных колебаний (по данным сейсмического мониторинга здания свайного типа – Дворца культуры г. Норильска) // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т.5, № 3. – С. 45–58.

14. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Альжанов Р.Ш., Громыко П.В. Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления // Патент на изобретение. RU 2546056 C2, 10.04.2015, Заявка 2013127923/28 от 18.06.2013.

15. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SpectrumSeism // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. RU 2021666241, 11.10.2021, Заявка 2021665611 от 11.10.2021.

16. Подольский В.И. Железобетонные опоры контактной сети конструкция, эксплуатация, диагностика. – М.: Интекст, 2007. – 152 с.

17. Шейнин А.М. Неразрушающий контроль строительных материалов: учебное пособие. – СПб.: Лань, 2019. – 252 с.

18. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – М.: Стандартинформ, 2011. – 52 с.

19. 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, 20.09.2012, Заявка 2010128394/28 от 08.07.2010.

20. Лисейкин А. В., Селезнев В. С. Методика дистанционного контроля разрушительных процессов по малоамплитудным сейсмическим сигналам при эксплуатации крупных промышленных объектов // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2024. – Т. 51, № 3. – С. 86–106. – DOI 10.21455/VIS2024.3-5.

21. Байкал-8, технические характеристики. ООО «Экспас». [Электронный ресурс]. – URL: http://expas-sib.com/posts/baykal-8.html (дата обращения 25.10.2025).

22. Seismic Sensor Geophone Seismic Sensor Land Geophone String [Электронный ресурс]. – URL: https://www.cqtopgeo.com/geophysical-equipment/seismic-equipment-and-seismograph/seismic-sensor-geophone-seismic-sensor-land.html (дата обращения 20.10.2025).

23. Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Коковкин И.В. Метод сейсмического мониторинга «Дисконт» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVII Международной сейсмологической школы. (Ташкент, Республика Узбекистан, 11-15 сент. 2023 г.) – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С. 100.

24. Метрологические характеристики DR-24. [Электронный ресурс]. – URL: https://industrialmonitoring.ru/certificates (дата обращения 25.10.2025).

25. А. А. Брыксин, П. В. Громыко, Д. Б. Севостьянов Использование регистраторов "Байкал-8" для сейсмического мониторинга зданий и сооружений в режиме реального времени в СЕФ ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 68–80. DOI 10.35540/2686-7907.2022.3.06.

26. Коковкин И.В., Громыко П.В., Брыксин А.А., Селезнев В.С. О возможности удаленного мониторинга работы гидроагрегатов Новосибирской ГЭС по данным сейсмологических наблюдений // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. – 2021. – Т. 2, № 2. – С. 81–89. DOI: 10.33764/2618-981X-2021-2-2-81-89.

27. Бадиков Н.В., Игнатов А.М., Козлович Ю.Л., Москаленко Ю.А., Харитонов В.М. Пневматический источник сейсмических сигналов // Патент на изобретение RU 13705, 10.05.2000, Заявка № 2000102011/20 от 24.01.2000.

28. Бадиков Н.В., Гуленко В.И. Источник упругих волн для сейсморазведки на предельном мелководье и в транзитных зонах // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2009. –Т. 29, № 3. – С. 24–26.

29. Мосягин Е.В., Ефимов А.С. О речной сейсморазведке: история, опыт применения, возможности на современном этапе исследований Сибирской платформы // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. –2021. – № 3. – С. 48–60. DOI: 10.20403/2078-0575-2021-3-48-60.

30. Кашубин С.Н., Петров О.В., Шокальский С.П., Мильштейн Е.Д., Андросов Е.А., Винокуров И.Ю., Тарасова О.А. Глубинное строение земной коры северо-восточной Евразии и ее континентальных окраин // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т.12, № 2. – С. 199 – 224. DOI: 10.5800/GT-2021-12-2-0521.

31. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. – 301 с.

32. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2013. – 94 с. – URL: https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/ (дата обращения: 21.11.2025).

33. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Брыксин А.А., Севостьянов Д.Б., Кречетов Д.В., Коковкин И.В. Возможности речной сейсморазведки для изучения строения земной коры и верхней мантии территории Сибири // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 280–292. DOI: 10.15372/GiG2022104.

34. Селезнев В.С., Сысоев А.П., Игнатов А.М., Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Бабушкин С.М., Брыксин А.А., Кашун В.Н., Иванов А.И., Варламов С.Н., Евдокимов А.А., Лазутин Д.Г., Захарычев В.В. Детальная высокоразрешающая сейсморазведка при нефтегазовых работах в зонах шельфа, речной и озерной сети в условиях сверхмалых (0.5-1м) глубин // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа. Пятая научно-практическая конференция. Т. 1. – Ханты-Мансийск: «Путиведъ», 2002, – С. 301–309.

35. Рыбушкин А.Ю., Терешкин Д.О. Современные сейсмические станции серии «Байкал» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. (г. Новосибирск, 06-10 сент. 2021 г.) – Обнинск:ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 76.

36. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. SSlicer // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2022613238, 12.03.2022, Заявка № 2022613181 от 11.03.2022.

37. Глубинное строение территории СССР. – М.: Наука, 1991. – 224 с.

38. Селезнев В.С., Соловьев В.М., Сысоев А.П., Бабушкин С.М., Кашун В.Н., Брыксин А.А., Лисейкин А.В. Речная сейсморазведка на востоке России // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: Сборник материалов научно-практической конференции. – Красноярск: КНИИГиМС, 2007. – С. 143–146.

39. Соловьев В.М., Галева Н.А., Сальников А.С., Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Кашубина Т.В., Вяткина Д.В. Особенности сейсмического строения Забайкалья в створе опорного профиля 1-СБ «Восточный» по данным разнополяризованных P- и S-волн // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – Т. 39, № 3. – С. 57–71. DOI: 10.20403/2078-0575-2019-3-57-71.

40. Сулейманов А.К., Берзин Р.Г., Давыдова Т.В., Жуков А.П. Обработка близвертикальных данных МОВ-ОГТ // Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс). – Тверь: ФГУ ГНПП «Спецгеофизика», 2001. – С. 22–31.

41. Сулейманов А.К., Заможняя Н.Г., Андрющенко Ю.Н., Липилин А.В. Глубинные сейсмические исследования отраженными волнами // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным. – Новосибирск: Издательство «Наука», 2007. – С. 22–27.

42. Шапорина М.Н., Мосягин Е.В., Садур О.Г., Беспечный В.Н. Геолого-геофизические особенности строения Предверхоянского краевого прогиба и прилегающих территорий по данным нового сейсморазведочного речного профиля МОГТ-2D и переинтерпретации архивных материалов // Геология нефти и газа. – 2021. – № 5. – С. 55–73. DOI: 10.31087/0016-7894-2021-5-55-73.

43. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Сальников А.С., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А., Лисейкин А.В., Брыксин А.А., Галева Н.А. Глубинное скоростное строение и сейсмичность Забайкалья (в створе опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ) // Вулканология и сейсмология. – 2023. – № 2. – С. 83–96. DOI: 10.31857/S0203030623700086.

44. Кунгурцев Л.В., Гошко Е.Ю. Глубинное строение и модель формирования континентальной коры Верхоянского складчато-надвигового пояса в позднем мезозое // Геодинамика и тектонофизика. – 2023. – Т. 14, № 3. – С. 1–31. DOI: 10.5800/GT-2023-14-3-0706.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Публикации сотрудников СЕФ ФИЦ ЕГС РАН в 2025 году

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М., Заможняя Н.Г., Каширский А.Ю., Кунгурцев Л.В. Построение разрезов земной коры до границы Мохоровичича по малоамплитудным отраженным волнам речной сейсморазведки методом ОГТ-2D (р. Витим, зона сочленения Ангаро-Ленской моноклизы Сибирской платформы и Бодайбино-Патомской складчатой системы) // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 1. – С. 109–123. – DOI: 10.15372/GIG2024150.

   Liseikin A.V., Seleznev V.S., Soloviev V.M., Zamozhnyaya N.G., Kashirsky A.Yu., Kungurtsev L.V. Construction of Earth crust sections down to the Moho boundary based on low amplitude reflected waves of river seismic survey using CPD-2D method (Vitim River, junction zone of the Angara-Lena monocline of the Siberian platform and the Bodaibo-Patom folded system) // Russian Geology and Geophysics. – 2025. – V. 66, N 1. – P. 97–110. – DOI: 10.2113/rgg20244769.
2. Неведрова Н.Н., Пономарев П.В., Санчаа А.М., Шапаренко И.О. Влияние сейсмических событий на геоэлектрические параметры многолетней мерзлоты в Горном Алтае // Литосфера. – 2025. – Т. 25, № 6. – С. 1416-1427. – DOI: 10.24930/1681-9004-2025-25-6-1416-1427.
3. Соловьев В.М., Сальников А.С., Селезнев В.С., Кашубина Т.В., Галева Н.А., Шенмайер А.Е. Особенности глубинного строения верхней коры и минерагения в створе Сихотэ-Алиньского фрагмента опорного геолого-геофизического профиля 8-ДВ // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 11. – С. 1418-1433. – DOI:10.15372/GiG2025145.
4. Макаров А.А., Селезнев В.С. Дистанционный сейсмический мониторинг первой ступени Вилюйского каскада ГЭС по записям сейсмической станции «Чернышевский» // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2025. – Т. 30, № 3. – С. 365–375. DOI: 10.31242/2618-9712-2025-30-3-365-375.

Издания ФИЦ:

1. Макаров А.А., Куляндина А.С., Шибаев С.В., Селезнев В.С., Туктаров Р.М., Старкова Н.Н., Наумова А.В., Пересыпкин Д.М. Результаты детального сейсмического мониторинга. Техногенная сейсмичность угольной шахты «Денисовская» (Южная Якутия) // Землетрясения России в 2023 году. – Ежегодник. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 145–149.

Доклады на международных конференциях:

1. Громыко П.В. Способ контроля целостности объектов железнодорожной инфраструктуры методом инженерно-сейсмического мониторинга // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 32.
2. Коковкин И.В., Селезнев В.С., Пархоменко Е.Э., Уколов Д.А. Анализ собственных частот как инструмент диагностики физического состояния плотины // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 45.
3. Лисейкин А.В., Селезнев В.С., Соловьев В.М. Построение разрезов земной коры на всю мощность методом ОГТ по малоамплитудным волнам // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 52.
4. Макаров А.А., Селезнев В.С. Спектральные характеристики проходческих комбайнов (на примере шахты «Денисовская») // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 57.

5. Селезнев В.С. Дистанционный контроль состояния турбин ГЭС // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 83.
6. Соловьев В.М., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Селезнев В.С., Елагин С.А., Шенмайер А.Е. Вибросейсмический мониторинг среды угледобывающих разрезов (Колыванский и Восточный) Горловской впадины // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы. (г. Махачкала, Россия, Дагестан, 8-12 сент. 2025 г.) – Обнинск, 2025. – С. 86.
7. Соловьев В.М., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Елагин С.А., Шенмайер А.Е. О длительности сезонных изменений среды под мощным виброисточником и вибромониторинг угледобывающих разрезов Горловской впадины // Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология. Сборник материалов Международной научной конференции «Интерэкспо ГЕО-Сибирь». – (г. Новосибирск, 21-22 мая 2025 г.) – Новосибирск: СГУГиТ, 2025. – Т. 2, № 3 – С. 132–139. – 10.33764/2618-981X-2025-2-3-132-139