

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«ЕДИНАЯ ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ СЛУЖБА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ ФИЛИАЛ

На правах рукописи



ЛИСЕЙКИН АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ
СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ**

1.6.9 – геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора технических наук

НОВОСИБИРСК

2025

О Г Л А В Л Е Н И Е

В В Е Д Е Н И Е	5
Глава 1. ВЫДЕЛЕНИЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ШУМЕ НА ОСНОВЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА.....	21
1.1. Аналитический обзор современных зарубежных и отечественных разработок. Их достоинства и недостатки.....	21
1.2. Разработка алгоритма обработки сейсмограмм.....	26
1.2.1. Постановка задачи	26
1.2.2. Программная реализация алгоритма	32
1.2.3. Верификация программного обеспечения	48
1.3. Выделение слабых сигналов в спектрограммах сейсмического шума с определением их амплитудно-частотных характеристик	57
1.4. Полученные результаты	63
Глава 2. ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАБОТАЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ.....	65
2.1. Обзор современных методик с анализом их преимуществ и ограничений.....	66
2.2. Разработка методики на примере крупных ГЭС	69
2.2.1. Постановка задачи разработки методики по данным мониторинга сейсмического шума в окрестности промышленного объекта....	69
2.2.2. Способы идентификации зарегистрированных малоамплитудных сигналов	73
2.3. Реализация на примере аварии 17 августа 2009 г на Саяно-Шушенской ГЭС.....	90
2.3.1. Характеристика зарегистрированного в 4.4 км от ГЭС сейсмического шума перед аварией и в ходе ее развития.....	95

2.3.2. Интерпретация идентифицированных с работающей ГЭС малоамплитудных сигналов	101
2.4. Полученные результаты	139
Глава 3. ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ЧАСТОТАХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО МАЛОАМПЛИТУДНЫМ СИГНАЛАМ КАК ИНДИКАТОРА НАЧАВШИХСЯ РАЗРУШЕНИЙ ИХ КОНСТРУКЦИИ И/ИЛИ ОСНОВАНИЯ	143
3.1. Аналитический обзор известных решений	143
3.2. Разработка методики на примере оценки состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС.....	148
3.2.1. Используемые данные, методы исследования, аппаратура	152
3.2.2. Определение частот собственных колебаний сооружения по данным мониторинга сейсмического шума в его окрестности .	155
3.2.3. Обнаружение начавшихся разрушений конструкций и/или основания сооружения при учете многофакторного искажения частот при воздействии внешней среды.....	169
3.3. Реализация на примере оценки устойчивости отвалов угольных месторождений	172
3.4. Полученные результаты	187
Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ РАЗРЕЗОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ.....	191
НА ВСЮ МОЩНОСТЬ ПО МАЛОАМПЛИТУДНЫМ СИГНАЛАМ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ.....	191
МЕТОДОМ ОГТ	191
4.1. Аналитический обзор современных разработок: достоинства и недостатки	191
3.2. Разработка методики по материалам сейсморазведки на р. Лена.....	197
3.2.1. Постановка задачи	197

3.2.2. Методика экспресс-обработки сейсмограмм увеличенной длительности	205
4.3. Реализация разработки на материалах речного сейсморазведочного профилирования по р. Витим.....	216
4.4. Полученные результаты	228
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	232
ЛИТЕРАТУРА	235

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – слабые колебания земной поверхности, амплитудой от нескольких нанометров до микрометров и частотой от десятых долей до первых десятков герц, регистрируемые в составе сейсмического шума на расстоянии до первых десятков километров от возбуждающих их источников, таких как работающее оборудование, колеблющиеся здания или сооружения и характеризующиеся постоянной или медленно меняющейся во времени частотой. На отдельных этапах выполнения работы как объект исследования рассматриваются слабые, по амплитуде до двух порядков ниже общей амплитуды сейсмического шума, колебания отраженных упругих волн, возбужденных сейсмическими источниками импульсного типа. Для обозначения перечисленных типов сигналов используется термин «малоамплитудные сейсмические сигналы».

Предмет исследования – поиск новых решений, способствующих надежному выделению в сейсмическом шуме малоамплитудных сейсмических сигналов и их использованию для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и определения структуры земной коры на всю ее мощность.

Актуальность. В настоящее время выявление разрушительных процессов в зданиях, инженерных сооружениях и работающем оборудовании промышленных объектов осуществляется главным образом на основе данных размещенной на них контрольно-измерительной аппаратуры. Это – системы вибрационного, сейсмометрического, деформационно-напряженного, температурного и других видов мониторинга. Однако 17 августа 2009 г. произошла крупнейшая катастрофа на Саяно-Шушенской ГЭС с разрушением дорогостоящего имущества и человеческими потерями, причины которой не сразу были выяснены из-за неполноты данных мониторинга при выходе из строя установленной на гидроагрегатах аппаратуры. Это событие заставило задуматься о разработке новых способов дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений по материалам мониторинга сейсмических

сигналов, регистрируемых в их окрестности, на станциях сейсмологических сетей. Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН) располагает такой сетью из более чем 350 станций, часть из которых расположена в окрестностях особо важных промышленных объектов (ГЭС, ТЭЦ, АЭС, заводы и др.). Ряд объектов окружен еще и собственными станциями локальных сейсмологических наблюдений. Современные сейсмостанции оснащаются высокочувствительной калиброванной цифровой аппаратурой для регистрации событий природного и техногенного характера (землетрясений, промышленных взрывов), при этом одновременно регистрируется и непрерывный сейсмический шум. Зарегистрированные в режиме, близком к реальному времени, сейсмограммы передаются в обрабатывающие центры ФИЦ ЕГС РАН и хранятся по регламенту неограниченное время в виде цифровых архивов, доступных для исследования по ряду станций с конца 1990-х – начала 2000-х годов. При спектральном анализе сейсмического шума выясняется, что в его техногенной составляющей регистрируются слабые упругие волны, возбужденные колебаниями различных объектов, расположенных даже в нескольких километрах от сейсмической станции. К ним относятся: вибрация оборудования при работе крупных промышленных объектов и собственные колебания зданий и технических сооружений. При развитии каких-либо нештатных ситуаций характеристики этих колебаний изменяются. Располагая современными способами выделения из сейсмического шума малоамплитудных (на порядки ниже уровня фона) сигналов от колебаний конкретного объекта и интерпретируя изменение их характеристик во времени, можно дистанционно обнаружить начавшиеся разрушительные процессы при эксплуатации этого объекта. Кроме этого, с использованием архивных данных длительного мониторинга контролируется долговременное (измеряемое годами и даже десятилетиями) изменение устойчивости сооружений и работающего оборудования, остро необходимое при расследовании нештатных ситуаций (как при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС).

Сейсмические разрезы земной коры, как известно, широко используются для решения задач геодинамики и тектоники, а также 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. 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. Однако на сегодня объем финансирования этих запредельно дорогих исследований значительно сокращен, в связи с чем территории протяженностью в сотни километров еще остаются неисследованными. Одним из рациональных путей построения разрезов средней и нижней частей земной коры, является дообработка материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки (ОГТ), отличающаяся использованием сейсмограмм увеличенной длительности. В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русла рек Лена, Витим и Нижняя Тунгуска, на профилях общей длиной около 2700 км, получен и хранится на электронных носителях значительный объем материала. Это – непрерывные записи сейсмического шума, включающего сигналы от пневмоисточников с периодом между воздействиями больше, чем время пробега продольных волн близвертикально отраженных от границ в земной коре на любой глубине, включая поверхность Мохоровичича. Современные сейсморазведочные станции характеризуются широким динамическим диапазоном, обеспечивая регистрацию слабых сигналов, на порядки ниже общей амплитуды сейсмического шума. Располагая специальными способами обработки сейсмограмм методом ОГТ можно существенно повысить отношение сигнал-помеха и выделить малоамплитудные сигналы отраженных волн из сейсмического шума.

Анализ **степени разработанности темы исследования** показывает, что несмотря на значительное количество современных разработок российских и зарубежных исследователей, остается нерешенным ряд вопросов. Так, сложный

состав сейсмического шума, особенно регистрируемого в пределах крупных населенных пунктов, диктует необходимость разработки новых эффективных алгоритмов выделения в нем малоамплитудных сигналов и их реализации в специальном программном обеспечении. Дистанционный контроль исправности работающего оборудования по данным мониторинга станциями сейсмологической сети в настоящее время практически не используется, так как не разработаны специальные методики выделения и интерпретации малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме. Методика контроля технического состояния зданий и сооружений по частотам их собственных колебаний нуждается в дальнейшем развитии в связи с необходимостью учета многих факторов, влияющих на текущие значения частот. Материалы сейсморазведки со слабыми источниками возбуждения упругих волн и удлиненной записью в настоящее время также не востребованы для определения строения земной коры на всю глубину по причине отсутствия специального методического обеспечения.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется необходимостью выполнения исследований в целях обеспечения безопасного функционирования промышленных объектов способом дистанционного обнаружения разрушительных процессов при их эксплуатации и определения структуры земной коры на всю мощность по малоамплитудным сейсмическим сигналам, зарегистрированным в составе сейсмического шума.

Цель исследования – развить составляющую сейсмологии в части использования малоамплитудных сейсмических сигналов для дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений (напр., ГЭС, АЭС, ТЭЦ), работающего оборудования (гидроагрегатов, турбин и др.) и для уточнения структуры земной коры на всю мощность.

Научная проблема – найти и реализовать новые научно-обоснованные эффективные решения для дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и

уточнения структуры земной коры на всю мощность с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме.

Научные задачи

1. По материалам мониторинга сейсмического шума на основе Фурье-анализа разработать эффективный алгоритм и программную реализацию выделения малоамплитудных сейсмических сигналов.

2. Исследовать возможности дистанционного изучения механики процессов при эксплуатации промышленных объектов по малоамплитудным сейсмическим сигналам и на основе полученных результатов разработать методику обнаружения начавшихся разрушений в работающем оборудовании.

3. По данным многолетнего мониторинга сейсмического шума разработать методику дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания.

4. С использованием архивных материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ разработать методику определения структуры земной коры на всю мощность по малоамплитудным отраженным волнам.

Методы исследования, фактический материал

Теоретической и методической основой решения поставленных задач является классический гармонический анализ и современные высокопроизводительные алгоритмы дискретного оконного преобразования Фурье для построения спектрограмм.

Для программной реализации алгоритмов и разработки визуальных интерфейсов (программы [SpectrumSeism, 2021; Geofiters, 2022; SSlicer, 2022]) использована библиотека Qt, язык программирования C++. Верификация программного обеспечения осуществлялась на основе сравнительного анализа результатов обработки синтетических сейсмограмм, содержащих малоамплитудные сигналы с заданными амплитудно-частотными характеристиками, изменяющимися во времени. Кроме этого, часть

функциональных возможностей разработки проверялась сопоставлением с результатами обработки реальных данных при использовании известного программного обеспечения других авторов (П.А. Дергач, В.Ю. Юшин, 2016; А.А. Бах и др., 2019).

Исходным материалом для исследования служат цифровые сейсмограммы сейсмического шума, непрерывно регистрируемого стационарными станциями сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН (Алтае-Саянского, Дагестанского и Камчатского филиалов) и локальных сейсмологических сетей ПАО «РусГидро» (филиалов Чиркейской, Саяно-Шушенской и Новосибирской ГЭС) [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Установленная на сегодня новейшая цифровая аппаратура этих станций произведена в Великобритании (компания Guralp): DBC – в пос. Дубки (Республика Дагестан), широкополосный сейсмометр CMG-6TD; станция CERR – в пос. Черемушки (Республика Хакасия), станция KНAR – в пос. Харино (Новосибирская область) и станция BSTK – вблизи пос. Быстровка (Новосибирская область) оснащены широкополосными сейсмометрами CMG-3ESP. Указанные станции ранее также были цифровыми: так, со станции CERR с 2001 до 2016 г. использовались сейсмограммы, зарегистрированные аппаратурой «Байкал-10» с датчиками CM3-KB (частотный диапазон от 0.5 до 50 Гц) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Для временных сейсмических наблюдений на промышленных объектах (в ряде точек на разных уровнях в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС, на зданиях) использовались современные сейсмические регистраторы серии «Байкал» разработанные в ФИЦ ЕГС РАН с трехкомпонентными акселерометрами A1638 и A1738 (разработка ЗАО «Геоакустика», г. Зеленоград, частотный диапазон 0.5-400 Гц) и/или электродинамическими сейсмоприемниками GS-20DX, GS-One (произведены в ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа). Причем амплитудно-частотные характеристики последних расширены в сторону низких частот (до 1-2 Гц) с

использованием реализованного в программах SpectrumSeism и Geofilters известного алгоритма низкочастотной деконволюции сейсмограмм.

При построении разрезов земной коры по материалам речной сейсморазведки использовались алгоритмы метода общей глубинной точки, реализованные в программном обеспечении RadExPro (версия 2019.2), такие как: криволинейное бинирование, полосовая фильтрация, автоматическая регулировка усиления, ввод кинематических поправок и суммирование. Верификация результатов выполнялась сопоставлением полученных разрезов с результатами обработки материалов близлежащих профилей наземной сейсморазведки и ГСЗ.

В качестве исходных материалов для разработки методики построения разрезов земной коры использовались сейсмограммы зарегистрированного непрерывно сейсмического шума на профилях речной сейсморазведки (р. Лена, лето 2018 г.; р. Витим, лето 2019 г.). Аппаратура – сейсмические автономные регистраторы «Байкал-7» (разработанные в 2018 г. специалистами ФИЦ ЕГС РАН) с современными вертикальными электродинамическими сейсмоприемниками GS-One.

Соискатель защищает новые научно обоснованные **решения**, совокупность которых представляет собой инструментарий для дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений и уточнения структуры земной коры на всю мощность с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме. Их внедрение вносит значительный вклад в развитие сейсмологии при снижении затрат на исследования, а значит выгодно для экономики страны.

Защищаемые положения, отражающие главные результаты диссертационной работы:

1. Комбинированный алгоритм обработки сейсмограмм на основе оконного преобразования Фурье с формированием спектрограмм с одной стороны, и расчета усредненных амплитудных спектров и временных рядов амплитуд монохромных сигналов в выделенных на спектрограмме интервалах, с другой, реализованный в

программном обеспечении SpectrumSeism, позволяющий более эффективно, чем традиционно применяемые алгоритмы, выделять малоамплитудные сейсмические сигналы в сейсмическом шуме.

2. Методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в связи с ростом вибрации и резонансами в работающем оборудовании крупных промышленных объектов по выделенным малоамплитудным сигналам с использованием накопленных данных мониторинга сейсмического шума.

3. Методика дистанционного определения аномалий в частотах собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам как индикатора начавшихся разрушений их конструкции и/или основания по данным многолетнего мониторинга сейсмического шума.

4. Методика построения разрезов земной коры на всю мощность по выделенным в сейсмическом шуме малоамплитудным отраженным волнам на увеличенных временах вступлений в материалах речного профилирования методом ОГТ.

Обоснованность и высокая степень достоверности научных результатов подтверждается использованием апробированных на практике классических и современных алгоритмов цифровой обработки сейсмограмм (на основе методов Фурье-анализа и ОГТ), представительного материала многолетнего мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного современной высокочувствительной калиброванной аппаратурой станций сейсмологической сети, а также данными многочисленных экспериментов, выполненных как лично, так и под руководством соискателя с использованием новейшей аппаратуры и современных методов исследований, применяемых в сейсмологии и сейсморазведке.

Научная новизна.

Найден оригинальный подход для решения трех разных научных задач с использованием малоамплитудных сигналов, выделенных в сейсмическом шуме:

1. Для разработки первой методики найдено новое решение, а именно: с использованием накопленных данных мониторинга на сеймостанциях в

окрестности крупных промышленных объектов дистанционно выявляются факторы, указывающие на начавшиеся разрушительные процессы в работающем оборудовании в связи с повышенной вибрацией и резонансными эффектами.

2. По-новому разрабатывается вторая методика: по локальным максимумам усредненных амплитудных Фурье-спектров записей сейсмического шума в окрестности зданий и/или сооружений дистанционно определяются частоты их собственных колебаний, аномалии которых служат индикаторами начавшихся разрушений в сооружении и/или его основании.

3. Новизна в третьей методике заключается в использовании для построения разреза земной коры на всю мощность малоамплитудных отраженных волн, зарегистрированных при речной сейсморазведке методом ОГТ и выделенных в сейсмическом шуме при существенном увеличении кратности за счет увеличения площади бина.

Личный вклад.

Соискателю принадлежит ключевая роль в выборе методов исследований, постановке научных задач, участии в экспедиционных работах, поиске подходов и разработке способов их решения, анализе, верификации и внедрении результатов исследования:

1. Поставлена и решена задача разработки и программной реализации комбинированного алгоритма выделения малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме на основе анализа спектрограмм, протестированной лично соискателем на синтетических и экспериментальных данных.

2. Разработана и реализована на примере расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС методика дистанционного обнаружения начавшихся разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов по накопленным данным мониторинга сейсмического шума в их окрестности.

3. На основе усреднения амплитудных спектров сейсмограмм разработана и реализована методика дистанционного определения по выделенным

малоамплитудным сигналам частот собственных колебаний зданий и сооружений с высокой точностью (до 0.01 Гц) и их аномалий по данным многолетнего мониторинга сейсмического шума.

4. По архивным материалам речной сейсморазведки в Восточной Сибири (р. Лена, р. Витим) методом ОГТ по специальной технологии, отличающейся непрерывной регистрацией сейсмического шума между возбуждениями, разработана методика экспресс-обработки, включающая формирование сейсмограмм увеличенной длительности и построение разрезов на всю мощность земной коры по малоамплитудным отраженным волнам при существенном увеличении кратности за счет увеличения площади бина.

Практическое значение.

Найденный в исследовании подход к дистанционному обнаружению разрушительных процессов в сооружениях и работающем оборудовании крупных промышленных объектов имеет высокое практическое значение, так как нацелен на предотвращение аварий с разрушением дорогостоящего оборудования и возможными человеческими потерями (как при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС).

Разработанный трехмодульный алгоритм, реализованный в программном обеспечении SpectrumSeism повышает качество спектрально-временного анализа зарегистрированного сейсмического шума [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Так, реализованные функции интерактивного изменения параметров расчета, визуализации спектрограмм и их масштабирования по осям частоты и времени позволяют обработчику быстро обнаруживать в сейсмическом шуме слабые, малоамплитудные сигналы, особенно локализованные в относительно небольших ограниченных частотой и временем интервалах. Отображение спектрограммы на экране компьютера одновременно с процессом определения в модулях программы амплитудно-частотных характеристик сигналов дает возможность обработчику оперативно оценивать влияние на них разного рода помех, что уменьшает вероятность ошибки и повышает качество спектрально-временного анализа. Наличие в составе программного обеспечения SpectrumSeism дополнительных

функций интегрирования, дифференцирования и деконволюции сейсмических трасс расширяет технические возможности используемой сейсмической аппаратуры, что существенно увеличивает полноту извлекаемой из зарегистрированных материалов информации. Аналогичные функции реализованы в программном обеспечении Geofilters, отличающемся пакетной обработкой любого количества сейсмограмм с сохранением ее результатов в файлы для использования при необходимости другими исследователями или в других программах.

Подход к дистанционному определению по малоамплитудным сигналам в накопленных данных многолетнего мониторинга сейсмического шума характеристик вибрации оборудования, резонансных эффектов и частот собственных колебаний технических сооружений используется как источник дополняющей информации о механике процессов, происходящих на работающем промышленном объекте. Так, не на всех сооружениях установлены системы непрерывного сейсмометрического мониторинга, или они функционируют непродолжительное время (напр., в плотине Саяно-Шушенской ГЭС с 2016 г.). В случае же разрушений на промышленном объекте и выходе из строя контрольно-измерительной аппаратуры, для установления причин аварии, используются материалы мониторинга сейсмического шума с удаленных от объекта сейсмических станций.

Программное обеспечение SSlicer разработано для пакетной обработки любого количества и длительности сейсмограмм, зарегистрированных малоканальной (1-4 канала) автономной аппаратурой серии «Байкал», с формированием многоканальной сейсмограммы в традиционном для сейсморазведки формате SEG-Y по заданному в табличном виде порядку следования сейсмических трасс. Это дает возможность реализовывать сейсморазведочные системы наблюдения практически любой конфигурации, что особенно актуально при речном профилировании в труднодоступных местах.

Методика экспресс-обработки сейсмограмм увеличенной длительности позволяет с невысокими затратами строить разрезы на всю мощность земной коры с использованием как архивных материалов речного сейсмического профилирования, так и материалов новых сейсморазведочных работ.

Реализация результатов.

Разработанные алгоритмы и программное обеспечение при одновременной их оптимизации и отладке реализовывались при спектрально-временном анализе зарегистрированного в окрестности 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС сейсмического шума, перед и во время крупнейшей техногенной катастрофы, произошедшей 27 августа 2009 г. Результаты исследования вошли в отчеты о проведении договорных работ в 2010-2011 гг. между ГС СО РАН и ОАО «НИИЭС» (№30/ОГ-139-17-2011 от 20.04.2011), ОАО «РусГидро» (№ СШ-140-2020 от 30.03.2010 и № СШ-656-2010 от 16.12.2010).

Методические разработки и программное обеспечение для обработки сейсмического шума, зарегистрированного как в окрестности (на станциях локальной сейсмологической сети), так и в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской ГЭС, с выделением сигналов, возбужденных вновь вводимыми в эксплуатацию после аварии гидроагрегатами, прошли проверку на практике в более 10-ти исследованиях ГС СО РАН по договорам с ПАО «РусГидро», что нашло свое отражение в научно-производственных отчетах за 2010-2016 гг.

Методические разработки, результаты исследований и программное обеспечение SpectrumSeism и Geofilters используются в учебных курсах «Сейсмомониторинг гидроузлов» Саяно-Шушенского филиала Сибирского федерального университета (СФУ) и «Дистанционный сейсмический мониторинг зданий, сооружений и работающего оборудования» Новосибирского государственного университета (НГУ), в исследовательских и договорных работах филиалов ФИЦ ЕГС РАН, а также Центра геофизического мониторинга НАН Республики Беларусь.

В настоящее время основным направлением научно-исследовательских работ, выполняемых в ФИЦ ЕГС РАН как лично соискателем, так и под его руководством, является развитие этого подхода применительно к обработке данных мониторинга с ряда других станций, расположенных в окрестности других объектов в том числе в крупных городах (Москва, Иркутск, Петропавловск-Камчатский).

Исследования являются частью планов научно-исследовательских работ ФИЦ ЕГС РАН – тема «Мониторинг полей малоамплитудных геофизических сигналов для контроля над опасными процессами при техногенном воздействии на земную кору». В 2024-2025 гг. получили развитие при поддержке гранта РФФИ 24-27-00145 «Разработка методики контроля раскрытия трещины в теле плотины Саяно-Шушенской ГЭС».

Программное обеспечение SSlicer и методические разработки соискателя по проведению регистрации сейсмических сигналов автономной аппаратурой серии «Байкал» использовались при производстве договорных работ с АО СНИИГГиМС на р. Нижняя Тунгуска (2012 г.), с ООО НППГА «Луч» на реках Лена (2018 г.) и Витим (2019 г.). Полученные в этих исследованиях материалы сейсморазведки методом ОГТ легли в основу разработки методики построения разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным отраженным волнам на увеличенных временах вступлений, которая нашла поддержку двумя контрактами между ФИЦ ЕГС РАН и ФГБУ «Институт Карпинского» и отражена в научно-производственных отчетах за 2020 и 2023 гг.

Публикации и апробация работы.

Результаты диссертационного исследования широко известны научной общественности. Основные результаты представлены за период 2010-2025 гг. в 90 публикациях, зарегистрированных в РИНЦ, из них 20 публикаций – в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК и приравненных к ним, в том числе: 2 патента на изобретение; 3 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ; 15 журналов, из которых специальности 1.6.9 «Геофизика» по техническим

наукам соответствуют 10 журналов («Геология и геофизика» – 4 статьи; «Вопросы инженерной сейсмологии» – 1 статья; «Доклады Академии Наук. Науки о Земле» – 2 статьи; «Seismological Research Letters» – 1 статья; «Российский сейсмологический журнал (2023 г.) – 2 статьи), из них категориям ВАК К1 или К2 соответствуют 8 работ.

Докладывались на 29 международных и российских конференциях и симпозиумах: 5-й, 8-й Международные симпозиумы «Современные проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов», НС РАН в г. Бишкек, Киргизия, 2011, 2021 г.; Международные конгрессы «Natural cataclysms and global problems of the modern civilization - geocataclysm 2011», Турция, Стамбул, 2011 г.; «18th european meeting of environmental and engineering geophysics of the near surface geoscience division of eage, near surface geoscience 2012», Франция, Париж, 2012; «American geophysical union (AGU), meeting of the America», Мексика, 2013 г.; 13-й Всероссийский семинар «Геодинамика, геомеханика и геофизика», Россия, Новосибирск, 2013 г.; Всероссийская конференция с международным участием «50 лет сейсмологического мониторинга Сибири», Россия, Новосибирск, 2013 г.; 1-я, 2-я научно-практические конференции «Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири», Россия, Новосибирск, 2014, 2015 г.; Всероссийская конференция «Геофизические методы исследования земной коры», Россия, Новосибирск, 2014; 5-я, 7-я научно-технические конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга дальнего востока России», Россия, Петропавловск-Камчатский, 2015, 2019 г.; 3-я, 4-я, 5-я Всероссийские научно-практические конференции молодых ученых «Гидроэлектростанции в XXI веке», Россия, Саяногорск, Черемушки, 2016, 2017, 2018 г.; 9-я, 10-я, 11-я научно-технические конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», Россия, Санкт-Петербург, 2015, 2016, 2017 г.; Научно-практическая конференция по сейсмостойкому строительству (с международным участием), Россия, г. Москва, 2016 г.; 11-я Международная конференция «Развитие систем сейсмологического и геофизического мониторинга природных и техногенных процессов на территории

северной Евразии», Россия, Москва, 2017 г.; Международные конференции «Интерэкспо Гео-Сибирь», Россия, Новосибирск, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 г., 2022 г.; 11-я, 14-я, 15-я, 16-я, 17-я, 18-я международные сейсмологические школы «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных», Киргизия, Чолпон-Ата, 2016 г., Молдова, Кишинев, 2019 г., Россия, Новосибирск, 2021 г., Беларусь, Минск, 2022 г., Узбекистан, Ташкент, 2023 г., Беларусь, Витебск, 2024 г.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 146 наименований. Изложена на 253 страницах, содержит 108 рисунков и 4 таблицы.

Выполненные соискателем исследования соответствуют **паспорту научной специальности 1.6.9 «Геофизика»** по техническим наукам – п. 16 «Методы обработки и интерпретации результатов измерений геофизических полей» и п. 18 «Использование геолого-геофизических данных для построения цифровых геологических, гидродинамических, геодинамических и иных моделей геологической среды и месторождений».

Благодарности.

За помощь в формировании научных взглядов, всестороннюю поддержку в проведении исследовательской работы на всех ее этапах соискатель благодарен своему наставнику д.г.-м.н. В.С. Селезневу.

За ценные советы при обсуждении материалов исследования автор глубоко признателен д.т.н. А.Ф. Еманову и к.г.-м.н. В.М. Соловьеву.

Содействие в выполнении ряда экспериментов, доброжелательность и поддержка чл.-корр. РАН А.А. Маловичко и директора ФИЦ ЕГС РАН д.т.н. Ю.А. Виноградова способствовали успешному проведению исследования.

Автор выражает отдельную благодарность коллективу АСФ ФИЦ ЕГС РАН и лично директору к.г.-м.н. А.А. Еманову за высокое качество предоставленных

материалов мониторинга сейсмического шума со станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона, без которого невозможно проведение исследования.

Содействие директора ДФ ФИЦ ЕГС РАН Х.Д. Магомедова и З.А. Адилова помогло в реализации сейсмических исследований на Чиркейской ГЭС. За помощь в получении экспериментальных материалов, в их обработке и обсуждение результатов автор благодарит коллег из СЕФ ФИЦ ЕГС РАН: А.А. Брыксина, П.В. Громыко, И.В. Коковкина, Д.В. Кречетова, Е.Э. Пархоменко и др.

Особенно следует отметить неоценимый вклад вед. программиста Д.Б. Севостьянова за профессиональную помощь в реализации разработанных соискателем алгоритмов и программ в виде современного оптимизированного программного обеспечения SpectrumSeism, GeoFilters и SSlicer.

За содействие и поддержку в проведении сейсмических исследований на гидроэлектростанциях автор благодарит руководителей и специалистов ПАО «РусГидро» и филиалов: В.А. Кяри, Т.М. Юсупова, Р.Ш. Альжанова, Н.И. Стефаненко, Н.С. Наумкина, В.А. Булатова, А.М. Курахмаева и др.

Автор благодарит коллектив ООО НППГА «Луч» и лично директора К.Н. Каюрова и Д.В. Напреева, благодаря сотрудничеству с которыми выполнены уникальные речные сейморазведочные работы на р. Лена и р. Витим, и коллег из ФГБУ «Институт Карпинского» д.г.-м.н. С.Н. Кашубина, к.г. м.н. Е.Д. Мильштейн, Н.Г. Заможную, А.Ю. Каширского, сотрудничество с которыми помогло воплотить идею использования малоамплитудных сейсмических сигналов отраженных волн для построения разрезов земной коры на всю мощность.

Автор выражает искреннюю признательность В.И. Самойловой за методические рекомендации и консультации при подготовке диссертации.

Глава 1. ВЫДЕЛЕНИЕ МАЛОАМПЛИТУДНЫХ СИГНАЛОВ В СЕЙСМИЧЕСКОМ ШУМЕ НА ОСНОВЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

1.1. Аналитический обзор современных зарубежных и отечественных разработок. Их достоинства и недостатки

Под сейсмическим шумом в исследовании общепринято понимается совокупность зарегистрированных сейсмической аппаратурой фоновых, зачастую некоррелированных механических колебаний земной поверхности как природного (ветер, осадки, течение воды, волны в океанах, растрескивание горных пород и др.), так и техногенного (работающие промышленные установки, движущийся транспорт и др.) происхождения. Многочисленными российскими и зарубежными исследованиями доказывается, что по выделенным из сейсмического шума слабым сигналам можно получить полезную информацию не только о процессах, происходящих в океанах, озерах и атмосфере [Podolskiy, Walter, 2016; Anthony et al., 2018; Smalls et al., 2019; Investigating..., 2022; Using..., 2024], но и о скоростном и структурном строении Земли, об изменении напряженно-деформированного состояния земной коры, в том числе о предвестниках крупных землетрясений [Об использовании..., 2005; Coseismic..., 2016; Яновская, 2017; Ambient..., 2023; Мультифрактальные..., 2023; Алгоритм..., 2024], и даже о напряженно-деформированном состоянии зданий и сооружений [New seismic..., 2017; Egorov et al., 2017; Изучение..., 2022; Экспериментальное..., 2023; Мониторинг..., 2024] как источниках таких колебаний.

Амплитуда таких сигналов значительно ниже общей амплитуды сейсмического шума в связи с затуханием и поглощением энергии упругих волн на пути их пробега. В то же время, благодаря высокой чувствительности современной цифровой аппаратуры, используемой в сейсмологии, в составе сейсмического шума регистрируются сигналы амплитудой на несколько порядков меньше его общей амплитуды [Салтыков, 2017; Исследования..., 2024]. Специалисты знают, что при сейсмологическом мониторинге регистрирующую аппаратуру стремятся

размещать в специально оборудованных заглубленных сооружениях (в бункерах, в скважинах) для минимизации влияния колебательных процессов на поверхности – ветра, дождя и т.п. [Мишаткин, 2007], что в целом увеличивает соотношение сигналы/помеха при их регистрации на расстоянии от источника. Следовательно, малоамплитудные сигналы включают информацию о колебании самих источником на значительном расстоянии от регистрирующей аппаратуры. В этой связи подход к дистанционному обнаружению разрушительных процессов на технических сооружениях по данным мониторинга сейсмического шума может быть реализован на практике.

Несомненно, для выделения малоамплитудных сигналов в сейсмическом шуме необходимо применять специальные современные способы обработки, значительно повышающие соотношение сигналы/помеха. Специалисты знают, что механические колебания различных установок по выработке электроэнергии, двигателей, а также собственные колебания зданий и сооружений характеризуются определенными частотами, т.е. являются периодическими функциям на некотором интервале времени. Следовательно, и малоамплитудные сигналы от них, зарегистрированные приборами сейсмостанций вдали от объектов, также будут периодическими. Поэтому при их выделения в сейсмическом шуме традиционно используется гармонический анализ [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Вибраторы, как и другие источники малоамплитудных периодических сигналов, возбуждают упругие волны, которые регистрируются приборами сейсмических станциями на значительных расстояниях. Из публикаций известно, что упругие волны от вибраторов регистрируются на расстояниях от десятков до тысячи километров (в зависимости от их мощности) [Активная..., 2004]. При этом амплитуда волн на таких расстояниях составляет нанометры, что на несколько порядков ниже амплитуды сейсмического шума. Как показывает мониторинг, выделение столь слабых, малоамплитудных сигналов из шума возможно только при их длительном накоплении. Например, монохроматические колебания от 100-тонного вибратора при регистрации на расстоянии в сотни километров

накапливаются около часа [Активная..., 2004]. Следовательно, способы выделения малоамплитудных сигналов от вибраторов можно применять также и для выделения сигналов от колебания оборудования промышленных объектов из зарегистрированного на значительном расстоянии от них сейсмического шума при условии, что такие сигналы достаточно длительные для их накопления [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Из ряда публикаций известно, что амплитудно-частотный состав сейсмического шума непостоянен во времени, поскольку меняются погодные условия, запускаются, останавливаются промышленные установки, изменяются их режимы работы, регистрируются землетрясения, помехи от движущегося транспорта и т.п. [Синева и др., 2000; Салтыков, 2017; Журавлев, Лукк, 2021; Копылова и др., 2021; Изучение..., 2022; La Rocca, Chiappetta, 2022; Экспериментальное..., 2023 и многие другие]. В связи с этим появляются частотно-временные интервалы, в которых на исследуемые малоамплитудные сигналы накладываются помехи с близкими или перекрывающимися частотными характеристиками. Влияние этих помех необходимо учитывать при анализе изменения амплитудно-частотных характеристик сейсмического шума во времени, т.е. при спектрально-временном анализе.

Из современных решений задачи спектрально-временного анализа сейсмического шума широко распространена методика, основанная на построении изображений, наглядно показывающих изменение амплитуд и частот сигналов во времени – спектрограмм [Трофименко и др., 2016; La Rocca, Chiappetta, 2022; Изучение..., 2022 и др.]. Ее достоинство состоит в возможности пользователю оперативно оценивать изменение спектрального состава сейсмограммы во времени. Наиболее распространенное представление спектрограммы – двумерная диаграмма: на одной оси представлено время, на другой – частота; третье измерение с указанием амплитуды на определенной частоте в конкретный момент времени представлено интенсивностью или цветом каждой точки изображения. Преимущество такого представления состоит в изображении на одной диаграмме

разных по интенсивности сигналов, отличающихся на порядки по амплитуде. Таким образом, по спектрограмме, одновременно с высокоамплитудными, проявляются и малоамплитудные сигналы. Спектрограммы широко применяются в различных областях исследований и с различной целью (для идентификации речи, анализа звуков животных, в различных областях музыки, радио- и гидролокации, обработке речи), в том числе в сейсмологии для спектрально-временного анализа сейсмограмм [Экспериментальное..., 2023].

Из анализа известных современных публикаций следует, что спектрограммы обычно создаются с помощью оконного быстрого преобразования Фурье. Методика классическая, описана во многих учебниках для учащихся вузов и широко известна (см., например, учебное пособие К.Н. Вишератина, Ф.И. Карманова «Практические методы оценивания спектральных параметров» [Вишератин, 2008]) и состоит в следующем. Производится цифровая выборка данных во временной области: сейсмическая трасса разбивается на части, которые, как правило, перекрываются, и затем производится быстрое преобразование Фурье с расчетом амплитудного спектра для каждой части. Каждая часть соответствует одной вертикальной или горизонтальной линии на изображении — значение амплитуды в зависимости от частоты в каждый момент времени. Множество последовательно меняющихся спектров, расположенных рядом на изображении, формирует спектрограмму.

Известно ограничение результатов гармонического анализа сейсмограмм по спектрограммам с использованием оконного преобразования Фурье. С одной стороны, чем меньше временной интервал окна, тем выше разрешенность спектрограммы по времени. Однако такое уменьшение окна приводит к уменьшению разрешающей способности спектрограммы по частотной оси. Так, представленные в ряде исследований иллюстрации спектрограмм дискретизованы с частотами от 0.10 до 0.33 Гц [Podolskiy, Walter, 2016; Трофименко и др., 2016; Anthony et al., 2018]. В указанных работах не уточняется, с какими параметрами рассчитывались спектрограммы. Однако учитывая дискретизацию изображений,

они были получены при окне от 1 до 3 с. Следовательно, сигналы, отстоящие по времени на меньшую величину (или по частоте меньше 0.10-0.33 Гц), неотличимы друг от друга на таких спектрограммах.

Общеизвестно, что зарегистрированные в сейсмическом шуме сигналы ввиду многообразия характеристик источников их возбуждения, существенно отличаются как по длительности, так и по частотному составу (в том числе ширине частотного спектра). Поэтому на спектрограмме, рассчитанной при определенном временном окне (а значит, имеющей соответствующую этому окну разрешенность по частоте и времени), часть сигналов (для которых не хватает разрешенности) не отображается. В то время как другие сигналы (для которых разрешенность спектрограммы существенно больше, чем требуется для определения их характеристик), отображаются с избыточной детальностью, а их амплитудно-частотные характеристики определяются неустойчиво. Следовательно, для глубокого анализа всех сигналов, содержащихся в шуме, требуется рассматривать не одну, а ряд спектрограмм, отличающихся параметрами их расчета.

Несмотря на все преимущества спектрально-временного анализа сейсмического шума по спектрограммам – это в большей мере качественный анализ. С его помощью наглядно представлена полная картина разных по амплитуде сигналов в сейсмическом шуме и приближенно оцениваются характеристики (такие, как частота и амплитуда, дата и время) [Трофименко и др., 2016]. Следовательно, для получения количественных, более точных, характеристик сигналов требуются дополнительные, новые способы их определения.

Анализ сейсмического шума на наличие в нем сигналов только по спектрограммам не всегда информативен: в ряде случаев необходимо идентифицировать сигналы и во временной области. Например, зарегистрированный сигнал от кратковременного сейсмического воздействия (землетрясения, взрыва, удара и т.п.) опытным геофизиком несложно идентифицируется по сейсмической трассе, в то время как в спектрально-

временной области эти сигналы в ряде случаев не отличаются при их схожей амплитудно-частотной характеристике. В таких случаях авторы публикуют на одном рисунке в одинаковом временном масштабе как исходную или фильтрованную сейсмическую трассу, так и построенную по ней спектрограмму [Трофименко и др., 2016; Podolskiy, Walter, 2016; Deep-Learning-Based..., 2024].

1.2. Разработка алгоритма обработки сейсмограмм

1.2.1. Постановка задачи

Исходным материалом при разработке алгоритма выделения малоамплитудных сигналов из сейсмического шума на основе гармонического анализа служат данные мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного на сейсмостанциях в виде непрерывных во времени сейсмограмм.

Формат данных. Формат, используемый при современной сейсмологической регистрации (как за рубежом, так и в Российской Федерации в ФИЦ ЕГС РАН), – MiniSEED/SEED, является международным стандартным форматом, созданным для обмена первичными материалами между различными институтами и агентствами [Бутырин, Красилов, 2021]. Кроме этого, рядом исследователей-разработчиков сейсмической аппаратуры созданы внутренние форматы. Например, в ФИЦ ЕГС РАН — это форматы «Байкал» и «Vibr2», в СНИИГГиМС – «Роса». Ряд филиалов ФИЦ ЕГС РАН использует формат CSS (версия 3.0). Несомненно, нестандартные форматы могут быть преобразованы в стандартный miniSEED при использовании специальных программ. Однако при обработке большого объема данных (например, мониторинга большой длительности, или использования данных с большого числа сейсмостанций) такой подход требует дополнительных вычислительных затрат, расходуются временные ресурсы. В связи с этим в разрабатываемое программное обеспечение включается опция прямого чтения файлов разных (из названных) форматов.

Дискретизация. Наиболее типичная дискретизация зарегистрированных сейсмограмм на станциях сейсмологической сети составляет от 100 до 200 Гц.

Однако в ряде случаев она отличается как в большую, так и в меньшую стороны. Например, при регистрации высокочастотного сейсмического шума на гидроэлектростанциях дискретизация составляет 500-1000 Гц [Лисейкин и др., 2020]. Поэтому разрабатываемое программное обеспечение должно обеспечивать возможность обработки сейсмограмм с любой дискретизацией.

Длительность. Длительность сейсмограмм во времени также меняется в зависимости от вида регистрации. По состоянию на 2022 г. в состав сейсмологической сети входят 364 цифровые станции, расположенные на всей территории России, причем с каждым годом количество постоянных пунктов наблюдения только растет [Дягилев, Сдельникова, 2022]. На сегодня все станции одновременно с относительно кратковременными сейсмическими событиями природного или техногенного характера (землетрясений, промышленных взрывов) регистрируют и непрерывный сейсмический шум высокочувствительной цифровой аппаратурой. Причем данные с большинства станций (за исключением тех, где затруднена передача данных по Интернет) передаются в реальном времени в региональные центры сбора и обработки информации и накапливаются. Наиболее длительные сейсмограммы регистрируются при мониторинге на стационарной сейсмологической сети станций – это временной период до ~25 лет (на ряде станций и более), с момента переоснащения аппаратуры с аналоговой на цифровую до настоящего времени. При регистрации временными сетями станций, например, при регистрации сейсмического шума на зданиях, сооружениях, период регистрации может составлять от нескольких часов до нескольких суток. Очевидно, что технических возможностей даже самых современных компьютеров недостаточно для загрузки в оперативную память и обработки таких больших объемов данных. Тем не менее, разрабатываемое программное обеспечение должно обеспечивать оперативную обработку как можно большей информации, т.е. сейсмограмм как можно большей длительности. Несомненно, что эта функция будет ограничена, прежде всего, объемом оперативной памяти компьютера.

Структура файлов. Материалы сейсмического мониторинга, как правило, сохраняются в виде набора файлов, каждый из которых содержит данные за некоторый фиксированный промежуток времени. Так, файлы в формате miniSEED, включающие сейсмограммы зарегистрированных непрерывно сейсмических сигналов, имеют общепринятый установленный односуточный размер. Файлы группируются в каталоги, как правило, соответствующие году регистрации. В отдельных случаях (при неустойчивой передаче данных, при отсутствии материалов мониторинга из-за выхода аппаратуры из строя) файлы имеют размер меньше, чем сутки, а также встречаются пропуски в регистрации между соседними файлами. Аналогично отмеченному организована регистрация и хранение файлов сейсмограмм специальной сейсмической аппаратуры «Байкал» (общепринято разделение данных на часовые файлы). При этом предполагается, что визуализация спектрограмм может включать периоды регистрации больше, чем период, записанный в одном файле (например, когда анализируется сейсмический шум за период мониторинга в несколько суток). Таким образом, разрабатывается программное обеспечение для чтения и автоматического сбора в единый массив набора из ряда файлов сейсмограмм.

Метод. Специалисты знают, что механические колебания различных установок по выработке электроэнергии, электродвигателей, а также собственные колебания зданий и сооружений характеризуются определенными частотами. Причем временная длительность этих колебаний значительна ввиду продолжительности работы промышленных установок [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Собственные же колебания зданий и сооружений, обусловленные формированием стоячих волн под воздействием микросейсмических колебаний как техногенного, так и природного происхождения, регистрируются практически постоянно [Еманов и др., 2002]. Таким образом, перечисленные механические колебания фактически являются периодическими на некотором интервале времени, следовательно, и малоамплитудные сигналы от них, зарегистрированные сеймостанциями вдали от объектов, также будут периодическими. Поэтому для их выделения в

сейсмическом шуме общепринято использовать гармонический, или Фурье-анализ. Причем для спектрально-временного анализа сейсмического шума с построением спектрограмм традиционно используется оконное преобразование Фурье.

Помехоустойчивость. В связи с низкой амплитудой информативных малоамплитудных сейсмических сигналов относительно сигналов-помех вопросу помехоустойчивости уделяется особое внимание. Известно, что соотношение сигнал/помеха увеличивается при суммировании (или усреднении) сейсмограмм пропорционально квадратному корню из числа слагаемых за счет когерентности полезных сигналов, с одной стороны, и некогерентности помех, с другой. Так как в сейсмическом шуме содержатся сигналы с постоянными частотами, то фрагменты этого шума в разные единицы времени также будут содержать в себе сигналы с теми же частотами. Значит, амплитудные спектры, вычисленные по этим фрагментам будут содержать в себе как когерентные составляющие на частотах таких сигналов, так и некогерентные, связанные со случайными помехами. Отсюда следует, что за счет суммирования (усреднения) амплитудных спектров сейсмического шума, вычисленных в разные промежутки времени, будет увеличиваться отношение сигналы/помехи, где «сигналами» являются спектральные характеристики колебаний с постоянными во времени частотами, а «помехами» – колебаний с непостоянными во времени частотами. Таким образом, одной из важных функций разрабатываемого программного обеспечения, должна быть функция увеличения отношения сигнал-помеха за счет суммирования (усреднения) амплитудных спектров от фрагментов сейсмического шума, вычисленных в разные промежутки времени.

Однако приведенный выше способ увеличения соотношения сигнал/помеха справедлив только для стационарных помех. При регистрации внезапных высокоамплитудных, но ограниченных во времени сигналов, например, от землетрясений, от промышленных взрывов, от движущего вблизи сейсмостанции транспорта и т.п. упомянутый алгоритм увеличения соотношения сигнал/помеха становится неэффективным. Это связано с появлением слагаемых (амплитудных

спектров) с частотами, перекрывающими частоту полезного сигнала, а амплитудой значительно (на порядки) превышающих амплитуду полезного сигнала. Наличие хотя бы одного такого спектра затрудняет накопление малоамплитудных сигналов. Поэтому при создании программного обеспечения разрабатывается алгоритм учета такого рода помех.

Дополнительные функциональные возможности программного обеспечения.

К дополнительным возможностям разработанного программного обеспечения относятся следующие элементы цифровой обработки сейсмограмм:

Учет постоянной составляющей. Наличие постоянной составляющей свойственно многим материалам сейсмического мониторинга и ее неучет при гармоническом анализе проявляется в виде мнимого повышения амплитуды спектра на «нулевой» или близкой к нулю частоте. Традиционно этот эффект устраняется вычитанием средней амплитуды колебаний, определенной на этапе загрузки файлов в обработку.

Низкочастотная деконволюция сейсмограмм, зарегистрированных короткопериодным электродинамическим сейсмоприемником. С применением этой методики, разработанной В.И. Юшиным [Юшин, 2001] и в последствии адаптированной П.А. Дергачом [Особенности..., 2018], сейсмограммы электродинамических сейсмометров преобразуются в сейсмограммы виртуальных датчиков аналогичного типа, но имеющих более низкую собственную частоту. Применяется при восстановлении зарегистрированных сигналов с частотой, ниже собственной частоты сейсмоприемника. Для ее выполнения необходимо учитывать характеристики приборов, а именно собственную частоту и коэффициент затухания сейсмоприемника. Методика применяется при экспериментальных работах по регистрации сигналов достаточной амплитуды (амплитуды сигнала должна быть строго больше амплитуды аппаратного шума), т.е. в тех случаях, когда нет необходимости применять дорогостоящие длиннопериодные сейсмографы. Например, при регистрации собственных колебаний плотин ГЭС, где частоты собственных колебаний изменяются от первых герц, успешно

применяются сейсмоприемники типа GD-10 с собственной частотой 10 Гц [Лисейкин и др., 2020].

Так формулируются требования к разрабатываемому программному обеспечению (таблица 1.1):

Таблица 1.1 Технические требования к разработанному программному обеспечению

№	Параметр	Описание
1	Теоретическая и методическая основа	Гармонический анализ, дискретное оконное преобразование Фурье, методика построения спектрограмм
2	Формат файлов сейсмограмм	«miniSEED», «Байкал», «Роса», «Vibr-2», «CSS-3.0» файлы разбиты по временным интервалам
3	Частота дискретизации	Любая (наиболее типичная – 100-500 Гц)
4.	Длительность обрабатываемых трасс	Ограничена только объемом оперативной памяти компьютера
5.	Процедуры обработки	1. Первичная обработка сейсмических трасс (учет постоянной составляющей, интегрирование/дифференцирование, низкочастотная деконволюция) 2. Визуализация спектрограммы с управлением в интерактивном режиме: - изменение параметров расчета (размер окна, тип окна, шаг окна); - изменение цветовой палитры, сглаживающие эффекты; - масштабирование отдельно по осям частоты и времени, навигация. 3. Визуальный анализ сейсмической трассы на выделенном участке спектрограммы 4. Расчет и визуализация усредненных спектров в выделенной на спектрограмме области частота-время, учет высокоамплитудных помех 5. Расчет и визуализация временной развертки амплитуды сигнала на заданной частоте

1.2.2. Программная реализация алгоритма

Для спектрально-временного анализа сейсмограмм и выделения из зарегистрированного сейсмического шума малоамплитудных сейсмических сигналов с постоянными на некотором временном интервале частотами, разработано специальное программное обеспечение SpectrumSeism [SpectrumSeism, 2021] (Рисунок 1.1). Это компактное, удобное, простое в использовании приложение для Windows (как 32-х, так и 64-х разрядные версии), написанное на языке C++ в программной платформе Qt (разработка программного кода, его первичное тестирование и оптимизация выполнены ведущим программистом СЕФ ФИЦ ЕГС РАН, Д.Б. Севостьяновым).

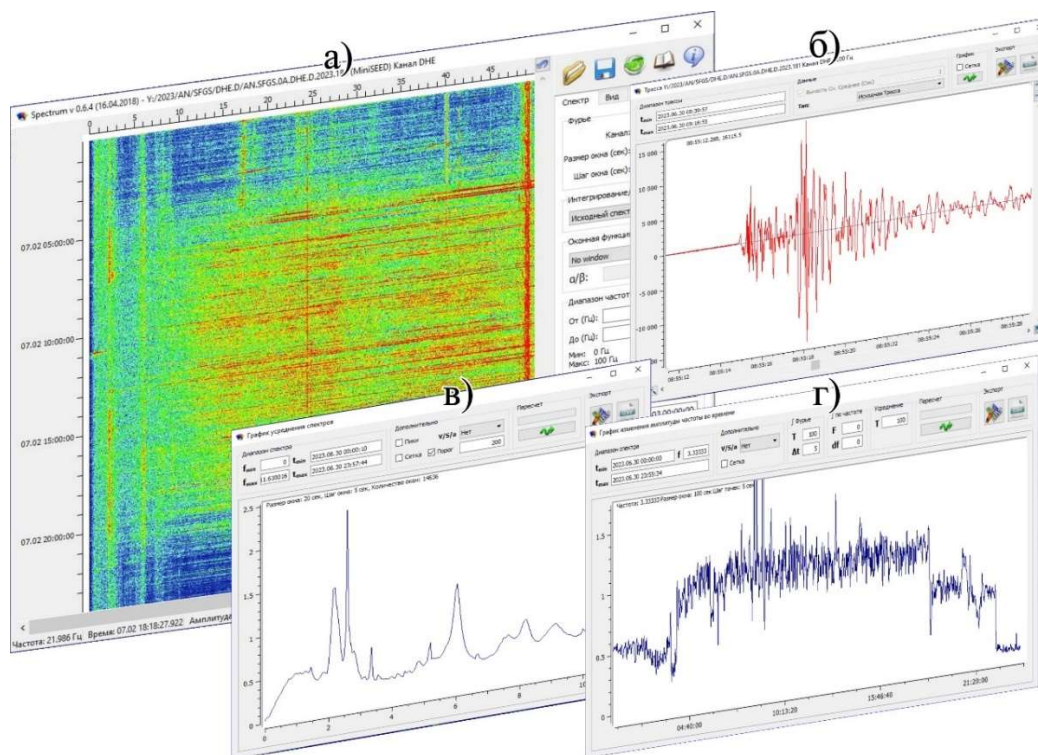


Рисунок 1.1 – Интерфейс программы SpectrumSeism. (а) – главное окно со спектрограммой; (б) – фрагмент сейсмической трассы; (в) – усредненный амплитудный спектр Фурье; (г) – развертка во времени амплитуды сигнала на заданной частоте.

Главное окно программы состоит из двух основных частей – области спектрограммы и боковой панели (Рисунок 1.2). На боковой панели расположены основные инструменты управления программой, включающие несколько вкладок.

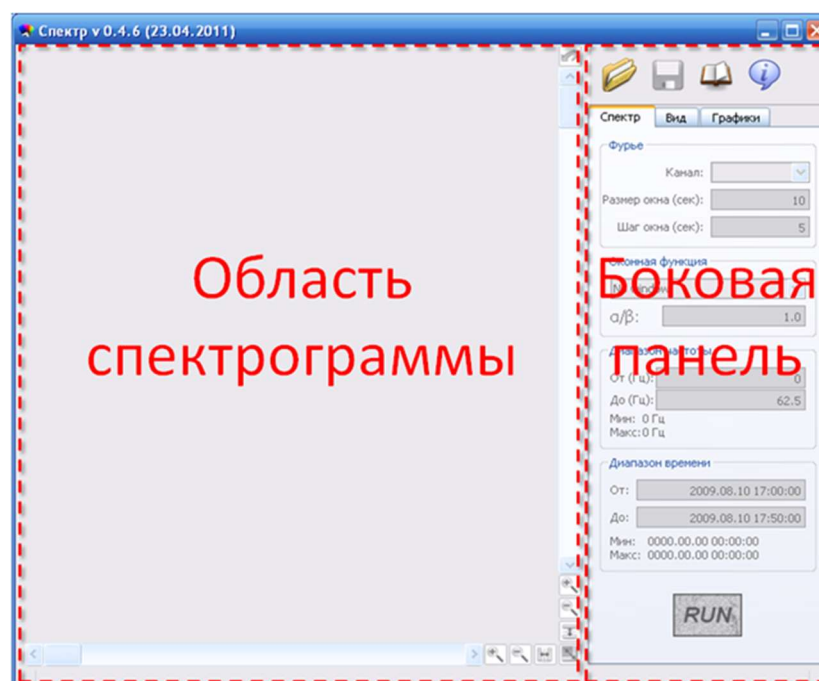


Рисунок 1.2 – Главное окно программы SpectrumSeism

Для загрузки файлов в программу используется диалоговое окно (Рисунок 1.3). Необходимо выбрать файл сейсмограммы для дальнейшей работы; при необходимости обработки материалов большого периода мониторинга (т.е. большего временного интервала, чем содержится в одном файле) в программе реализована возможность выбора и чтения нескольких последовательно идущих файлов.

В текущей версии программы поддерживаются следующие форматы файлов: стандартный «miniSEED» и специфические форматы, созданные разработчиками сейсмической аппаратуры «Vibr-2», «Байкал» (ФИЦ ЕГС РАН) и «Роса» (АО СНИИГГиМС). Тип файла определяется автоматически.

Если выбрана опция «Рассчитать спектр», то спектрограмма рассчитывается автоматически с предыдущими настройками (все настройки сохраняются в конфигурационном файле). Это удобно при необходимости анализа одного периода мониторинга по разным станциям (т.е. в разных файлах).

Опция «Центрировать» вводится для предварительной обработки с учетом постоянной составляющей, в ряде случаев зарегистрированной в сейсмограммах.

При ее неучете на спектрах на спектрах появляется мнимый высокоамплитудный сигнала на «нулевой» (или близкой к нулю) частоте.

Опция «Деконволюция» также необходима при предварительной обработке сейсмограмм. При ее активации исходные сейсмограммы преобразуются по методике низкочастотной деконволюции [Юшин, 2001; Особенности..., 2018].

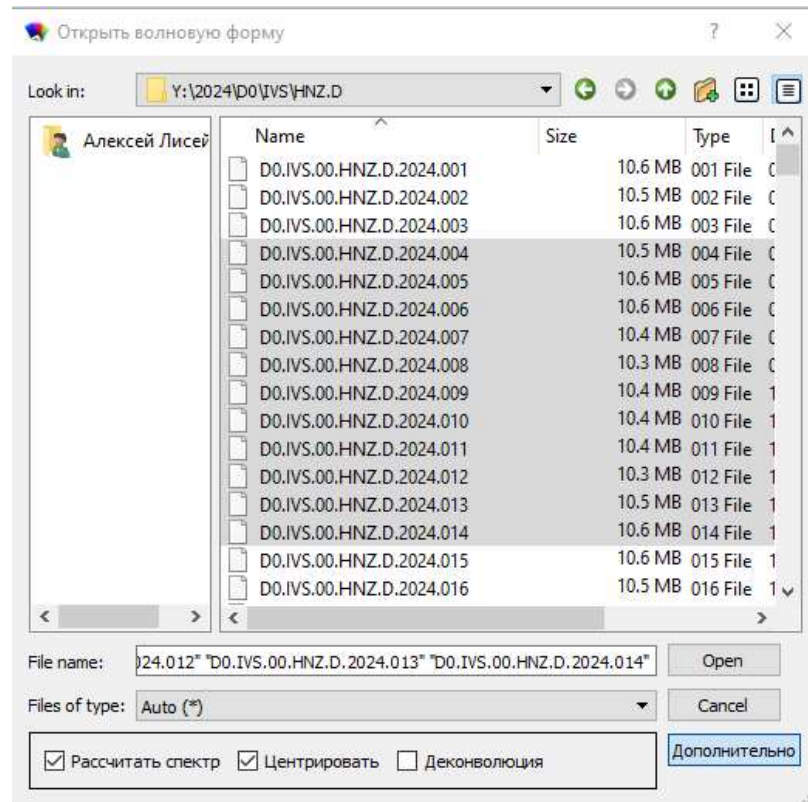


Рисунок 1.3 – Диалоговое окно выбора файлов сейсмограмм

После ввода сейсмических данных спектрограмма рассчитывается с заданными пользователем параметрами. Она представляется в интерактивном режиме в виде двумерного цветного изображения, по одной оси которой указывается дата и время регистрации, по другой – частота сигнала; третье измерение, его амплитуда, представляется цветовой шкалой на определенной паре частота-время [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Амплитуда сигналов на спектрограмме рассчитывается при преобразовании Фурье:

$$A(t, f) = \frac{2}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} F(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \right|, \quad (1.1)$$

где $F(\tau)$ – сейсмическая трасса, f – частота сигнала, t – время регистрации, T – длительность сигнала («окно» - у обработчиков), в котором определяется амплитуда $A(t, f)$, $|\dots|$ – обозначение модуля комплексного числа. Расчет по формуле (1.1) от цифровой (дискретной) сейсмической трассы выполняется с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (алгоритм Кули-Тьюки), реализованного в популярной библиотеке FFTW [<https://www.fftw.org/install/windows.html>]. Длительность сигнала T задается обработчиком исходя из требуемой детальности гармонического анализа сигналов. Как известно, разрешенность (дискретизация) спектра по частоте составляет $1/T$, поэтому чем больше длительность сигнала T , тем выше разрешенность спектрограммы по частоте. Однако при этом уменьшается ее разрешенность по времени, поэтому различить сигналы длительностью меньше T невозможно [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Учитывая многообразие характеристик (частота, ширина спектра, длительность по времени, амплитуда) регистрируемых в составе сейсмического шума сигналов, от функционала программного обеспечения требуется возможность оперативного (в интерактивном режиме) изменения параметров расчета спектрограмм, влияющих на информативность их анализа. К таким параметрам относятся не только размер временного окна T в формуле 1.1, задаваемый в секундах, но и ряд других. Например, перекрытие окон и сглаживание полученного изображения. Первый параметр необходим для повышения «гладкости» спектрограммы по временной оси. Действительно, при разбиении сейсмической трассы на временные окна без их перекрытия, в случае переменной во времени частоты сигнала, его отображение на спектрограмме выглядит «ступенчатым» (Рисунок 1.4а). При перекрытии окон количество точек на изображении по временной оси увеличивается, оно становится более сглаженным – эта процедура равносильна известному способу сглаживания «скользящим средним» (Рисунок 1.4б). Кроме этого, для дополнительного сглаживания спектрограммы и улучшения ее восприятия, в программное

обеспечение добавляется функция матричного сглаживания изображения (Рисунок 1.4в).

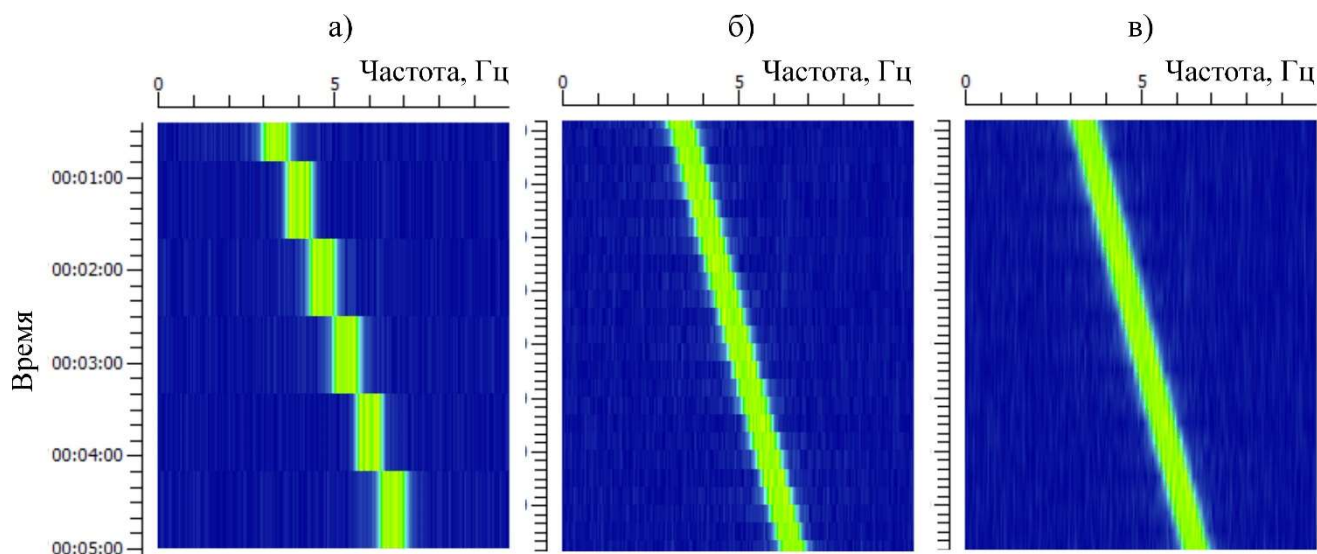


Рисунок 1.4 – Спектрограммы с разными параметрами сглаживания при окне $T=50$ с от сигнала с меняющейся по линейной зависимости частоты от времени.

(а) – без перекрытия окон; (б) – с перекрытием в 10 с; (в) – с применением матричного сглаживания изображения.

Для ввода параметров расчета спектрограммы используется вкладка «спектр» (Рисунок 1.5). После открытия файла для расчета сейсмограммы выполняются 4 основных шага:

1. Выбирается необходимый сейсмический канал (трасса);
2. Задается размер окна и шаг окна в секундах;
3. Задается диапазон спектрограммы (по времени и частоте);
4. Запускается расчет спектрограммы.

Также дополнительно перед запуском пересчета можно задать использование весового окна для ослабления известного специалистам эффекта «растекания» при расчете оконного преобразования Фурье. Параметр α/β определяет параметр для окна Гаусса/Кайзера соответственно. Кроме этого, при необходимости, можно пересчитать спектр функцией интегрирования или дифференцирования. Это может понадобиться, например, при анализе спектров смещения грунта, зарегистрированных датчиком-велосиметром. После расчета спектрограмма появится слева от боковой панели в главном окне программы (Рисунок 1.6).

Рисунок 1.5 – Вкладка «Спектр» для ввода параметров расчета спектрограммы

Спектрограмма имеет две размерности: ось времени (по вертикали) и ось частоты (по горизонтали). Элементы навигации по спектрограмме отмечены пунктирной линией и последовательно состоят из полосы прокрутки, кнопки увеличения масштаба, кнопки уменьшения масштаба и кнопки выравнивания по ширине окна (Рисунок 1.6). При наведении курсора мыши на область спектрограммы в нижней части главного окна отображаются частота, время и амплитуда сигнала.

Для управления визуализацией спектрограммы служит вкладка «Вид». Это, прежде всего, цветовая палитра, которая выбирается пользователем из предлагаемого набора. Корректировка яркости для выделения малоамплитудных или высокоамплитудных сигналов в составе сейсмического шума осуществляется

подбором параметра «Усиление». Кроме этого, в программе реализована функция автоматической регулировки усиления (АРУ) для выравнивания, при необходимости, амплитуды спектра сигналов на разных частотах. Эта функция аналогична традиционной АРУ для сейсмической трассы, однако выполняется в частотной области. Для ее применения требуется включить опцию «АРУ» и задать размер окна по частоте в герцах, относительно которого происходит выравнивание спектральных составляющих в алгоритме АРУ.

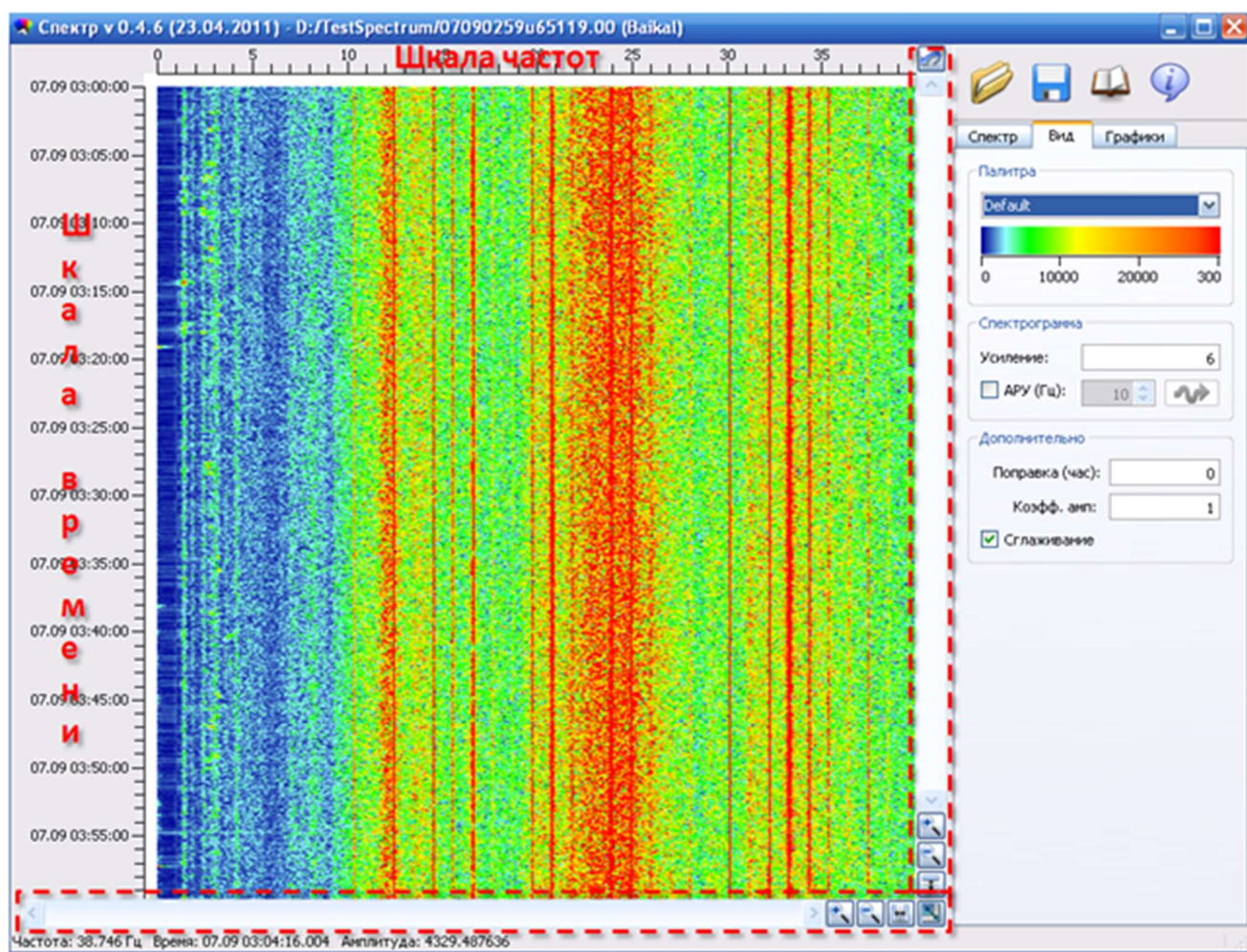


Рисунок 1.6 – Спектрограмма и вкладка «Вид» для настройки изображения

В качестве дополнительных параметров, в программе реализованы следующие: «Поправка, час», «Коефф. ампл.» и «Сглаживание». Поправка для времени вводится в часах относительно мирового времени при необходимости анализа данных мониторинга в местном времени. Второй параметр, коэффициент амплитуд, вводится как множитель для перевода амплитуд сигналов из

безразмерных величин в физически значимые. Для сглаживания изображения (см. Рисунок 1.4в) служит опция «Сглаживание».

Для анализа и выделения из сейсмического шума ограниченных по времени и частоте малоамплитудных сигналов в программе реализуется возможность построения дополнительных графиков, а именно график трассы, мгновенный спектр, усредненный спектр, график временной развертки амплитуды сигнала на постоянной частоте, график временной развертки амплитуды линейного свип-сигнала. Для выбора типа графика используется вкладка «Графики» (Рисунок 1.7).

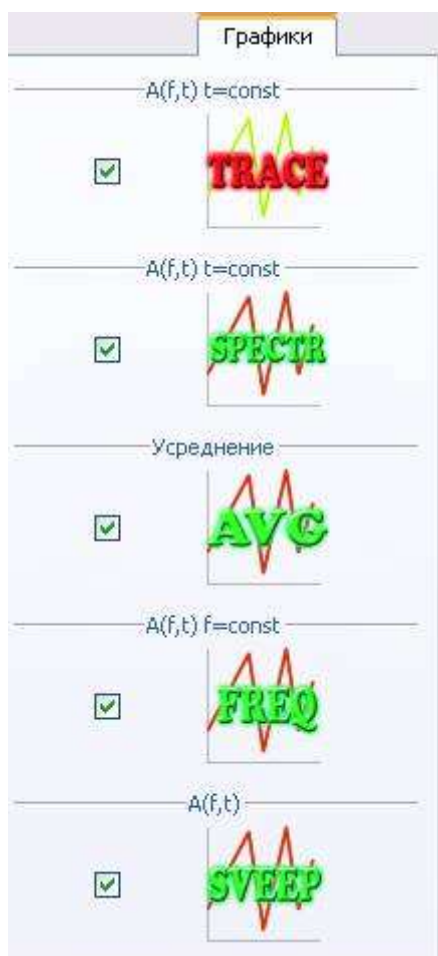


Рисунок 1.7 – Вкладка «Графики»

Активация нужного графика осуществляется нажатием галочки слева от кнопки. После этого на области спектрограммы с помощью мыши задаются временные и частотные границы анализируемых областей для построения графиков (Рисунок 1.8).

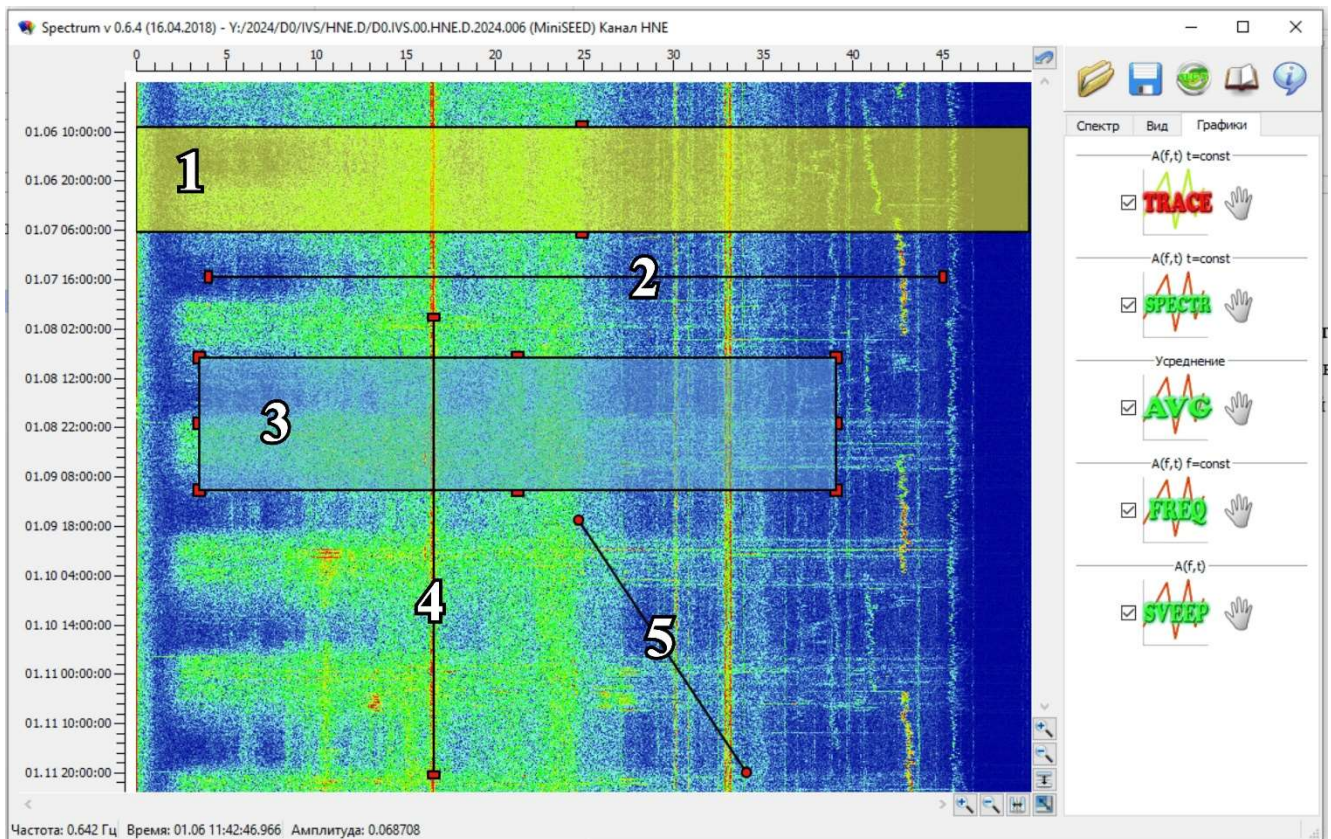


Рисунок 1.8 – Окно спектрограммы в режиме работы с графиками. Цифрами отмечены инструменты задания границ анализируемых областей для: 1 – трассы; 2 – мгновенного амплитудного спектра; 3 – усредненного амплитудного спектра; 4 – временной развертки амплитуды сигнала на постоянной частоте; 5 – то же для сигнала с линейно зависимой частотой от времени

График трассы. При активации графика трассы на области спектрограммы появляется инструмент задания анализируемого временного диапазона сейсмической трассы (Рисунок 1.8, под цифрой «1»). Пользователем при помощи мыши задается начало и конец этого диапазона. При нажатии кнопки «Trace» появляется окно «Трасса» с графиком сейсмической трассы и дополнительными элементами управления (Рисунок 1.9).

Элемент «Диапазон трассы» служит для уточнения временного диапазона, выбранного на спектрограмме. При изменении значений инструмент выбора диапазона трассы на спектрограмме автоматически изменит свои границы. Элемент «Данные» позволяет выполнять следующие преобразования сейсмической трассы: вычитать постоянную составляющую («Центрированная трасса»), а также дифференцировать или интегрировать (однократно или дважды).

Последние две функции применяются при необходимости для преобразования данных между ускорением, скоростью и смещением. Известно, что для корректного интегрирования сейсмической трассы (например, при необходимости из зарегистрированных датчиком-велосиметром данных получить значения смещений), необходимо устранить низкочастотные составляющие сигнала (на «нулевой» или близкой к нулю частоте). В текущей версии программы низкочастотные составляющие устраняются способом скользящего среднего (для этого задается размер окна в секундах).

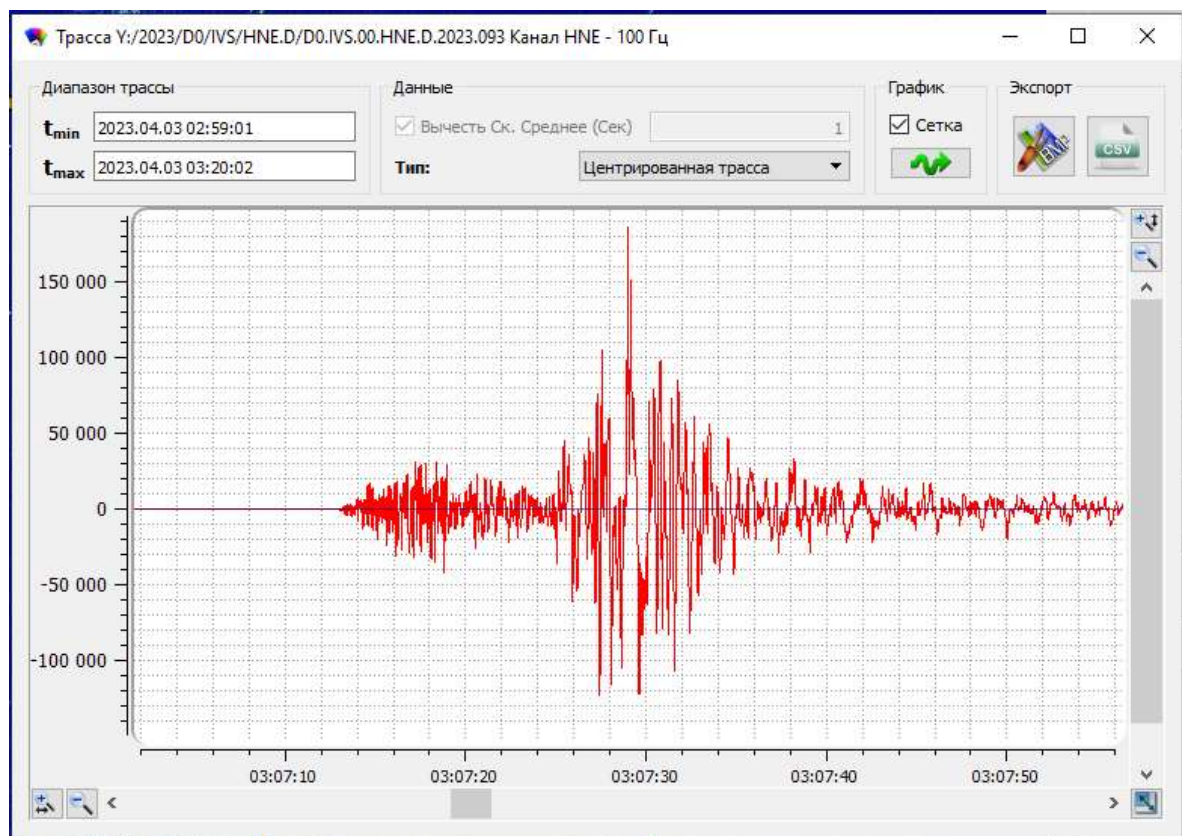


Рисунок 1.9 – Окно «Трасса» для анализа зарегистрированных сигналов на сейсмограмме во временной области

График мгновенного амплитудного спектра. При активации этого графика на области спектрограммы появляется инструмент задания анализируемого частотного диапазона (Рисунок 1.8, под цифрой «2»). Пользователь при помощи мыши задает начало и конец этого диапазона, а также время, к которому будет относиться мгновенный спектр. При нажатии кнопки «Spectr» появляется окно

«График спектра» с графиком амплитудного и дополнительными элементами управления (Рисунок 1.10).

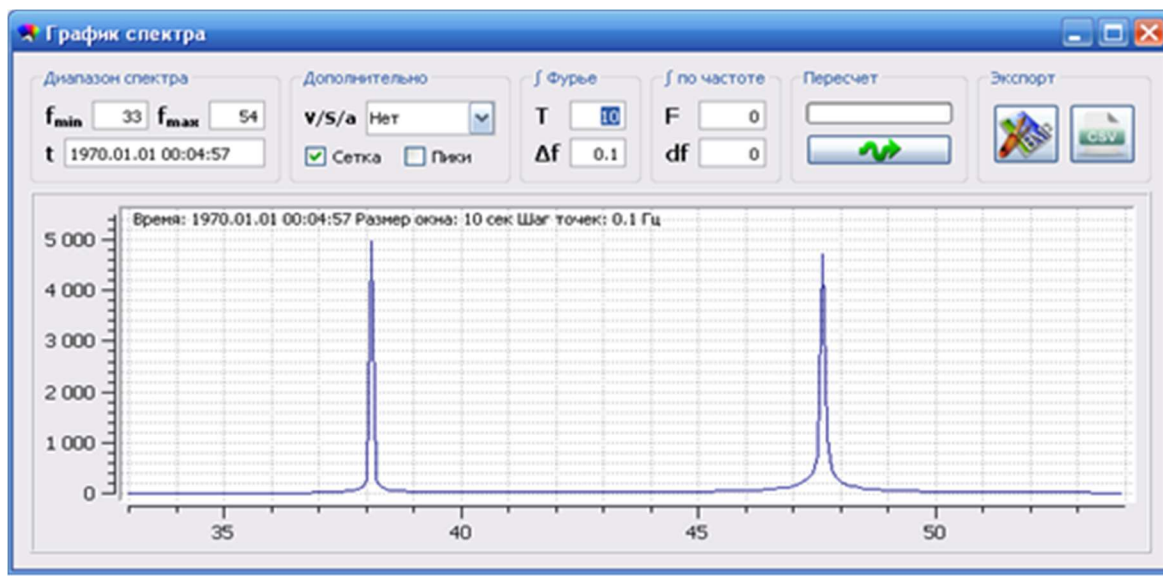


Рисунок 1.10 – Окно «График спектра» для анализа мгновенного амплитудного спектра

Элемент «Диапазон спектра» служит для уточнения частотного диапазона и времени, выбранных на спектрограмме. При изменении этих значений инструмент выбора на спектрограмме автоматически изменит свои границы. Блок «Дополнительно» позволяет выполнять следующие преобразования амплитудного спектра: дифференцировать или интегрировать (однократно или дважды). Эти функции применяются при необходимости для преобразования данных между ускорением, скоростью и смещением. Блок «Интеграл Фурье» служит для задания параметров расчета графика через интеграл Фурье: параметр T означает размер окна и определяет верхнюю и нижнюю границу интеграла Фурье, а параметр Δf – шаг его расчета по частоте. Также в программе поддерживается дополнительно интегрирование полученного спектра по частоте. Параметр « F » симметрично задает верхнюю и нижнюю границу интегрирования. Параметр « df » задает дифференциал интегрирования. Если интегрирование по частоте не требуется необходимо оставить данные поля нулевыми.

График усредненных спектров. При активации этого графика на области спектрограммы появляется инструмент задания анализируемого частотно-

временного диапазона в виде прямоугольника (Рисунок 1.8, под цифрой «3»). Границы прямоугольника задаются пользователем при помощи мыши. При нажатии кнопки «AVG» появляется окно «График усредненного спектра» с одноименным графиком и дополнительными элементами управления (Рисунок 1.11). При расчете усредненного спектра исходные данные (единичные спектры) берутся из рассчитанной спектрограммы, без учета АРУ и оконной функции. Например, если спектрограмма рассчитана с окном размером 10 с и шагом окна 5 с, то в диапазоне равным одной минуте будет усреднено 12 спектров от десятисекундных интервалов сейсмической трассы (с учетом перекрытия окон). Количество спектров в усреднении определяется автоматически исходя из заданного временного диапазона и информационно указывается в верхнем левом углу построенного графика.

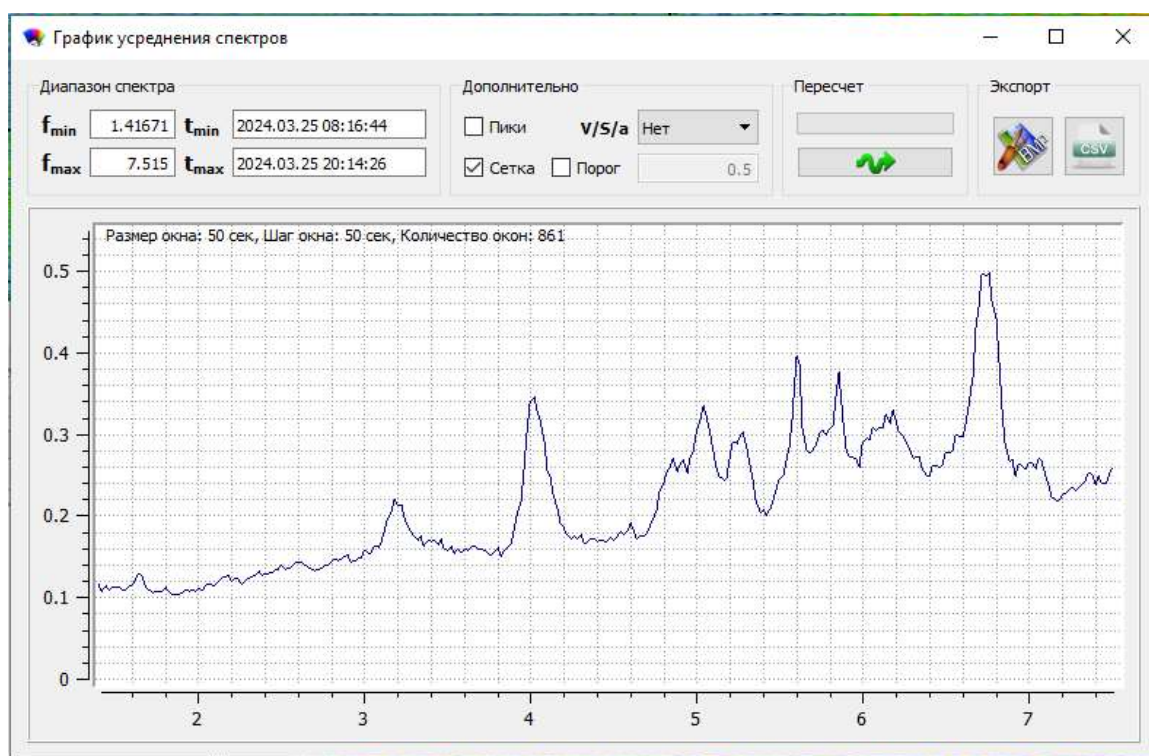


Рисунок 1.11 – Окно «График усредненного спектра» для анализа одноименного амплитудного спектра

Блок «Диапазон спектра» служит для уточнения частотного и временного диапазонов, выбранных на спектрограмме. При изменении этих значений инструмент выбора на спектрограмме автоматически изменит свои границы.

Блок «Дополнительно» позволяет выполнять следующие преобразования усредненного амплитудного спектра: дифференцировать или интегрировать (однократно или дважды). Эти функции применяются при необходимости для преобразования данных между ускорением, скоростью и смещением. Элемент «Порог» служит для исключения из суммы отдельных спектров, имеющих повышенную амплитуду (с амплитудой выше, чем указана в расположенном рядом поле). Этот элемент обработки данных введен с целью устранения высокоамплитудных помех, значительно усложняющих процесс выделения из сейсмического шума малоамплитудных сигналов.

График временной развертки амплитуды сигнала на постоянной частоте. При активации этого графика на области спектрограммы появляется инструмент задания анализируемого временного диапазона и частоты (Рисунок 1.8, под цифрой «4»). Пользователь при помощи мыши задает начало и конец этого диапазона, а также частоту, для которой будет рассчитываться амплитуда. При нажатии кнопки «Freq» появляется окно с графиком временной развертки амплитуды сигнала на заданной пользователем частоте (Рисунок 1.12).

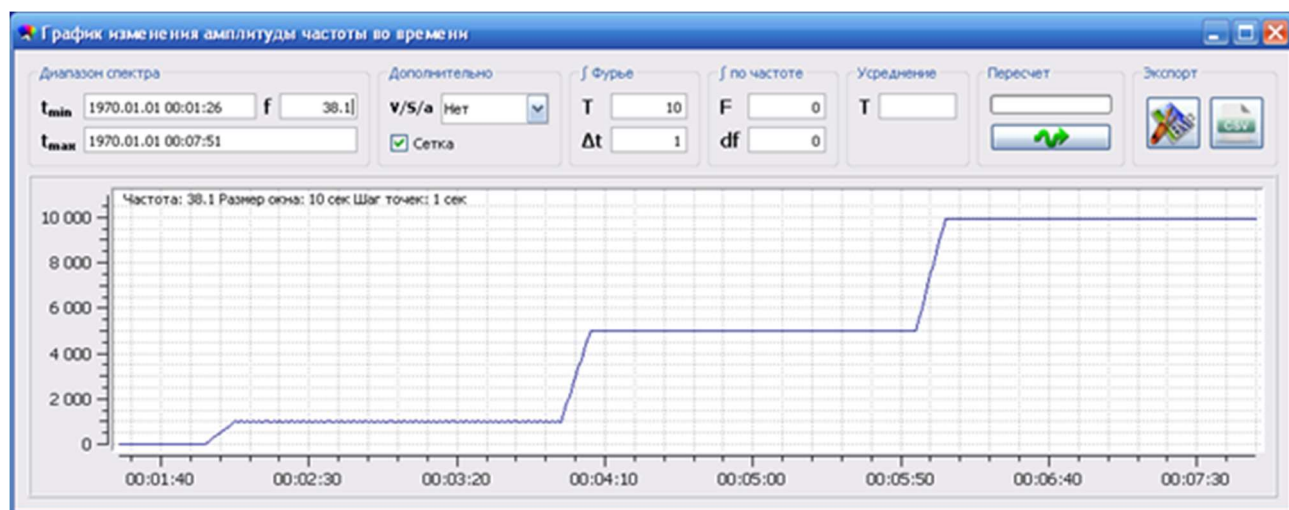


Рисунок 1.12 – Окно графика развертки амплитуды сигнала на заданной частоте

Расчет графика (см. Рисунок 1.12) осуществляется по формуле [Способ..., 2012]:

$$A_f(t) = \frac{2}{T} \left| \int_{t-T/2}^{t+T/2} F(\tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \right|, \quad (1.2)$$

где $A_f(t)$ – амплитуда колебаний на частоте f , t – время регистрации, T – длительность сигнала («окно» - у обработчиков), в котором определяется амплитуда, $|\dots|$ – обозначение модуля комплексного числа. Необходимо отметить, что здесь частота может быть задана любым положительным числом в отличие от вычислений спектрограмм по формуле (1.1) с использованием быстрого преобразования Фурье, где дискретизация по частоте равна $1/T$ (т.е. все частоты кратны этой величине) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Вышеупомянутый подход выгодно отличается возможностью анализировать монохромные сигналы от источников, частота которых в общем случае не кратна шагу дискретизации спектра (именно поэтому при традиционном быстром преобразовании Фурье амплитуда таких сигналов определяется с погрешностью). Это поясняется следующим примером (Рисунок 1.13). Пусть на сейсмограмме зарегистрирован гармонический сигнал с частотой 3.35 Гц и амплитудой 1 мкм/с. В результате оконного дискретного преобразования Фурье такого сигнала получаются амплитудные спектры, высота локального максимума которых отличается в зависимости от величины окна (T). Из графиков видно, что только при величине окна равном 20 с (когда один из отсчетов равен 3.35 Гц) амплитуда максимума спектра совпадает с амплитудой сигнала (рисунок 1.13в). В остальных случаях частоты отсчетов в окрестности сигнала не равны 3.35 Гц, именно поэтому амплитуда определяется неточно – она понижена (Рисунок 1.13а,б).

Блок «Дополнительно» позволяет выполнять следующие преобразования графика: дифференцировать или интегрировать (однократно или дважды). Эти функции применяются при необходимости для преобразования данных между ускорением, скоростью и смещением.

Блок «Интеграл Фурье» служит для задания пользователем окна (T) и шага (Δt) вне зависимости от того, с какими параметрами была рассчитана спектрограмма.

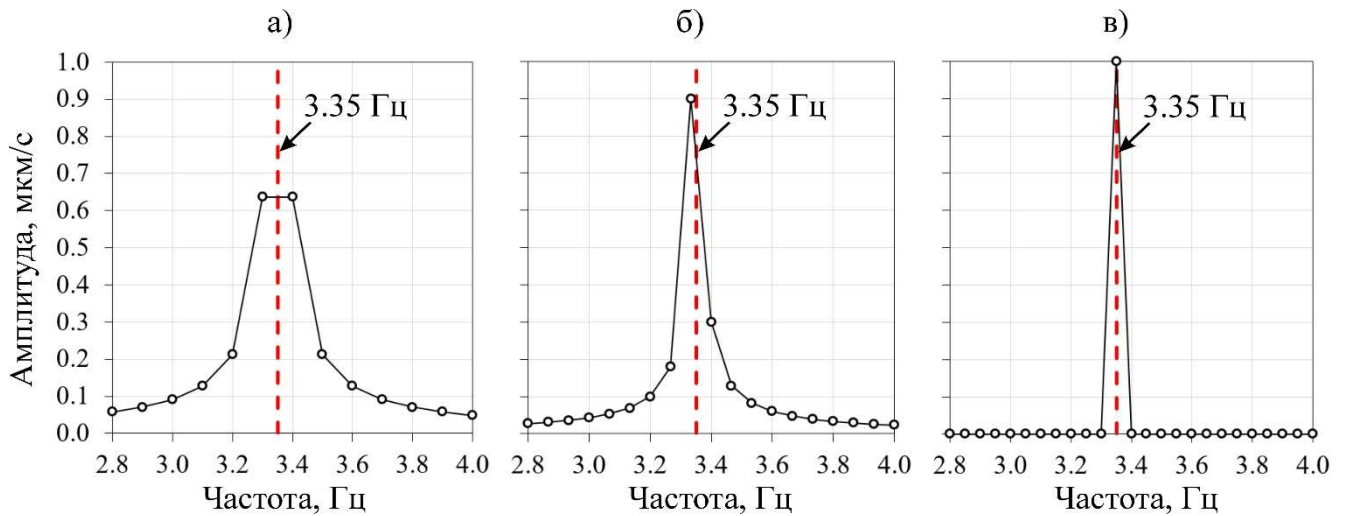


Рисунок 1.13 – Амплитудные спектры в результате оконного дискретного преобразования Фурье гармонического сигнала с частотой 3.35 Гц и амплитудой 1 мкм/с при разном размере окна: 10 с (а), 15 с (б) и 20 с (в)

Если анализируемый сигнал не строго монохроматический (т.е. его частота изменяется в некоторых пределах, как, например, у сигнала с пониженной добротностью), то в программе предусмотрено дополнительное интегрирование по частоте (блок «Интегрирование по частоте»). Параметр « F » симметрично задает верхнюю и нижнюю границу интегрирования, а параметр « df » – дифференциал интегрирования. Если интегрирование по частоте не требуется, то эти поля задаются нулевыми значениями.

Для повышения устойчивости определения амплитуды сигнала, рассчитанные по формуле (1.2) графики усредняются способом скользящего среднего на интервале времени T_I , большем, чем интервал T , по которому вычислялась амплитуда $A_f(t)$:

$$\overline{A_f(t)} = \frac{1}{T_I} \left| \int_{t-T_I/2}^{t+T_I/2} A_f(\tau) d\tau \right| \quad (1.3)$$

Длина интервала T_I задается пользователем в поле блока «Усреднение». С его увеличением растет отношение сигнал/помеха пропорционально квадратному корню от количества интервалов T , попадающих в интервал T_I (при условии, что помеха – случайная величина с нормальным распределением). Это повышает

надежность выделения малоамплитудных сигналов из сейсмического шума, однако детальность анализа во времени при этом уменьшается соответственно увеличению интервала T_I .

График временной развертки амплитуды линейного свип-сигнала. При активации этого графика на области спектрограммы появляется инструмент задания анализируемого временного и частотного диапазонов (см. Рисунок 1.8, под цифрой «5»). Пользователь при помощи мыши задает начало и конец этих диапазонов, а промежуточные значения определяются автоматически по линейной зависимости (линейный свип-сигнал). При нажатии кнопки «Sweep» появляется окно с графиком временной развертки амплитуды сигнала вдоль заданной пользователем линии (Рисунок 1.14). Элементы задания параметров этого графика и графика временной развертки амплитуды сигнала на постоянной частоте (см. Рисунок 1.12) аналогичны, за исключением того, что здесь амплитуда сигнала определяется вдоль линии с меняющейся по линейной зависимости частоты от времени.

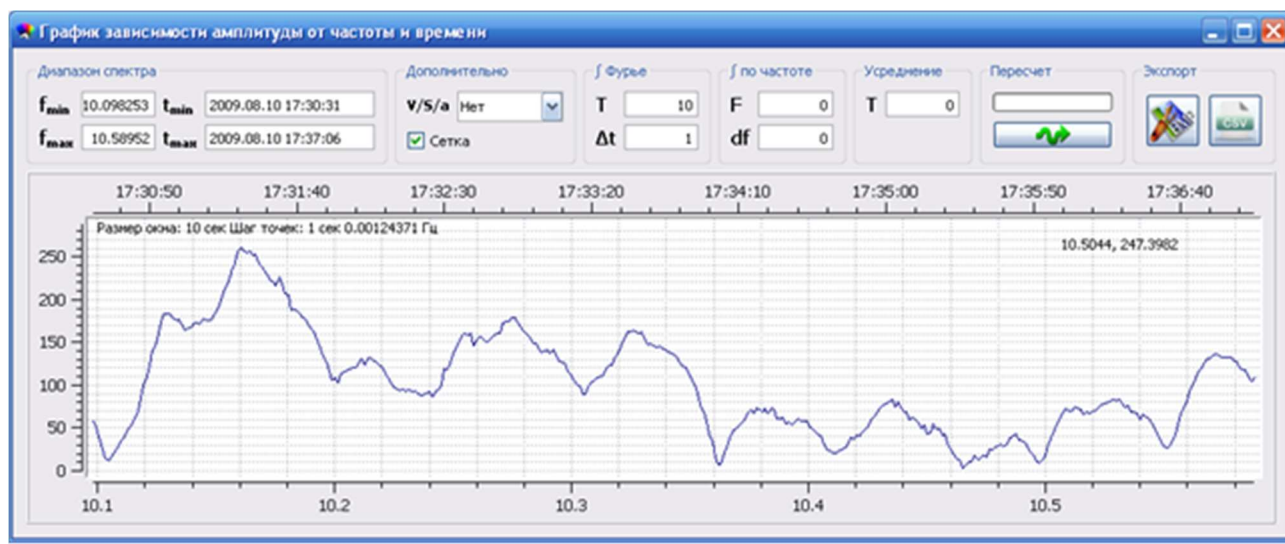


Рисунок 1.14 – Окно графика временной развертки амплитуды линейного свип-сигнала

К дополнительным возможностям программы Spectrum относятся функции сохранения результатов анализа (спектрограмм и графиков) как в виде точечных изображений, так и в числовом (табличном) виде. Причем спектрограмма при необходимости может быть сохранена в виде бинарного файла многоканальной

сейсмограммы (в SEG-Y формате, каждая трасса которой является амплитудным спектром от фрагмента исходной сейсмической трассы). Эта возможность предоставляется пользователю для обработки полученных спектрограмм в других программах (например, их двумерная фильтрация, пикировка локальных максимумов спектров и т.п.).

1.2.3. Верификация программного обеспечения

Разработанное для спектрально-временного анализа сейсмического шума и выделения в нем малоамплитудных сигналов специальное программное обеспечение SpectrumSeism представляет реализацию сложного (многомодульного) алгоритма цифровой обработки сейсмограмм, включающего разветвленный ряд более простых адаптированных алгоритмов (часть из которых известна). Это такие алгоритмы, как чтение файлов специального формата, низкочастотная деконволюция, расчет спектрограмм, расчет мгновенного и усредненного амплитудных спектров, расчет графиков развертки амплитуды во времени сигналов с постоянной частотой (монохромные сигналы) и с меняющейся по линейной зависимости частотой от времени (свип-сигналы). Не существует известных аналогов программного обеспечения, сочетающих в себе одновременно все названные алгоритмы, поэтому верификация разработки выполняется по отдельности для каждой из компонент алгоритма как тестированием на синтетических данных, так и сопоставлением с результатами обработки реальных данных сторонним программным обеспечением.

Тестирование на синтетических данных

Тестирование программного обеспечения на синтетических данных заключается в подаче на его вход искусственно реализованных сейсмограмм сейсмического шума, содержащего в себе сигналы с заданными разработчиком (а значит известными) характеристиками, обработке таких сейсмограмм и сравнении полученных результатов с ожидаемыми. Синтетические данные в виде сейсмограмм сначала моделируются в ПО MS Excel заданием в табличном виде

разных по характеристикам сигналов, которые затем экспортируются в текстовые файлы и переформатируются в файлы формата Vibr2 с использованием специально созданной для таких тестов программы Txt2Vi2.

Тест на гармонических и квазигармонических сигналах. В основе алгоритмов обработки лежит Фурье-анализ, поэтому тестирование программного обеспечения выполняется на синтетических данных, включающих в себя искусственно заданные гармонические и квазигармонические сигналы. К последним относятся сигналы с «плавающей» частотой и/или с меняющейся амплитудой во времени, т.е. такие сигналы, которые при малом окне обработки (в пределе) можно считать гармоническими. Выполнено несколько тестов:

1. Сейсмограмма из суммы гармонических сигналов. Сейсмическая трасса моделировалась в виде суммы из семи синусоид разной частоты и амплитуды каждая, частота дискретизации 200 Гц, длина сейсмограммы 5000 с (Рисунок 1.15). Из сопоставления графиков исходной сейсмограммы, заданной в ПО MS Excel и прочитанной из файла (созданного при экспорте из таблицы в бинарный файл формата Vibr2) в ПО SpectrumSeism видно их полное соответствие. В результате оконного преобразования Фурье (окно $T=100$ с, шаг окна 100 с) и усреднения 49 амплитудных спектров получается усредненный спектр, состоящий из пиков в точности совпадающих по значению частоте и амплитуде заданных сигналов (Рисунок 1.16).

2. Сейсмограмма от квазигармонических сигналов с «плавающей» частотой. Выполнен ряд тестов на синтетических данных, включающих сигналы с меняющейся частотой. На представленной ниже иллюстрации (Рисунок 1.17) – спектрограмма сейсмического шума, зарегистрированного на одной из станций сейсмологической сети («Черемушки») с добавленными искусственными сигналами: «Сигнал 1» – квазигармонический с увеличивающейся по квадратичному закону частотой (появился в 16:40) и «Сигнал 2» – гармонический с частотой 20 Гц (прекратился в 01:15). Видно, что оба сигнала на спектрограмме

отображаются корректно (время регистрации и частоты соответствуют характеристикам заданных сигналов).

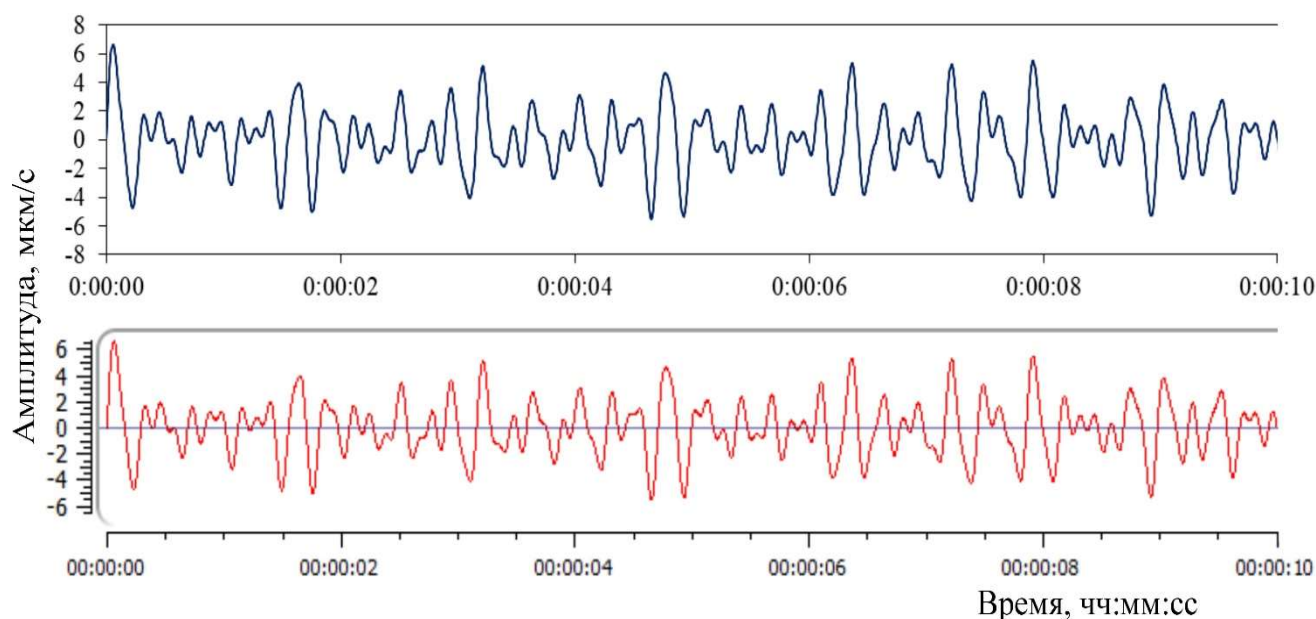


Рисунок 1.15 – Фрагменты от 5000-секундной синтетической сейсмограммы из суммы гармонических сигналов (вверху – трасса, отрисованная в ПО MS Excel; внизу – трасса, прочитанная из файла и отрисованная в ПО SpectrumSeism)

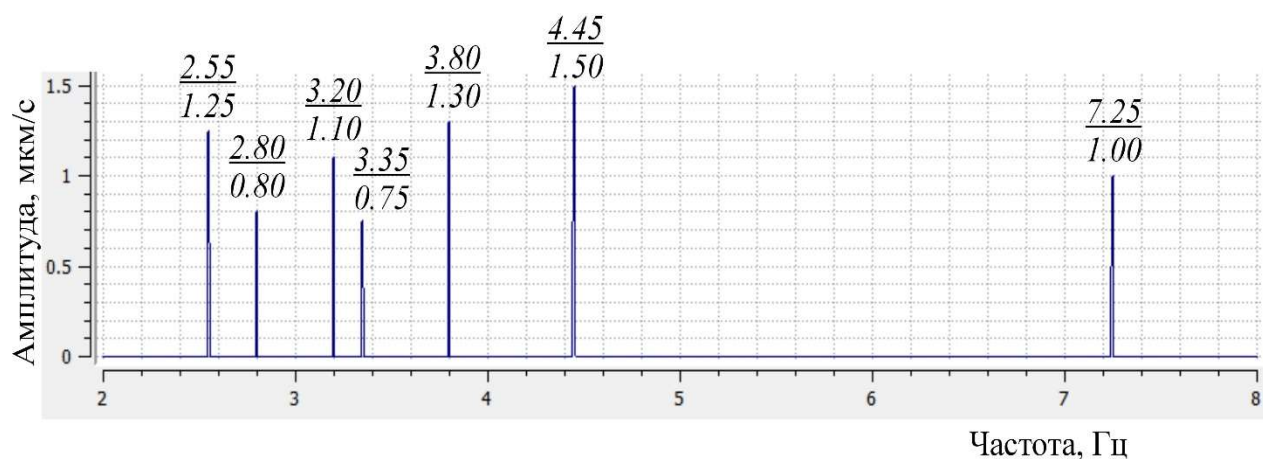


Рисунок 1.16 – Амплитудный спектр от синтетической сейсмограммы (см. Рисунок 1.15). Числами на графике отмечены заданные характеристики каждого из синтезированных гармонических сигналов: в числителе – частота (Гц), в знаменателе – амплитуда (мкм/с)

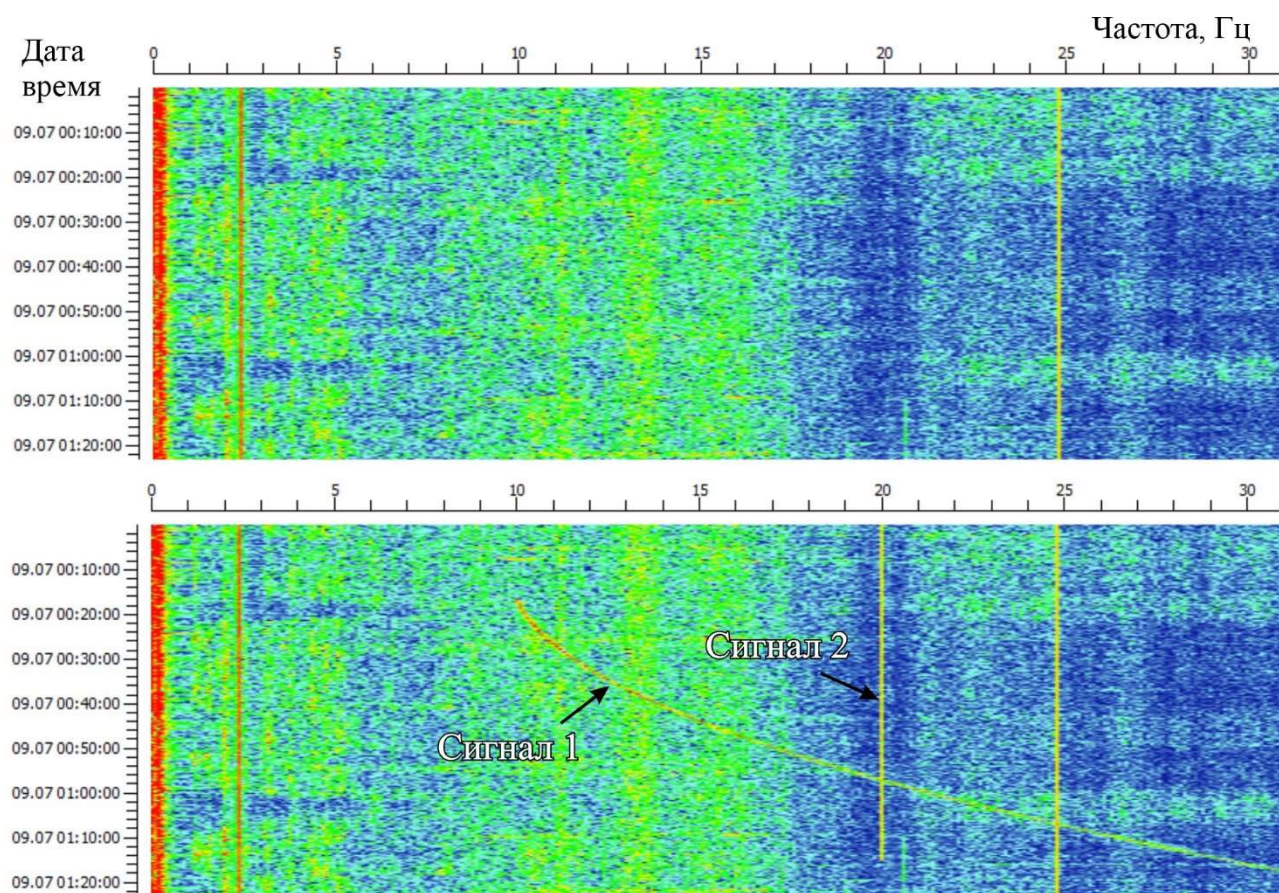


Рисунок 1.17 – Спектрограмма зарегистрированного на сейсмостанции «Черемушки» сейсмического шума (вверху) и она же с добавлением искусственных сигналов (внизу). «Сигнал 1» – квазигармонический с увеличивающейся по квадратичному закону частотой от времени (появился в 00:16:40) и «Сигнал 2» – гармонический с частотой 20 Гц (прекратился в 00:01:15)

3. Сейсмограмма от монохроматических сигналов с меняющейся амплитудой. В этом примере тестируется результат применения ПО SpectrumSeism на двух искусственных сигналах с постоянным дробным значением частоты: 3.333 и 38.095 Гц и меняющейся ступенчатообразно со временем амплитудой в одной сейсмической трассе (Рисунок 1.18). В результате применения ПО Spectrum получаются графики временной развертки амплитуды сигналов, совпадающие по значению и времени изменения амплитуды с характеристиками исходных сигналов (Рисунок 1.19).

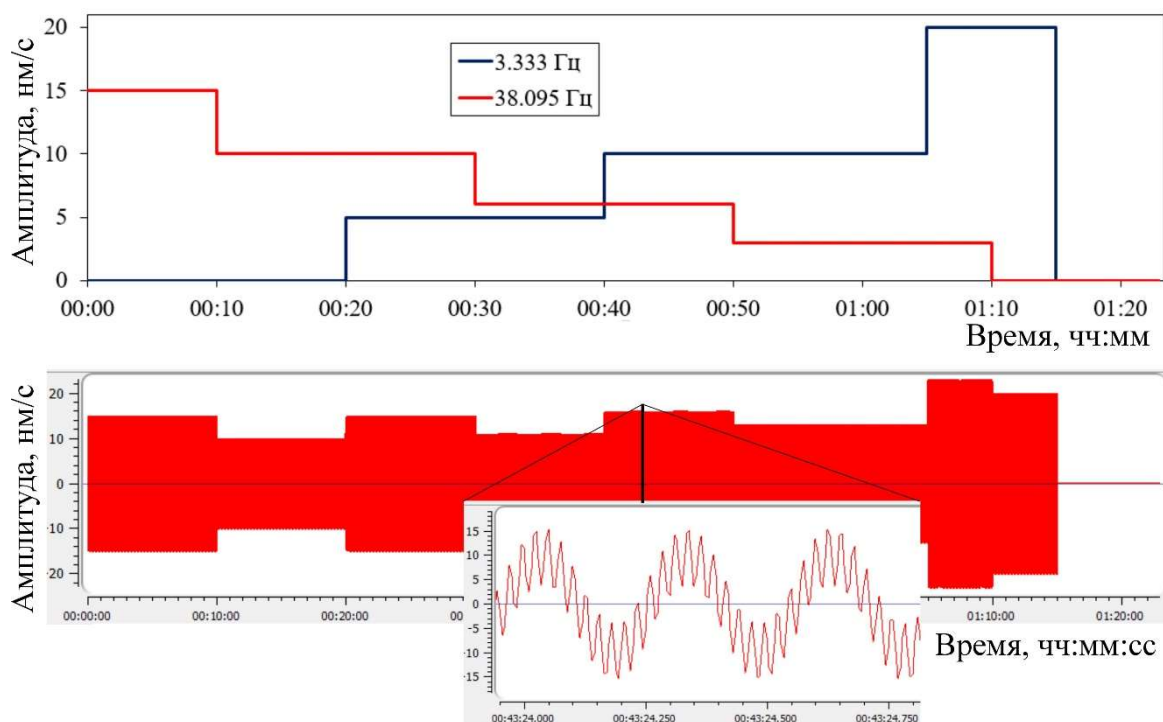


Рисунок 1.18 – Изменение амплитуды во времени искусственных сигналов с частотами 3.333 Гц и 38.095 Гц (вверху) в одной сейсмической трассе (внизу)

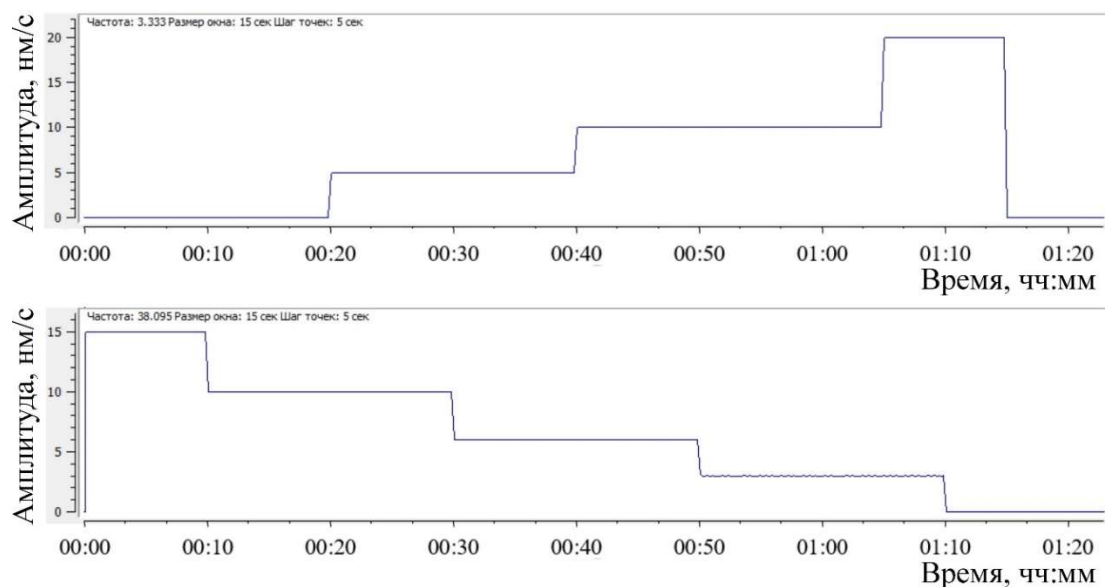


Рисунок 1.19 – Временная развертка амплитуды монохромных сигналов с частотой 3.333 Гц (вверху) и 38.095 Гц (внизу) в результате обработки синтетической сейсмограммы (см. Рисунок 1.18)

Сопоставление с результатами обработки реальных данных сторонним программным обеспечением

Верификация программного обеспечения SpectrumSeism выполнялась также сопоставлением результатов ее применения на реальных сейсмических данных с

результатами обработки программами других разработчиков. Выполнено два теста:

1. Верификация процедуры расчета усредненных амплитудных спектров зарегистрированного сейсмического шума выполнялась при сопоставлении с результатами применения ПО «SVMOD V1.0» [Бах и др., 2019] (Рисунок 1.20). Входными данными являлись сейсмограммы зарегистрированного в плотине Саяно-Шушенской ГЭС сейсмического шума автономной аппаратурой «Байкал» с трехкомпонентными акселерометрами «А1632» (включающие серии 10-минутных записей с дискретизацией 200 Гц в ряде точек на гребне плотины, дата регистрации 04.10.2009). Для корректного сопоставления амплитудные спектры рассчитывались с одинаковыми параметрами, а именно: размер окна равнялся 4096 отсчетам в программе SVMOD и 20.48 с в программе SpectrumSeism, спектры рассчитывались без перекрытия окон. Из сопоставления результатов обработки сейсмограммы двумя разными программами видно их полное соответствие (Рисунок 1.20).

2. Верификация процедуры низкочастотной деконволюции сейсмограмм выполнялась при сопоставлении результатов обработки данных программой SpectrumSeism с результатами применения программного обеспечения, разработанного и реализованного в исследовании П.А. Дергача [Особенности..., 2018]. Исходная сейсмограмма (Рисунок 1.21 вверху) получена при регистрации аппаратурой «Байкал-АСН86» с вертикальным сейсмоприемником-геофоном ZF (собственная частота 4.5 Гц, КЭМС 28.8 В/(м/с)) колебаний от Колыванского землетрясения, произошедшего 09.01.2019 с $ML=4.3$ на расстоянии около 30 км [Алтай..., 2021]. Из графиков сейсмограмм, полученных в результате низкочастотной деконволюции к 0.45-герцевому сейсмоприемнику двумя программами, видно их полное соответствие (Рисунок 1.21).

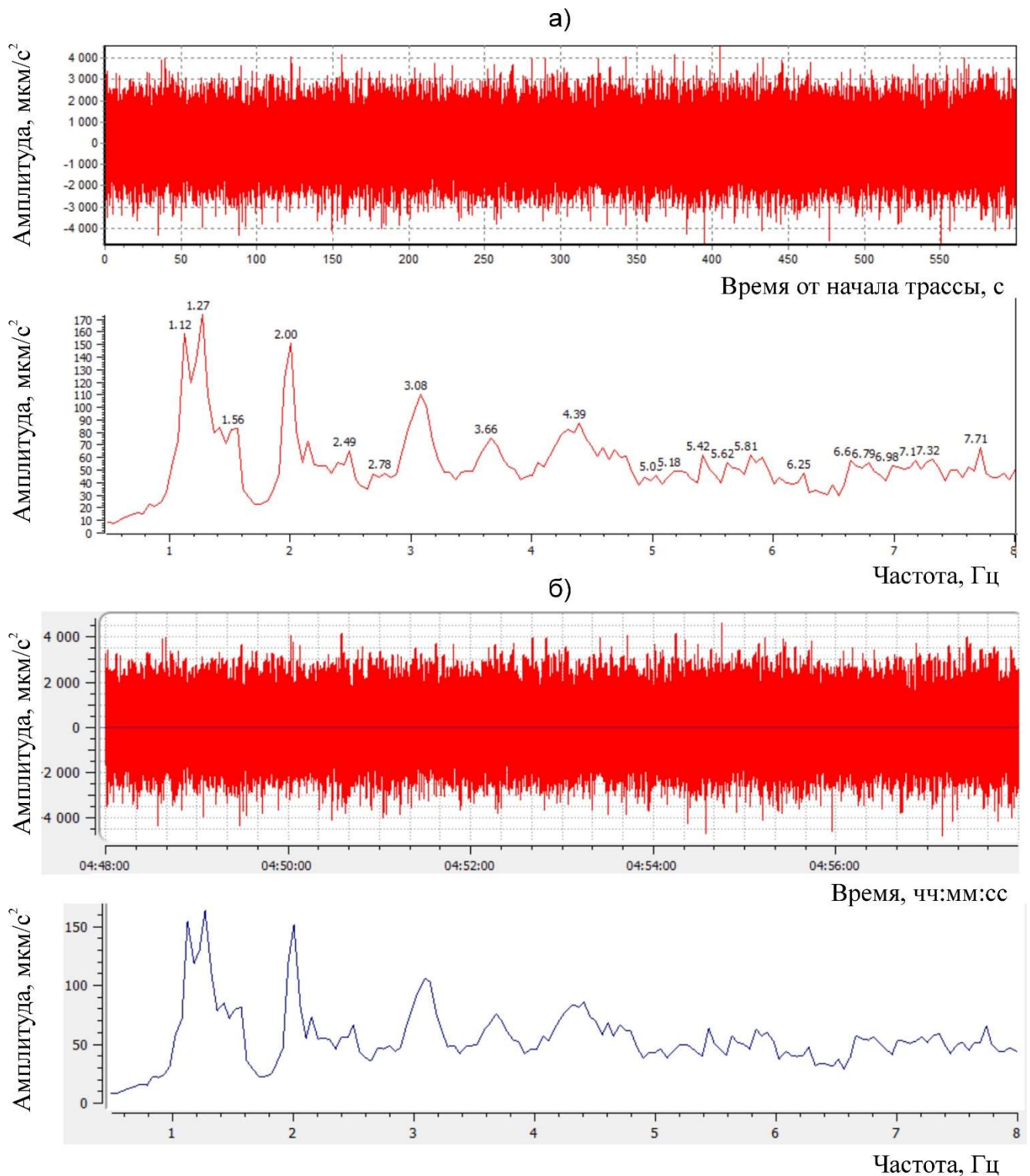


Рисунок 1.20 – Сейсмограмма зарегистрированного в плотине Саяно-Шушенской ГЭС сейсмического шума и усредненный амплитудный спектр от нее при обработке программами SVMOD (а) и SpectrumSeism (б)

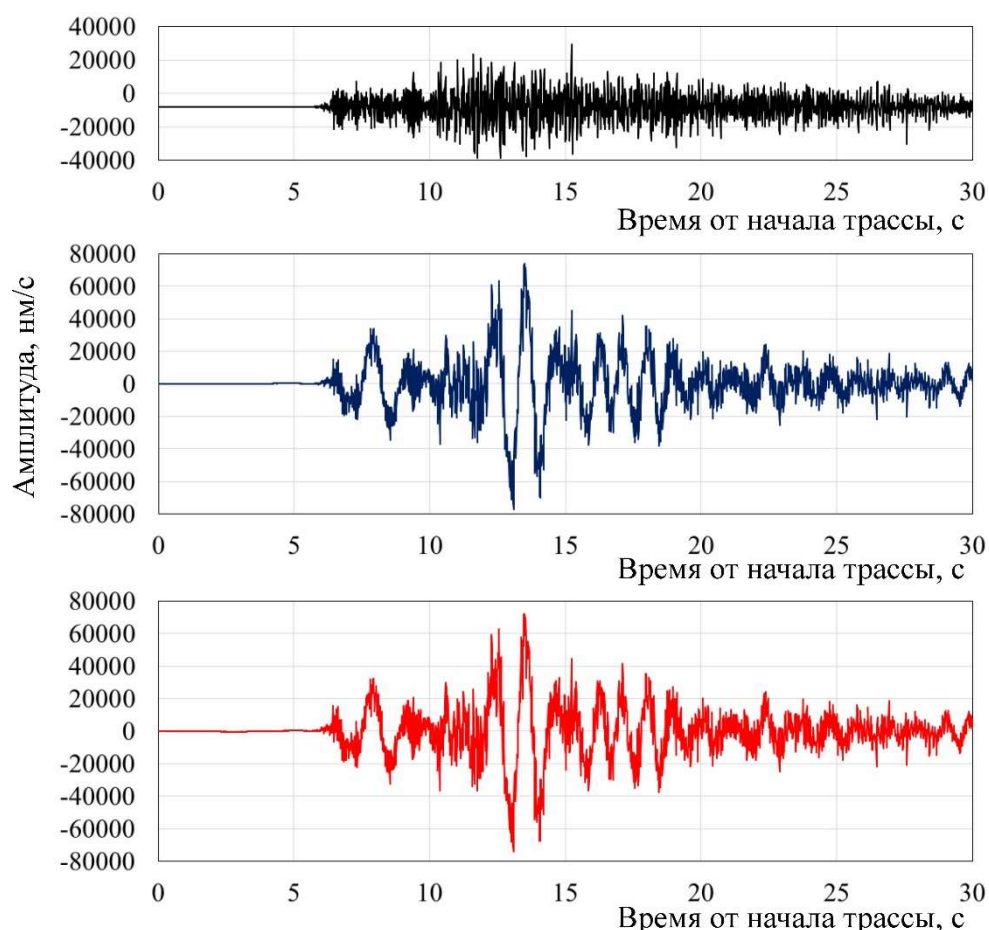


Рисунок 1.21 – Сейсмограмма колебаний от Колыванского землетрясения при регистрации 4.5-герцевым геофоном ZF (вверху) и после ее низкочастотной деконволюции к 0.45-герцевому сейсмоприемнику с использованием программы П.А. Дергача [Особенности..., 2018] (в центре) и ПО SpectrumSeism (внизу)

Для верификации реализованной в ПО SpectrumSeism процедуры низкочастотной деконволюции применительно к сейсмическому шуму проведен специальный эксперимент с одновременной регистрацией сигналов в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС низкочастотным акселерометром A1738 (нижняя частота 0.4 Гц) и сейсмоприемником GS-20DX (собственная частота 10 Гц). Оцифровка аналогового сигнала с сейсмических датчиков производилась однотипными 24-разрядными автономными регистраторами «Байкал». Амплитудный спектр сигнала с сейсмоприемником GS-20DX пересчитан в ускорения (для корректного сопоставления с сигналом, зарегистрированным при помощи акселерометра). Причем для сравнения взяты горизонтальные компоненты датчиков, где с наибольшей амплитудой регистрируются поперечные колебания

плотины (Рисунок 1.22). Известно, что частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС принимают значения от 1.1 Гц и выше (в зависимости от номера моды) [Брызгалов, 1999; Пересчет..., 2002]. Эти колебания прослеживаются в низкочастотной части амплитудных спектров сейсмического шума, регистрируемого в плотине в виде локальных максимумов [Пересчет..., 2002; Егоров и др., 2016], что также видно на усредненных амплитудных спектрах (Рисунок 1.22). Вместе с тем, амплитуда локальных максимумов в низкочастотной части спектра (на частоте меньше 10 Гц), зарегистрированного сейсмоприемником GS-20DX, существенно ниже, чем у спектра от акселерометра в силу несоответствия амплитудно-частотных характеристик этих двух приборов (Рисунок 1.22 вверху). Из сопоставления усредненных амплитудных спектров сейсмического шума, зарегистрированного акселерометром A1738, и зарегистрированного сейсмоприемником GS-20DX и затем преобразованного алгоритмом низкочастотной деконволюции от 10 Гц к 0.5 Гц, видно, что амплитуды локальных максимумов совпадают между собой (Рисунок 1.22 внизу). Это говорит, во-первых, о корректности реализованного в ПО SpectrumSeism алгоритма низкочастотной деконволюции, а во-вторых – о принципиальной возможности выполнять экспериментальные исследования при регистрации сейсмического шума на объектах с использованием электродинамических датчиков, даже если их собственная частота выше частоты полезного сигнала. Последнее позволило выполнить значительный объем исследований на Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС и других объектах при крайне низком финансировании (т.к. использовалась относительно дешевая регистрирующая аппаратура).

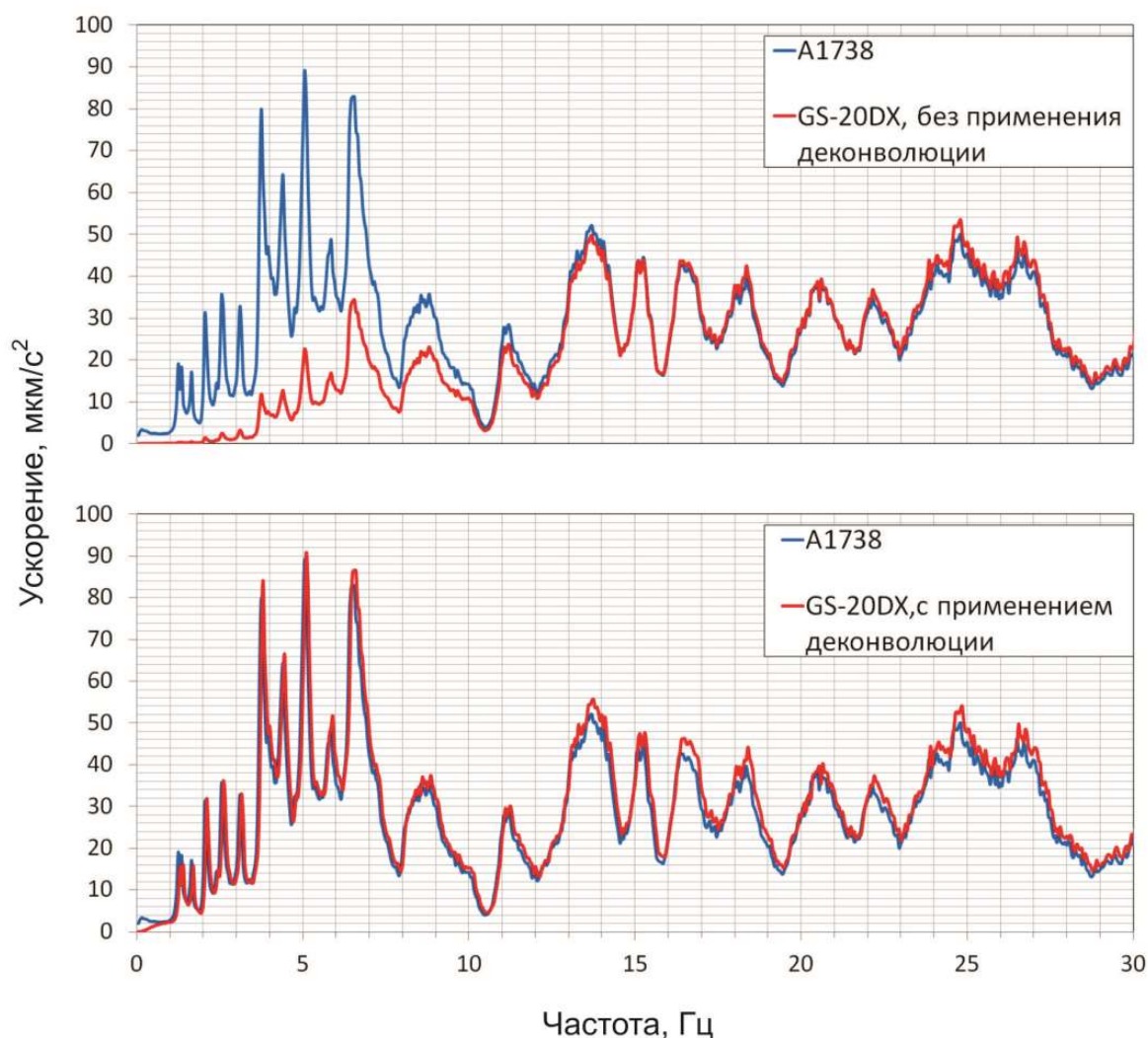


Рисунок 1.22 – Сопоставление усредненных амплитудных спектров сейсмического шума при регистрации в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС двумя типами датчиков. Вверху – по исходным данным; внизу – данные сейсмоприемника преобразованы процедурой низкочастотной деконволюции от 10 Гц к 0.5 Гц.

1.3. Выделение слабых сигналов в спектрограммах сейсмического шума с определением их амплитудно-частотных характеристик

Спектрально-временной анализ сейсмограмм зарегистрированного сейсмического шума с использованием разработанного программного обеспечения SpectrumSeism, с целью выделения из его состава малоамплитудных сигналов, включает следующие этапы:

1. Учет априорной информации о характеристиках анализируемых сигналов.

Для выделения полезных сигналов из сейсмического шума необходимо знать признаки, по которым можно отличить сигнал от помех. До проведения опыта по обнаружению сигналов, абсолютные значения этих признаков неизвестны, априорно определяются только вероятности наличия тех или иных признаков. Они определяются исследователем исходя из условий поставленной задачи: например, выделить сигнал от вращающейся гидротурбины, или от колеблющегося на собственной частоте сооружения; для каждого из объектов необходимо определить ожидаемые границы значений частоты возбуждаемого ими сигнала. Эта априорная информация используется для задания стартовых параметров расчета спектров и создания спектрограмм: размер окна, шаг окна, а также параметров предварительной обработки сигналов при ее необходимости (Рисунок 1.23).

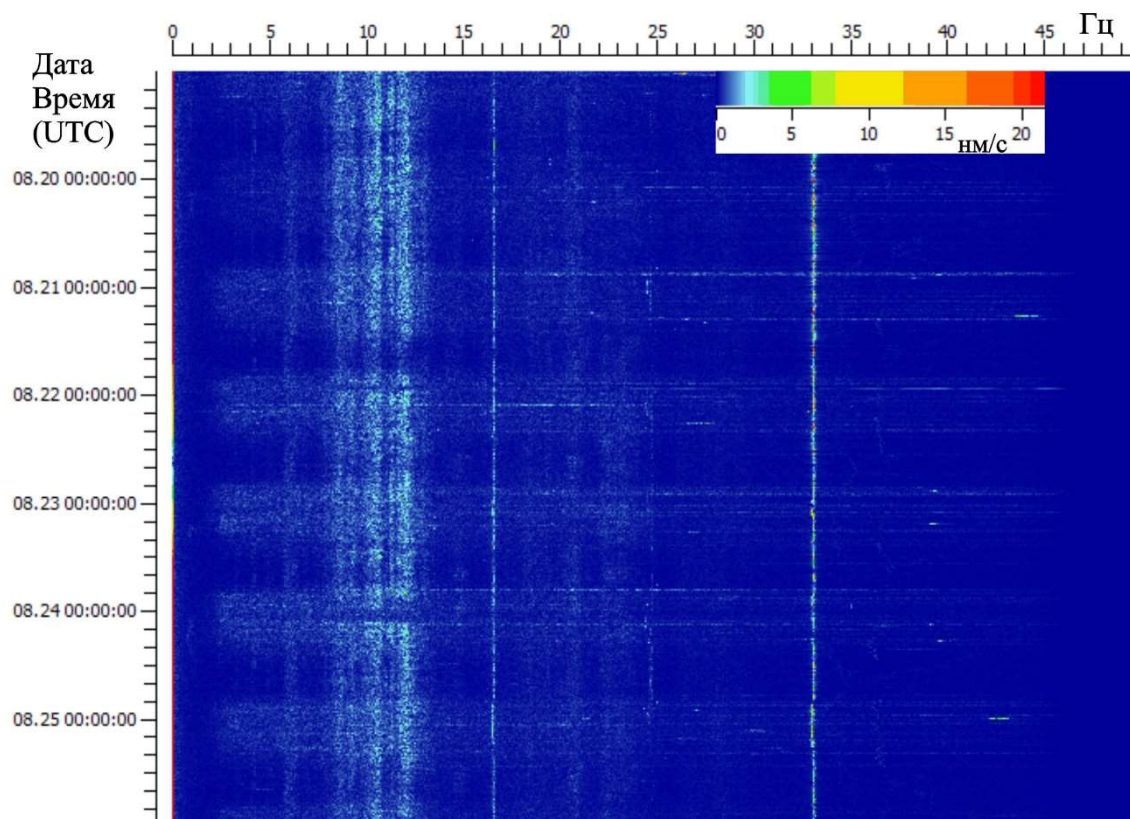


Рисунок 1.23 – Спектрограмма сейсмического шума при первой загрузке данных 5-ти дней мониторинга на станции IVS (г. Петропавловск-Камчатский)

Так, если по условиям задачи необходимо определять значения частот сигналов с разрешенностью по частоте в 0.01 Гц, то размер окна задается не менее, чем 100 с. В таком случае разрешенность рассчитанной спектрограммы по времени составит также не менее 100 с. Другой пример: необходимо определять изменение амплитуды сигнала на частоте вращения гидротурбины с разрешающей способностью во времени 20 с, тогда окно задается соответствующего размера. Однако в этом случае разрешенность спектра по частоте составит $1/20=0.05$ Гц (таков будет шаг дискретизации спектрограммы по оси частот).

К априорной информации о сигналах можно отнести и характеристики их регистрации, из особенностей которых следует потребность в предварительной обработке сигналов. Так, в ряде случаев требуется преобразовать зарегистрированный высокочастотным электродинамическим сейсмоприемником сигнал в более низкочастотный – в этом случае применяется реализованный в программе алгоритм низкочастотной деконволюции. Кроме этого, в ряде исследований необходимо преобразовать данные из одних единиц измерения в другие. Например, из данных регистрации датчиком-велосиметром получить значения ускорений, что достигается реализованным в программе или алгоритмом дифференцирования сейсмической трассы или, в спектральной области (как известно из теорем о спектрах) умножением амплитуды на величину $2\pi f$, где f – частота в герцах.

2. Уточнение параметров расчета и визуализации спектрограммы.

Выполняется исследователем следующим шагом при спектрально-временном анализе сейсмического шума по спектрограмме, рассчитанной на первом шаге (с предварительными параметрами). В результате на спектрограмме выявляются интересующие малоамплитудные сигналы (по частоте и времени), а затем уточняются (подбором) параметры (окно, шаг окна, масштаб, цветовая палитра) для более наглядной визуализации этих сигналов (Рисунок 1.24).

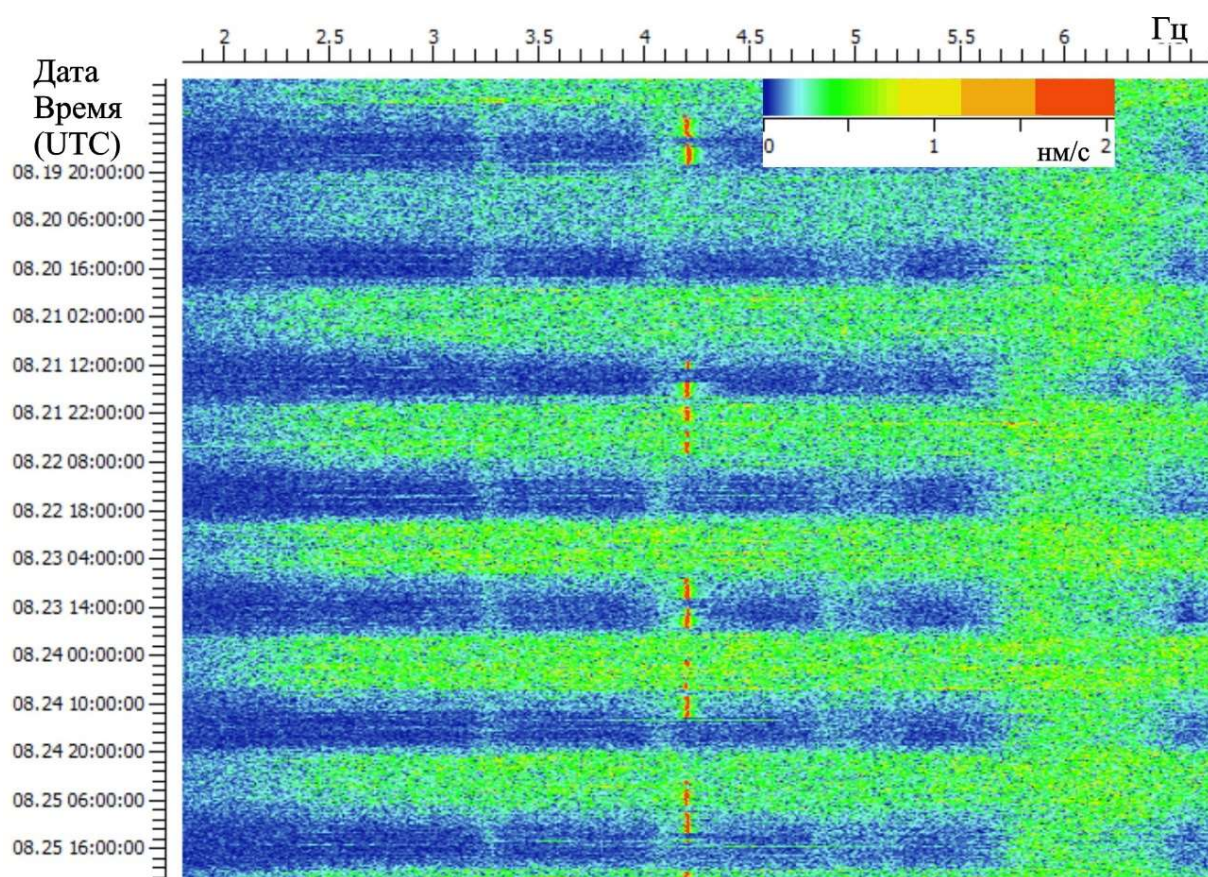


Рисунок 1.24 – Увеличенный фрагмент (по сравнению с изображенным на Рисунке 1.23) спектрограммы сейсмического шума с подобранной палитрой для визуализации малоамплитудных сигналов с частотами ~ 3.3 Гц, ~ 4.1 Гц и ~ 4.9 Гц (по данным 5-ти дней мониторинга на станции IVS, г. Петропавловск-Камчатский)

3. Анализ спектрограммы с определением амплитудно-частотно-временных характеристик малоамплитудных сигналов. В результате визуального анализа спектрограммы определяются характеристики малоамплитудных сигналов, выделяющихся в виде локальных максимумов амплитудных спектров на фоне некоррелированного шума: средняя частота и диапазон ее изменения во времени, изменение амплитуды во времени и ее значение относительно фона, а также ширина спектральной характеристики.

4. Определение в границах частота-время области устойчивого выделения полезного сигнала. Исследователем по спектрограмме визуально оцениваются границы области, где анализируемый малоамплитудный сигнал не искажен многообразными помехами, как квазистационарными (например, повышенным

фоном помех в дневное время суток или в период ухудшения погодных условий, длительной работой промышленных установок с пересекающимся с полезным сигналом частотным диапазоном и т.д.), так и относительно кратковременными (например, землетрясениями, взрывами, сейсмическими воздействиями при строительных работах или при движении транспорта и т.д.) (Рисунок 1.25). В качестве вспомогательного инструмента для определения типа помехи реализована возможность анализа фрагмента сейсмической трассы, границы которого задаются пользователем на спектрограмме.

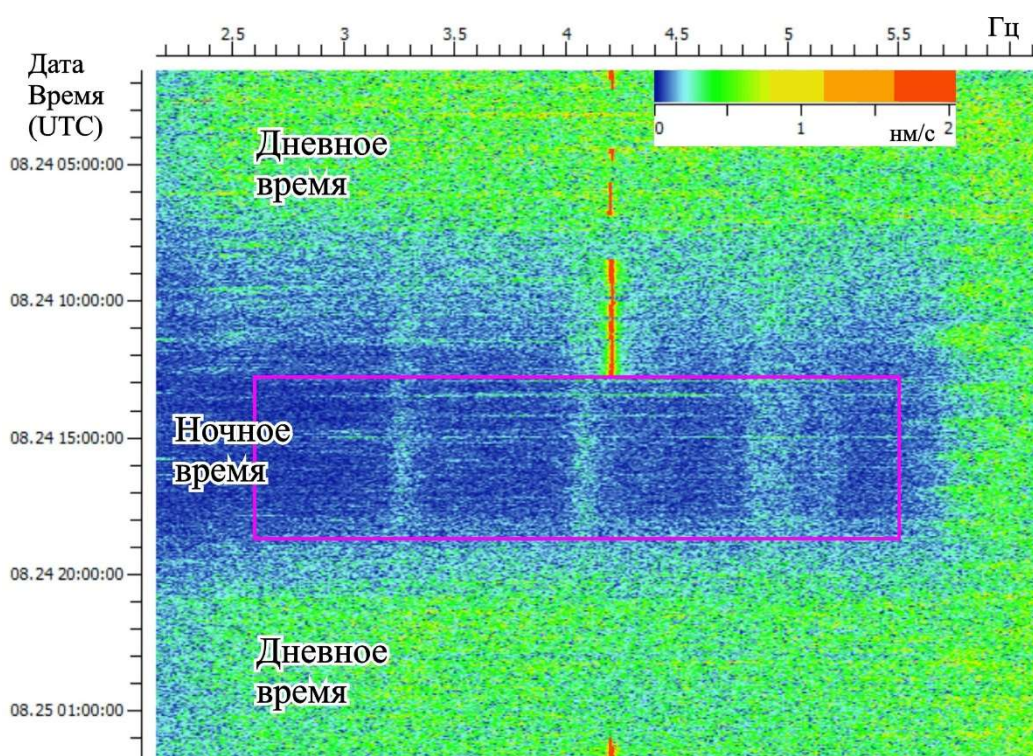


Рисунок 1.25 – Увеличенный фрагмент (по сравнению с изображенным на Рисунке 1.24) спектрограммы сейсмического шума с выбранной областью устойчивого выделения малоамплитудных сигналов с частотами ~ 3.3 Гц, ~ 4.1 Гц и ~ 4.9 Гц (по данным мониторинга на станции IVS, г. Петропавловск-Камчатский)

5. Выделение малоамплитудных сейсмических сигналов при усреднении амплитудных спектров. В заданной исследователем ограниченной частотой и временем области рассчитываются усредненные амплитудные спектры на которых проявляются малоамплитудные сейсмические сигналы в виде локальных максимумов, определяется частота и амплитуда этих экстремумов (Рисунок 1.26). Для устранения высокоамплитудных кратковременных помех реализовано

исключение из усредняемых слагаемых амплитудных спектров, имеющих максимальную амплитуду больше заданной пользователем.

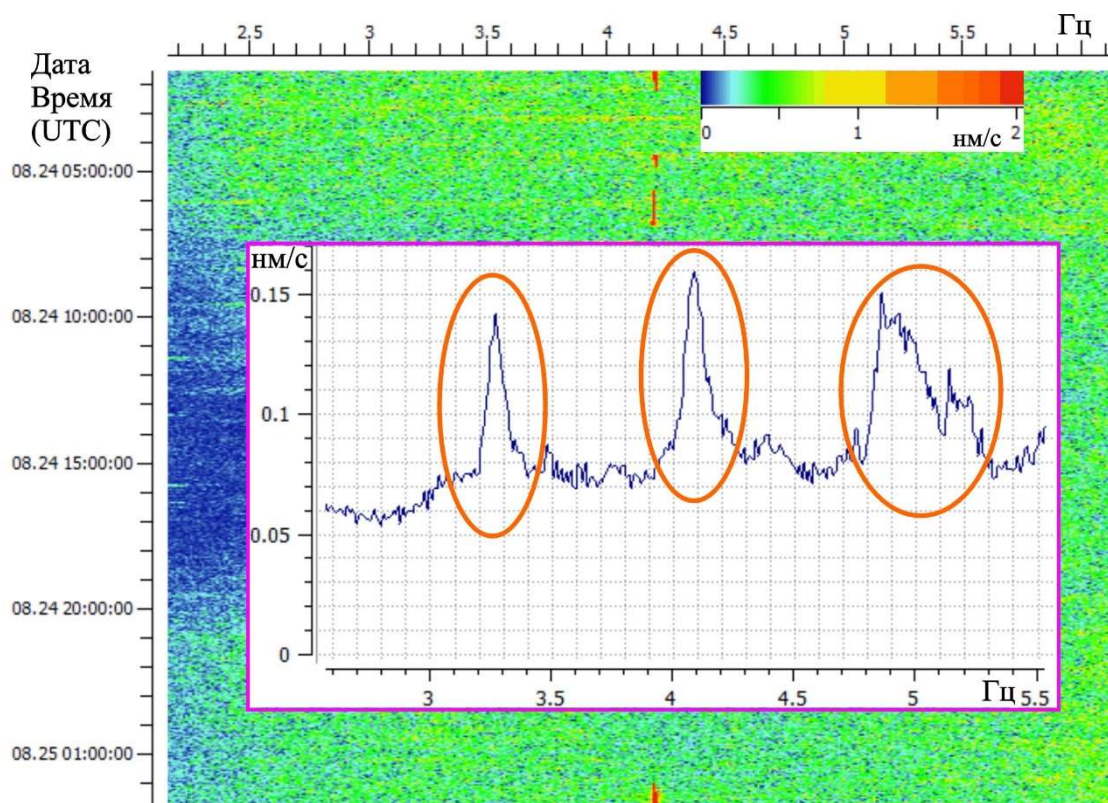


Рисунок 1.26 – Увеличенный фрагмент спектрограммы сейсмического шума и усредненный амплитудный спектр по данным из области устойчивого (см. Рисунок 1.25) выделения малоамплитудных сигналов ~ 3.3 Гц, ~ 4.1 Гц и ~ 4.9 Гц (по данным мониторинга на станции IVS, г. Петропавловск-Камчатский)

6. Выделение малоамплитудных монохромных сейсмических сигналов по временной развертке амплитуды во времени. Для заданных исследователем частоты и временного диапазона рассчитывается график зависимости амплитуды сигнала во времени. При этом каждое значение амплитуды рассчитывается через интеграл Фурье, пределы которого соответствуют временному окну, заданному пользователем. Дополнительно, для повышения помехоустойчивости (однако, в ущерб временной разрешенности анализа) реализована процедура сглаживания графика во временном окне, также заданным исследователем. Полученные в результате обработки значения амплитуд используются для определения степени возбуждения упругих волн источником (например, вращающейся турбиной ГЭС).

1.4. Полученные результаты

Итак, по данным мониторинга сейсмического шума (относительно постоянной вибрации земной поверхности, возникающей из-за множества разных техногенных и природных источников возбуждения упругих волн), разработан, теоретически и экспериментально обоснован, апробирован и программно реализован комбинированный алгоритм выделения малоамплитудных квазигармонических сейсмических сигналов на основе Фурье-анализа [SpectrumSeism, 2021]. Строгий порядок действий исполнителя следующий:

1. Выполняется спектрально-временной анализ зарегистрированного сейсмического шума:

1.1. С использованием оконного преобразования Фурье с заданными по характеристикам сигналов априорных данных параметрами (окно, шаг окна, частотный и временной диапазон), формируется спектрограмма сейсмической трассы.

1.2. При интерактивном изменении масштаба спектрограммы, подбора цветовой палитры амплитуд, перемещения изображения по осям частота-время, качественно анализируется прослеживаемость в сейсмическом шуме малоамплитудных сигналов.

1.3. Для повышения детальности или устойчивости отображения обнаруженных (п. 1.2) малоамплитудных сигналов на спектрограмме уточняются параметры оконного преобразования Фурье.

1.4. Для исключения из обработки помех по спектрограмме определяются интервалы их наложения на малоамплитудные сигналы в границах частота-время.

1.5. По спектрограмме определяются характеристики малоамплитудных сигналов, а именно частота и ее вариации во времени, ширина спектральной линии, временной период прослеживания.

2. Выделяются малоамплитудные сейсмические сигналы при усреднении амплитудных спектров:

2.1. По построенной спектрограмме (п. 1.3) в границах частота-время определяются интервалы устойчивого прослеживания малоамплитудных сигналов.

2.2. С исключением из обработки помех в виде высокоамплитудных сигналов рассчитываются и строятся графики усредненных амплитудных спектров Фурье в заданных границах (п. 2.1).

2.3. По построенным графикам (п. 2.2) выделяются малоамплитудные сигналы в виде локальных максимумов и по ним определяются значения амплитуд и частот.

3. Выделяются малоамплитудные монохромные сейсмические сигналы по временной развертке их амплитуды:

3.1. По построенной спектрограмме (п. 1.3) в границах частота-время определяются интервалы устойчивого прослеживания монохромных малоамплитудных сигналов.

3.2. При исключении из обработки интервалов с высокоамплитудными помехами рассчитывается временной ряд амплитуд монохромного сигнала по формуле (1.2).

3.3. Способом скользящего среднего временной ряд сглаживается для повышения помехоустойчивости в определении по нему амплитуд сигнала.

Преимущество найденного решения заключается в сочетании в одной программе оперативного анализа спектрально-временных характеристик сейсмического шума, включающего удобную навигацию по спектрограмме с возможностью интерактивно менять параметры ее расчета и масштаб, со одной стороны, а с другой – инструментов усреднения амплитудных спектров и расчета амплитуд монохромных сигналов во времени в заданных на спектрограмме областях их устойчивого прослеживания. Такая комбинация позволяет обработчику надежно выделять в сейсмическом шуме малоамплитудные сигналы с учетом влияния помех, что уменьшает вероятность ошибки и повышает эффективность обработки данных мониторинга по сравнению с традиционно применяемыми алгоритмами и программами.

Глава 2. ДИСТАНЦИОННОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАБОТАЮЩЕМ ОБОРУДОВАНИИ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

К разрушительным процессам в работающем оборудовании промышленных объектов в контексте исследования относятся такие опасные явления, как сбои в его работе, сопровождающиеся увеличением вибрации, в том числе появлением новых ее компонент, и резонансные усиления колебаний конструкций и сооружений предприятий при взаимодействии с ними работающего оборудования [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Известные современные методики обнаружения таких процессов базируются на анализе данных мониторинга колебаний, зарегистрированных непосредственно на объектах при помощи систем вибрационного и сейсмометрического контроля [ГОСТ ИСО 10816-1-97, 1999; Сейсмометрический..., 2013; Егоров и др., 2016].

Техногенная катастрофа, произошедшая 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС заставила задуматься о разработке новой методики дистанционного контроля опасных процессов, возникающих при работе мощного оборудования. В ходе расследования причин аварии выяснилось, что общепринятый подход к организации вибрационного контроля с установкой датчиков непосредственно на гидроагрегатах не гарантирует защиту от чрезвычайных ситуаций [Карпик и др., 2011]. Необходимы новые подходы, новые методики определения степени воздействия работающего оборудования на окружающие конструкции, на все сооружение. Часть элементов оборудования (например, лопасти гидротурбины или лопатки направляющего аппарата) недоступна для прямого измерения их вибрации. Для контроля целостности указанных узлов требуется остановка оборудования для осмотра и дефектоскопии, а значит нарушается непрерывность мониторинга. Отсюда возможны пропуски зарождающихся дефектов в конструкции оборудования, следовательно, неизбежны аварии [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Еще и такой факт. При значительных повреждениях инженерных сооружений и промышленного оборудования контрольно-измерительная аппаратура, установленная в них, также разрушается, в результате информация развития аварийного состояния теряется. Все перечисленное создает трудности в анализе причин разрушения. Подобная ситуация сложилась на Саяно-Шушенской ГЭС в 2009 г. после выхода из строя второго гидроагрегата. В акте расследования причин аварии необоснованно отмечено увеличение вибрации подшипника турбины за два месяца до нее [Акт..., 2009]. В то же время результаты Фурье-анализа сейсмического шума, зарегистрированного перед аварией на одной из станций сейсмологической сети, свидетельствуют, что увеличения вибрации не было, а выводы основаны на данных с неисправного датчика системы вибрационного контроля [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Указанные факты убеждают в острой необходимости разработки новых (в дополнение к известным) подходов к обнаружению разрушительных процессов в работе оборудования крупных и стратегически важных промышленных объектов, а также для определения причин нештатных ситуаций для их исключения при последующей эксплуатации [Лисейкин, Селезнев, 2024].

2.1. Обзор современных методик с анализом их преимуществ и ограничений

Идея контроля физического состояния промышленного объекта по сейсмограммам сейсмического шума, зарегистрированного в его окрестности (дистанционного контроля), не нова и впервые озвучена в 70-х годах прошлого века, когда станциями сейсмической группы NORSAR (Норвегия) были зарегистрированы сигналы от работающих гидроагрегатов ГЭС [Hjortenberget, Risbo, 1975]. Однако сейсмические волны, распространяющиеся в геологической среде от ГЭС и зарегистрированные сейсмическими станциями, предлагалось использовать не для контроля безопасной работы оборудования, а для исследования вариаций скоростей упругих волн при прогнозе сейсмической активности [Бунгум и др.,

1981]. Впоследствии российскими учеными-геофизиками А.В. Николаевым, П.А. Троицким, И.А. Володиным и др. проводится ряд полевых экспериментов и разрабатывается несколько способов выделения из сейсмического шума слабых сигналов техногенного происхождения [Николаев и др., 1986]. По большей части эти исследования направлены на определение глубинного строения Земли [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Однако авторы замечают, что при наличии нескольких источников сейсмических волн с одинаковой частотой их возбуждения (например, ГЭС с однотипными генераторами), следующее: «На удалении от источников соответствующее поле периодических колебаний будет представлять собой суперпозицию волн, порожденных разными источниками; разделить эти волны вследствие неоднородного строения среды крайне сложно или даже невозможно» [Николаев и др., 1986, стр. 264, 1-й абзац]. При этом, не учитывается тот факт, что даже от одного источника возбуждения на расстоянии регистрируется суперпозиция значительного набора сейсмических волн (например, разнополяризованных поверхностной, прямой, преломленных, отраженных волн) и, в случае монохромного источника (фактически, синусоидального), информация о фазах и амплитудах этих волн оказывается утраченной. Именно поэтому для изучения строения Земли в вибрационной сейсморазведке используются более сложные (в том числе в плане технической реализации) свип-сигналы, а не простые монохромные [Активная..., 2004].

В исследовании А.Л. Александрова и др. [Изучение..., 1981] обозначен ряд трудностей при использовании монохромных сигналов, источником возбуждения которых является работающая ГЭС (на примере данных сейсмологического мониторинга на станциях в окрестности Нурекской ГЭС, Республика Таджикистан): «Недостатком гидростанций как источников сейсмической энергии является сравнительно низкая стабильность частоты колебаний. Последняя зависит от нагрузки, испытывает относительные изменения более 10^{-3} , что исключает возможность накопления сигнала на интервалах времени, превышающих по

длительности несколько сотен периодов, т.е. $\sim 2-3$ мин.». Авторы предлагают решить этот вопрос использованием алгоритмов, «учитывающих нестабильность работы источника», а именно использовать для оценки нестабильности сигнал электрической сети (т.к. частота электрического тока кратна частоте вращения генератора), в связи с чем ими разработан специальный «метод синхронного накопления периодического сейсмического сигнала». Кроме этого, авторами исследования справедливо отмечается, что «Выделение периодического сигнала от гидростанций связано с необходимостью подавления помех разных типов» [Изучение..., 1981]. К таким помехам они относят, во-первых, промышленные помехи, связанные с помехой от асинхронного двигателя, которая, как отмечают авторы «не может быть подавлена средствами синхронной коммутации». Во-вторых, выделение слабых сигналов в сейсмоактивных районах затруднено помехами от землетрясений. Такие помехи авторы предлагают исключать особыми мерами: «...амплитудного ограничения, либо остановки работы коммутатора при увеличении амплитуд выше определенного уровня». Несомненно, перечисленные авторами трудности возникнут при использовании монохромных сигналов не только для исследования среды прохождения упругих волн, но также и при контроле надежности работающего оборудования ГЭС. А значит, при разработке методики на это следует обратить особое внимание.

Исследования Ф.Н. Юдахина с коллегами убеждают, что здания и сооружения при колебании под воздействием ветра являются «...своеобразным сейсмическим источником, излучающим монохроматические сейсмические сигналы на собственных частотах...» [Об использовании..., 2005]. Эти сигналы используются для «сейсмического просвечивания верхов земной коры», а не для контроля состояния зданий и сооружений [Лисейкин, Селезнев, 2024], так как авторы полагают, что «важное преимущество ветровых колебаний состоит в высокой стабильности частоты излучаемого сейсмического сигнала». В качестве обоснования приводятся результаты исследования собственных колебаний одного из высотных зданий в г. Москва. Вместе с тем, результаты современных

исследований свидетельствуют о том, что не всегда частоты собственных колебаний стабильны, для ряда зданий и сооружений отмечены значительные (до 1-10 %) их вариации при сезонных и суточных изменениях температуры, оттаивании/промерзании конструкций и грунта в основании и других изменений внешней среды [Корепанов, Цветков, 2014; Контроль..., 2023; Определение..., 2023; Изменение..., 2024; Effect..., 2024; Ardila et al., 2024].

Из современных наиболее известны работы Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновской и их коллег, имеющих собственный взгляд на способы оценки технического состояния «антропогенных объектов» путем комплексирования данных сейсмологического, сейсмометрического и вибрационного мониторинга [Антоновская и др., 2015; Hydropower..., 2019 и др.]. Дистанционный контроль вибрации работающего оборудования исследуется на примере гидроагрегата Чиркейской ГЭС и патентуется «Способ мониторинга возникновения недопустимой вибрации гидроагрегата вследствие гидродинамических пульсаций...» [Способ..., 2019]. При этом регистрация вибраций производится «датчиками, расположенными как на корпусе гидроагрегата, так и на удалении от него от единиц до сотен метров», т.е. это сейсмометрическая система с датчиками в пределах машинного зала ГЭС [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Далее разрабатывается методика дистанционного контроля разрушительных процессов при эксплуатации крупных промышленных объектов по малоамплитудным сигналам, зарегистрированным в составе сейсмического шума на станциях сейсмологической сети (расположенных в окрестности объектов на удалении в несколько километров) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

2.2. Разработка методики на примере крупных ГЭС

2.2.1. Постановка задачи разработки методики по данным мониторинга сейсмического шума в окрестности промышленного объекта

Исходным материалом для исследования служат цифровые сейсмограммы, непрерывно регистрируемые станциями сейсмологической сети Федерального

исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН). На сегодня в состав сейсмологической сети входит более 350 станций, расположенных на территории Российской Федерации [Дягилев, Сдельникова, 2022]. Кроме этого, ряд особо важных промышленных объектов (ГЭС, АЭС) имеют и собственные локальные сейсмологические сети, зачастую интегрированные в структуру сети ФИЦ ЕГС РАН. Сеть предназначена для постоянной регистрации землетрясений, ее работа продолжается непрерывно, а практическая значимость в контексте настоящего исследования состоит в разработке новых и совершенствовании известных методов, способов и методик для контроля разрушительных процессов при эксплуатации промышленных объектов.

Сейсмические станции оснащены современной высокочувствительной (способной регистрировать колебания с амплитудой в нанометры) аппаратурой с широким частотным диапазоном (как минимум, от 0.5 Гц до 50 Гц, однако ряд станций оснащен широкополосной аппаратурой с нижней границей в 0.03 Гц). По результатам мониторинга накоплен богатый материал для обработки и анализа: современный цифровой архив сейсмических данных ФИЦ ЕГС РАН содержит сейсмограммы начиная с 1993 г.; окончательный же переход всех станций на цифровую регистрацию осуществили в начале 2000-х годов. Причем плотность сейсмологической сети станций наиболее высокая именно в районах повышенной сейсмической активности Земли, чтобы получить наиболее представительный материал. Наиболее плотно (с расстоянием между пунктами наблюдения в первые десятки километров) станции размещаются в сейсмоактивных районах Северного Кавказа, Байкальской рифтовой зоны, Горного Алтая и Камчатки. Часть станций расположена в окрестностях как важных и дорогостоящих промышленных объектов (ГЭС, ТЭЦ, АЭС, заводы и др.), так и различных зданий, сооружений [Афтершоки..., 2018; Региональная..., 2022; Камчатка..., 2022] (Рисунок 2.1).

На сегодня все станции одновременно с относительно кратковременными сейсмическими событиями природного или техногенного характера

(землетрясений, промышленных взрывов) регистрируют в виде цифровых сейсмограмм также и непрерывный сейсмический шум, которые в реальном времени передаются в центры сбора данных и хранятся неограниченное время до востребования специалистами. Хотя на сегодня не все сеймостанции оснащены современной модификацией высокочувствительной цифровой аппаратуры, тем не менее постоянно добавляются новые станции и переоснащаются старые [Дягилев, Сдельникова, 2022]. Именно содержащаяся в сейсмограммах техногенная составляющая сейсмического шума, вызванная промышленной деятельностью, например, работой мощного оборудования различных предприятий, является предметом настоящего исследования.

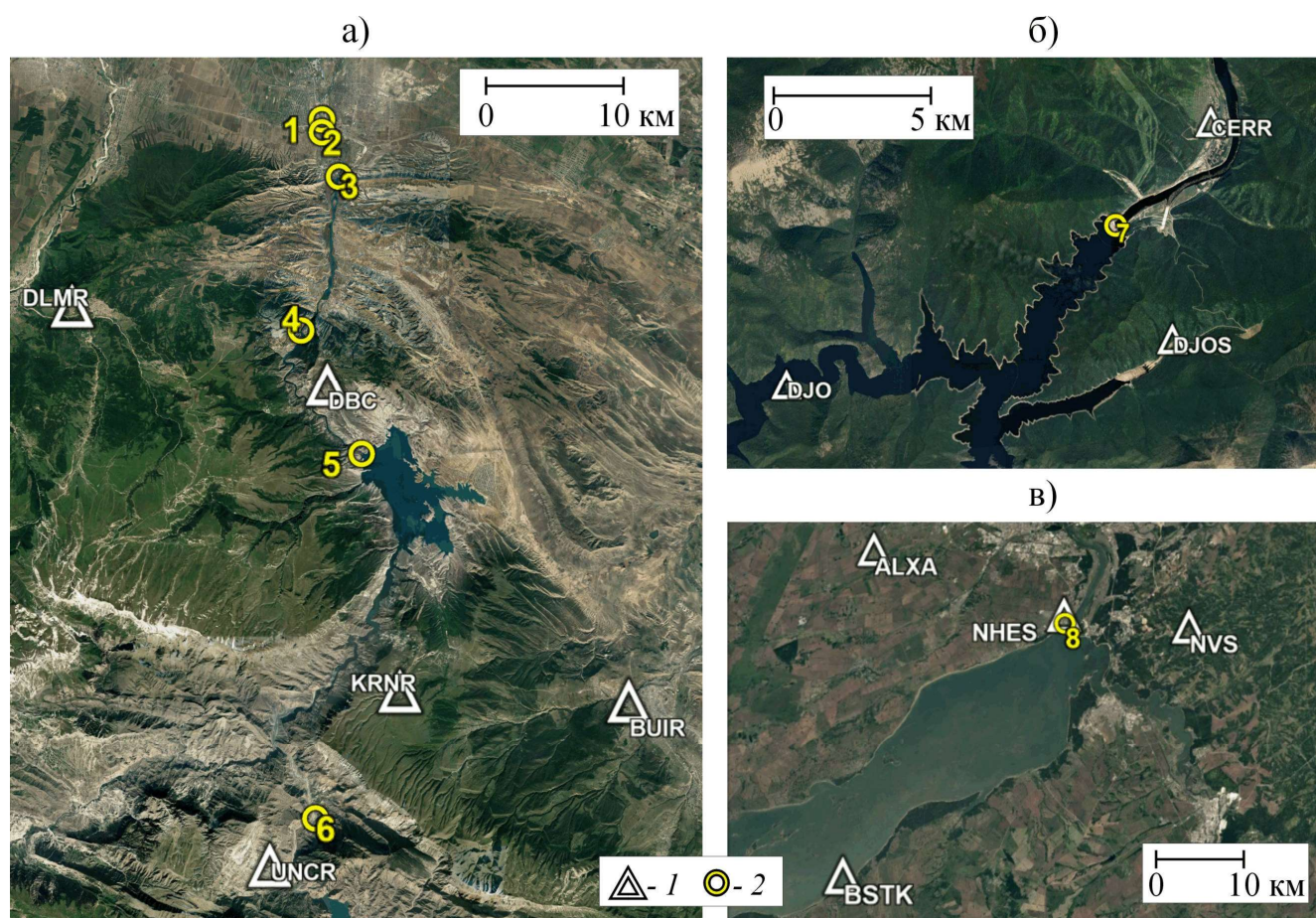


Рисунок 2.1 – Примеры расположения сеймостанций относительно контролируемых объектов: региональная сеть на севере Республики Дагестан (а), локальные сети в окрестности Саяно-Шушенской (б) и Новосибирской (в) ГЭС

1 – сеймостанции с международным кодом; 2 – гидроэлектростанции:

Чирюртская-2 (1), Чирюртская-1 (1), Гельбахская (3), Миатлинская (4), Чиркейская (5), Ирганайская (6); Саяно-Шушенская (7); Новосибирская (8)

Как правило, работающий промышленный объект представляет собой набор агрегатов и узлов, осуществляющих механические колебания (чаще всего, вращательные) с определенной частотой. На работающей ГЭС, например, – это ротор гидроагрегата и лопасти гидротурбины; на работающих ТЭЦ и АЭС – ротор генератора и лопасти паровой турбины; на работающих заводах – электродвигатели. Все названные механизмы, по сути, – монохромные вибрационные источники: они возбуждают упругие волны, которые распространяются в окружающую среду и регистрируются сейсмическими станциями [Лисейкин, Селезнев, 2024]. При развитии каких-либо нештатных ситуаций характеристики этих колебаний, несомненно, изменятся. Например, специалистам, занимающимся вибродиагностикой оборудования, известно, что при опасном увеличении дисбаланса турбины вырастает амплитуда колебаний на оборотной частоте; при нарушении целостности узлов и агрегатов появляются нелинейные эффекты и, как следствие, увеличивается амплитуда кратных частот [Лисейкин, Селезнев, 2024]. В случае же совпадения частоты источника возбуждения сигнала с частотой собственных колебаний зданий, сооружений или отдельных конструкций, происходит еще одно опасное явление – резонанс. Поскольку закрепление объекта к основанию не бывает абсолютно жестким, колебания передаются от него в геологическую среду в виде упругих волн и также регистрируются сейсмическими станциями на расстоянии [Об использовании..., 2005].

Для временных сейсмометрических наблюдений на объектах исследования (в ряде точек на разных уровнях в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской ГЭС) использовались современные автономные сейсмические регистраторы серии «Байкал» [Рыбушкин, Терешкин, 2021] с трехкомпонентными акселерометрами А1638 и электродинамическими сейсмоприемниками GS-20DX, GS-One. Причем амплитудно-частотные характеристики последних расширены в сторону низких частот (до 1 Гц) с использованием реализованного в ПО SpectrumSeism известного

алгоритма низкочастотной деконволюции, разработанного В.И. Юшиным и П.А. Дергачем [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Сейсмограммы сейсмического шума обрабатываются с использованием специального программного обеспечения SpectrumSeism и Geofilters на основе гармонического (или Фурье) анализа [Селезнев, Лисейкин и др., 2021; Лисейкин и др., 2022]. Наличие малоамплитудных сигналов в зарегистрированном сейсмическом шуме на удалении от источника механических колебаний объясняется распространением упругих волн. Полученные с использованием разработанной методики результаты обработки данных мониторинга с удаленных от объектов исследования сеймостанций сопоставляются с результатами Фурье-анализа данных кратковременных (около суток) опытов по регистрации сейсмического шума непосредственно на объекте (в машинном зале и плотине Саяно-Шушенской ГЭС). Кроме этого, при недоступности объектов для непосредственной регистрации сейсмического шума (например, Миатлинская ГЭС) полученные характеристики малоамплитудных сигналов по частоте сопоставляются с фактически известными. Так, частоты вращения (оборотные частоты) гидроагрегатов известны с высокой точностью из технической документации, а при их запуске, остановке и изменении нагрузок меняются амплитуды колебаний как на оборотных частотах, так и на частотах собственных колебаний плотин, что подтверждается проведенными ранее исследованиями на ГЭС В.С. Селезневым, А.В. Лисейкиным, Г.Н. Антоновской, Н.К. Капустян, П.В. Громыко и др. [Лисейкин, Селезнев, 2024].

2.2.2. Способы идентификации зарегистрированных малоамплитудных сигналов

Общеизвестно, что механические колебания различных установок по выработке электроэнергии, электродвигателей, а также собственные колебания зданий и сооружений характеризуются определенными частотами. Например, частота электрического тока 50 Гц кратна частоте вращения электрогенераторов с

высокой стабильностью (для их синхронизации с единой энергетической системой страны). Электродвигатели различных промышленных установок работают также на определенной частоте вращения, заданной заводом-изготовителем. Частота же собственных колебаний зданий и сооружений определяется по результатам специальных исследований [Bukenya et al., 2014]. Эта частота, хотя и изменяется под воздействием внешних факторов (например, у плотин ГЭС – при изменении уровня воды в водохранилище, при сезонных изменениях температуры конструкции и др.), однако эти изменения – обратимые (при неизменном техническом состоянии сооружения), происходят не мгновенно, а плавно в течение длительного (от нескольких часов до нескольких суток) времени и определяются по данным мониторинга [Определение..., 2023]. Итак, перечисленные механические колебания фактически являются периодическими на некотором интервале времени, следовательно, и малоамплитудные сигналы от них, зарегистрированные сейсмостанциями вдали от объектов, также будут периодическими. Поэтому для их выделения в сейсмическом шуме используется гармонический, или Фурье-анализ [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Малоамплитудные сейсмические сигналы от колебаний промышленного оборудования и от собственных колебаний зданий и сооружений в зарегистрированном длительном (от нескольких часов до суток) сейсмическом шуме выделяются с использованием специально разработанного на основе Фурье-анализа и протестированного программного обеспечения SpectrumSeism [SpectrumSeism, 2021] (см. Глава 1, Рисунок 1.1). Алгоритм обработки зарегистрированных сигналов (сейсмического шума) следующий. На вход программного обеспечения обработчиком подаются файлы с сейсмическими трассами в различных форматах, в том числе в используемом сейсмологами всего мира формате «MiniSeed». Пользователю в интерактивном режиме предоставляется спектрограмма в виде двумерной функции, по одной оси которой указывается дата и время регистрации, по другой – частота сигнала; третье измерение, его амплитуда, представляется цветовой шкалой на определенной паре

частота-время. В интерактивном режиме обработчиком задается масштаб спектрограммы (по осям частоты и времени) и шкала амплитуд, а также параметры оконного преобразования Фурье (размер окна и его шаг). Как отмечалось выше (см. Глава 1), размер окна определяет разрешенность спектрограммы по времени и частоте [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Последняя обратно пропорциональна размеру окна в секундах.

В представленном ниже примере спектрограмма сейсмического шума (аппаратура «Байкал», сейсмоприемник GS-20DX, частотный диапазон 1-120 Гц), зарегистрированного в машинном зале Саяно-Шушенской ГЭС, рассчитана с окном T в 20 с, т.е. ее разрешенность по времени также равна 20 с (Рисунок 2.2). А по частоте, разрешенность спектрограммы соответственно составит 0.05 Гц. На спектрограмме (Рисунок 2.2б) видно, что зарегистрированный сейсмический шум представляет собой набор сигналов с постоянной частотой и с переменной во времени амплитудой [Лисейкин, Селезнев, 2024].

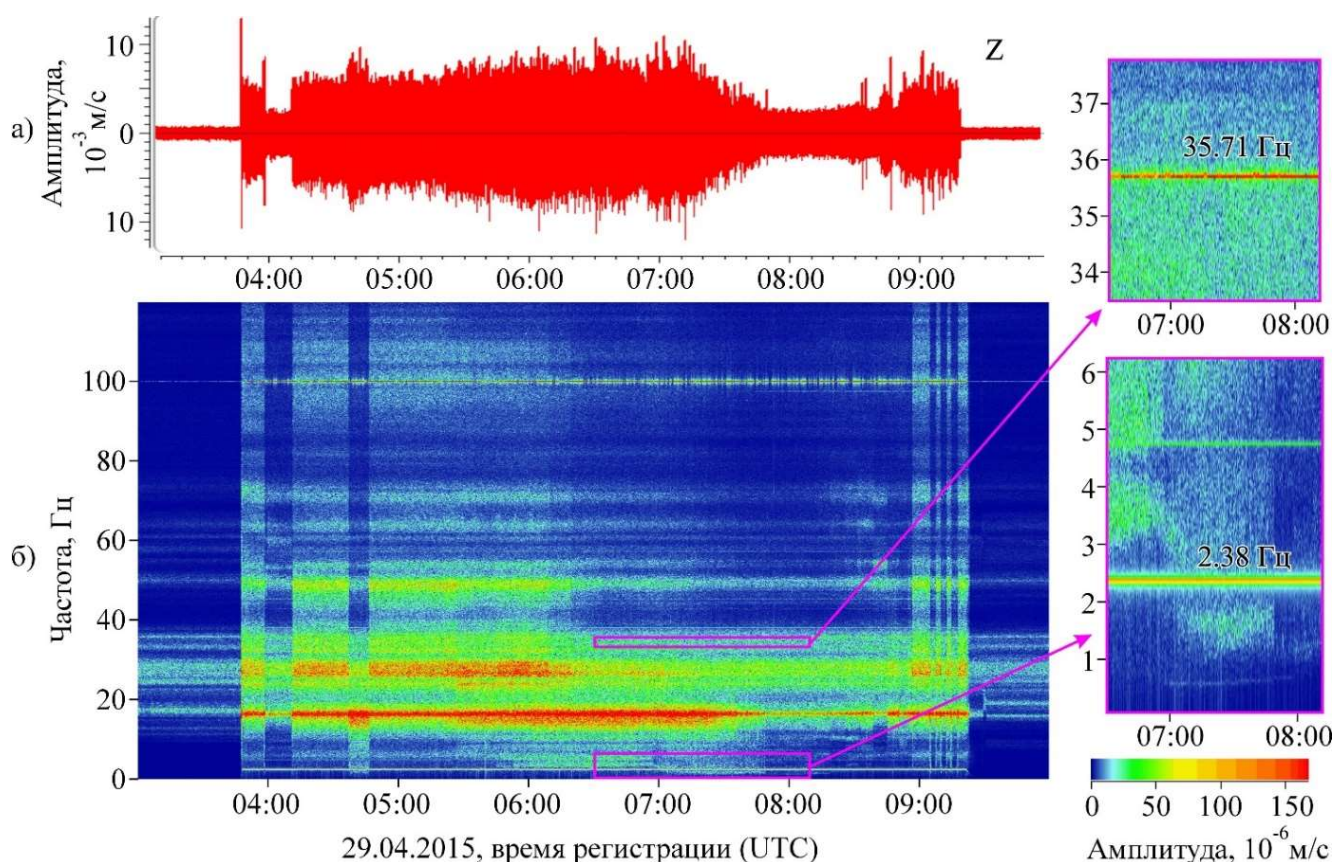


Рисунок 2.2 – Сейсмическая трасса (а) и спектрограмма (б) сейсмического шума при регистрации на полу машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС в 25 м от работающего гидроагрегата № 2 [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Происхождение каждого из этих сигналов объясняется возбуждением и распространением упругих волн от источников колебаний в точку регистрации сейсмического шума. Какие-то сигналы полезны для анализа, если они вызваны колебаниями важного узла или агрегата, а какие-то являются помехой, усложняющей анализ. В связи с этим сейсмический шум разделяется на составляющие его сигналы с постоянными частотами, но с разными амплитудами, определенными по специальной формуле (см. Глава 1, Формула 1.2). Причем, как отмечалось в Главе 1, значение частоты сигнала может быть любым в отличие от расчета спектрограмм по формуле (1.1) с использованием быстрого преобразования Фурье, где дискретизация по частоте составляет $1/T$. Такой подход выгодно отличается возможностью анализировать колебания от вращающихся гидроагрегатов ГЭС, частота которых в герцах, как известно, представляется в виде дроби $50/N$, где N – количество пар полюсов электрогенератора. Такая частота в общем случае не кратна дискретизации спектра, следовательно, при традиционном быстром преобразовании Фурье амплитуда рассчитывается с погрешностью. Например, известно, что для гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС оборотная частота представляется отношением $50/21$, или $2.38\dots$ Гц. При этом лопастная частота составляет $35.71\dots$ Гц как произведение оборотной частоты на количество лопастей турбины (15 шт.) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Изменение амплитуды сигналов во времени является следствием изменения режимов работы одного или нескольких гидроагрегатов. Это подтверждается многократными сейсмическими исследованиями, проводимыми как специалистами ФИЦ ЕГС РАН (В.С. Селезевым, А.В. Лисейкиным, П.В. Громыко и др.) в машинном зале и на плотине Саяно-Шушенской ГЭС [Влияние..., 2013; Громыко и др., 2017], так и другими учеными на других объектах гидроэнергетики (например, исследования Г.Н. Антоновской и ее коллег на Чиркейской ГЭС [Антоновская и др., 2015]). На графиках (Рисунок 2.3а) видны изменения амплитуд сигналов от трех различных источников колебаний во времени в сопоставлении с изменением нагрузки гидроагрегата. Два из них – это сигналы от колебаний на

оборотной и лопастной частотах (2.38 Гц и 35.71 Гц). Сигнал с частотой 16.3 Гц, который хорошо виден на спектрограмме (см. Рисунок 2.2б), согласно технической документации по ГЭС, вызван собственными колебаниями крестовины гидроагрегата [Громыко и др., 2017]. Такое разделение сейсмического шума на отдельные частотные составляющие позволяет их анализировать для каждого из источников колебаний отдельно и оценивать взаимодействие работающего оборудования с конструкциями [Лисейкин, Селезнев, 2024].

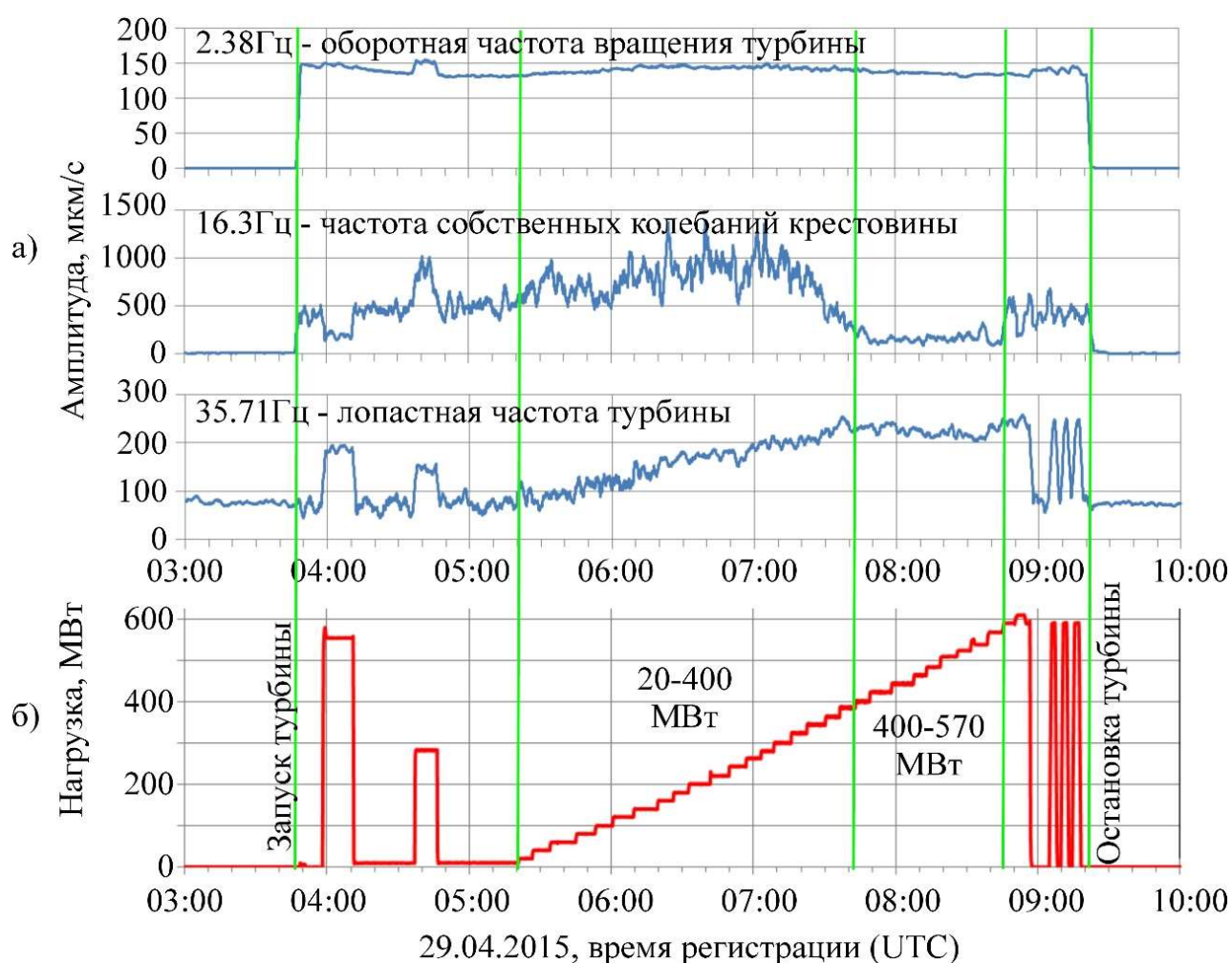


Рисунок 2.3 – Амплитуда колебаний упругих волн от трех различных источников на частотах 2.38, 16.3 и 35.71 Гц (а) при изменении нагрузки на гидроагрегате (б) (при регистрации сейсмического шума на полу машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС в 25 м от работающего гидроагрегата №2) [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Так, из анализа графиков (См. Рисунок 2.3) следуют выводы, изложенные в работе [Лисейкин, Селезнев, 2024]:

1) Поскольку амплитуда сигнала на оборотной частоте не меняется в течение периода наблюдений (в приведенном примере с 03:47 до 09:22), то представляющего опасность увеличения дисбаланса турбины не предвидится.

2) При сопоставлении графиков видно, что амплитуда колебания крестовины гидроагрегата высокая при режиме работы гидроагрегата до 400 МВт, т.е. наиболее безопасный режим работы для крестовины – от 400 до 570 МВт, на что указывает значительное снижение амплитуды колебания.

3) Амплитуда колебаний на лопастной частоте в интервале от 20 до 400 МВт увеличивается с ростом нагрузки гидроагрегата, а в интервале 400-570 МВт (где колебания крестовины пониженные) практически не меняется. Значит, нет необходимости разделять указанный интервал нагрузок на более или менее опасные подынтервалы.

4) Изменения амплитуд колебаний трех источников не связаны (нет корреляции), значит между ними нет зависимости.

На представленном выше примере показано, как по результатам анализа сейсмического шума, зарегистрированного возле работающего оборудования (в 25 м от гидроагрегата, т.е. в том месте, где амплитуда сигналов достаточно высокая), оценивается опасность его разрушения. Если же сейсмостанция располагается на существенно большем расстоянии, например, в нескольких километрах от объекта, то, несомненно, сейсмограмма содержит еще большее количество разнообразных сторонних сигналов, маскирующих и подавляющих полезные сигналы (амплитуда последних будет тем меньше, чем больше расстояние до сейсмостанции). Это видно из сопоставления спектрограмм сейсмического шума, зарегистрированного одновременно в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС (аппаратура «Байкал», сейсмоприемник GS-20DX) и на сейсмостанции «Черемушки» (аппаратура Guralp, CMG-3ESP) в 4.4 км от плотины (Рисунок 2.4). Так, колебания с частотами около 1.3, 1.7, 2.1, 2.6, 3.2 Гц, соответствующими частотам собственных колебаний плотины [Определение..., 2023], выделяются на обеих спектрограммах. Однако амплитуда колебаний таких

сигналов при регистрации на удаленной сеймостанции существенно ниже, чем при регистрации на объекте. Так, в представленном примере (Рисунок 2.4) разница составляет до трех порядков: от десятков микрометров в секунду в плотине до десятков нанометров в секунду на сеймостанции «Черемушки». Это выражается в значительном уменьшении отношения сигнал/помеха, а значит снижается информативность и достоверность гармонического анализа сейсмического шума по спектрограммам. Причем амплитуда колебания даже от относительно слабого землетрясения (как в представленном примере (Рисунок 2.4), зарегистрированном в 07:35), составляет десятки мкм/с, что по сравнению с амплитудой «полезных» сигналов больше на порядки [Лисейкин, Селезнев, 2024].

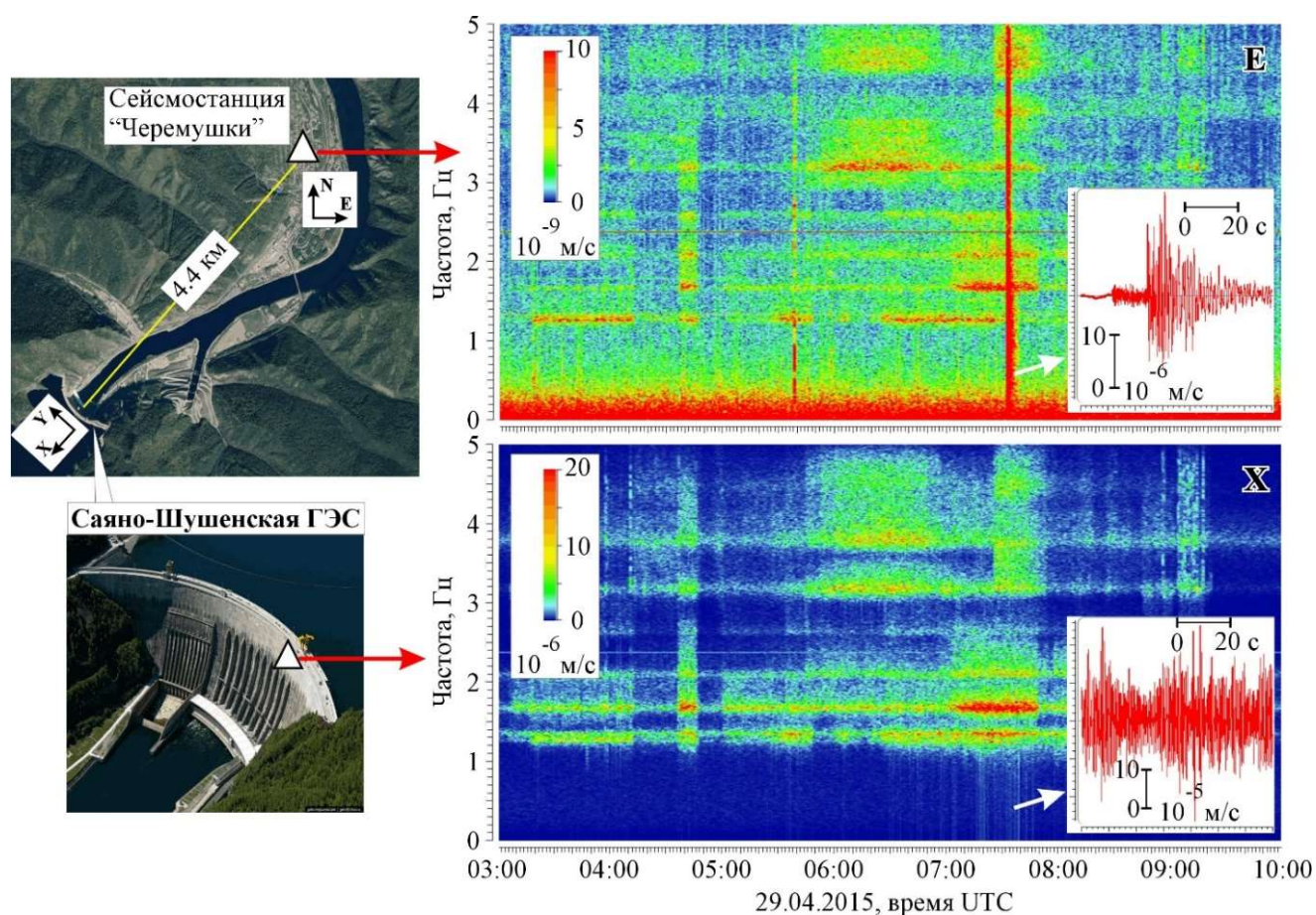


Рисунок 2.4 – Спектрограммы сейсмического шума, одновременно зарегистрированного на сеймостанции «Черемушки» и на плотине Саяно-Шушенской ГЭС. На врезках показаны фрагменты сейсмических трасс [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Отношение сигнал/помеха предлагается повышать в два приема. Сначала с использованием разработанного и протестированного программного обеспечения

Geofilters [Geofilters, 2022] участки сейсмических трасс с кратковременными, но высокоамплитудными помехами, вызванными землетрясением, взрывом или другим техногенным воздействием, традиционно исключаются из анализа (в программе такие участки зануляются). Затем с использованием программы SpectrumSeism рассчитанные амплитуды колебаний усредняются скользящим средним на интервале времени T_I , большем, чем интервал T (см. Глава 1, формула 1.3). Интервал времени T_I подбирается после анализа сейсмических трасс, зарегистрированных на сейсмостанции: при его увеличении растёт отношение сигнал/помеха пропорционально квадратному корню от количества интервалов T , попадающих в интервал T_I . Такой подход выгодно отличается от принятого расчёта Фурье-спектра от сейсмической трассы большой длительности. В случае, если частота сигнала «флуктуирует» в некоторых пределах, то при разрешенности спектра выше этой величины (что неизбежно при преобразовании Фурье от трассы большой длительности) локальный максимум «размазывается» и процедура выделения слабого сигнала становится неэффективной [Изучение..., 1981]. Здесь же каждое из преобразований Фурье выполняется по коротким фрагментам сейсмической трассы (с интервалом времени T и соответствующей разрешенностью спектра $1/T$). Таким приемом значительно повышается надёжность выделения малоамплитудных сигналов из сейсмического шума, однако детальность (разрешающая способность) анализа во времени при этом уменьшается в соответствии с увеличением интервала T_I [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Определение истинной амплитуды колебаний объекта по малоамплитудным сигналам, зарегистрированным на удалении, осуществляется по эмпирической зависимости между их амплитудами при спектрально-временном анализе материалов эксперимента. Как пример, из соотношения амплитуд колебаний на частоте 1.68 Гц, зарегистрированных одновременно на плотине и на удаленной сейсмостанции видно, что связь между ними линейная, если исключить из внимания значения при сверхмалых амплитудах (менее 10 нм/с), при которых

предположительно малоамплитудные сигналы искажены или аппаратным шумом или другими неучтенными помехами (Рисунок 2.5). С использованием полученной зависимости по малоамплитудным сейсмическим сигналам, зарегистрированным на удаленной от плотины станции определяется истинная амплитуда колебаний плотины [Лисейкин, Селезнев, 2024].

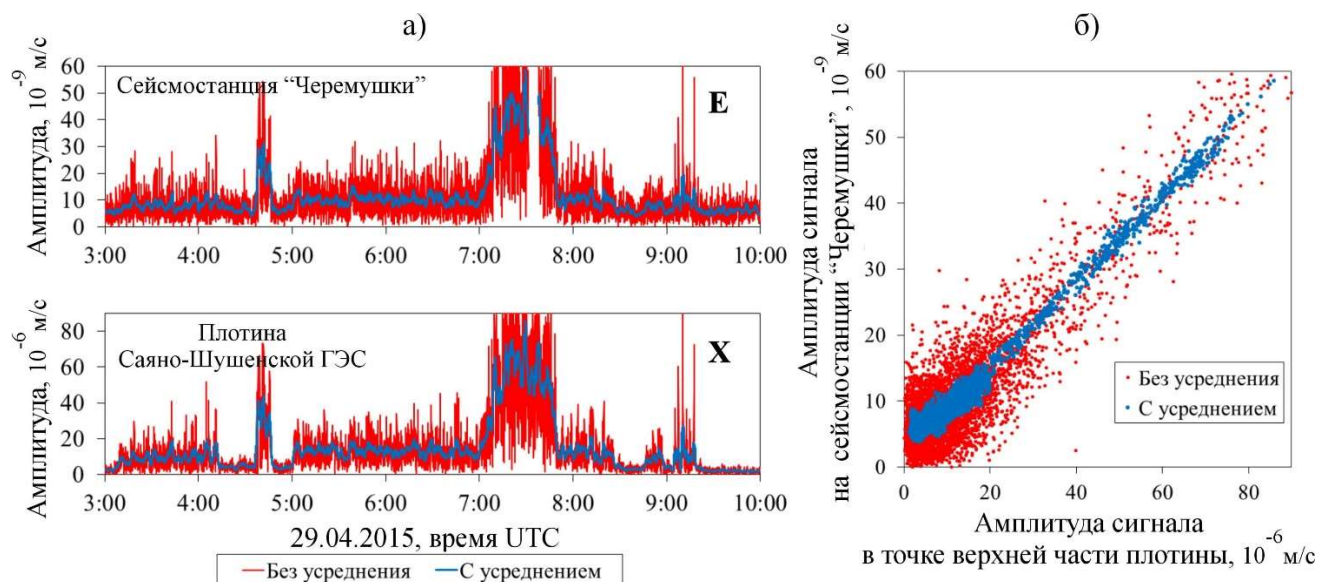


Рисунок 2.5 – Изменение во времени амплитуд сигнала на частоте 1.68 Гц при регистрации сейсмического шума на сеймостанции «Черемушки» и в точке верхней части плотины (а), и соотношение между ними (б). Е и Х – направление осей сеймоприемников (см. Рисунок 2.4) [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Необходимо отметить, что колебание с частотой 1.68 Гц – это собственное колебание 3-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Исследования В.С. Селезнева, А.Ф. Еманова и их коллег убеждают, что связь собственных колебаний в двух точках регистрации на здании или сооружении описывается линейной моделью [Пересчет..., 2002]. Однако это справедливо для объектов без повреждений (т.е. при отсутствии нелинейных эффектов). Нелинейные эффекты могут проявляться, например, в зданиях с сейсмоизоляцией [Лисейкин и др., 2017]. Причем, для собственных колебаний малой амплитуды (до 4-х баллов по шкале MSK-64), даже в здании с сейсмоизоляцией в виде резинометаллических опор, также справедливо линейное соотношение между амплитудами колебаний, зарегистрированных в нижней и верхней его частях [Лисейкин и др., 2017]. Так как плотина Саяно-Шушенской ГЭС не оснащена

системой сейсмоизоляции, то можно предполагать, что между связью между собственными колебаниями нижней ее части и верхней, также линейная. Кроме этого, общеизвестно, что и при распространении сейсмических волн в среде, при их малой амплитуде (условие, при котором соблюдается закон Гука), связь между входным и выходным сигналом также линейная [Гольдин, 1974]. Из всего перечисленного следует, что и соотношение амплитуд между слабыми сигналами, зарегистрированными на расстоянии от объекта и собственными колебаниями, зарегистрированными в какой-либо точке на объекте, также линейна, что и подтверждается результатами эксперимента (см. Рисунок 2.5). Если при мониторинге выяснится, что линейность нарушена, то это будет указывать или на возможные разрушения в объекте, или на изменения в среде распространения сейсмических волн.

Резкое увеличение (в несколько раз) амплитуды колебаний на частоте собственных колебаний плотины в определенные промежутки времени указывает на нештатную ситуацию – резонансный эффект (см. Рисунок 2.5). Как показывают другие сейсмические исследования, такой резкий амплитуды происходит при определенных (неблагоприятных) режимах работы гидроагрегатов [Влияние..., 2013]. Причем это является следствием другого резонансного эффекта – формирования автоколебаний воды в водоводах турбин Саяно-Шушенской ГЭС, который также происходит при неблагоприятных режимах работы гидроагрегатов [Громыко и др., 2017]. Таким образом в результате гармонического анализа сейсмического шума, зарегистрированного на удаленной от промышленного объекта сеймостанции, надежно и несложно выявляются опасные резонансные эффекты, свидетельствующие о нештатной ситуации на объекте [Лисейкин, Селезнев, 2024].

В окрестности сеймостанции может находиться не один, а несколько различных объектов, каждый из которых является источником упругих волн с определенными частотами. Следовательно, и зарегистрированный сейсмический шум также будет содержать в себе не одну, а несколько последовательностей

малоамплитудных сигналов с разными амплитудно-частотными характеристиками (Рисунок 2.6а). Причем выделяются два типа сигналов: колебания высокой и пониженной добротности (Рисунок 2.6б) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

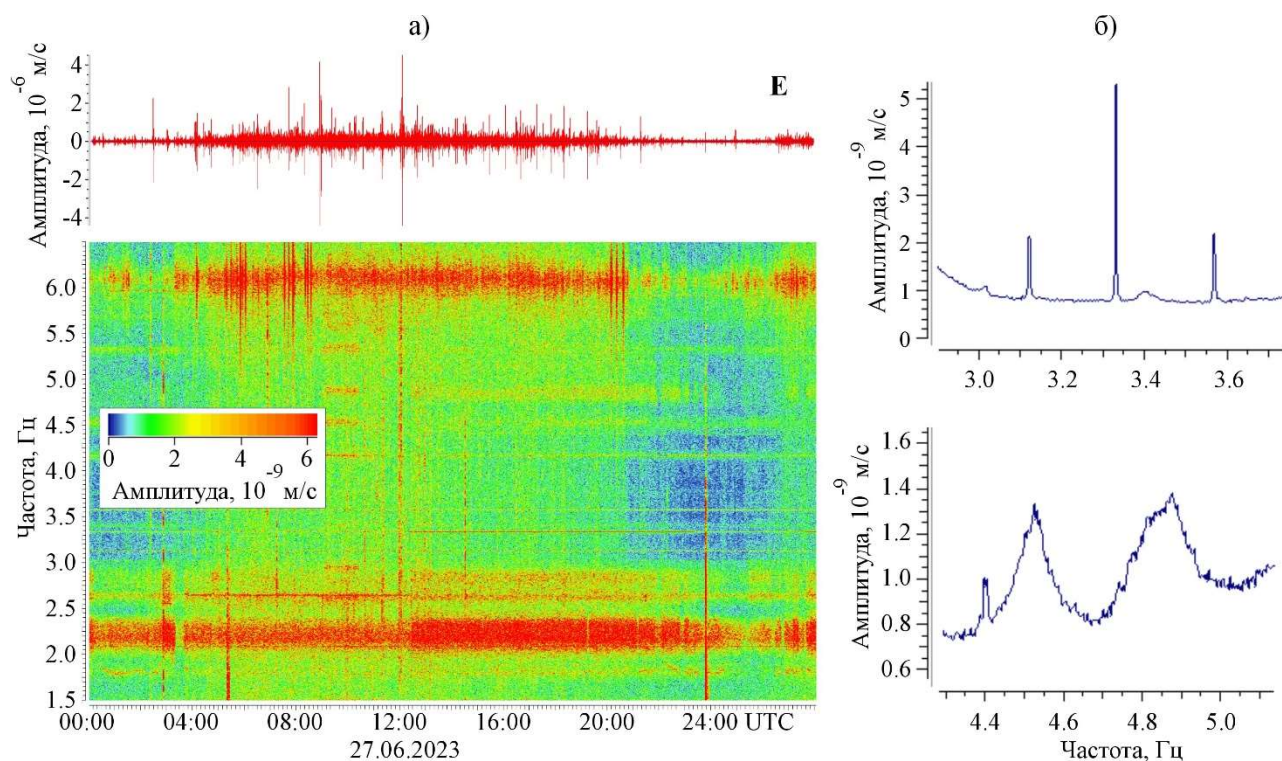


Рисунок 2.6 – Сейсмическая трасса и ее спектрограмма (а) и фрагменты усредненных амплитудных спектров колебаний высокой (вверху) и пониженной (внизу) добротности (б) при регистрации сейсмического шума на Е (восточной) компоненте сейсмостанции «Дубки» в Республике Дагестан [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Для анализа таких сигналов необходимо знать, какой именно источник возбуждает упругие волны, т.е. определить соответствие источник-частота. Так, сигналы от колебаний с высокой добротностью, представляющие собой компактные по частоте пики в спектральной области (см. Рисунок 2.6б, вверху), как известно, являются отображением гармонических сигналов из временной области. Они возбуждаются источниками с постоянной частотой и не затухающей во времени амплитудой, например, вибрационными источниками или аналогичными им вращающимися гидроагрегатами, турбинами, электродвигателями и т.п. Собственные колебания зданий и сооружений, как известно, – колебания пониженной добротности в связи с их затуханием. На спектрограмме (см. Рисунок 2.6а) сигналы от таких колебаний представляют собой широкие

(0.1-0.5 Гц) по частоте полосы, а на спектрах – колоколообразную форму (см. Рисунок 2.6б, внизу) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Частота колебаний высокой добротности некоторых источников, например, вращающихся гидротурбин, однозначно определяется по их характеристикам как отношение $50 \text{ Гц}/N$, где N – число пар полюсов электрогенераторов (информация о типе электрогенераторов, по которой определяется характеристика N , содержится на официальном сайте ПАО «Русгидро»: <https://rushydro.ru/>). Так, частота вращения турбин Чирюртской-1, Чирюртской-2, Гелбахской, Миатлинской, Чиркейской, Ирганайской гидроэлектростанций (с точностью до третьего знака) составляет 3.125, 1.389, 4.167, 2.083, 3.333 и 3.571 Гц, соответственно. Из результатов гармонического анализа зарегистрированного на сейсмостанции «Дубки» сейсмического шума следует, что в нем содержатся и могут быть выделены сигналы от работающих гидроагрегатов всех этих гидроэлектростанций (Рисунок 2.7). В приведенном примере амплитудные спектры усреднялись для интервала 2-3 часа. При этом размер окна составлял 200 с, а дискретизация спектров – 0.005 Гц. Следовательно, с использованием записей сейсмических сигналов с одной станции можно контролировать вибрацию на оборотной частоте гидроагрегатов с шести разных гидроэлектростанций, расположенных на разных расстояниях, от 5.3 до 30.4 км. Однако из-за низкой амплитуды соответствующего сигнала разрешающая способность такого контроля ограничена временем, необходимым для его выделения [Лисейкин, Селезнев, 2024].

В работах А.В. Николаева, А.Л. Александрова, А.А. Володина с соавторами отмечаются трудности использования в исследованиях монохромных сигналов, зарегистрированных удаленной сейсмостанцией от нескольких источников с одинаковой частотой [Николаев, 1986]. Действительно, при суперпозиции гармонических сигналов, регистрируемый сигнал представляет собой синусоиду с такой же частотой, а амплитуда и фаза зависит от амплитуд и фаз каждого из слагаемых сигналов. Эти характеристики неизвестны, определить их по зарегистрированному сигналу не представляется возможным. В

рассматриваемом случае зарегистрированные сигналы отличаются по частоте, т.к. у этих гидроэлектростанций типы генераторов разные (Рисунок 2.7). Однако, как правило, в пределах одной электростанции одновременно работают несколько гидроагрегатов (например, известно, что на Чиркейской ГЭС их четыре). Поэтому, при анализе сигналов на оборотной частоте гидротурбин сталкиваются с теми же трудностями, что и авторы упомянутых исследований [Николаев, 1986].

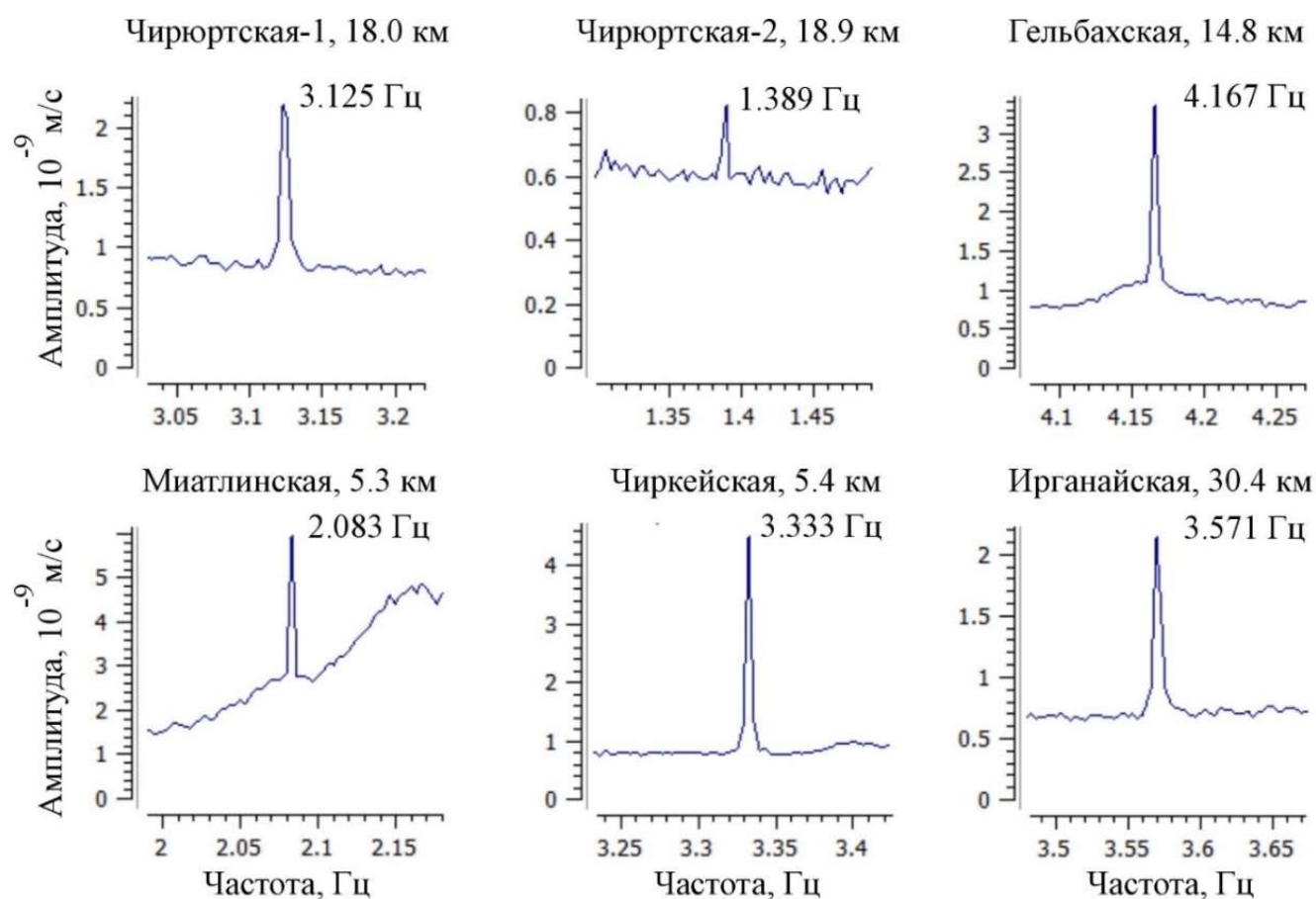


Рисунок 2.7 – Усредненные спектры сигналов от высокочастотных колебаний работающих гидроагрегатов ГЭС при регистрации сейсмического шума на Е (восточной) компоненте сейсмостанции «Дубки» в Республике Дагестан [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Для оценки вибрации гидроагрегатов по малоамплитудным монохромным сигналам на их оборотной частоте разработан следующий способ [What..., 2014]. Спектрально-временной анализ сейсмического шума, зарегистрированного при мониторинге на станциях, расположенных в окрестности нескольких километров от Чиркейской, Миатлинской (Рисунок 2.8), а также Саяно-Шушенской и

Новосибирской ГЭС свидетельствует, что амплитуда сигнала на оборотной частоте во времени ступенчатообразно меняется. В представленном примере подобраны следующие параметры расчета амплитуды сигналов, определяющие разрешающую способность графиков: окно 300 с, усреднение 1000 с.

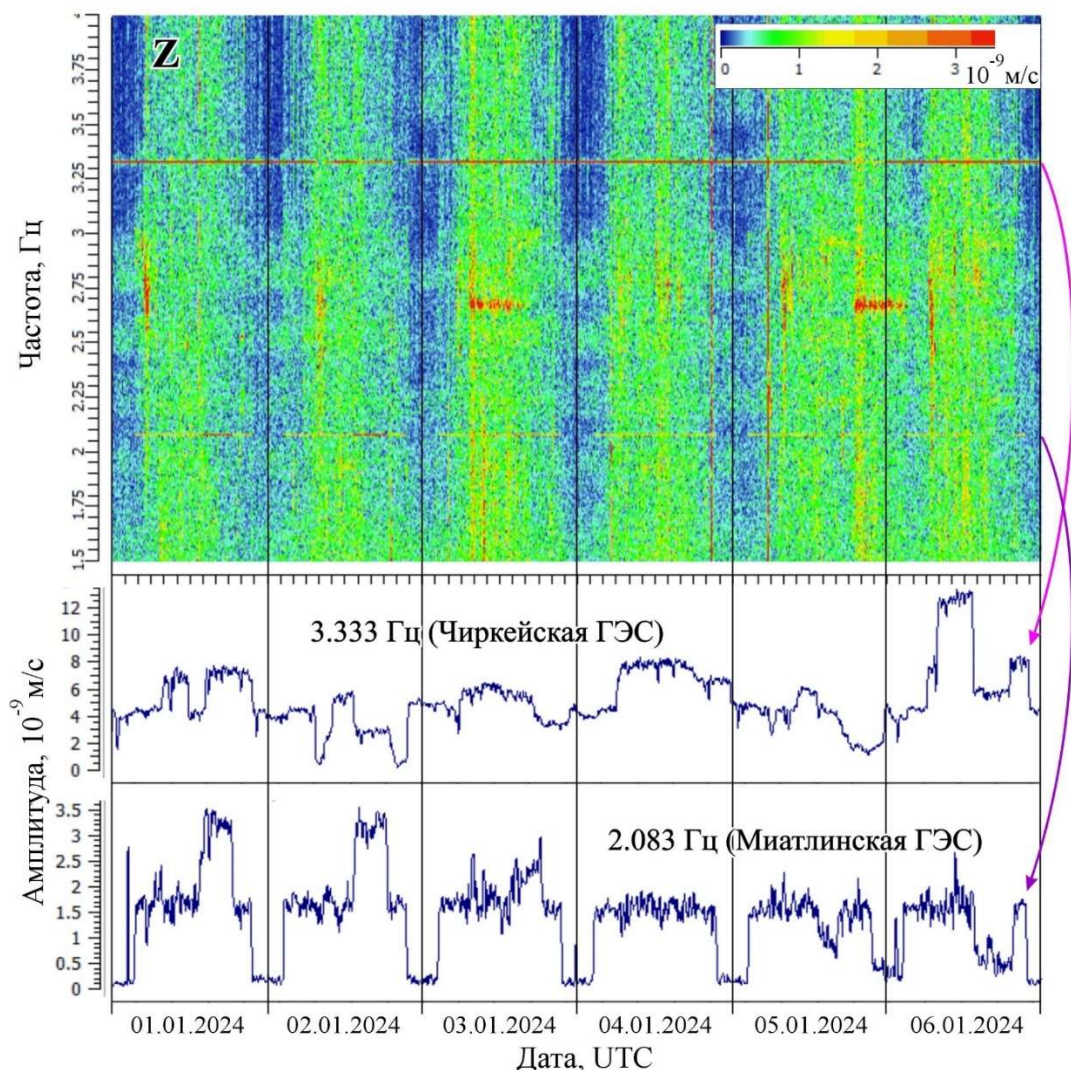


Рисунок 2.8 – Спектрограмма (вверху) и временные развертки амплитуд сигналов на частотах вращения гидротурбин Чиркейской и Миатлинской ГЭС (внизу) при регистрации сейсмического шума на Z (вертикальной) компоненте сейсмостанции «Дубки» в Республике Дагестан [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Ступенчатое изменение амплитуды (см. Рисунок 2.8) происходит в момент запуска или остановки хотя бы одного из гидроагрегатов [Лисейкин, Селезнев, 2024], что подтверждается сопоставлением времен работы гидроагрегатов с временами изменений амплитуд колебаний на оборотной частоте, выполненным в ходе расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС [Селезнев и др.,

2012]. Таким образом, располагая информацией о том, какой из гидроагрегатов запускался или останавливался в определенный момент времени, можно по амплитуде ступени определить вклад этого гидроагрегата в амплитуду регистрируемого сигнала (см. Рисунок 2.8 внизу). Однако если сигнал не калиброванный, то эта характеристика будет относительной – в таком случае можно оценить вибрацию одного гидроагрегата относительно других, как это было сделано при анализе колебаний второго гидроагрегата перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС [Селезнев и др., 2012а].

В случае если в сейсмическом шуме выделяются сигналы от низкочастотных колебаний с постоянными частотами, источник которых неизвестен, то он идентифицируется по изменениям их амплитуд во времени. Например, известно, что после запуска, остановки или смены режимов работы гидроагрегатов изменяется амплитуда собственных колебаний плотины (см. Рисунок 2.4) [Влияние..., 2013]. На спектрограмме сейсмического шума, зарегистрированного 19.06.2023 г. на сейсмостанции «Дубки» в 5.3 км от плотины Миатлинской ГЭС (Рисунок 2.9), видно, что после 22:30 сигналы на частоте вращения ее гидроагрегатов (2.083 Гц) не регистрируются. Причем регистрация сигналов с частотами вращения других ГЭС (Гельбахской, Ирганайской и Чирюрстской-1 с оборотными частотами 4.167, 3.571, 3.125 Гц) продолжается, а низкочастотных сигналов с частотами около 2.6, 4.2, 4.4, 4.9, 5.3 Гц прекращается после 22:30. Отсюда следует, что источником наблюдаемых на спектрограмме сигналов от низкочастотных колебаний является один или несколько объектов Миатлинской ГЭС [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Предполагается, что источник возбуждения описанных сигналов – собственные колебания плотины Миатлинской ГЭС. Для подтверждения этой гипотезы в ближайшее время планируется детальное исследование методом стоячих волн колебаний плотины (из современных публикаций неизвестно, определялись ли характеристики ее собственных колебаний другими методами или другими исследователями). Итак, по результатам сравнения усредненных спектров

от интервалов записей сейсмического шума, включающего работу набора гидроэлектростанций с разной частотой колебаний и с разными режимами работы во времени в окрестности сеймостанции, более точно идентифицируются низкодобротные сигналы и затем определяются их частоты [Лисейкин, Селезнев, 2024].

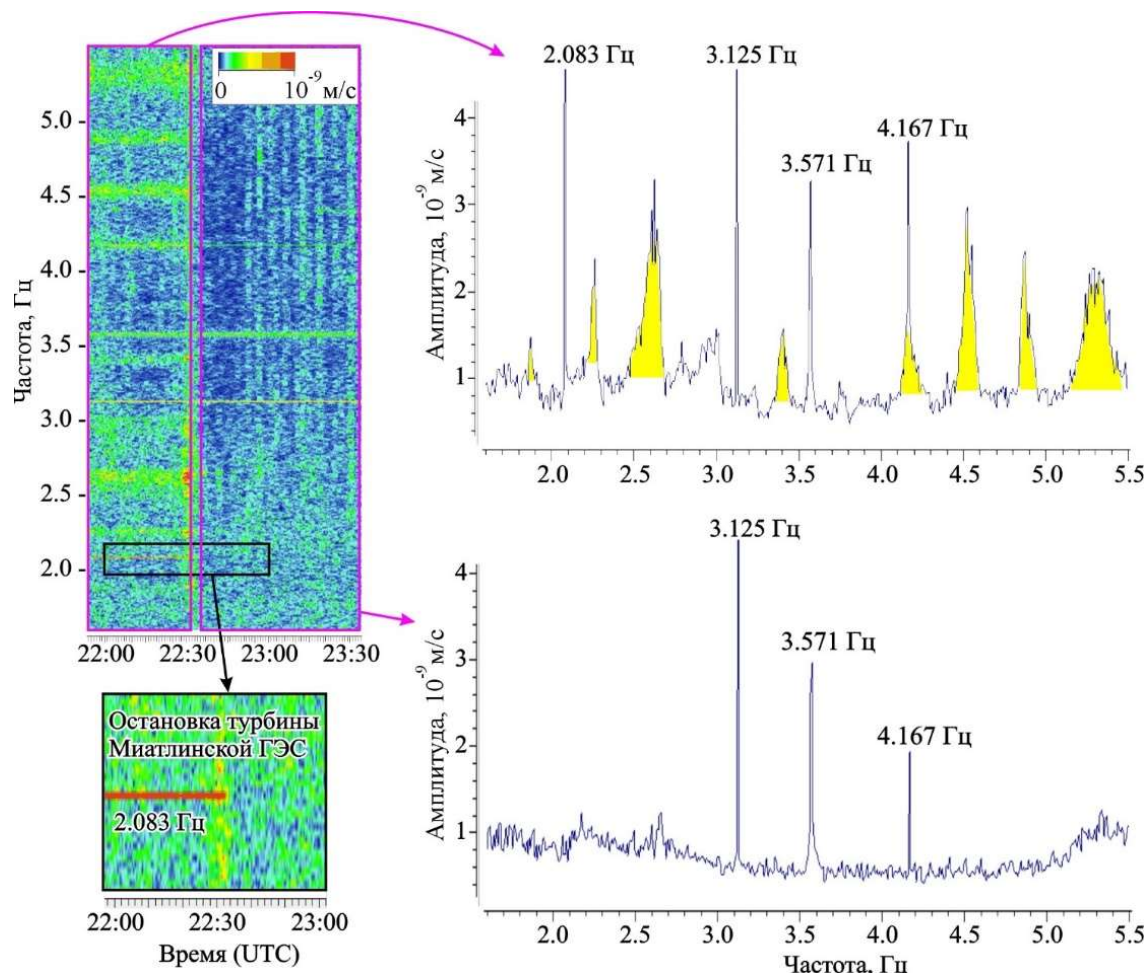


Рисунок 2.9 – Спектрограмма (слева) и усредненные спектры (справа) по записям Е-компоненты сейсмического шума на сеймостанции «Дубки» во время работы и остановки турбин Миатлинской ГЭС 19.06.2023.

Желтым цветом отмечены сигналы предположительно возбужденные собственными колебаниями плотины [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Как отмечалось, с использованием данных мониторинга сейсмического шума возможно обнаружение такого опасного явления, как резонанс. Он возникает при совпадении частоты вынужденных колебаний с одной или несколькими частотами собственных колебаний объекта. Одно из таких резонансных явлений обнаружено при запуске гидроагрегата №1 Саяно-Шушенской ГЭС в декабре 2011 г. Это

первый из гидроагрегатов новой конструкции, введенный в строй после катастрофы 17 августа 2009 г, и имеющий ряд усовершенствований в плане надежности и безопасности. Однако тестовый запуск этого гидроагрегата показал, что в интервале работ примерно от 100 до 500 МВт происходит значительное усиление колебаний в области частот до 5 Гц (Рисунок 2.10).

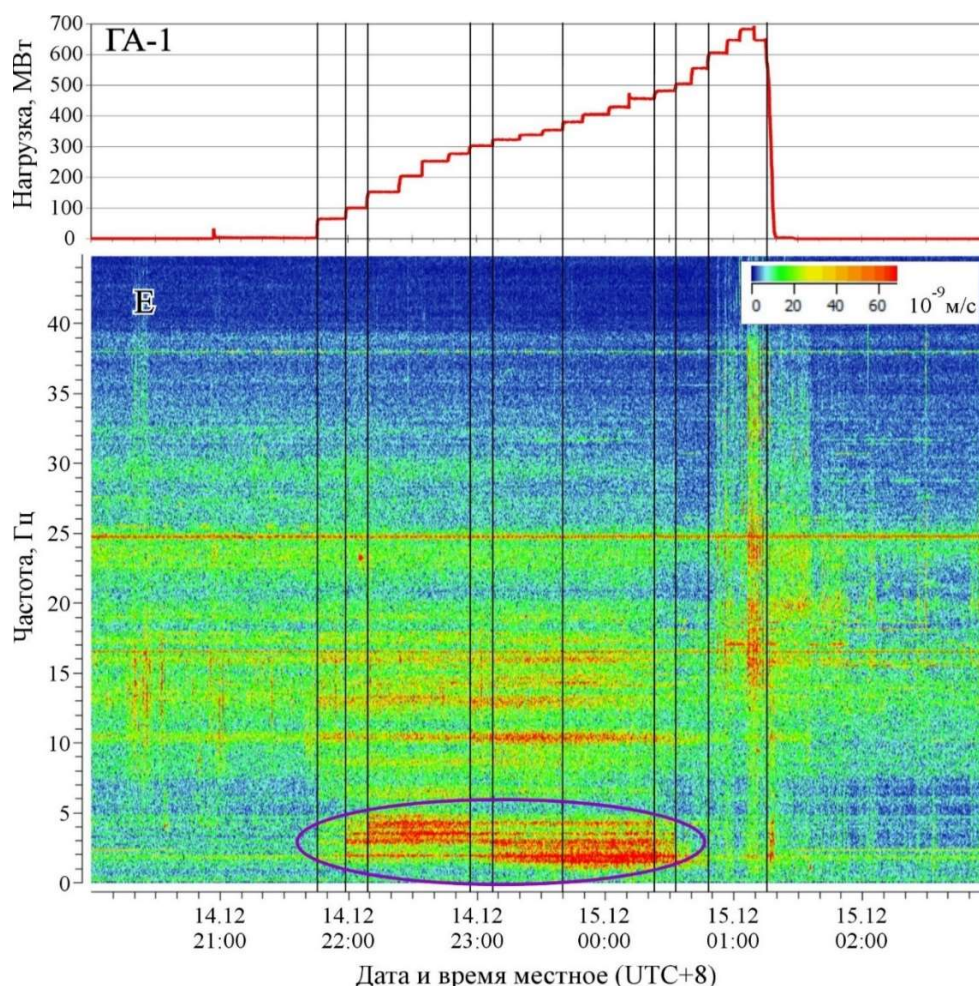


Рисунок 2.10 – График нагрузок гидроагрегата №1 (новой конструкции) Саяно-Шушенской ГЭС в период его тестового запуска 14-15 декабря 2011 г. (вверху) и спектрограмма по данным мониторинга сейсмического шума на сеймостанции «Черемушки» (внизу). Во время испытаний работали гидроагрегаты № 3, 4, 5 (старой конструкции) с постоянной нагрузкой около 600 МВт.

Фиолетовым овалом отмечена область резонансных колебаний плотины

Как показал детальный спектрально-временной анализ, усиление колебаний происходит на частотах собственных колебаний плотины (с 1-й по 7-ю моды). Усиление значительное (более чем на порядок) и свидетельствует о возникновении резонанса (Рисунок 2.11). Дальнейшие исследования, в том числе с регистрацией

колебаний в плотине Саяно-Шушенской ГЭС, показали, что такой резонансный эффект свойственен всем без исключения «новым» гидроагрегатам. Причем, он следует за другим резонансным явлением – возникновением «органных» колебаний при формировании стоячих волн в водоводах гидроагрегатов [О собственных..., 2016; Громыко и др., 2017]. Необходимо отметить, что подобных резонансных явлений при эксплуатации гидроагрегатов «старой» конструкции (т.е. таких, которые были до аварии) не отмечалось.

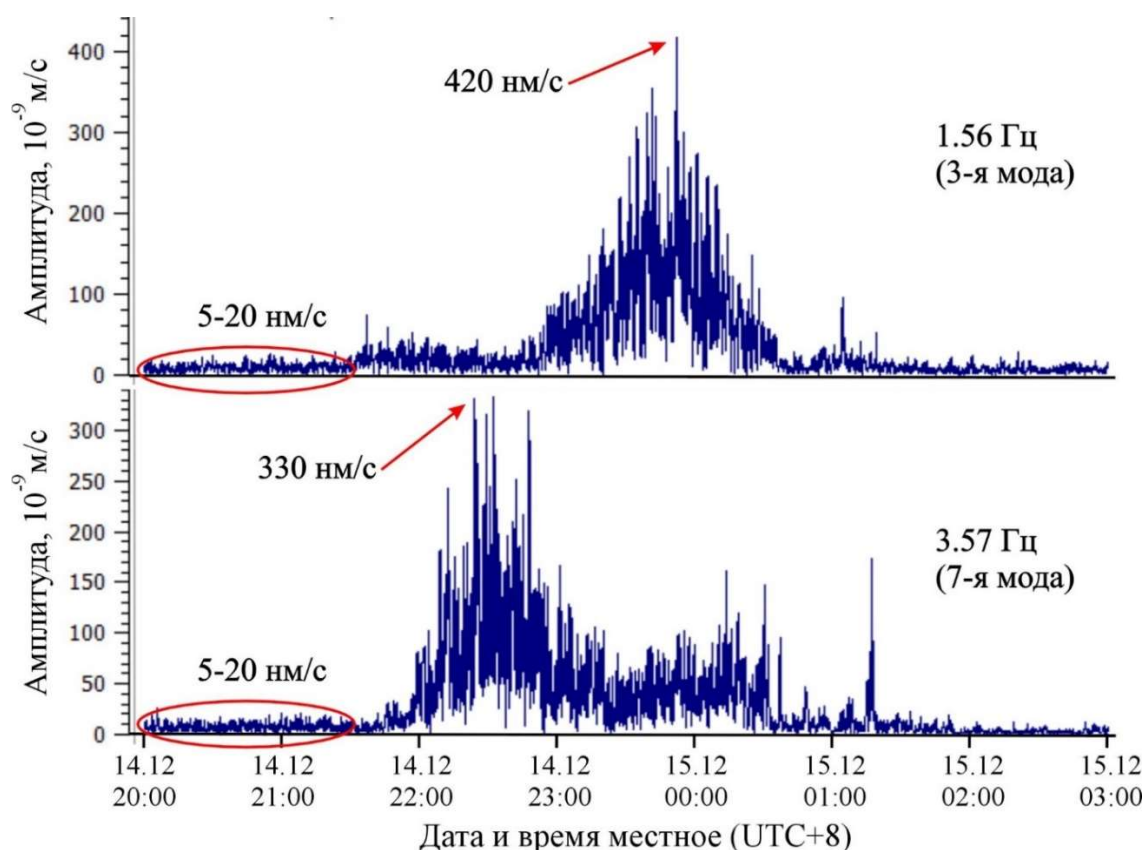


Рисунок 2.11 – Временная развертка амплитуд сигналов на частотах 3-й и 7-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным мониторинга сейсмического шума станцией «Черемушки» на удалении в 4.4 км

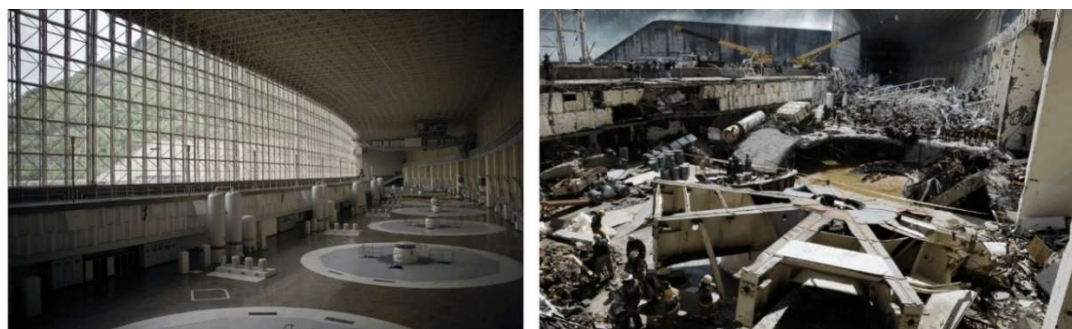
2.3. Реализация на примере аварии 17 августа 2009 г на Саяно-Шушенской ГЭС

17 августа 2009 года в 08:13:25 местного времени произошла одна из крупнейших в истории гидроэнергетики техногенная катастрофа. На Саяно-Шушенской ГЭС погибло 75 человек, полностью разрушен гидроагрегат №2, остальные 9 получили повреждения, обрушен машинный зал. Уже на второй день

после аварии В.С. Селезнев (в то время директор ГС СО РАН) был на ГЭС и принял участие в работе правительственной комиссии по расследованию причин аварии [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015], в состав которой в том числе были включены сотрудники ГС СО РАН. В средствах массовой информации много писали о различных версиях аварии. Например, что это был или гидроудар (а возможно другое мощное кратковременное воздействие на гидроагрегат №2), или повышенная вибрация аварийного гидроагрегата. Ситуация осложнялась тем, что при разрушении гидроагрегата, установленная на нем контрольно-измерительная аппаратура была утеряна, а значит проверить показания датчика вибрации оказалось затруднительно (Рисунок 2.12). Станным кажется тот факт, что из показаний девяти датчиков системы вибрационного контроля [Лисейкин, Селезнев, 2024] только на одном (датчике радиальных вибраций турбинного подшипника в направлении нижнего бьефа – ТПНБ на Рисунке 2.12) значения вибраций превышают норму. Так, в статье В.В. Кудрявого отмечается, что «вывод о недопустимом уровне вибраций гидроагрегата № 2 основан на показаниях лишь одного датчика (ТП Р НБ), которые не могут считаться достоверными, поскольку данный датчик показывал запредельные вибрации даже на остановленном гидроагрегате, что свидетельствует о неисправности датчика» [Кудрявый, 2013]. Аналогичные факты приводятся и в статье А.А. Ключака [Ключач, 2011]. Причем это превышение фиксировалось начиная с 23.06.2009, т.е. практически за два месяца до аварии.

Выдвинуто было также значительное количество альтернативных гипотез причин аварии. В частности, возможность развития в напорном тракте ГЭС автоколебательных (резонансных) процессов [Лобановский, 2010; Башнин, 2012; Тарасов, 2012], воздействие на ГЭС геологических процессов [Марчук, 2012; Сашурин, 2012], рассинхронизация лопаток направляющего аппарата [Колосов, 2012]. Эти гипотезы (как и рассматривавшаяся первоначально в качестве приоритетной версия гидроудара) не получили поддержки в профильном научном сообществе и подвергаются критике рядом авторитетных специалистов в области

гидроэнергетики и гидротехники [Юркевич, 2011; Берлин, Муравьев, 2012а; Берлин, Муравьев, 2012б; Воронков, 2012; Газиев и др., 2012].



Изменение показаний датчика радиальных вибраций ТПНБ подшипника турбины при мощностях 500-600 МВт

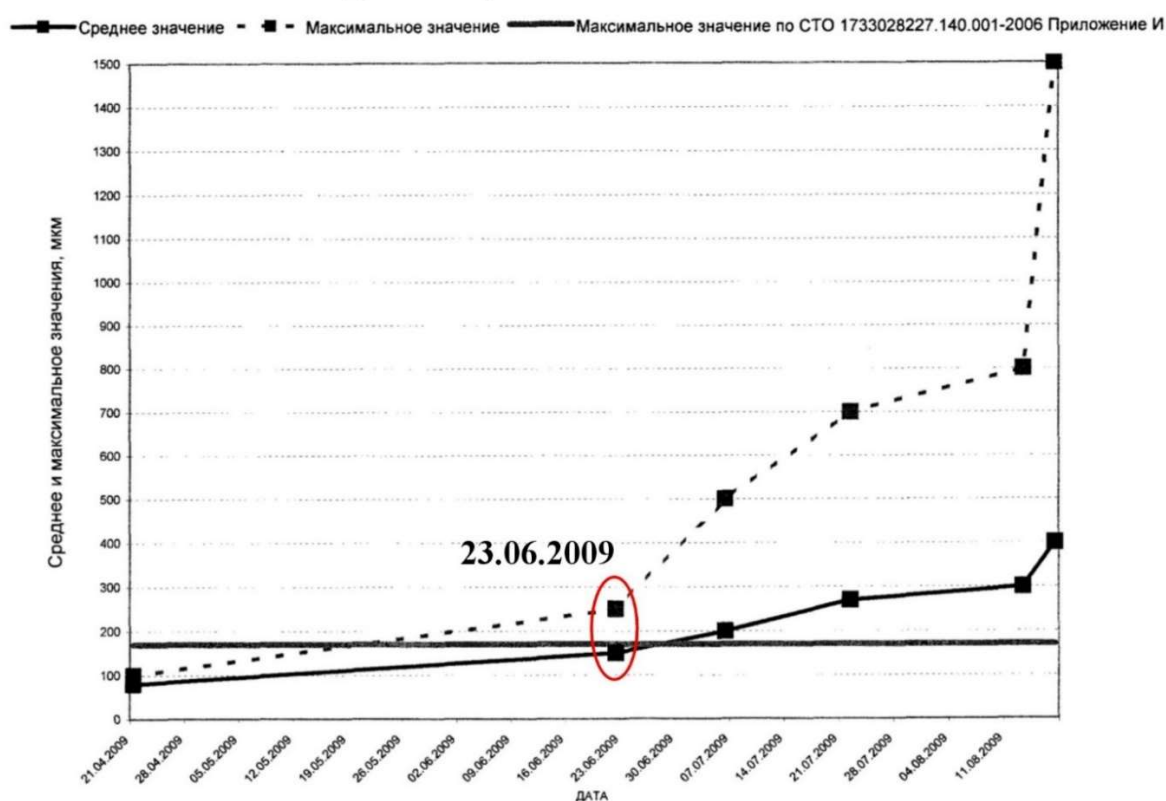


Рисунок 2.12 – Фотографии машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС до и после катастрофы 17.08.2009 г. (вверху) [<https://ru.wikipedia.org/>] и график показаний одного из 9-ти датчиков вибрации 2-го гидроагрегата [Акт..., 2009]

Комиссия Ростехнадзора установила, что «Вследствие многократного возникновения дополнительных нагрузок переменного характера на гидроагрегат, связанных с переходами через не рекомендованную зону, образовались и развились усталостные повреждения узлов крепления гидроагрегата, в том числе крышки турбины. Вызванные динамическими нагрузками разрушения шпилек привели к

срыву крышки турбины и разгерметизации водоподводящего тракта гидроагрегата» [Акт..., 2009, стр. 65]. Однако вопрос о том, что это за «дополнительные нагрузки» и как их предотвратить, чтобы снизить риск аварии в будущем, не рассматривался.

Также, в акте не указано сколько времени прошло между разрушением гидроагрегата и перекрытием водовода – отмечено лишь, что «С 8 час. 35 мин. и не позже 09 час. 30 мин. в ручном режиме персоналом станции были закрыты аварийные затворы напорных водоводов» [Акт..., 2009, стр. 87]. Вместе с тем, как следует из акта, причина гибели основной массы людей связана именно с затоплением помещений машинного зала и нижней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС.

В 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС расположена сейсмостанция «Черемушки» (принадлежащая ОАО «РусГидро», обслуживаемая АСФ ГС СО РАН), которая кроме землетрясений, регистрировала непрерывный сейсмический шум задолго до описываемых событий (начиная с 2001 г.) и во время развития аварии (Рисунок 2.13). К сожалению, на тот момент из-за низкого финансирования сейсмостанция была оснащена слабой системой бесперебойного питания, в связи с чем регистрация с кратковременными сбоями продолжалась лишь до 08:50 местного времени (т.е. в целом проработала около 37 минут после аварии в период полного отсутствия электропитания).

Кроме сейсмостанции, в теле плотины также была установлена сейсмометрическая система (принадлежащая и обслуживаемая ОАО «РусГидро»). Однако она имела существенный недостаток – предназначенная исключительно для регистрации кратковременных сейсмических событий, система работала по принципу их обнаружения – после толчка заданной амплитуды система производила запись колебаний в течение лишь 30 с, после чего опять переводилась в ждущий режим. Кроме этого, время регистрации было неточным (без синхронизации с GPS).



Сейсмометрическая система в плотине Саяно-Шушенской ГЭС

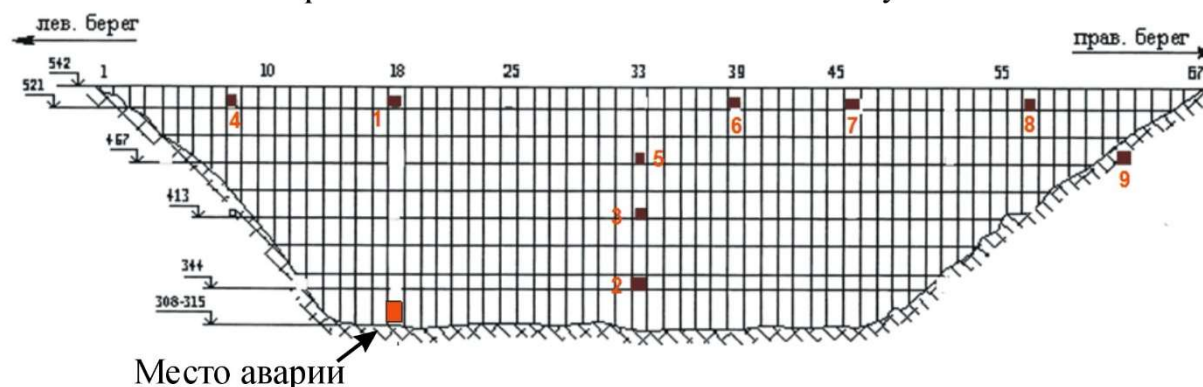


Рисунок 2.13 – Спутниковый снимок размещения сейсмостанции «Черемушки» относительно Саяно-Шушенской ГЭС (вверху) и схема пунктов сейсмометрической системы в плотине по состоянию на 17.08.2009 г. (внизу)

Необходимо отметить, что уже после аварии, когда стали ясны недостатки устаревших сейсмологической и сейсмометрической систем наблюдения, эти системы были модернизированы. Так, в 2011-2012 гг. силами специалистов АСФ ГС СО РАН (по договору с ПАО «РусГидро») модернизировалась локальная сейсмологическая сеть вводом еще двух станций и установкой современной широкополосной аппаратуры производства компании Guralp (Великобритания) (см. Рисунок 2.16). Сейсмометрическая система также была модернизирована в 2016 г., теперь уже для возможности регистрации колебаний в непрерывном режиме, с установкой современной аппаратуры и добавлением новых пунктов регистрации [Егоров и др., 2016].

Для детального анализа данных мониторинга с сейсмостанции «Черемушки», расположенной в 4.4 км к северо-востоку от Саяно-Шушенской ГЭС, с целью получения независимой оценки вибрационного состояния агрегатного блока №2 перед аварией 17.08.2009 г на Саяно-Шушенской ГЭС был заключен договор между ГС СО РАН и ОАО «НИИЭС» от 20 апреля 2011 г. №30/ОГ-139-17-2011. Исходными данными являлись материалы мониторинга за период с 01.01.2009 г до момента аварии [Лисейкин, Селезнев, 2024], а также информация о режимах работы гидроагрегатов ГЭС. Кроме этого, в исследовании частично использовались материалы, полученные специалистами ГС СО РАН при определении параметров динамических воздействий на плотину и здание машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС от запусков восстановленных после аварии гидроагрегатов №6 и №3 (договоры между ГС СО РАН и ОАО «РусГидро» – № СШ-140-2020 от 30.03.2010 и № СШ-656-2010 от 16.12.2010).

2.3.1. Характеристика зарегистрированного в 4.4 км от ГЭС сейсмического шума перед аварией и в ходе ее развития

Расположенная в п. Черемушки одноименная сейсмостанция (международный код – CERR) перед аварией функционировала в штатном режиме, регистрируя непрерывный сейсмический шум по трем взаимно перпендикулярным компонентам (N – на север; Z – вертикально; E – на восток). Тип датчиков СМ-3 (датчики скорости или велосиметры), регистрирующая аппаратура – 16-ти разрядная «Байкал-11» (разработка ГС СО РАН). Из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) сейсмической станции видно, что частотный диапазон, в котором датчики регистрируют колебания практически без искажений, составляет от 0.5 до 15 Гц (Рисунок 2.14). Перечисленные характеристики относятся к периоду перед и во время аварии, через некоторое время аппаратура была модернизирована.

В результате качественного частотно-временной анализа сейсмического шума, зарегистрированного до и во время развития аварии 17.08.2009 на Саяно-Шушенской ГЭС выделены малоамплитудные сигналы, вероятно, связанные с

работой оборудования и последующими после аварии событиями (Рисунок 2.15). Хотя анализировались все три компоненты сейсмограмм, без необходимости на иллюстрациях приводится только одна компонента, на которой описываемые особенности зарегистрированного волнового поля наиболее выражены.

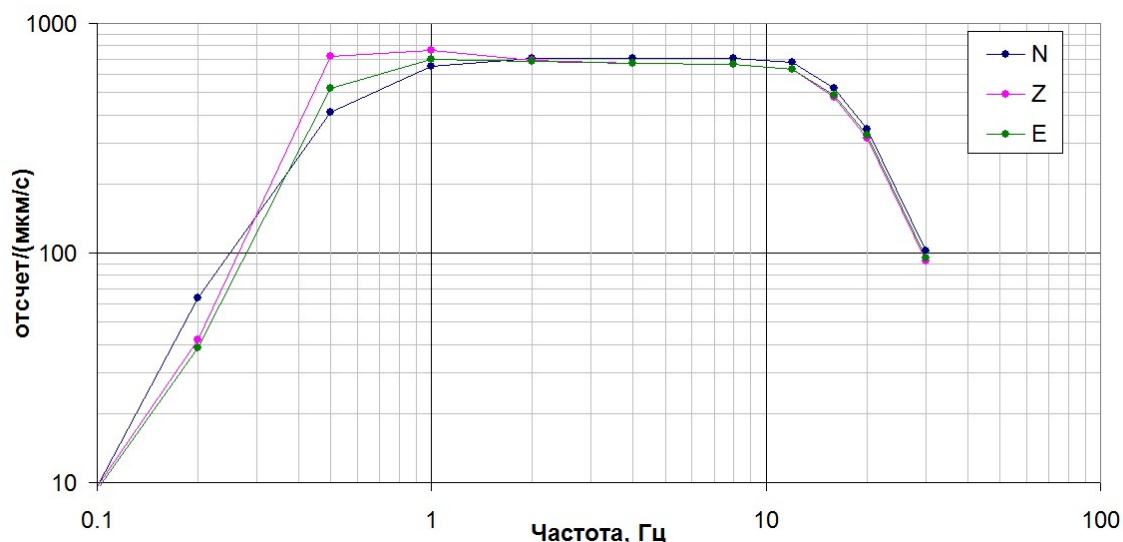


Рисунок 2.14 – Амплитудно-частотная характеристика аппаратуры сеймостанции «Черемушки» на момент аварии 17.08.2009

Прежде всего, необходимо идентифицировать источники возбуждения выделенных сигналов. Часть из них известна – это источники монохромных сигналов на частотах 2.381 и 38.095 Гц. Первая соответствует частоте вращения турбины (оборотная частота у гидроэнергетиков), вторая – равна произведению оборотной частоты на количество лопастей турбины (лопастная частота). Каким источником возбуждены другие сигналы, например, зарегистрированные в 5-минутный период времени до аварии (См. Рисунок 2.15, частотно-временная область под цифрой 2), и имеют ли они отношение к аварии, предстояло выяснить. Учитывая, что сеймостанция «Черемушки» расположена на значительном (более 4 км) расстоянии от Саяно-Шушенской ГЭС она, без сомнения, кроме сейсмических сигналов, исходящих от ГЭС, регистрирует и сигналы, возбужденные другими источниками. Поэтому необходимо проанализировать сейсмограмму с определением взаимосвязи между тем или иным сигналом в составе зарегистрированного сейсмического шума и соответствующим ему сейсмическим источником. Таким образом будет идентифицирован источник

малоамплитудного сигнала, зарегистрированного на удалении от гидроэлектростанции, а интерпретация изменений характеристик сигнала во времени позволит восстановить ход событий до и во время развития аварии.

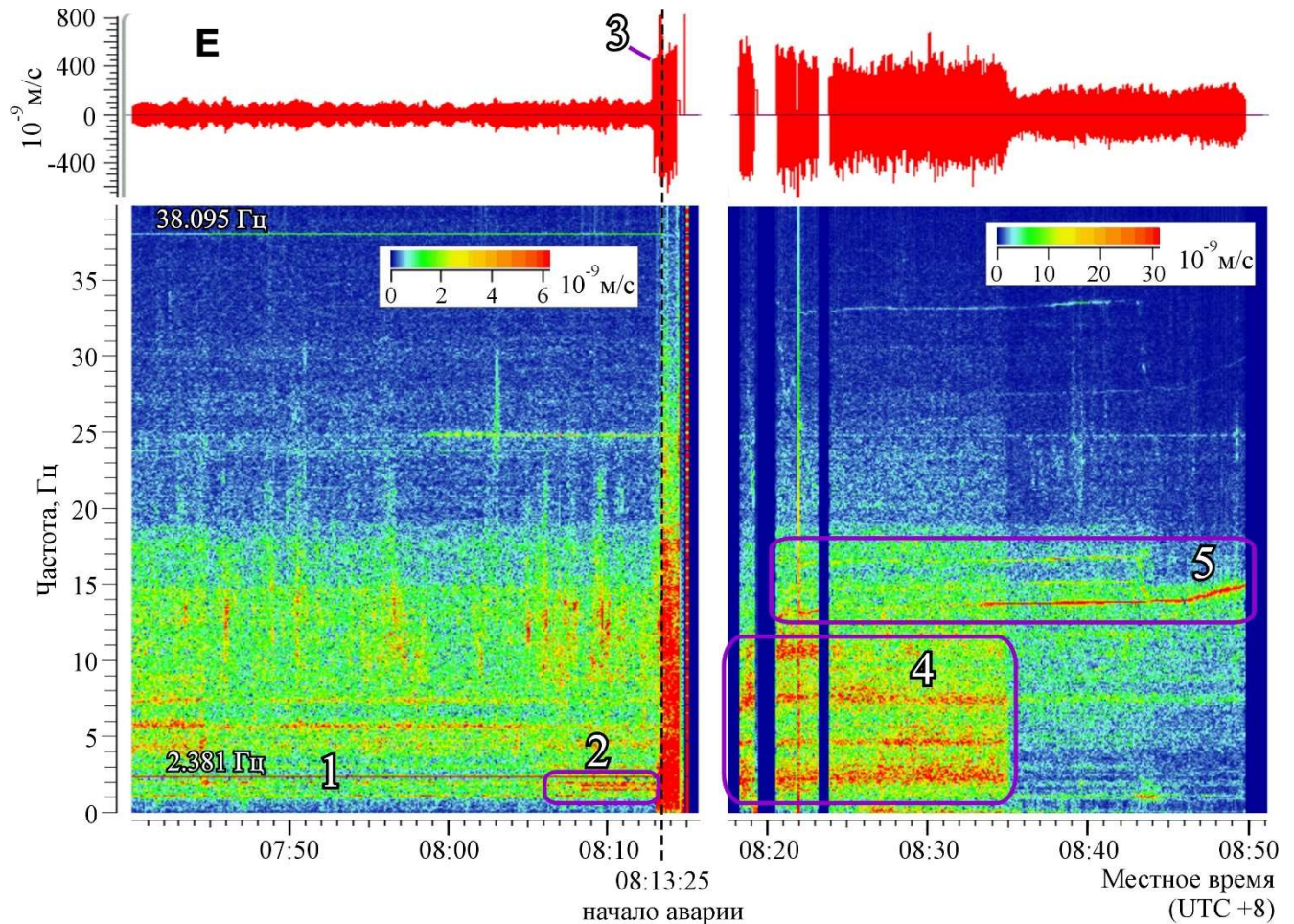


Рисунок 2.15 – Сейсмическая трасса (вверху) и спектрограмма (внизу) до и при развитии аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009 по данным мониторинга сейсмического шума на станции «Черемушки». Цифрами обозначены частотно-временные области анализируемых малоамплитудных сигналов

На детальных спектрограммах в период перед аварией видно, что за ~ 20 с до нее наблюдается низкочастотный (до 3 Гц) сигнал (Рисунок 2.16). Заметно, что сигнал с лопастной частотой турбины прекращается после начала аварии, в то время как другой монохромный сигнал (24.85 Гц) прослеживается как до, так и после нее до момента отключения сейсмостанции в связи потерей электропитания.

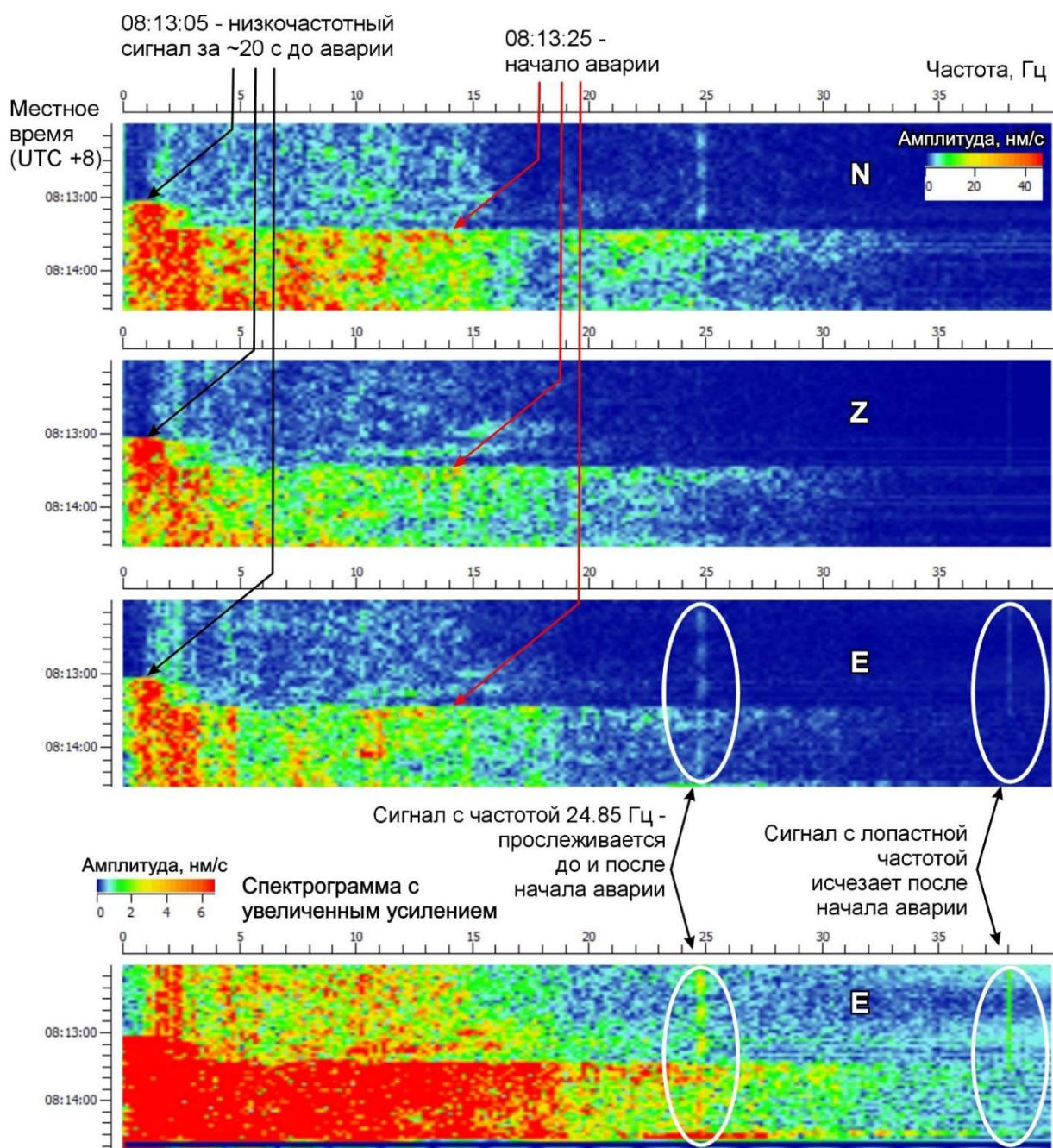


Рисунок 2.16 – Детальные спектрограммы в период начала аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009 по данным мониторинга сейсмического шума на станции «Черемушки»

Итак, из предварительного спектрально-временного анализа сейсмического шума, зарегистрированного сеймостанцией «Черемушки» перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС [Лисейкин, Селезнев, 2024] и при ее развитии, выделены следующие малоамплитудные сигналы:

1. До аварии прослеживаются монохромные сигналы с частотами 2.381 и 38.095 Гц – оборотная и лопастная частоты турбин;

2. За 5-7 минут до аварии повышается амплитуда сигналов на низких частотах (до 5 Гц);

3. За ~20 с до аварии наблюдается низкочастотный сигнал (до 3 Гц);

4. После начала аварии до 08:35 (в течение ~22 минут) регистрируются ряд из 4-х низкодобротных сигналов;

5. С начала аварии до 08:50 (в период длиной ~37 минут) видны монохромные сигналы с частотами от 13 до 17 Гц.

Предварительный анализ причинно-следственной связи (по времени событий) между выделенными сигналами в составе сейсмического шума, зарегистрированного сейсмостанцией «Черемушки» и изменениями режимов работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС перед аварией, показывает следующее. В момент времени, когда на сейсмограммах появляется монохромный сигнал с частотой 24.8 Гц (~07:58:20) ни на одном из гидроагрегатов не происходило изменений нагрузок (Рисунок 2.17). Этот факт и то обстоятельство, что описываемый сигнал регистрируется и в процессе развития аварии и даже после нее, говорит о том, что его возбуждение не вызвано работой гидроэлектростанции (источник его другой). Напротив, событие, произошедшее в 08:08:25, начиная с которого на сейсмостанции наблюдаются низкочастотные сейсмические сигналы (до 5 Гц), совпадает по времени с изменениями нагрузок на нескольких из агрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (Рисунок 2.17). Так, на гидроагрегатах № 2, 4 и 9 происходил сброс нагрузки, в среднем, до 575 МВт, на 7-м – сброс до 10-20 МВт. На остальных гидроагрегатах нагрузка в этот момент времени не изменялась. Это говорит о том, что описываемое событие как-то связано с изменением режимов работы одного или нескольких из 4-х гидроагрегатов (2, 4, 7, 9). Несомненно, тот факт, что на сейсмостанции «Черемушки» регистрировались сигналы с повышенными амплитудами указывает на то, что увеличились колебания в источнике на самой ГЭС. Чем вызваны эти колебания, с каким именно гидроагрегатом связаны (или с несколькими) – основная задача дальнейшего анализа.

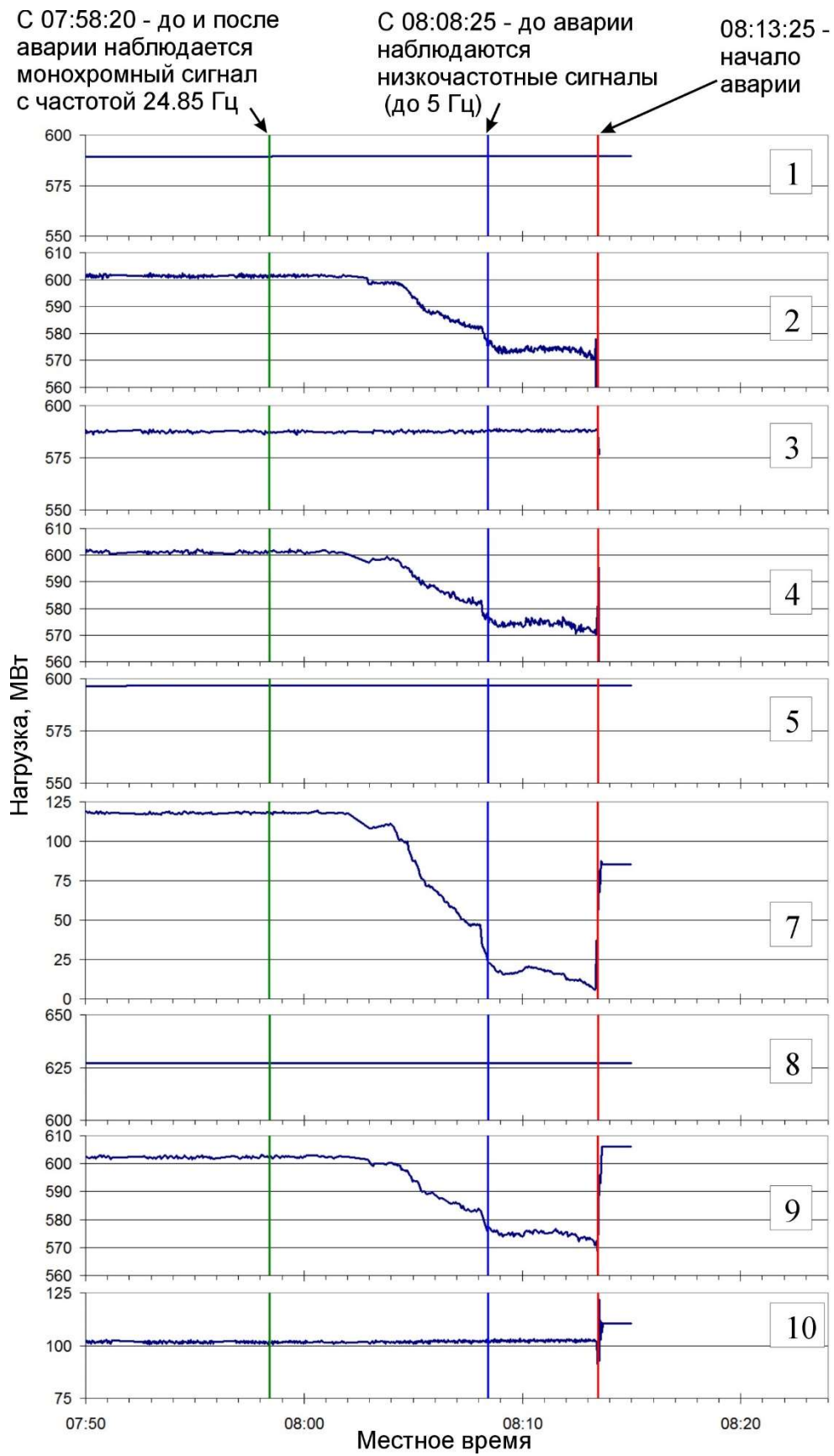


Рисунок 2.17 – Графики нагрузок гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС перед аварией 17.08.2009. Цифрами показаны номера работающих гидроагрегатов

2.3.2. Интерпретация идентифицированных с работающей ГЭС

малоамплитудных сигналов

Монохромные сигналы, кратные частоте вращения гидроагрегатов

Как отмечалось, в зарегистрированном станцией «Черемушки» сейсмическом шуме, на расстоянии в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС содержатся монохромные малоамплитудные сигналы на частотах 2.381 и 38.095 Гц – оборотная и лопастная частоты гидроагрегатов. Аналогичные сигналы, амплитуды которых менялись в зависимости от режимов работы гидроэлектростанции, наблюдались на сейсмограммах станции «Черемушки» и до, и после аварии [Лисейкин, Селезнев, 2021], когда запускались первые из восстановленных гидроагрегатов (№6 и №3). Известно, что кроме разрушенного 2-го гидроагрегата, перед аварией функционировало еще восемь (все, кроме 6-го, остановленного ранее на плановое техобслуживание). Все работающие турбины вращались синхронно с одной и той же частотой (2.381 Гц). Поэтому сеймостанция «Черемушки» фактически регистрировала суперпозицию упругих волн от 9-ти источников возбуждения, из которой необходимо выделить вклад только одного (гидроагрегата № 2). Для выделения из сейсмического шума сигнала, связанного с работой только одного гидроагрегата предложен следующий способ. Из данных мониторинга выбираются для анализа сейсмограммы за периоды времени, при которых все гидроагрегаты, кроме 2-го, работают в постоянном режиме, а его режим – изменяется (запускается, останавливается, меняет нагрузку). В таком случае ожидается, что разница амплитуд сигнала до и после изменения режима работы гидроагрегата № 2 будет связана только с ним.

На графиках изменения нагрузок гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС в интервале с 27.03.09 09:00 по 28.03.09 02:00, на протяжении которого гидроагрегат № 2 работал в различных режимах, выделяется 6 наиболее значимых событий (Рисунок 2.18). Событие 1 – запуск с выходом на нагрузку около 180 МВт; 2 – набор нагрузки ступенью до 500 МВт; 3 – сброс нагрузки с 500 до 150 МВт; 4 – набор со 150 до 500 МВт; 5 – сброс с 500 до 180 МВт и 6 – остановка гидроагрегата после

нагрузки 50 МВт. Следующим шагом перечисленные события сопоставляются с графиками изменения амплитуд монохромных сигналов с оборотной и лопастной частотами, зарегистрированных в сейсмическом шуме на станции «Черемушки».

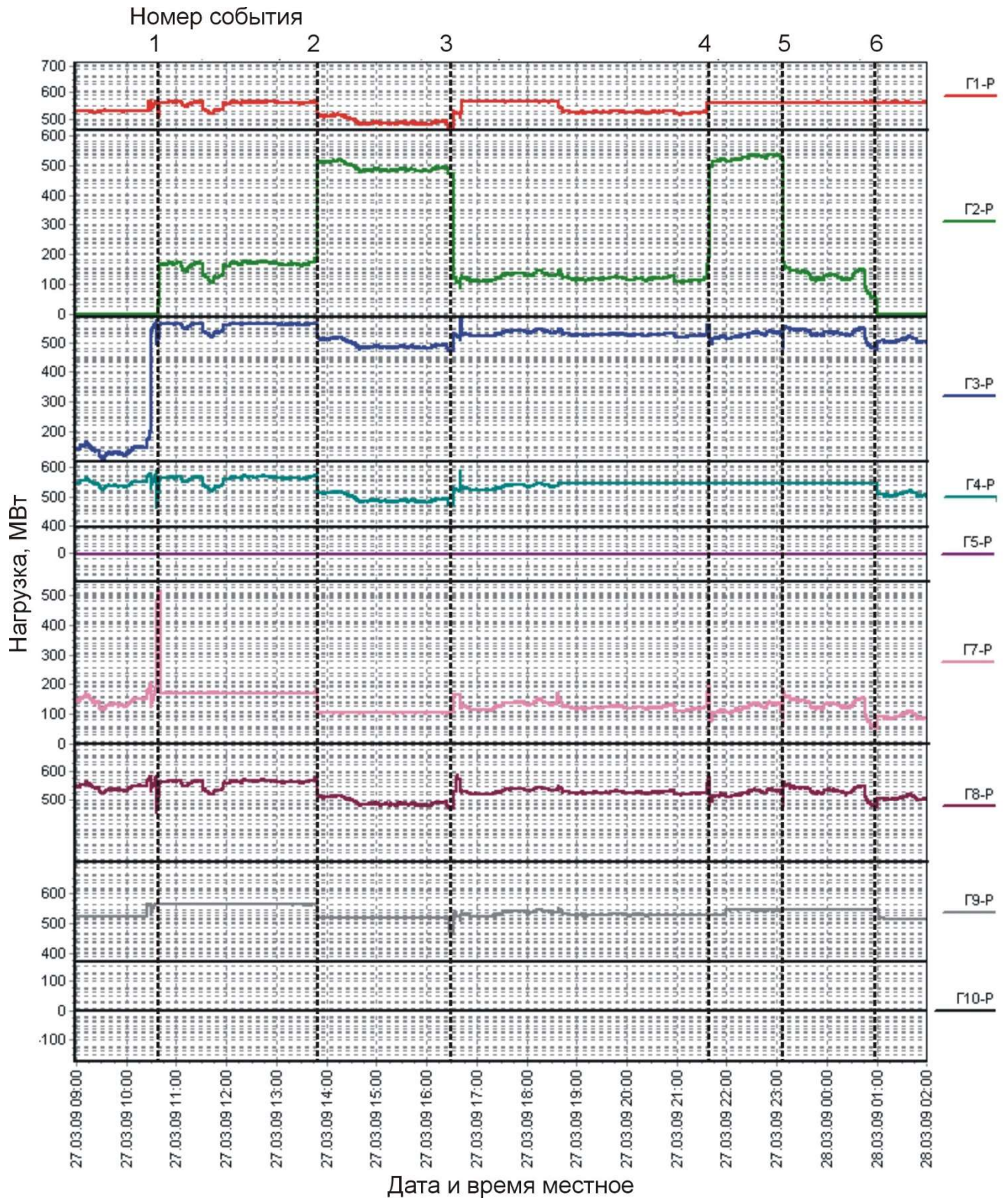


Рисунок 2.18 – Графики изменения нагрузок гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС с 27.03.09 09:00 по 28.03.09 02:00. Цифрами сверху отмечены времена смены режима работы гидроагрегата № 2 (за 5 месяцев до его разрушения)

На графиках изменения амплитуд монохромных сигналов с оборотной частотой 2.381 Гц, на E- и Z-компонентах наиболее интенсивно выделяются события № 1 и № 6, соответствующие запуску и остановке гидроагрегата № 2, в виде ступенчатого скачка амплитуды на величину около 4 нм/с (Рисунок 2.19). При этом остальные события, соответствующие сменам нагрузок на гидроагрегате № 2, практически не отражаются на графиках. Это свидетельствует о том, что амплитуда колебаний на оборотной частоте (2.381 Гц) практически не зависит от нагрузки гидроагрегата. Это важно для анализа, поскольку практически всегда запуск или остановка какого-либо гидроагрегата сопровождается сменой нагрузок на нескольких остальных агрегатах (см. Рисунок 2.18). Таким образом, величина скачка амплитуды сигнала на оборотной частоте, определенная в момент запуска или остановки гидроагрегата, описывает вклад вибрации гидроагрегата в регистрируемое волновое поле.

Анализ амплитуд монохромных сигналов с лопастной частотой (38.095 Гц) показывает, что все изменения режимов работы гидроагрегата № 2 отображаются в виде скачков амплитуд. Однако величина этих скачков разная, несмотря на схожие смены режимов работы ГА-2 (например, запуск-остановка, сброс-набор нагрузки). Это объясняется влиянием работы остальных гидроагрегатов (см. Рисунок 2.18): все описываемые события сопровождаются изменениями нагрузок по крайней мере на нескольких гидроагрегатах.

Таким образом, для установления по монохромному малоамплитудному сигналу в сейсмическом шуме, зарегистрированном станцией «Черемушки», вклада от одного гидроагрегата, необходимо найти события, когда он или останавливался, или запускался, и определить величину скачка амплитуд колебаний на оборотной частоте во время этого события. Эта величина будет характеризовать вклад единственного гидроагрегата, а ее изменение в течение времени даст информацию об изменении вибрации. Анализировать следует E- и Z-компоненты сейсмограммы, т.к. на N-компоненте описываемые события практически не отображаются. Монохромные сигналы с лопастной частотой

(38.095 Гц) пока не рассматриваются из-за сложной картины их изменения. В ходе дальнейшего анализа определяется, как часто моменты запуска-остановки гидроагрегата № 2 сопровождаются ступенчатым изменением амплитуды сигнала на оборотной частоте (2.381 Гц).

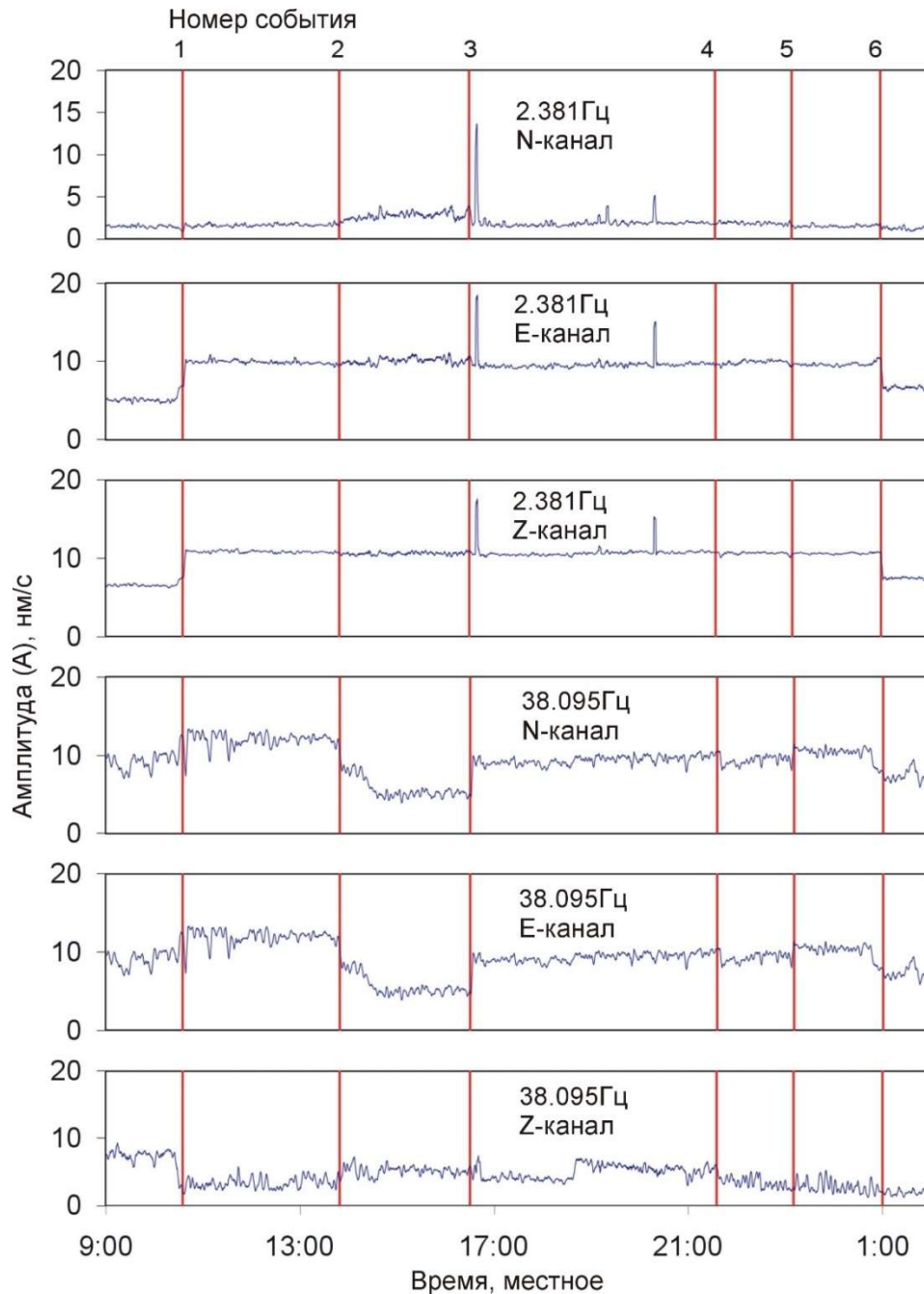


Рисунок 2.19 – Графики изменения амплитуд монохромных сигналов на оборотной (2.381 Гц) и лопастной (38.095 Гц) частотах по данным мониторинга на сейсмостанции «Черемушки» в период с 27 по 28 марта 2009 г. Цифрами сверху отмечены времена смены режима работы гидроагрегата № 2 (см. Рисунок 2.18)

По графикам изменения нагрузок гидроагрегатов найдены времена запуска-остановки гидроагрегата № 2 (пример одного из таких графиков – см. Рисунок 2.18). Следующим шагом по сейсмограммам сейсмического шума со станции «Черемушки» на E- и Z-компонентах с использованием программного обеспечения SpectrumSeism [SpectrumSeism, 2022] рассчитывались амплитуды монохромных сигналов на оборотной частоте (2.381 Гц) и строились графики их изменения во времени, по которым определялось время ступенчатого изменения амплитуды и сопоставлялось с временем запуска или остановки гидроагрегата. Это позволило установить, что на оборотной частоте моменты запуска или остановки гидроагрегата № 2 отображаются в виде ступенчатых скачков амплитуд по данным мониторинга на сеймостанции «Черемушки» практически повсеместно. Аналогичные скачки наблюдались и при запуске или остановке других гидроагрегатов, №№ 1, 3, 4, 9, 10 (Рисунок 2.20).

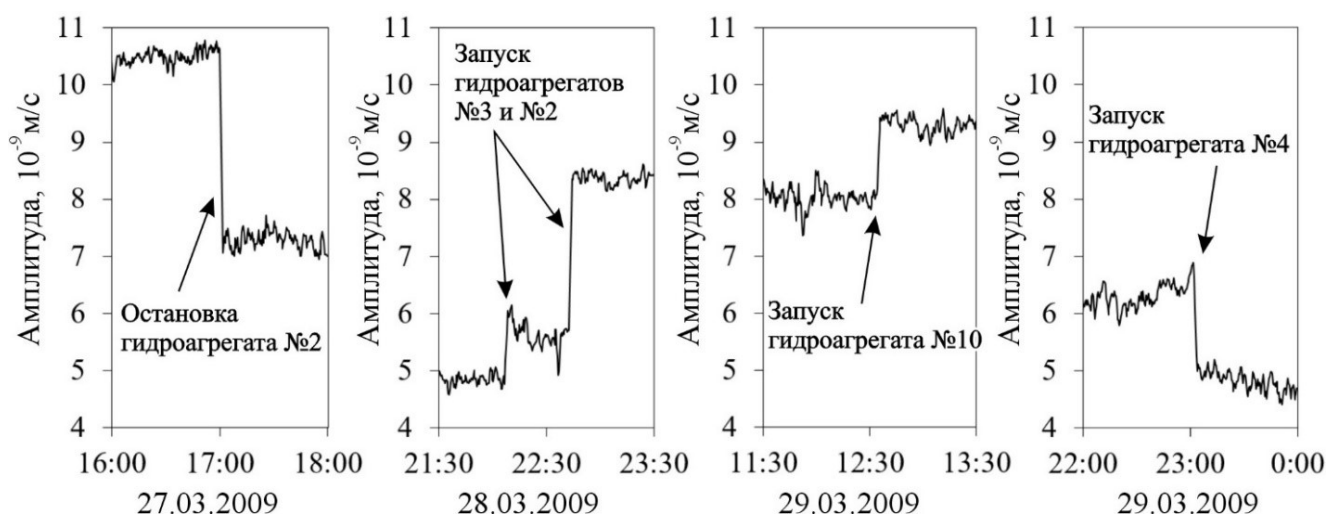


Рисунок 2.20 – Изменение амплитуды сигналов в марте 2009 г. на частоте вращения гидроагрегатов (2.381 Гц) Саяно-Шушенской ГЭС по результатам обработки сейсмического шума на E-компоненте сеймостанции «Черемушки» [Лисейкин, Селезнев, 2024]

В последующем анализировались три временных периода мониторинга сейсмического шума на станции «Черемушки»: полмесяца до ремонта гидроагрегата № 2 (01.01.2009-15.01.2009), месяц после его ремонта (14.03.2009-14.04.2009) и месяц до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (17.07.2009-17.08.2009). Анализировались данные в моменты времени, когда запускались или

останавливались как аварийный гидроагрегат №2, так и другие. По изменению амплитуды сигналов на частоте вращения турбин Саяно-Шушенской ГЭС (2.381 Гц) видно, что соответствующие 2-му гидроагрегату сигналы по амплитуде, в среднем, в 1.7 раза выше, чем соответствующие остальным гидроагрегатам (аналогичные события, но с меньшими амплитудами, были выявлены при запуске или остановке гидроагрегатов №№ 1, 3, 4, 9 и 10). Из этого следует, что и вибрация гидроагрегата № 2 на оборотной частоте была выше в проанализированные временные периоды, чем на других гидроагрегатах [Лисейкин, Селезнев, 2024]. При этом необходимо отметить, что амплитуды сигналов на оборотной частоте, как до ремонта 2-го гидроагрегата, так и после него, принимают близкие значения, что говорит об отсутствии улучшений вибрационного состояния после ремонта. Отмечается тенденция к снижению амплитуды с начала года до аварии примерно на 30 % (с 3.4 до 2.4 нм/с). Однако примерно в такой же пропорции снижается амплитуда сигналов от остальных гидроагрегатов.

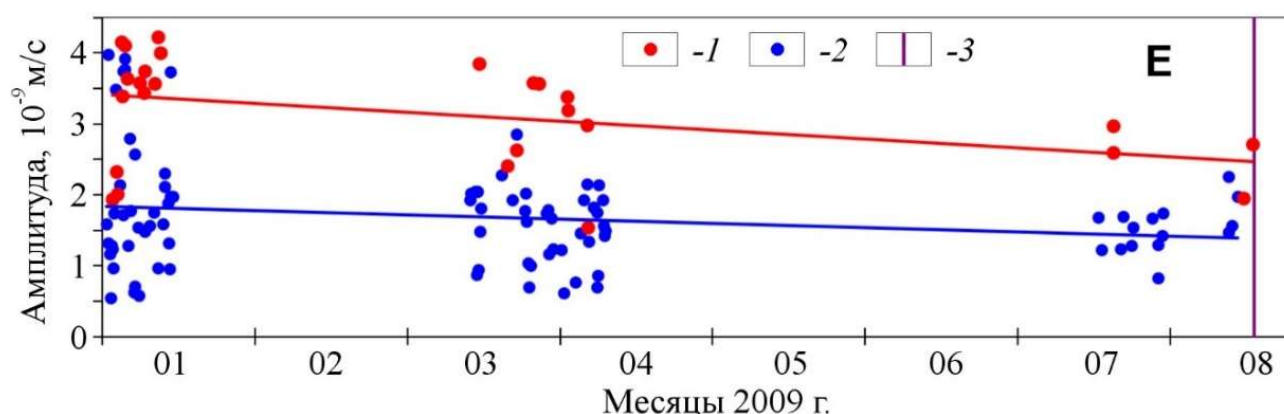


Рисунок 2.21 – Изменение амплитуды сигналов на частоте вращения турбин Саяно-Шушенской ГЭС (2.381 Гц) с января по август 2009 г. при запуске или остановке 2-го гидроагрегата (1) и 1, 3, 4, 9, 10-го гидроагрегатов (2). 3 – момент разрушения 2-го гидроагрегата [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Вышеперечисленное прямо указывает на имеющую место нештатную ситуацию: на гидроагрегате № 2 вероятно идут разрушительные процессы, которые скоро закончатся аварией. Как оказалось, на этом гидроагрегате изнашивались шпильки крышки турбины, и в результате произошло его разрушение [Акт..., 2009]. Высокая амплитуда вибрации 2-го гидроагрегата на частоте вращения по сравнению с остальными (в 1.7 раз выше) (см. Рисунок 2.21) за

длительный период эксплуатации (не менее, чем за 8 месяцев до аварии) – следствие его дисбаланса. Как результат – постепенное разрушение шпилек крышки турбины. Как показывает исследование, такие аварии можно (и нужно) предупреждать с использованием предлагаемой методики [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Наиболее важным фактом из результатов анализа вибрации 2-го гидроагрегата представляется то, что перед аварией (а точнее, в период одного месяца до нее, см. Рисунок 2.21) не отмечается многократного усиления амплитуды, в противовес тому, что было указано в акте расследования причин катастрофы [Акт..., 2009]. Учитывая еще и то обстоятельство, что характеристики вибрации, определенные по данным с 8-ми датчиков вибрации не превышали опасных значений, заключается, что показания датчика вибрации турбинного подшипника со стороны нижнего бьефа недостоверны, а выводы комиссии недостаточно обоснованы.

Низкочастотные сигналы (до 5 Гц), зарегистрированные за ~5 минут до аварии

Как отмечалось, в сейсмическом шуме, зарегистрированном сейсмостанцией «Черемушки» примерно за 5 минут (местное время ~08:08:25) до начала аварии выявлены низкочастотные малоамплитудные сигналы (до 5 Гц). Время их возникновения соответствовало времени, когда нагрузка на гидроагрегатах №№ 2, 4 и 9 снижалась до значений ~ 575 МВт, а на гидроагрегате № 7 до 10-20 МВт. Далее эти колебания анализируются более подробно.

На спектрограмме по данным мониторинга сейсмического шума на Е-компоненте станции «Черемушки» выделены для анализа две частотно-временные области: 1 – когда в волновом поле не отмечались низкочастотные колебания и 2 – когда отмечались (Рисунок 2.22). Однако на усредненном амплитудном спектре, рассчитанном в границах 1-й области, отмечаются низкодобротные сигналы на ряде частот: 1.15, 1.55, 1.95 и 3.15 Гц. На спектре, соответствующем 2-й области (за 5 минут до аварии) видно, что амплитуды сигналов на ряде из частот возрастают.

Так, происходит увеличение амплитуды сигнала на частоте 1.55 Гц примерно в 4 раза (с 1.1 до 4.4 нм/с), появляется частота 1.85 Гц (которой раньше не наблюдалось) с амплитудой 4.5 нм/с; кроме этого, увеличиваются примерно в два раза колебания на частотах 1.95, 2.5 и 3.05 Гц. Каждый из этих сигналов вызван упругими волнами, распространяющимися от какого-то источника периодической силы. Для определения, какую информацию несут в себе эти сигналы, необходимо идентифицировать эти источники.

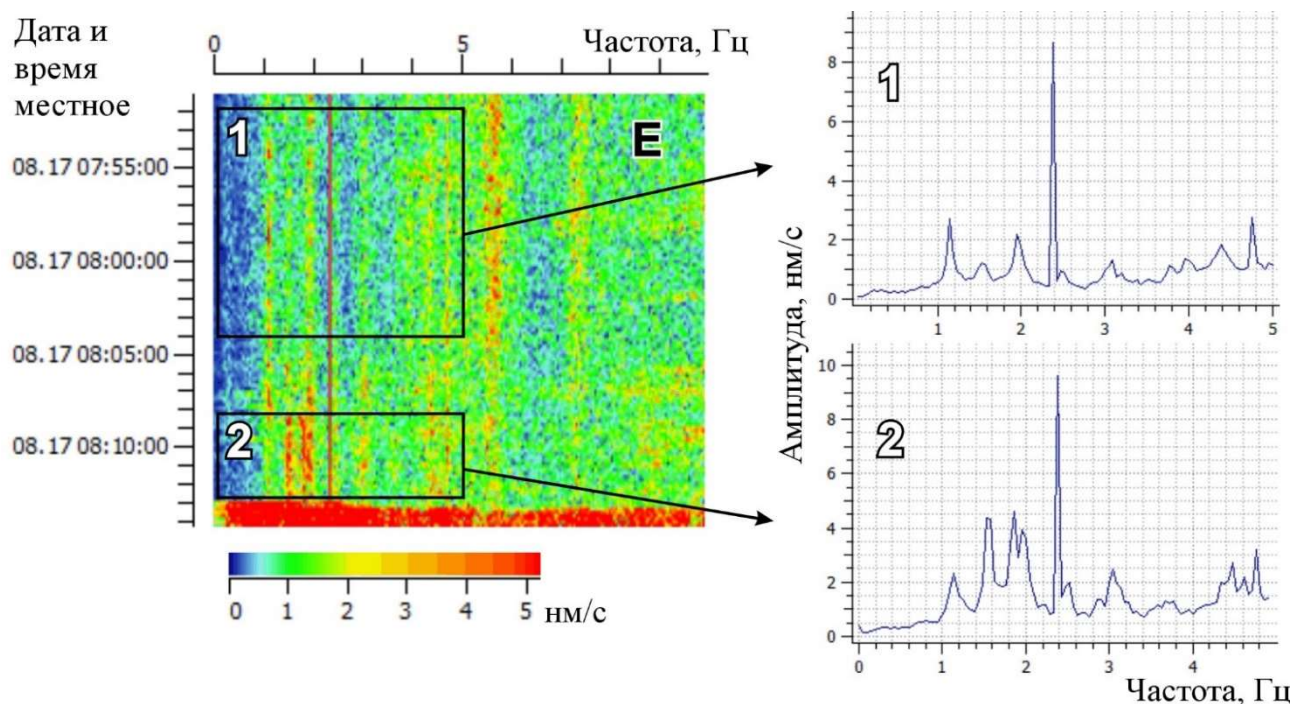


Рисунок 2.22 – Спектрограмма и усредненные амплитудные спектры в границах двух частотно-временных областей по данным мониторинга сейсмического шума на Е-компоненте станции «Черемушки» перед аварией 17.08.2009 на Саяно-Шушенской ГЭС

Примерно через 1.5 месяца после аварии (04.10.2009) на Саяно-Шушенской ГЭС сотрудниками ГС СО РАН (А.А. Бах и др.) были проведены экспресс-исследования собственных колебаний плотины методом стоячих волн [Пересчет..., 2002; Об изменении..., 2014]. Хотя это исследование проводилось по упрощенной схеме (колебания регистрировались не во всем объеме плотины, а только по профилю на ее гребне), тем не менее они позволили надежно определить частоты ее собственных колебаний, которые согласуются по значениям с частотами,

определенными ранее в других исследованиях [Брызгалов, 1999; Пересчет..., 2002] (Рисунок 2.23). Из рисунка видно, что наиболее высокоамплитудными являются колебания первых 7-ми мод, частоты которых составляют 1.15, 1.27, 1.56, 2.0, 2.49, 3.07 и 3.71 Гц, соответственно.

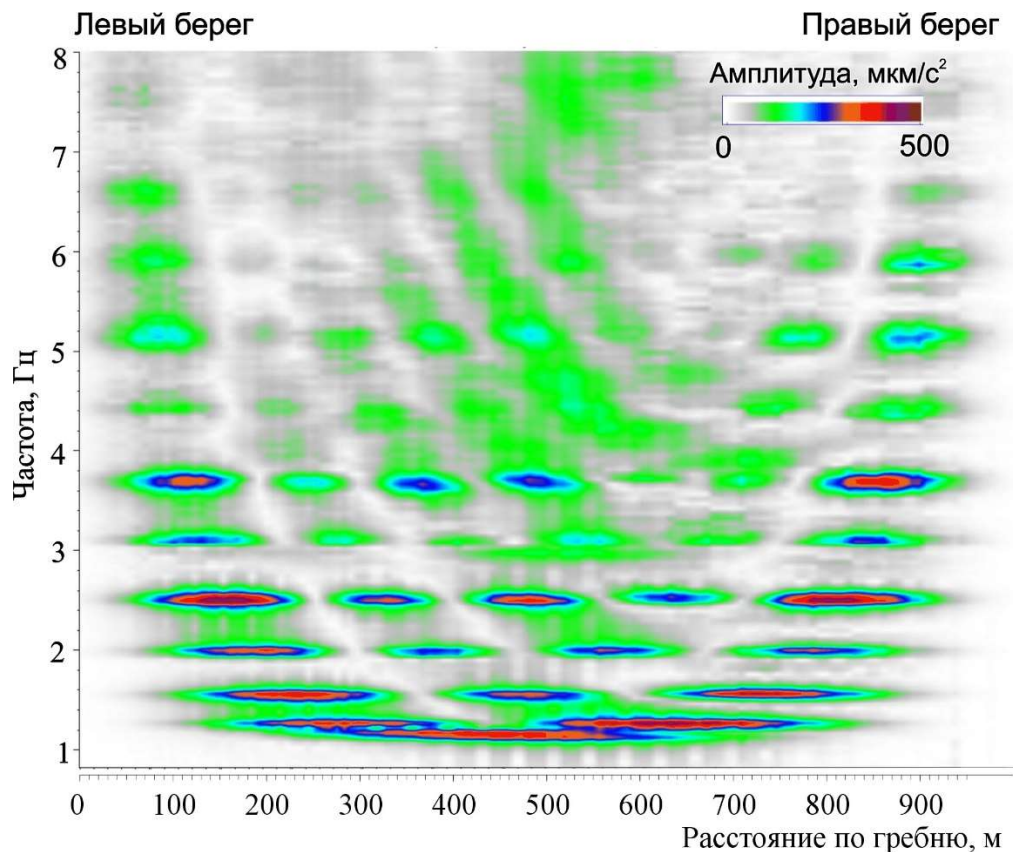


Рисунок 2.23 – Радиальные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным метода стоячих волн, зарегистрированные через 1.5 месяца после аварии

Детальный спектральный анализ сейсмического шума, зарегистрированного станцией «Черемушки» перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС показывает, что малоамплитудные сигналы со всеми перечисленными частотами проявляются в усредненных амплитудных спектрах (Рисунок 2.24). Из этого следует, что источником возбуждения упругих волн с названными частотами является плотина, колеблющаяся на собственных частотах. Аналогичное явление, такое как распространение упругих волн от колеблющегося под воздействием ветровой нагрузки на частотах собственных колебаний здания или инженерного сооружения, исследовано Ф.Н. Юдахиным и др. [Об использовании..., 2005; Лисейкин, Селезнев, 2024].

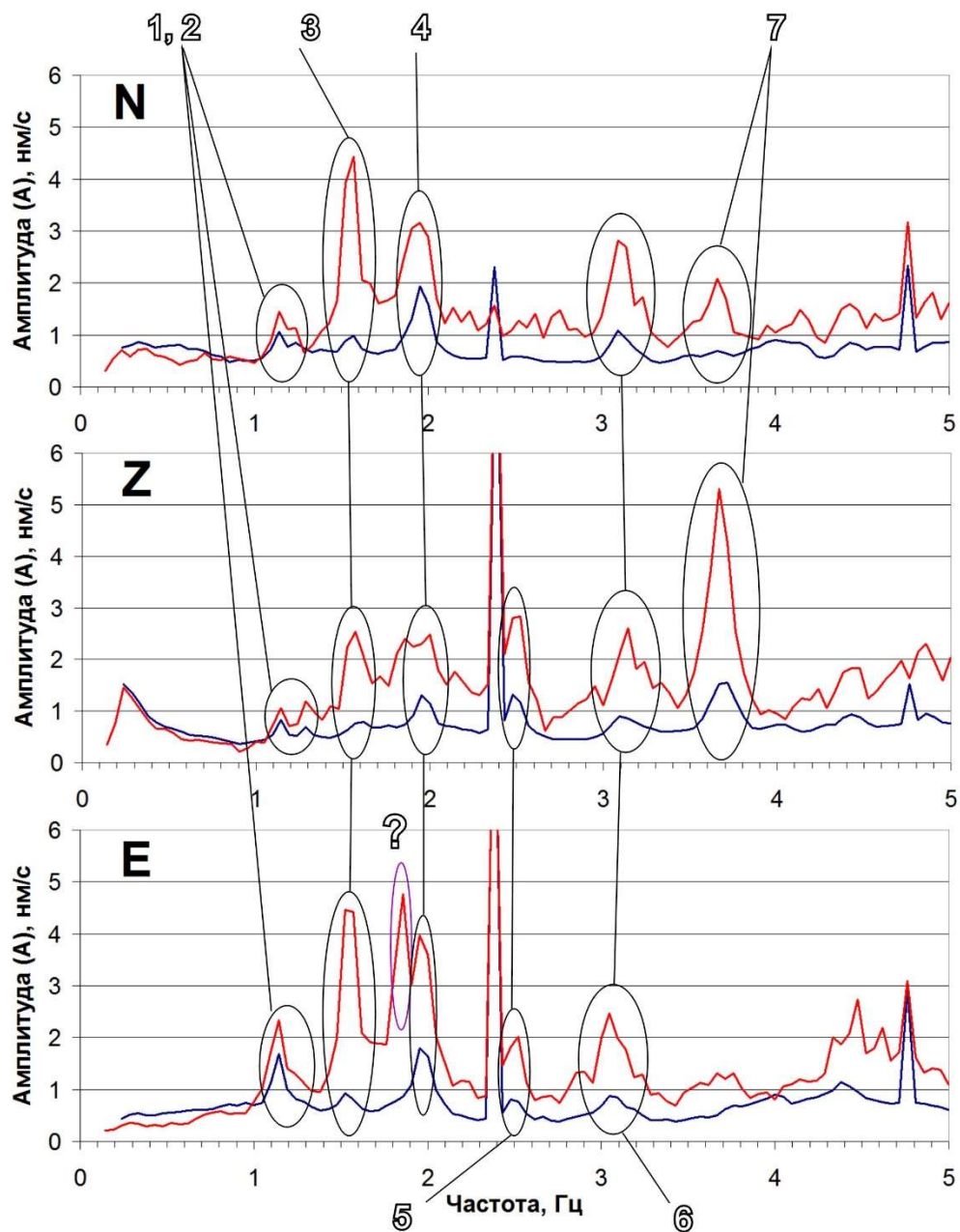


Рисунок 2.24 – Проявление малоамплитудных сигналов от собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС на усредненных амплитудных спектрах сейсмического шума [Лисейкин, Селезнев, 2024] за период мониторинга с 15.08.2009 08:00 по 16.08.2009 08:00 (синий цвет) и в 5-минутный период перед аварией (красный цвет). Цифрами обозначены номера мод

Анализировались два периода мониторинга сейсмического шума: суточный (с 15.08 08:00 по 16.08 08:00, время местное) и 5-минутный перед аварией (Рисунок 2.24). Столь длительный (сутки) период выбран была для того, чтобы получить статистически устойчивые спектры от слабых сигналов, свободные от

помех. Из рисунка видно, что в усредненных спектрах проявляются все 7 мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, причем в 5-минутный период перед аварией амплитуда этих сигналов увеличивается (см. Рисунок 2.24). Наиболее значительно (до 3-4 раз) увеличились сигналы на частотах 3-й и 7-й моды; в 1.5-3 раза увеличились на частотах 4-й, 5-й и 6-й моды. Менее всего (до 1.5 раз) увеличиваются сигналы с частотами 1-й и 2-й моды. Необходимо отметить, что источник сигнала на частоте 1.85 Гц в настоящее время не установлен – частота его не соответствуют ни одной из мод собственных колебаний плотины [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Таким образом, фактически установлено, что за 5 минут до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС увеличилась в несколько раз амплитуда собственных колебаний плотины [Лисейкин, Селезнев, 2024]. По данным мониторинга сейсмического шума со станции «Черемушки», амплитуда их возрастает, в среднем, до 4 раз по сравнению со средним значением в период 1 сутки до аварии. Кроме того, за 5 минут до аварии наблюдается сигнал с частотой ~ 1.85 Гц, источником которого не является плотина. Период, в котором проявляются эти колебания по времени совпадает с периодом, когда на Саяно-Шушенской ГЭС три гидроагрегата (№2, №4 и №9) работали в режиме нагрузки 575 МВт. Далее устанавливается, насколько эти колебания уникальны, связаны ли они с работой аварийного гидроагрегата № 2 и/или ГА-4, ГА-9, или это явление свойственно всем работающим гидроагрегатам. С этой целью используются архивные материалы мониторинга сейсмического шума со станции «Черемушки», а также информация о режимах работы гидроагрегатов в виде значений нагрузок (или вырабатываемых гидроагрегатами мощностей) во времени.

Прежде всего устанавливалось, наблюдались ли подобного рода низкочастотные сигналы раньше, или они характерны только для 5-минутного периода перед аварией. Спектрально-временной анализ данных мониторинга со станции «Черемушки» показывает, что аналогичные сигналы регистрируются с разной частотой проявления практически ежедневно по несколько раз

(Рисунки 2.25, 2.26). Так, из сопоставления графиков нагрузок гидроагрегатов и спектрограммы сейсмического шума следует, что с 07:30 до 07:31 такие колебания регистрировались и соответствовали режимам, когда на трех гидроагрегатах (№№ 2, 4 и 9) снизили нагрузку до 575-580 МВт (Рисунок 2.25). Важно отметить, что, в то время как нагрузка на гидроагрегатах на данном участке снижалась плавно, амплитуда рассматриваемых сигналов с частотами собственных колебаний плотины, напротив, при снижении нагрузки на гидроагрегатах до 580 МВт и ниже, увеличиваются достаточно быстро, что говорит о резонансном явлении. Также необходимо отметить, что значения амплитуды низкочастотных сигналов в 07:30 даже выше, чем в интервале перед аварией (Рисунок 2.25).

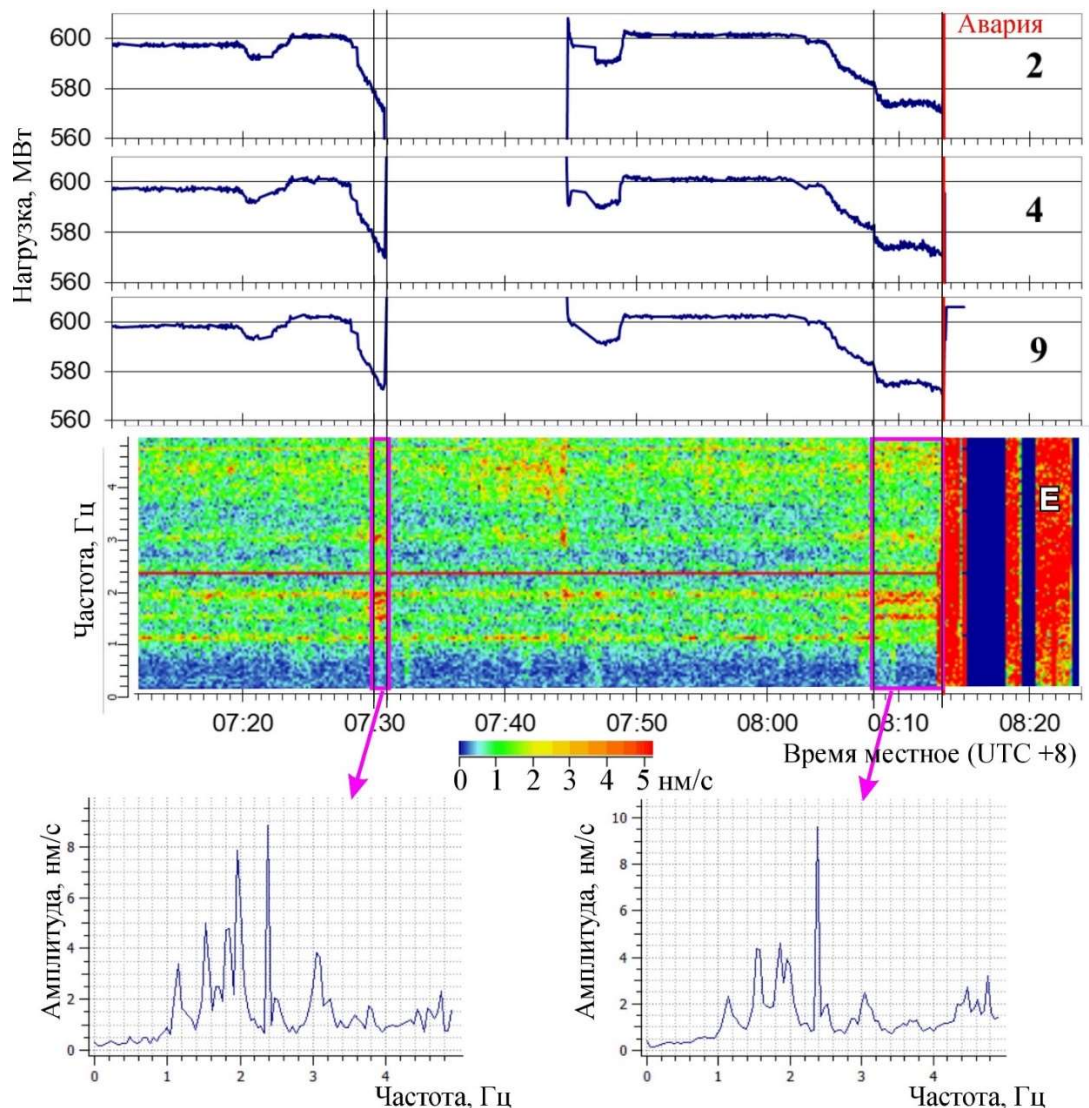


Рисунок 2.25 – Проявление в малоамплитудных сигналах усиления собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при режимах работы гидроагрегатов с нагрузкой 575-580 МВт. Цифрами обозначены номера гидроагрегатов

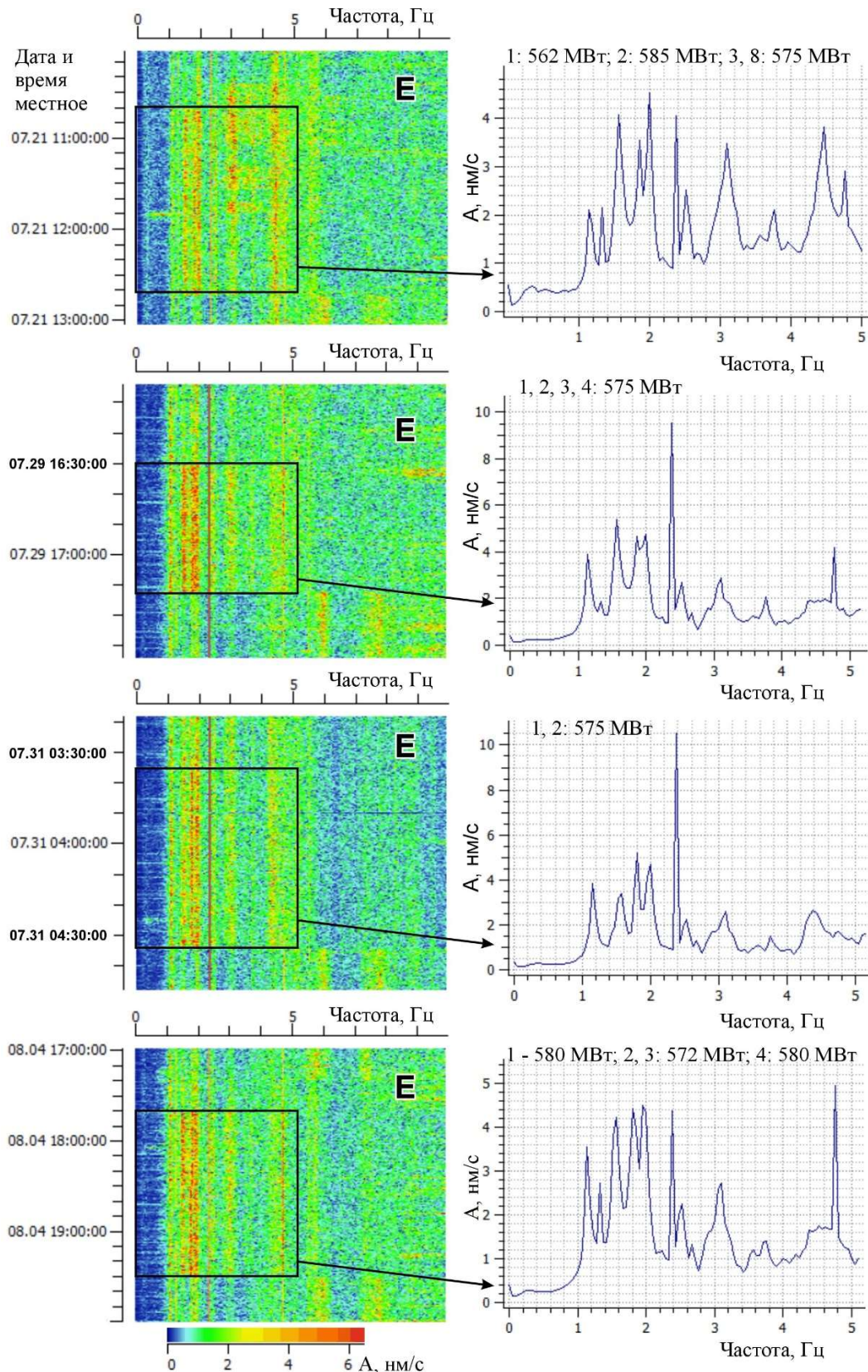


Рисунок 2.26 – Примеры проявления низкочастотных сигналов (до 5 Гц) на спектрограммах и усредненных спектрах по данным мониторинга на сейсмостанции «Черемушки» при работе гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС под нагрузкой около 575 МВт за месяц до аварии. Цифрами обозначены номера соответствующих гидроагрегатов и их нагрузка

Следующим шагом детально анализировались данные мониторинга с сейсмостанции «Черемушки»: сейсмограммы сейсмического шума, зарегистрированные начиная с 01.01.2009. Для этого по сведениям о режимах работы гидроагрегатов (графиков изменения нагрузок), предоставленных в рамках выполнения договора, определялись периоды времени, в которых хотя бы один гидроагрегат работал в режиме нагрузки около 575 МВт. Количество таких периодов, например, за 1 месяц до аварии, составило 30, т.е., в среднем по 1-му в сутки. Однако распределение этих периодов по времени неравномерно: есть даты, в которых таких режимов (575 МВт) не было, а были – где найдено по 2 режима за сутки. Длительность по времени указанных режимов также разнообразна: от нескольких минут до нескольких часов.

Далее выполнялся спектрально-временной анализ сейсмограмм сейсмического шума, зарегистрированного станцией «Черемушки», в ходе которого установлено, что все из найденных на предыдущем шаге периодов (режимы работы ГЭС, когда хотя бы один гидроагрегат работал с нагрузкой около 575 МВт) совпадают по времени начала и конца с периодами регистрации сейсмостанции, в которых проявляются в виде увеличенной амплитуды сигналы на частотах собственных колебаний плотины (См. Рисунок 2.26). При этом анализ данных мониторинга с 14.03.2009 по 31.03.2009 показал, что описываемые сигналы увеличиваются по амплитуде при относительно пониженных нагрузках гидроагрегатов (от 475 МВт до 560 МВт) [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Практически все описанные особенности соответствуют таким режимам работы Саяно-Шушенской ГЭС, при которых одновременно несколько гидроагрегатов работали под определенной нагрузкой (около 575 МВт за месяц до аварии и 475-560 МВт в марте 2009 г.) [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Поэтому установить, с каким именно гидроагрегатом связано появление низкочастотных сигналов на частотах собственных колебаний плотины, затруднительно. Однако этот набор был разным (например, есть периоды, в которых гидроагрегат № 2 был остановлен, а низкочастотные сигналы все равно проявляются). То же самое можно

сказать по крайней мере про несколько гидроагрегатов: есть периоды, когда анализируемых гидроагрегат остановлен, а низкочастотные сигналы все равно проявляются. Из этого следует, что наблюдаемые низкочастотные колебания, которые возникают при определенных нагрузках, не являются характерной особенностью какого-то одного гидроагрегата.

Далее определяется количественно амплитуда низкочастотных колебаний в разные интервалы времени: до ремонта второго гидроагрегата, после ремонта и перед аварией. В качестве анализируемого параметра была выбрана амплитуда сигналов с частотами около 1.55 и 1.85 Гц (определялась амплитуда локального максимума в окрестности этих частот). Первая из них соответствует частоте 3-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, и амплитуда сигнала наиболее значительная. Вторая частота, как отмечалось выше, не соответствует какой-либо моде, однако сигналы с этой частотой проявляются на большинстве спектрограмм и усредненных спектрах. В целом, амплитуда сигналов на указанных частотах по данным мониторинга сейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки», изменяется от 1 до 6 нм/с (Рисунок 2.27). При этом амплитуда сигналов в январе 2009 и июле-августе 2009 сопоставима, а во второй половине марта в ~ 1.5 раза ниже. Видно, что зарегистрированные за 5 минут до аварии сигналы по амплитуде незначительно выше средних значений, определенных за интервал месяц до аварии (4.5 и 4.8 нм/с при средних значениях в 3.3 и 3.7 нм/с, для частот 1.55 и 1.85 Гц, соответственно). Однако до аварии регистрировались сигналы с такой же амплитудой и выше (до 5.5-6.0 нм/с).

Почему во второй половине марта 2009 г. амплитуда зарегистрированных низкочастотных сигналов, в целом, ниже, чем в первой половине января и в июле-августе того же года?

Как отмечалось, при анализе материалов мониторинга периодом в месяц до аварии, низкочастотные колебания проявлялись при режимах работы Саяно-Шушенской ГЭС, когда группа гидроагрегатов работала под нагрузками 560-580 МВт; во второй половине марта эти нагрузки составляли 475-525 МВт. В

январе низкочастотные колебания наблюдаются, однако определить под какой нагрузкой работали гидроагрегаты в момент появления сигналов, не представляется возможным (не предоставлена информация о нагрузках). На графиках изменения уровня Саяно-Шушенского водохранилища в 2009 г и диаграмме характерных зон работы гидроагрегатов видно, что во время аварии уровень водохранилища был практически максимальным (напор 212 м), верхнее ограничение 2-й зоны при этом 575 МВт (Рисунок 2.28).

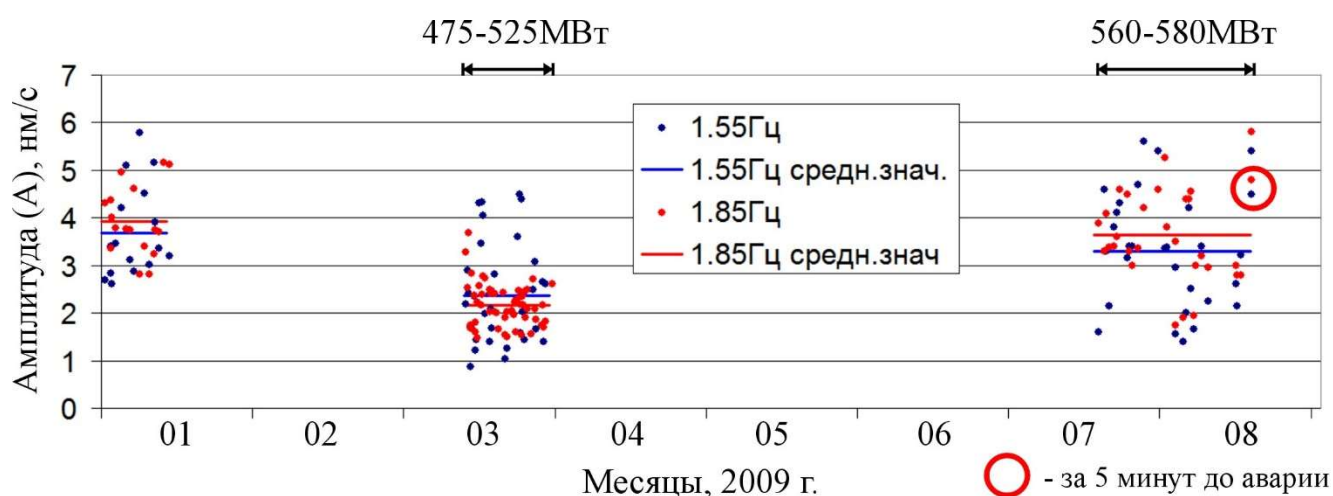


Рисунок 2.27 – Амплитуда сигналов с частотами 1.55 и 1.85 Гц, проявляющихся при определенных нагрузках гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС, по данным мониторинга на сейсмостанции «Черемушки»

Выше было показано, что в 5-минутный период до аварии три гидроагрегата (№2, №4 и №9) работали в режиме нагрузок около 575 МВт. При этом в зарегистрированном сейсмическом шуме на станции «Черемушки» выделяется частотно-временная область с повышенной амплитудой сигналов на частотах собственных колебаний плотины (до 5 Гц). За месяц до аварии аналогичные сигналы регистрировались неоднократно и соответствовали режимам работы нескольких гидроагрегатов под нагрузкой 560-580 МВт.

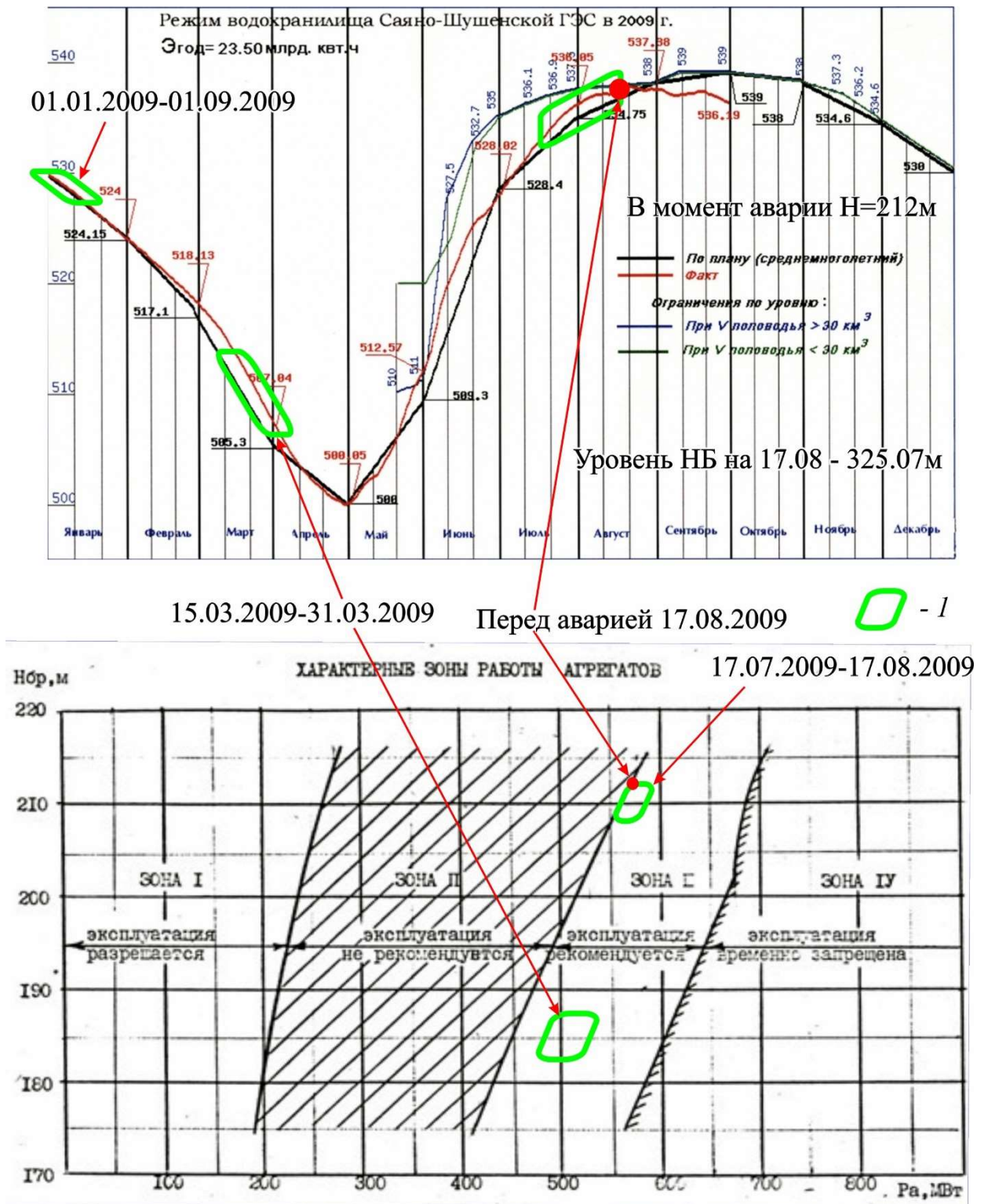


Рисунок 2.28 – График уровня воды в водохранилище и характерные зоны работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС [Акт..., 2009]. 1 – области нагрузок и напора, при которых резко увеличивались собственные колебания плотины по данным мониторинга со станции «Черемушки» [Лисейкин, Селезнев, 2024]

Напор в течение этого месяца составлял 208-212 м (См. Рисунок 2.28). Эта область, отмеченная прямоугольником на рисунке, расположена в левой части 3-й

зоны (зона напор-нагрузка, в которой эксплуатация рекомендуется). Низкочастотные сигналы, зарегистрированные на сейсмостанции во второй половине марта 2009 г, соответствуют режимам 475-525 МВт (напор 182.5-187.5 м). Эта область фактически находится внутри 3-й зоны, ближе к левой границе. Очевидно, что операторы Саяно-Шушенской ГЭС, при установлении нагрузок, руководствовались диаграммой характерных зон работы агрегатов (Рисунок 2.28, внизу). Тогда можно заключить, что низкочастотные сигналы, зарегистрированные в первой половине января 2009 г., соответствовали режимам работы агрегатов около 530 МВт. Этим объясняется поведение графика, изображенного на Рисунке 2.27: до ремонта гидроагрегата № 2 и за месяц до аварии уровень водохранилища высокий, гидроэлектростанция работает в сходных режимах, поэтому амплитуда сигналов на этих двух участках почти одинаковая. По наблюдениям во второй половине марта уровень водохранилища низкий, режимы гидроагрегатов другие (нижняя граница зоны 3 находится левее), поэтому и характеристики колебаний на этом интервале времени отличаются (в данном случае с пониженной амплитудой).

Перечисленные выше факты позволяют предположить, что существует причинно-следственная связь между работой гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС в определенных режимах нагрузки-напора и усилением собственных колебаний плотины [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Неоднократные дальнейшие исследования подтвердили, что это явление свойственно всем работающим гидроагрегатам: есть интервалы нагрузок, при которых значительно (в 10-20 раз) повышается амплитуда собственных колебаний плотины, т.е. происходит резонансный эффект [Влияние..., 2013]. Причем этот эффект является следствием другого резонансного явления – формирования автоколебаний воды в водоводах гидротурбин [Лисейкин, Селезнев, 2021], которые еще называют «органными» по аналогии с явлением формирования стоячих волн в органных трубах [О собственных..., 2016]. Исследованиями доказано, что источником повышенных колебаний плотины на собственных частотах являются колеблющиеся водоводы, в которых при определенных сочетаниях величины напора и нагрузки на

гидроагрегате возникает опасное резонансное явление с формированием мощных органических колебаний [Громыко и др., 2016]. Их частотная характеристика перекрывает частотную характеристику собственных колебаний плотины – отсюда и возникает резонансный эффект.

Низкочастотные сигналы (до 3 Гц) зарегистрированные за ~20 с до аварии

Как отмечалось, в ходе спектрально-временного анализа сейсмического шума, зарегистрированного на сейсмостанции «Черемушки» перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС, отмечено, что примерно за 20 с до начала аварии на спектрограммах выявляется низкочастотный сейсмический сигнал (с частотой до 3 Гц). При поиске в каталогах землетрясений выяснилось, что этот сигнал является результатом регистрации упругих волн от далекого землетрясения (эпицентрального удаление около 4200 км по поверхности Земли, или около 38° – эпицентральный угол в сейсмологии). Параметры очага по данным глобальной сети GEOFON: район – юго-запад островов Рюкю, Япония; дата и время в очаге – 17.08.2009 00:05:51.4 UTC; магнитуда – 6.5; координаты – E123.60, N23.40; глубина – 40 км (Рисунок 2.29). Вступление первой продольной волны на сейсмостанции «Черемушки» 08:13:05.6. Для сравнения приведен пример сейсмограммы этого землетрясения, зарегистрированного на сейсмостанции «Таштагол» (примерно на таком же эпицентральном удалении и азимуте): видно, что формы записей практически идентичны, времена первых вступлений отличаются незначительно (станция «Таштагол» расположена дальше, поэтому время вступления позже). Перечисленное исключает ошибку в идентификации этого сигнала. Сейсмологи знают, что на таких эпицентральных расстояниях интенсивность сотрясения от землетрясения ничтожно мала, и оно может быть обнаружено только при регистрации специальной высокочувствительной низкочастотной аппаратурой. Тем не менее, поскольку это событие произошло непосредственно перед аварией, то необходимо сделать оценку интенсивности этого сейсмического воздействия на ГЭС.

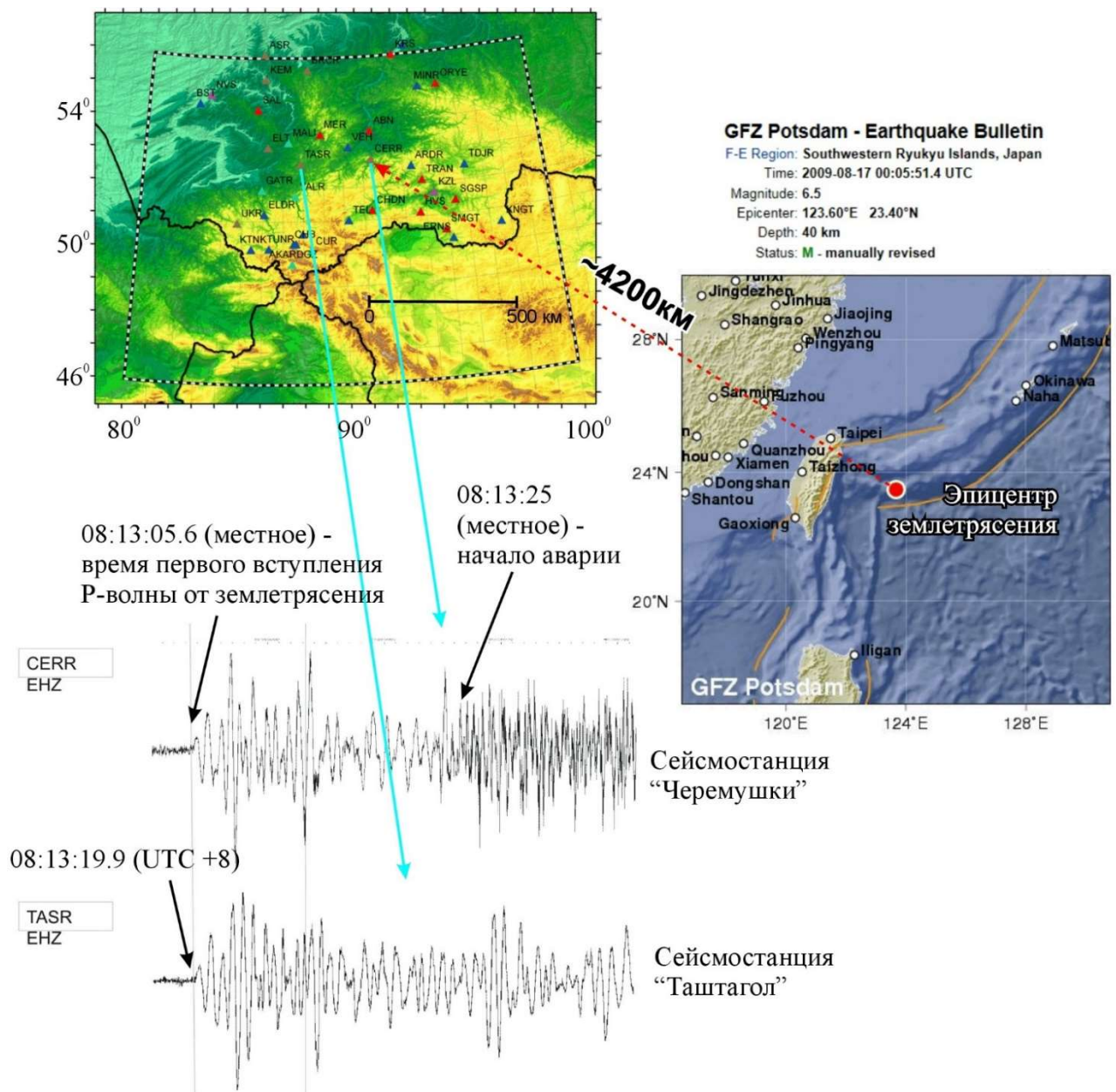


Рисунок 2.29 – Сейсмологическая сеть Алтае-Саянского региона (по данным АСФ ФИЦ ЕГС РАН), эпицентр землетрясения 17.08.2009 00:05:51.4 UTC (по данным GFZ Potsdam) и примеры зарегистрированных сейсмограмм

Далее анализировались сейсмограммы от ряда землетрясений, зарегистрированных на сейсмостанции «Черемушки» в период около 2-х недель до аварии, для сравнительной оценки их интенсивности с интенсивностью землетрясения, произошедшего непосредственно перед аварией. В качестве оценочного параметра использовались значения максимального размаха ($2A_{\max}$) сигнала: видно, что амплитуда их в несколько раз выше, чем амплитуда землетрясения, произошедшего непосредственно перед аварией (Рисунок 2.30).

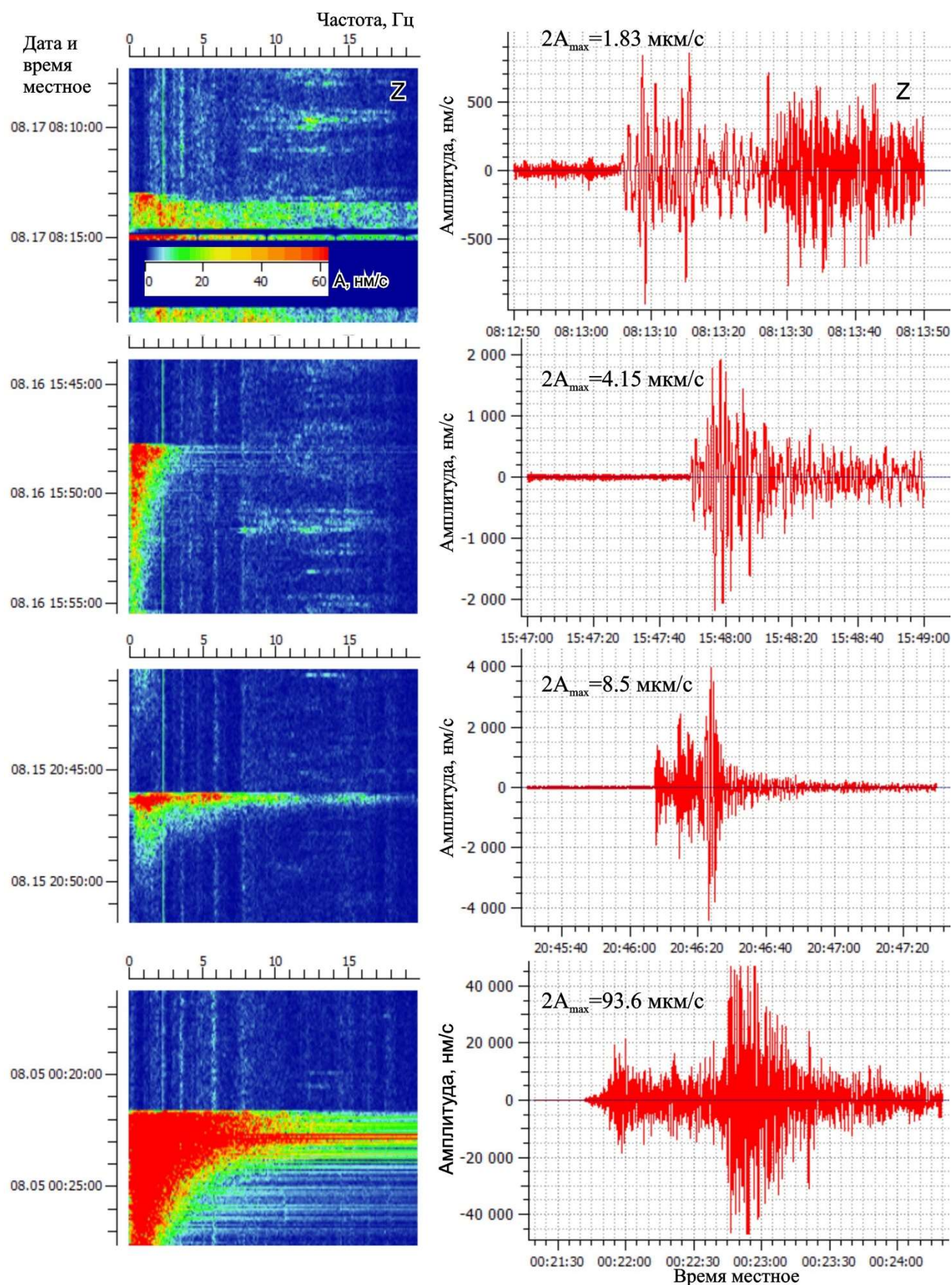


Рисунок 2.30 – Примеры спектрограмм и сейсмограмм ряда землетрясений при регистрации на станции «Черемушки» до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС (вверху – за 20 с до аварии)

Сопоставляя полученные параметры движения грунта на сеймостанции «Черемушки», вызванные землетрясениями, зарегистрированными в период две недели до аварии, со значениями балльности [Методы..., 1993], выясняется, что все землетрясения, включая наиболее интенсивное из рассмотренного интервала, характеризуются баллом «1» (т.е. неощутимые землетрясения, колебания от которых могут быть зарегистрированы только специальными высокочувствительными приборами). Таким образом установлено, что в районе расположения Саяно-Шушенской ГЭС неоднократно регистрировались землетрясения различной интенсивности, в том числе намного большей, чем интенсивность землетрясения, зарегистрированного (первые вступления) за 20 с до аварии. Как известно, эти землетрясения не причиняли вреда гидроэлектростанции, их интенсивность 1 балл. Следовательно, и землетрясение, зарегистрированное за 20 с до аварии, не могло оказать разрушительного действия на работающее оборудование Саяно-Шушенской ГЭС.

В первые дни после аварии в средствах массовой информации озвучивалась версия, что причиной разрыва шпилек был гидроудар (например, <https://www.kommersant.ru/doc/1222657>, <https://www.vesti.ru/article/2179396> и др.). Однако из анализа сейсмограмм со станции «Черемушки» следует, что гидроудара, способного разрушить шпильки и «выбросить» гидроагрегат весом около 150 тонн не было [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015]. Если предположить, что гидроудар (или иное динамическое воздействие) все же было, то максимальная энергия этого воздействия оценивается по сейсмограммам со станции «Черемушки» с использованием методик, развитых в сейсмологии для оценки энергии очага землетрясения.

Так, максимальная амплитуда сейсмических сигналов ($2A_{\max}$), зарегистрированных перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС, составляла, для вертикальной компоненты, не более 1.83 мкм/с (см. Рисунок 2.30 вверху). Амплитуда смещений при преобладающем периоде колебаний ~ 1 с составит $1.83/(2\pi) \approx 0.3$ мкм. Значит, если и произошло какое-либо динамическое воздействие

на гидроагрегат, то амплитуда сейсмического сигнала от него на удалении в 4.4 км не могла быть выше указанной величины. В противном случае оно было бы заметно на сейсмограмме. С использованием подходов, принятых в сейсмологии для оценки энергии очагов землетрясений, установлено, что максимальная сейсмическая энергия такого динамического воздействия не превышает 4-го энергетического класса, или 10 кДж (по известной шкале Т.Г. Раутиан [Раутиан, 1964, Origins..., 1997]). Однако эта оценка выполнена в предположении, что источник – аналогичен очагу землетрясения.

Для сравнения, сейсмическое событие с такой же энергией может быть вызвано взрывом, в тротиловом эквиваленте массой порядка одного килограмма. Необходимо отметить, что и эта оценка приблизительная, с точностью до 1-2 порядков из расчета, что лишь первые проценты тепловой энергии приходятся на долю сейсмической энергии [Коган, 1975]. Чтобы удостовериться, что такая оценка корректная, анализировались сейсмограммы, полученные при речных сейсморазведочных исследованиях, где источником упругих волн служат пневматические источники возбуждения, принцип работы которых состоит в выбросе в воду сжатого под высоким давлением воздуха (Рисунок 2.31). Из представленной сейсмограммы видно, что на удалениях от источника до 4.4 км максимальная амплитуда упругих волн составляет около 1 мкм/с, т.е. фактически сопоставима с амплитудой сейсмических сигналов, регистрируемых на станции «Черемушки» с расстояния 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, где произошла авария. Энергия сжатого воздуха, запасенного в рабочей камере пневмоисточника (давление 150 атм, объем 10 л) составляет около 150 кДж, т.е. по этой оценке энергия предполагаемого динамического воздействия с точностью до порядка соответствует оценке по шкале Т.Г. Раутиан (1.5 кДж сейсмической энергии, если так же считать ее как 1% от тепловой).

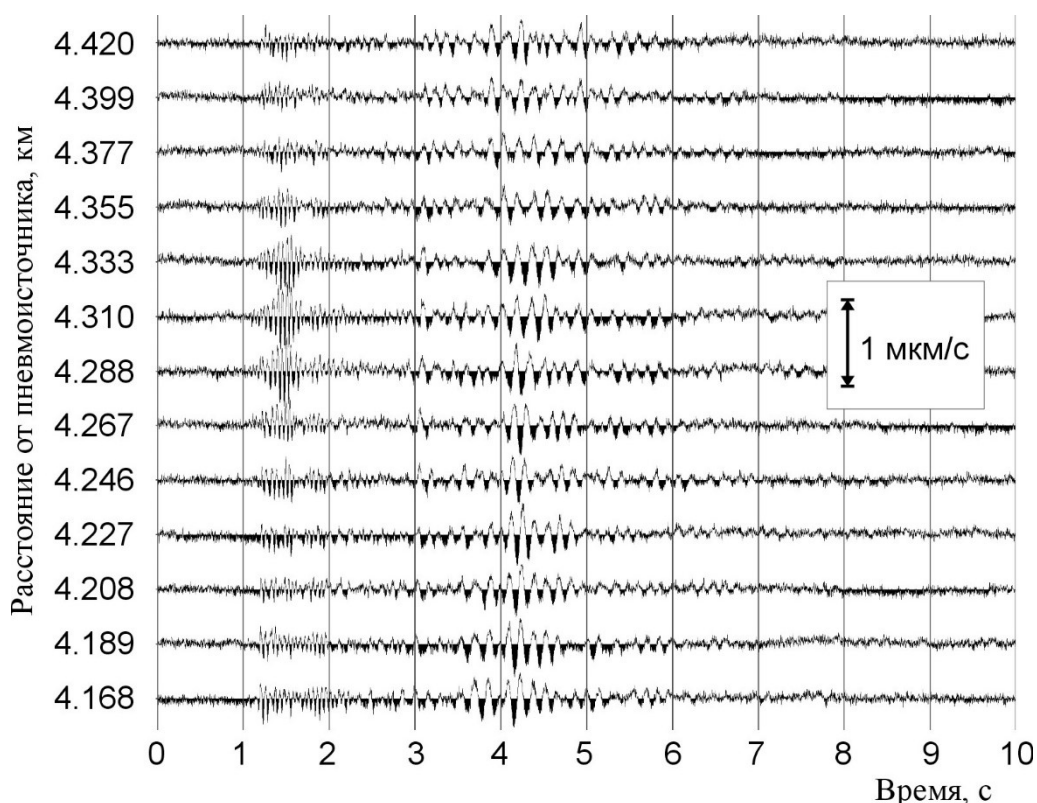


Рисунок 2.31 – Фрагмент зарегистрированной сейсмограммы от группы пневмоисточников «Пульс» (4 шт. по 2.5 л) по материалам сейсморазведочных работ на р. Нижняя Тунгуска в 2012 г.

Из перечисленного следует, что причиной аварии 17 августа 2009 г. не мог быть гидроудар (как и иное воздействие ударного типа) – иначе оно было бы заметно на сейсмограмме. Вместе с тем, по свидетельствам очевидца аварии, О. Мякишева: «Я стоял наверху, услышал какой-то нарастающий шум, потом увидел, как поднимается, дыбится рифленое покрытие гидроагрегата. Потом видел, как из-под него поднимается ротор. Он вращался. Глаза в это не верили. Он поднялся метра на три. Полетели камни, куски арматуры, мы от них начали уворачиваться...» [<https://www.kommersant.ru/doc/1225311>]. Кроме того, из анализа последствий аварии, по повреждениям на колонне машинного зала, следует, что гидроагрегат поднимался на высоту не менее 12 м (Рисунок 2.32а). Перечисленное выше возможно только в случае, если бы этот процесс происходил достаточно медленно [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015], иначе это противоречит данным сейсмического мониторинга. Разобраться в этом вопросе можно с помощью материалов, полученных сейсмометрической системой,

установленной в теле плотины. Однако необходимо удостовериться, могут ли быть зарегистрированы низкочастотные колебания этой аппаратурой. Частотный диапазон установленных в теле плотины станций 1-50 Гц (сейсмографы СМ-3), но даже в этом случае низкочастотные, но при этом высокоамплитудные колебания должны выделяться [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015], т.к. электродинамические сейсмические датчики регистрируют сигналы с частотами, значительно меньшими собственной частоты датчика [Юшин, 2001].

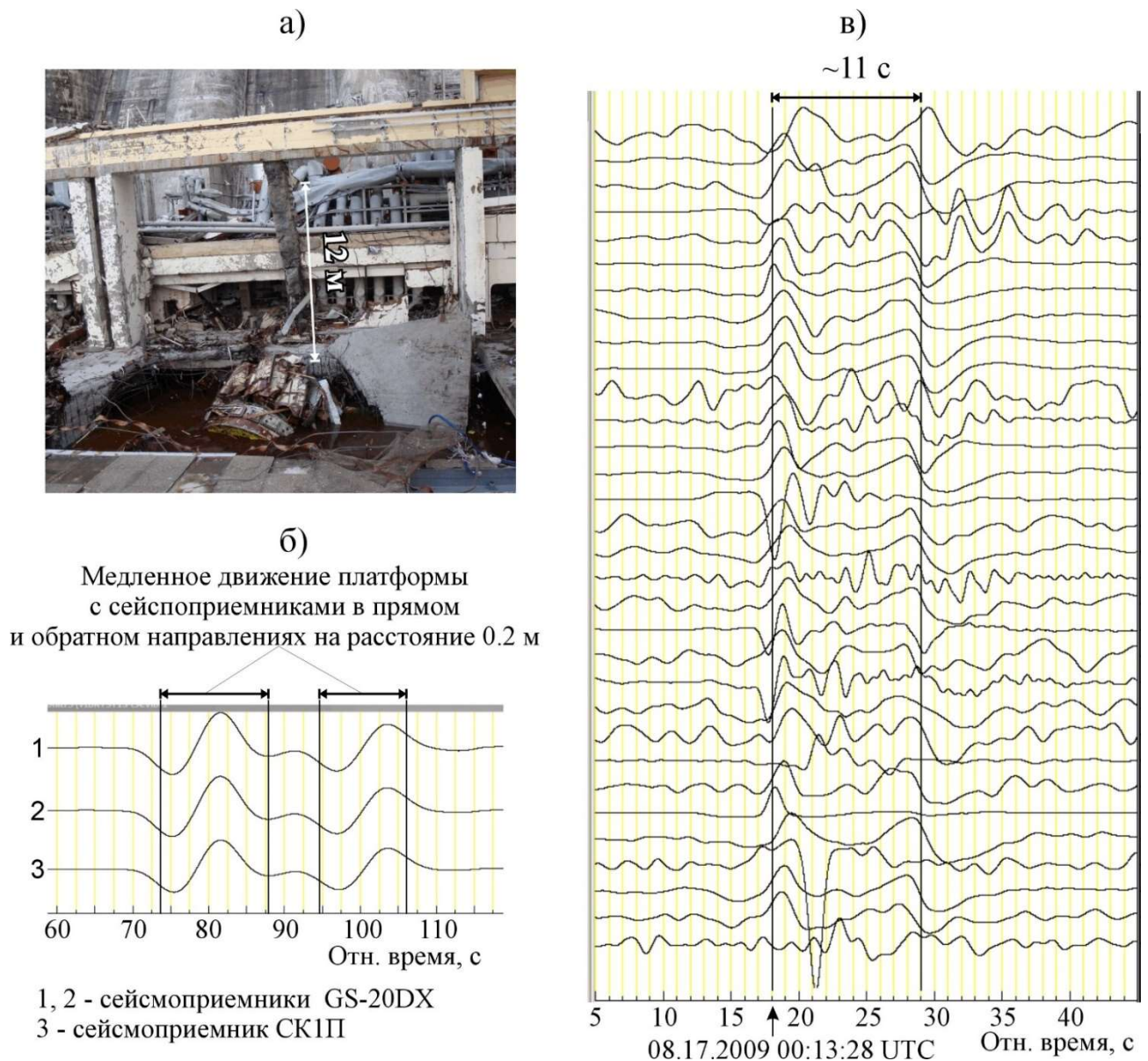


Рисунок 2.32 – Фотография машинного зала после аварии (а), сейсмограмма при моделировании медленных движений (б) и сейсмограмма во время начала аварии сейсмометрической системы в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (в) [О причине..., 2015]

Для определения возможности регистрации низкочастотных колебаний имеющейся аппаратурой, проведен следующий лабораторный эксперимент. На платформу поместили сейсмоприемники (горизонтальная X-компонента) и произвели медленное движение платформы (в течение 10-15 секунд) в одном направлении на расстояние 0.2 м и, затем, в обратном, с возвращением в исходное положение. Полученную сейсмическую запись отфильтровали НЧ-фильтром 0.05 Гц (см. Рисунок 2.32б). Из рисунка видно, что такое медленное, но высокоамплитудное движение выделяется на записях сейсмоприемниками, собственная частота которых 1 Гц и 10 Гц. После этого аналогичная процедура фильтрации была проделана с сейсмограммами, полученными сейсмометрической системой, установленной в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (см. Рисунок 2.32в). Из этих данных можно сделать вывод, что [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015] процесс подъема и опускания гидроагрегата длился около 11 с. Именно поэтому в материалах мониторинга на сеймостанции «Черемушки» перед аварией не зарегистрировано сигналов с высокой амплитудой.

В процессе анализа данных мониторинга с сейсмометрической системы, установленной ранее (в период, включающий аварию) в плотине Саяно-Шушенской ГЭС, выяснилось, что время на ней неточное (отсутствовала привязка к сигналам точного времени GPS/ГЛОНАСС). Однако при детальном расследовании катастрофических событий, точность временной привязки описываемых событий крайне важна. Все современные цифровые станции сейсмологической сети в обязательном порядке не только калибруются, но и синхронизируются с сигналами точного времени. В противном случае невозможна обработка сейсмограмм с зарегистрированными землетрясениями и промышленными взрывами: любая станция с некачественной калибровкой или со сдвигом во времени незамедлительно обнаруживается обработчиком-сейсмологом.

С целью удостовериться, что указанное в Акте расследования причин аварии [Акт..., 2009] время ее начала верное, анализировались сейсмограммы со станции «Черемушки» за временной период, охватывающий время начала аварии

(Рисунок 2.33). На представленных сейсмограммах, после подобранной полосовой фильтрации 10-40 Гц, отмечаются две особенности: в 08:13:26.20 местного времени проявляются подобные ударам сигналы, которые через ~ 3 с (в 08:13:29.25) сменяются более интенсивным шумом. Учитывая имеющуюся информацию о том, что разрушение гидроагрегата №2 произошло после обрыва шпилек, крепящих крышку турбины, предположено, что 3-секундный процесс, зарегистрированный на сейсмограмме, является процессом отрыва шпилек, после которого гидроагрегат начал подниматься потоком воды из агрегатного блока с последующими разрушениями в машинном зале ГЭС.

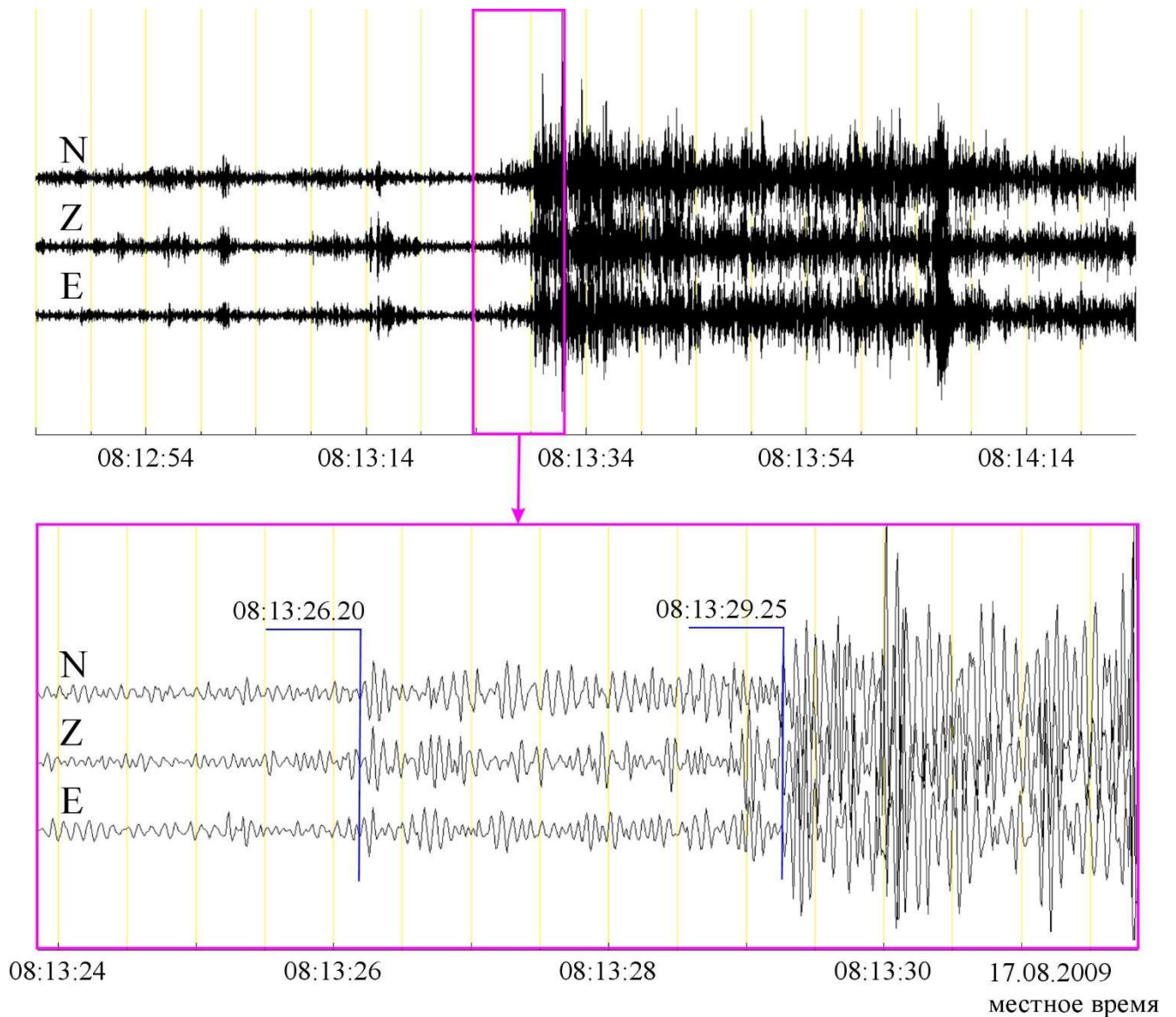


Рисунок 2.33 – Сейсмограмма в период начала аварии на Саяно-Шушенской ГЭС со станции «Черемушки» после полосовой фильтрации (10-40 Гц)

Что касается времени начала аварии: в акте указано, что она началась в 08:13.25. Это не противоречит данным с удаленной в 4.4 км сеймостанции, т.к. необходимо время для распространения упругих волн от источника возбуждения (ГЭС) до нее. Так, в районе расположения Саяно-Шушенской ГЭС и сеймостанции «Черемушки» отсутствует осадочный чехол, верхняя часть земной коры сложена метаморфическими (парасланцы, ортосланцы) и интрузивными (граниты) горными породами [Брызгалов, 1999]. Скорости продольных волн в таких породах достаточно высокие: по справочным данным, в среднем, для сланцев 4 км/с; для гранитов – 5.6 км/с [Пузырев, 1997]. Несомненно, что эта оценка в значительной степени приближенная, однако исходя из нее следует, что задержка из-за пробега продольной упругой волны на расстояние 4.4 км составит порядка 1 с. Следовательно, время начала аварии, указанное в Акте (08:13:25) соответствует действительности, а при использовании сейсмограмм со станции «Черемушки» при фиксации событий, происходящих на Саяно-Шушенской ГЭС необходимо вводить поправку в минус 1 с. Хотя точность временной привязки сейсмограмм высокая (10^{-6} с), но из-за отсутствия детальных сведений о скорости распространения упругих волн в земной коре исследуемого района достичь точности лучше 1 с в настоящее не представляется возможным, поэтому в дальнейшем все события приводятся с точностью до целых секунд.

Зарегистрированные в ходе развития аварии сигналы

Как отмечалось, при развитии аварии 17 августа 2009 г в течение ~37 минут, до выключения источника бесперебойного питания, продолжалась регистрация сейсмического шума на станции «Черемушки» в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС (см. Раздел 2.4.1). Далее подробно анализируются малоамплитудные сейсмические сигналы во время развития аварии, а именно, зарегистрированные в течение ~22 минут после ее начала ряд низкодобротных сигналов и в период ~37 минут (до отключения аппаратуры сеймостанции «Черемушки») высокодобротные сигналы с частотами от 13 до 17 Гц.

Как известно, при аварии 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС после разрушения 2-го гидроагрегата, поток воды из водовода хлынул в машинный зал и в отсасывающую трубу [Лисейкин, Селезнев, 2021]. Исходя из этого предполагается, что набор малоамплитудных низкодобротных сигналов с частотами 2.4, 4.7 и 7.5 Гц, зарегистрированных в составе сейсмического шума на станции «Черемушки» в течение ~21 минуты с начала аварии (в 08:34:55), является следствием колебаний стоячих волн в водоводе гидроагрегата (Рисунок 2.34). А прекращаются эти колебания после перекрытия водовода, время которого неизвестно согласно акта расследования причин аварии [Акт..., 2009]. Формирование стоячих волн в водоводах, по которым протекает жидкость – общеизвестное явление. Подобный эффект наблюдается и в органных трубах при прохождении через них потока воздуха. Поэтому такие колебания еще называют «органными», а сам эффект описан в учебниках и энциклопедиях (см., например, Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона, 1897, статья «Органные трубы», с. 108-111). Частоты собственных колебаний в трубах зависят главным образом от двух параметров: их размеров и скорости распространения упругих волн. Далее, с учетом размеров водовода и экспериментальных исследований при регистрации сейсмического шума вблизи водоводов Саяно-Шушенской ГЭС, дается оценка корректности сформулированного предположения.

Общая длина трубы, состоящей из водовода и отсасывающей трубы, даже без учета размеров спиральной камеры, составляет не менее 278 м, согласно разрезу плотины и машинного зала Саяно-Шушенской ГЭС, представленному в Акте расследования причин аварии [Акт..., 2009]. Труба имеет два открытых конца, значит при формировании стоячей волны по всей ее длине укладывается полуволна, волна, полторы длины волн и т.д. (поясняющая это иллюстрация приведена на Рисунке 2.35а). С использованием этих характеристик, расчетная скорость распространения упругих продольных волн в водоводе (в среднем по трем частотам) составляет около 1340 м/с.

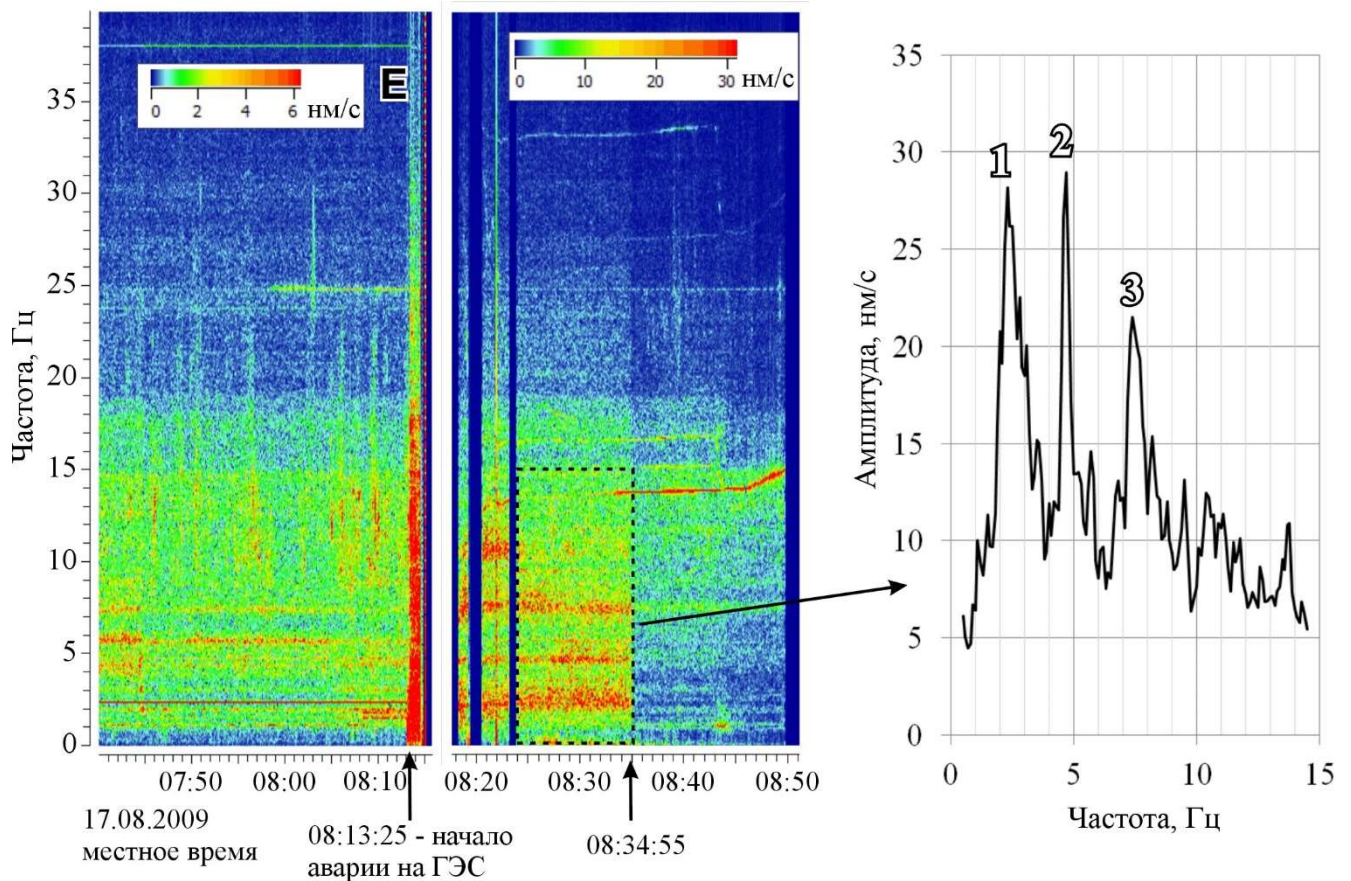


Рисунок 2.34 – Спектрограмма и усредненный амплитудный спектр малоамплитудных сигналов в выделенной частотно-временной области по данным мониторинга сейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки» во время развития аварии на Саяно-Шушенской ГЭС [О собственных..., 2016]. Цифрами отмечен номер предполагаемой моды стоячей волны в водоводе

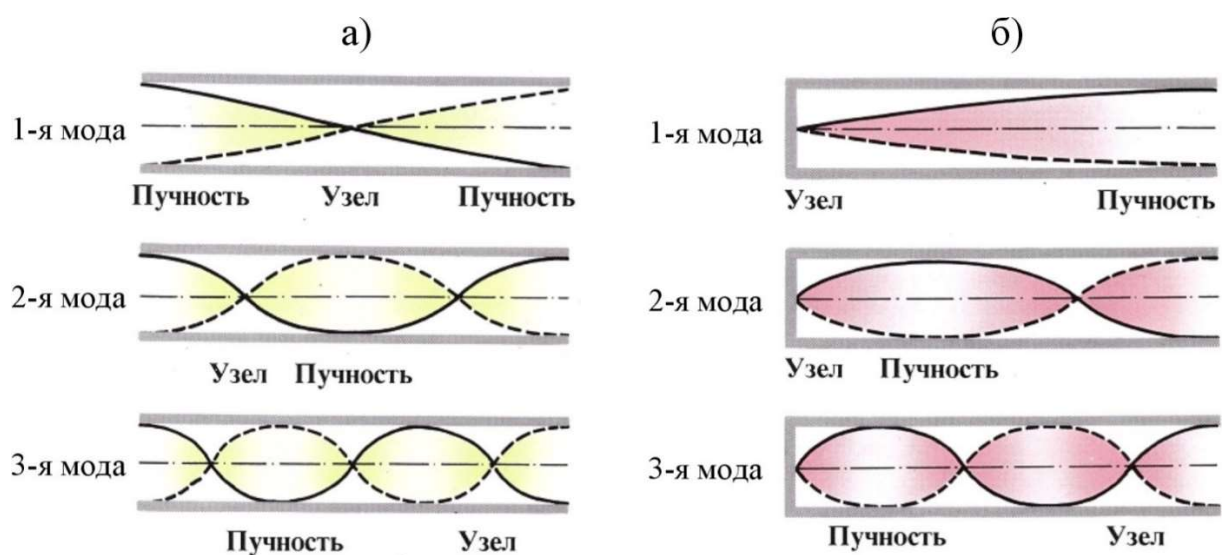


Рисунок 2.35 – Схематичное изображение стоячих волн в трубе полностью открытой (а) и с одним закрытым концом (б)

Исследованиями показано, что основной причиной многократного (резонансного) увеличения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, всегда регистрируемого при определенных режимах работы гидроагрегатов, являются собственные гидроакустические автоколебания, возникающие в водоводах гидротурбин при течении воды [О собственных..., 2016]. В качестве примера приводятся усредненные амплитудные спектры колебаний по вертикальной компоненте, зарегистрированных на водоводе 2-го гидроагрегата (восстановленного после аварии), в нижней его части (Рисунок 2.36). Каждый из спектров построен для нагрузок от 300 до 500 МВт, с шагом через 20 МВт в режиме без подачи (Рисунок 2.36а) и с подачей (Рисунок 2.36б) воздуха в водовод. Из рисунка видно, что во время работы 2-го гидроагрегата в режиме без воздуха, в низкочастотной части спектров отмечается последовательность из четырех низкочастотных сигналов, частоты которых не меняются со временем и составляют 1.7, 4.3, 6.7 и 8.9 Гц (Рисунок 2.36а). При работе гидроагрегата в режиме с подачей воздуха в водовод, частоты описываемых сигналов уменьшаются, причем тем сильнее, чем меньше нагрузка на гидроагрегате (Рисунок 2.36б) [Лисейкин, Селезнев, 2021].

Отмеченные колебания являются первыми 4-мя модами стоячих волн в водоводе, это подтверждается следующим. Анализируется процесс формирования стоячих волн в заполненной жидкостью трубе, у которой один конец открыт, а второй закрыт. Это приблизительно соответствует конструкции водовода до аварии (или восстановленного после аварии), так как с одной стороны находится водохранилище (открытый конец), а с другой расположена гидротурбина, отражающая упругие волны (условно закрытый конец). В описываемой ситуации стоячие волны формируются таким образом, что 1-я мода соответствует $1/4$ длины волны, 2-я мода – $3/4$ длины, и так далее (см. Рисунок 2.35б). У закрытого конца трубы находятся узлы смещений частиц жидкости при колебаниях; они же являются пучностями давления, возникающими при отражении волн от препятствия. Учитывая длину водовода (241 м, без отсасывающей трубы) и

частоты колебаний, определенные по спектрам (Рисунок 2.36а), рассчитывается скорость распространения упругих волн в водоводе. Она будет составлять, в среднем по 4-м частотам, 1380 м/с [Лисейкин, Селезнев, 2021]. Это значение скорости близко к значению, рассчитанному для описанного выше случая аварийного водовода, смоделированного в виде открытой с двух концов трубы (1340 м/с). Известно, что при газонасыщении жидкости, скорость распространения в ней упругих волн значительно уменьшается [Губайдуллин, Федоров, 2018]. Это выражается в уменьшении частот в режиме, когда в водовод подается воздух (Рисунок 2.36б).

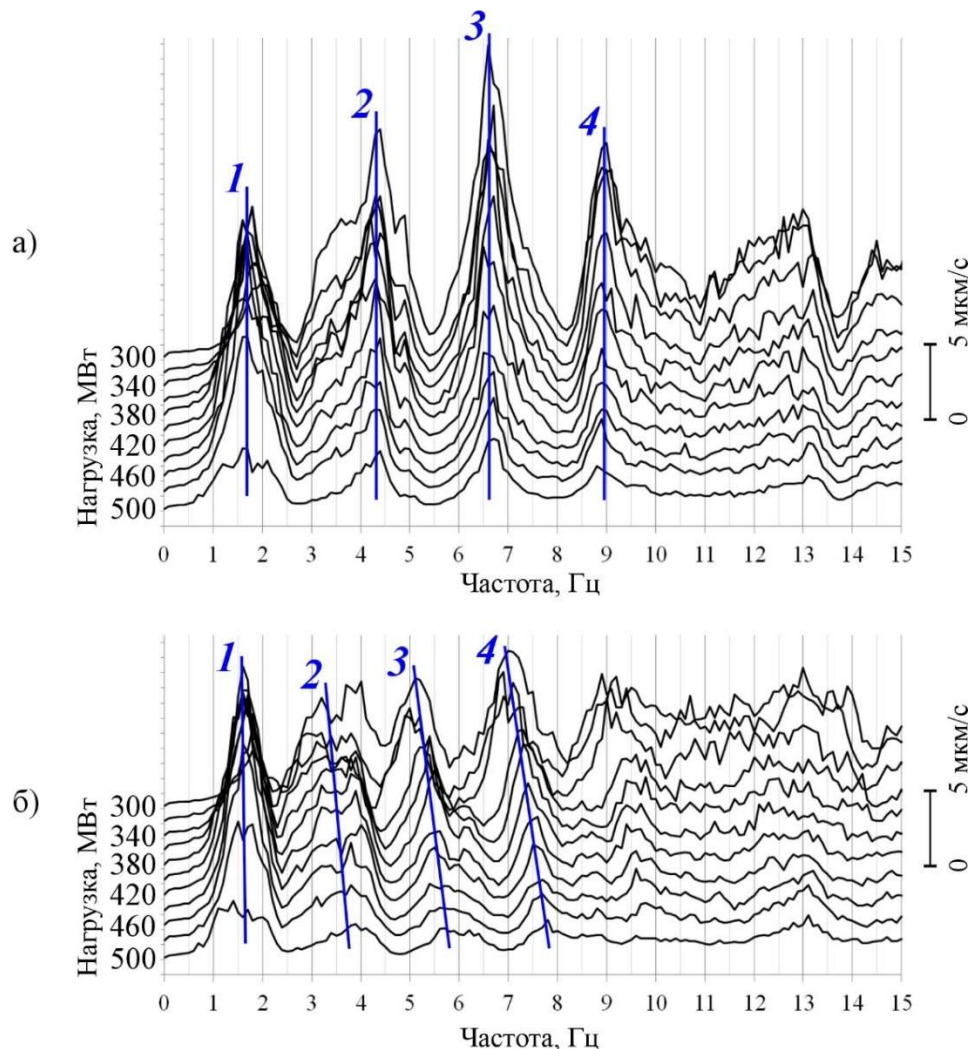


Рисунок 2.36 – Усредненные амплитудные спектры вертикальной компоненты зарегистрированных на водоводе 2-го гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС колебаний при работе в режиме без подачи (а) и с подачей (б) воздуха [Лисейкин, Селезнев, 2021]

Необходимо отметить, что в описываемом эксперименте подача воздуха в водовод производилась мощным компрессором, работающем в постоянном режиме (т.е. количество воздуха в единицу времени было постоянным). В то время как расход воды через водовод был тем больше, чем больше нагрузка гидроагрегата. Поэтому при разных нагрузках концентрация воздуха в воде также была разная: чем меньше нагрузка, тем меньше расход воды в единицу времени, что при постоянной подаче воздуха приводит к увеличению концентрации воздуха. Чем выше концентрация воздуха, тем ниже скорость упругих волн, а значит ниже частота колебаний стоячей волны. Этими фактами объясняется понижение частот сигналов со снижением нагрузки гидроагрегата (см. Рисунок 2.36б).

Перечисленные выше факты подтверждают корректность предположения о том, что зарегистрированные в течение ~21 минуты после начала аварии малоамплитудные низкочастотные сигналы являются откликом автоколебаний воды в водоводе 2-го гидроагрегата после его разрушения. Отсутствие этих колебаний в сейсмическом шуме после 08:34:55 местного времени объясняется перекрытием потока воды, судя по акту выполненным персоналом ГЭС вручную [Акт..., 2009].

Что касается зарегистрированных в период ~37 минут (до отключения аппаратуры сейсмостанции «Черемушки») высокочастотных сигналов с частотами от 13 до 17 Гц, предполагается, что они вызваны бесконтрольно вращающимися остальными гидроагрегатами. Это явление известно в гидроэнергетике, а частота вращения турбины в этом случае называется «угонной» или «разгонной». Необходимо отметить, что эта частота определяется изготовителем гидротурбин и обычно в 1.4-1.7 раз выше номинальной частоты вращения. Несомненно, что эта частота определяется по результатам физического моделирования, т.к. натурные испытания такого рода слишком опасные. В случае с аварией на Саяно-Шушенской ГЭС невольно получился натуральный эксперимент: несколько гидроагрегатов после аварии перешли в режим вращения без нагрузки, при полностью открытом

направляющем аппарате (таково его устройство), а сигналы, возбужденные этим вращением были зарегистрированы при сейсмическом мониторинге.

Полученные результаты

В результате выполненного спектрально-временного анализа данных мониторинга сейсмического шума с сейсмостанции «Черемушки», зарегистрированных в течение месяца перед аварией на Саяно-Шушенской ГЭС, произошедшей 17 августа 2009 г., а также в течение полумесяца до ремонта 2-го гидроагрегата (с 01.01.2009 г. по 14.01.2009 г.) и месяца после его ремонта (с 14.03.2009 по 14.04.2009), получены следующие новые результаты (Рисунок 2.37).

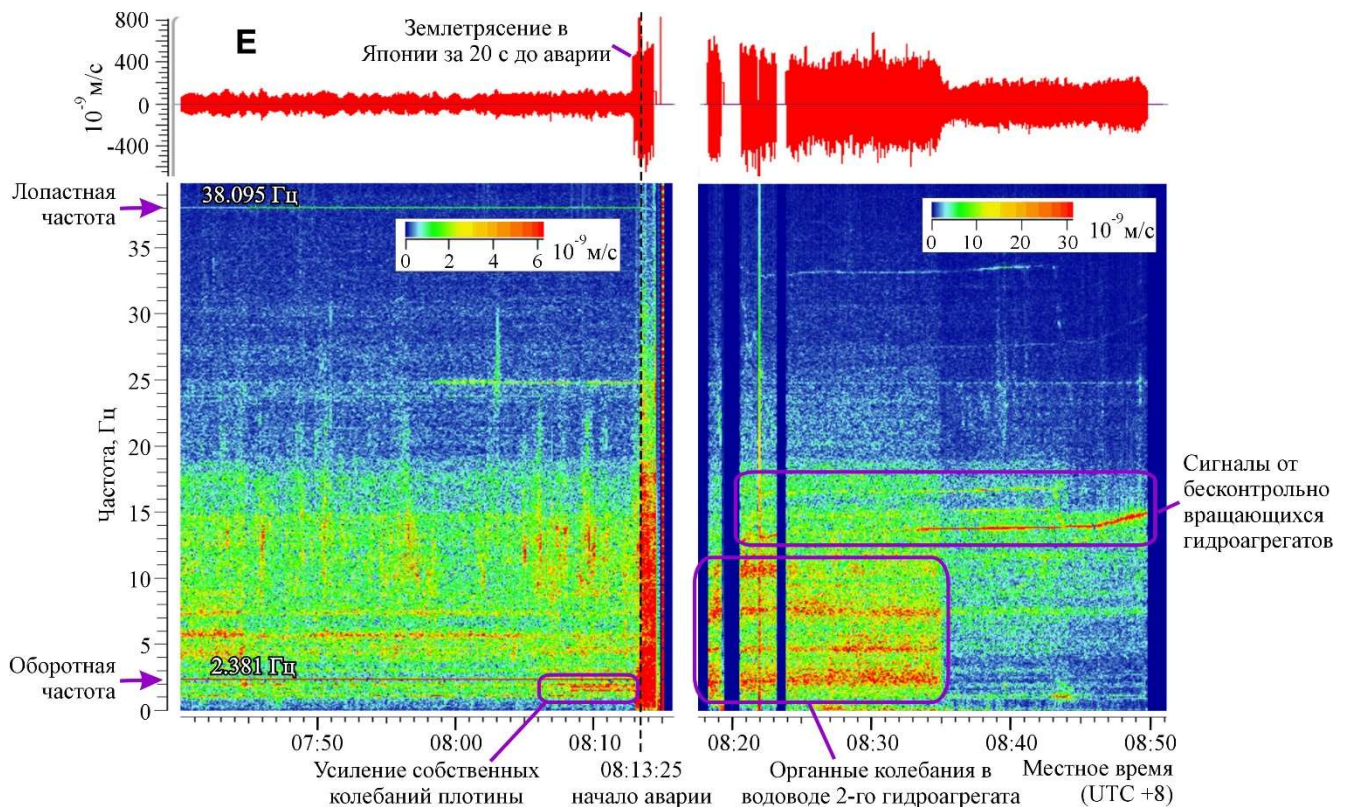


Рисунок 2.37 – Сейсмическая трасса (вверху) и спектрограмма (внизу) до и при развитии аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009 по данным мониторинга сейсмического шума на станции «Черемушки» с интерпретацией выявленных малоамплитудных сигналов

Выделены и проанализированы малоамплитудные сигналы, зарегистрированных в составе сейсмического шума станции «Черемушки» в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС перед аварией 17.08.2009 г.:

1. До аварии постоянно регистрировались монохромные высокочастотные сигналы с частотой 2.381 Гц – это оборотная частота гидроагрегатов. По данным мониторинга всех рассмотренных временных промежутках отмечаются скачки амплитуды сигнала в виде ступени, соответствующие по времени моментам запуска или остановки 2-го гидроагрегата, а также других агрегатов (1, 3, 4, 9 и 10). Амплитуда скачков, соответствующих запуску/остановке гидроагрегата № 2 в 1.7 раза выше, чем от остальных гидроагрегатов, что свидетельствует об увеличенном дисбалансе турбины по сравнению с остальными. Однако при этом не отмечается роста амплитуд этих скачков непосредственно перед аварией (за месяц) на Саяно-Шушенской ГЭС, что говорит о необоснованности выводов комиссии о росте вибрации 2-го гидроагрегата за два месяца до аварии.

2. В 5-минутный период до аварии регистрировались низкочастотные сигналы с повышенной амплитудой на низких частотах (до 5 Гц). Аналогичные сигналы неоднократно проявлялись в сейсмическом шуме до момента аварии на всех проанализированных временных периодах. Установлено, что они возникают на определенных частотах: семь из них соответствуют модам с 1-й по 7-ю собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Кроме этого, одновременно прослеживается сигнал с частотой 1.85 Гц, которая не соответствует частоте собственных колебаний. Амплитуда сигналов, определенная в период за 5 минут до начала аварии выше средних значений, однако не максимальная. Установлено, что она увеличивается при определенных режимах работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС: за месяц до аварии при нагрузках 560-580 МВт; в течение полумесяца после ремонта – 475-525 МВт. Причем эта особенность связана не только с разрушенным гидроагрегатом №2: амплитуда собственных колебаний плотины увеличивалась и в тех случаях, когда он был остановлен [Лисейкин, Селезнев, 2024].

3. За 20 с до начала аварии зарегистрировано низкочастотное сейсмическое событие (0-3 Гц), вызванное удаленным землетрясением (эпицентр возле Японии). Интенсивность его в районе сеймостанции составила 1 балл (неощутимое,

регистрируется только специальными высокочувствительными приборами) и не могло повлиять на работу оборудования ГЭС.

Из всего перечисленного следует, что перед аварией 17.08.2009 г. на сейсмограммах станции «Черемушки» регистрировались малоамплитудные сигналы, связанные с работой гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (как аварийного, так и других работающих). Однако сигналы с такими же характеристиками регистрировались неоднократно задолго до начала аварии (проведен детальный спектрально-временной анализ сейсмического шума начиная с 01.01.2009 г.). Аномалий, которые бы свидетельствовали о нештатной работе 2-го гидроагрегата (или других гидроагрегатов) непосредственно перед аварией, по данным мониторинга сеймостанции «Черемушки» не выявлено.

Кроме этого оценена версия того, что причиной аварии могло послужить динамическое воздействие (гидроудар или иное ударное воздействие). На сейсмограммах станции «Черемушки» перед аварией не отмечалось каких-либо высокоамплитудных импульсов, которые могли бы быть связаны с этим событием. Поэтому сделана оценка «сверху» энергии этого предполагаемого воздействия, учитывая, что амплитуда его ниже амплитуды зарегистрированного сейсмического шума. С использованием подходов, принятых в сейсмологии для оценки энергии очагов землетрясений, установлено, что максимальная сейсмическая энергия такого динамического воздействия не превышает 4-го энергетического класса, или 10 кДж.

Также были проанализированы записи сейсмической станции «Черемушки» непосредственно во время аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Учитывая, что сеймостанция расположена от ГЭС на расстоянии 4.4 км, то задержка сейсмического сигнала от источника составляет порядка 1 с. С учетом этой поправки определены времена сейсмических событий, происходящих на ГЭС при аварии 17.08.2009 (местное время, с точностью до секунды):

08:13:25 – начало аварии, начинается предположительно с отрыва шпилек крышки турбины 2-го гидроагрегата, этот процесс имел длительность около 3 с.

08:13:28 – отрываются последние шпильки, ротор турбины начинает движение вверх, длительность этого процесса около 11 с.

08:34:54 – перекрытие затвора разрушенного гидроагрегата.

08:23:54 – с этого времени в спектрограммах проявляются высокочастотные сигналы с частотами около 13.9, 15.2 и 16.7 Гц. Предполагается что это колебания от, как минимум 3-х бесконтрольно вращающихся гидроагрегатов.

08:42:50 – с этого времени сигналы с частотами 15.2 и 16.7 Гц не регистрируются – произошла остановка двух гидроагрегатов, возможно в это время были перекрыты соответствующие затворы.

08:46:05 – с этого времени частота оставшегося высокочастотного сигнала (13.9 Гц) начинает постепенно увеличиваться (практически линейная зависимость от времени) до значения около 15 Гц в 08:49:48. Предполагается, что в этот период времени уходила вода из машинного зала

08:49:48 – сейсмостанция «Черемушки» не регистрирует из-за отсутствия электроэнергии.

После аварии на Саяно-Шушенской ГЭС начали запускать гидроагрегаты как «старой» конструкции, которые были до аварии, так и «новой» конструкции [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015], улучшенной в части вибрационного состояния и безопасности. Спектральный анализ колебаний крышек турбин гидроагрегатов и агрегатных блоков показал следующее. На Рисунке 2.38 представлено сравнение спектров колебаний, зарегистрированных на гидроагрегатах двух типов: №3 – старой конструкции, аналогичной конструкции гидроагрегата №2 (на котором произошла авария), и №9 – новой конструкции, той же мощности, но с улучшенными характеристиками в плане надежности и безопасности. Представленные графики характеризуют колебания бетонных агрегатных блоков, зарегистрированные на полу машинного зала на расстоянии около 30 м от оси гидроагрегатов (Рисунок 2.38а), и колебания крышки турбины (Рисунок 2.38б). Оба гидроагрегата работали с максимальной нагрузкой в 600-640 МВт. Видно, что амплитуда колебаний, соответствующих гидроагрегату №3

существенно выше, чем соответствующих 9-му. Кроме этого, спектры значительно различаются наличием в колебаниях гидроагрегата старой конструкции большого числа монохроматических высокочастотных сигналов (частота каждого из них кратна частоте вращения гидроагрегата), которые отсутствуют при регистрации на гидроагрегате новой конструкции [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015].

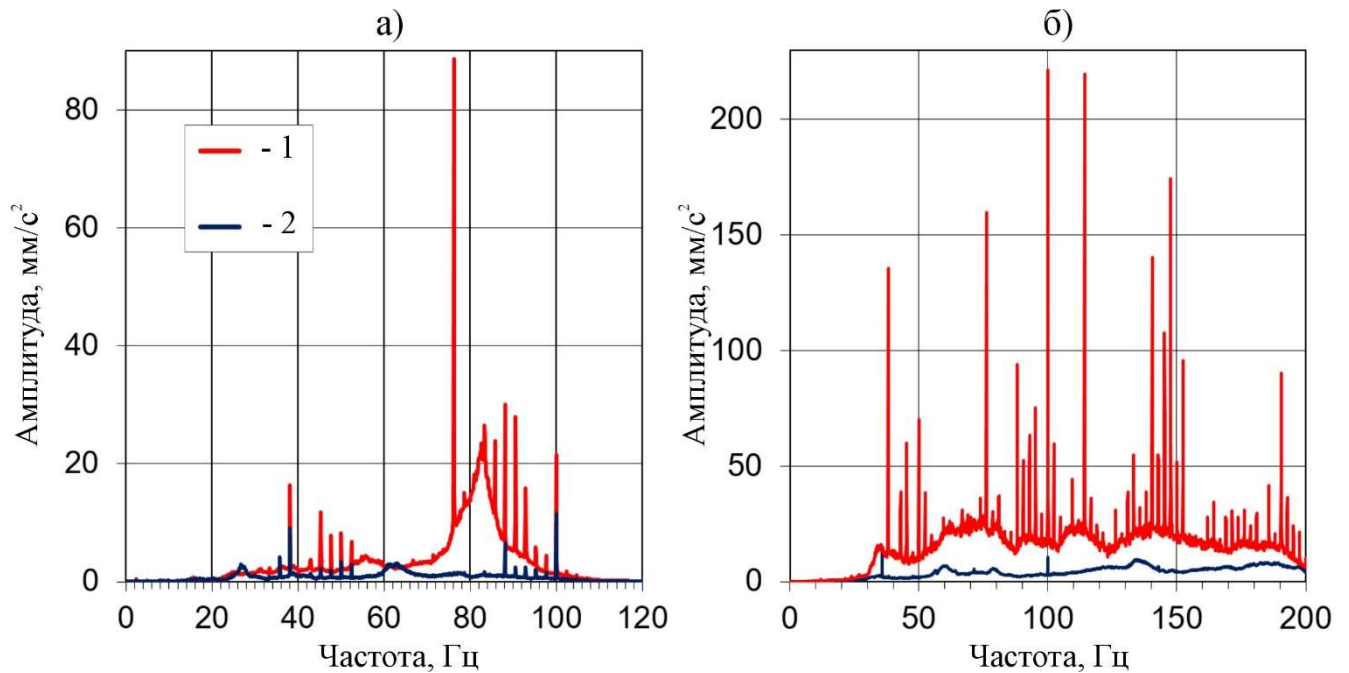


Рисунок 2.38 – Усредненные амплитудные спектры горизонтальных колебаний (в направлении по потоку) при регистрации на агрегатных блоках (а) и на крышках турбин (б) во время работы гидроагрегатов под нагрузкой 600-640 МВт. 1,2 – гидроагрегаты старой и новой конструкции, соответственно [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015]

Из перечисленного выше следует, что крышка турбины, а значит и шпильки, которые ее крепят, при работе гидроагрегата находились в состоянии постоянного воздействия высокочастотных вибраций. Так как второй гидроагрегат имел особенность, что возбуждаемые им колебания превышали колебания на остальных агрегатах, возможно, поэтому именно он разрушился в первую очередь. Осмотр шпилек с других гидроагрегатов после аварии показал, что некоторые из них также были в аварийном состоянии (с большим количеством усталостных дефектов) [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015]. Таким образом, предполагается, что истинная причина аварии связана с тем, что при расчете

крепления крышки турбины не был учтен тот факт, что она будет работать в состоянии длительного воздействия высокочастотных вибраций. На созданных новых гидроагрегатах количество шпилек было увеличено, и амплитуда монохроматических колебаний значительно снижена [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015].

Таким образом, по данным мониторинга (с 01.01.2009 г.) сейсмостанции «Черемушки», расположенной в окрестности 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, и с использованием разработанной методики дистанционного контроля разрушительных процессов по малоамплитудным сейсмическим сигналам определено следующее. Перед аварией 17.08.2009 г. на сейсмограммах станции «Черемушки» регистрировались малоамплитудные сигналы, возбужденные работой как разрушенного впоследствии гидроагрегата № 2, так и других гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС. В характеристиках этих сигналов не выявлено аномалий, которые бы свидетельствовали о нештатной работе 2-го гидроагрегата (или других гидроагрегатов) непосредственно перед аварией [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Это позволяет делать вывод о том, что характер аварии имел особенности «аварии последней капли» [Селезнев, Лисейкин и др., 2012]. Предположено, что причина аварии связана с тем, что при расчете крепления крышки турбины не был учтен тот факт, что она будет работать в состоянии длительного воздействия высокочастотных вибраций [Селезнев, Лисейкин и др. в статье «О причине...», 2015]. Из этого следует, что при эксплуатации таких крупных объектов промышленности, как ГЭС, необходимо контролировать не только вибрацию работающего оборудования, но и процессы воздействия его на отдельные части оборудования, окружающие конструкции и сооружения [What..., 2014].

2.4. Полученные результаты

С использованием накопленных на сегодня цифровых материалов мониторинга сейсмического шума на сети сейсмостанций ФИЦ ЕГС РАН по

выделенным квазигармоническим малоамплитудным сигналам разработана подтвержденная результатами исследований методика дистанционного обнаружения разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов в связи с повышенной вибрацией и резонансным усилением колебаний окружающих конструкций и сооружений, опубликованная в работе [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Методика включает следующие шаги:

1. По спектрограммам сейсмического шума, зарегистрированного в окрестности (до 30 км) крупного промышленного объекта (напр., ГЭС, АЭС, ТЭЦ и др.), выполняется спектрально-временной анализ для выделения в нем малоамплитудных сигналов, в результате которого:

- уточняются параметры оконного преобразования Фурье для повышения детальности и/или устойчивости отображения выделенных малоамплитудных сигналов;
- определяются интервалы наложения помех на малоамплитудные сигналы в границах частота-время для исключения их из обработки;
- по спектрограмме определяются приближенные характеристики малоамплитудных сигналов, а именно частота и ее вариации во времени, добротность по ширине спектральной линии, временной период устойчивого прослеживания.

2. Выделенные сигналы по значению частоты априорных данных идентифицируются с источниками колебаний:

- высокочастотные сигналы с работающими гидроагрегатами ГЭС, турбоагрегатами АЭС, ТЭЦ, двигателями различных промышленных установок;
- низкочастотные сигналы с собственными колебаниями крупных сооружений (напр., плотины ГЭС, здания, мосты и т.п.).

3. Достоверность идентификации (п. 2) повышается результатами сопоставления частот и интервалов прослеживаемости выявленных сигналов при одновременной регистрации сейсмического шума на исследуемом объекте и на удаленной сеймостанции.

4. Для определения истинной амплитуды колебаний объекта по малоамплитудным сигналам устанавливается эмпирическая зависимость между их амплитудами при спектрально-временном анализе материалов эксперимента (п. 3).

5. По зарегистрированным ранее (архивным) цифровым данным мониторинга сейсмического шума в период безаварийной эксплуатации промышленного объекта, с использованием разработанного алгоритма и его программной реализации SpectrumSeism, определяются регулярные (напр., ежедневные) значения частот и амплитуд малоамплитудных сигналов для получения статистически значимой информации о нормальных пределах их изменения.

6. По поступающим новым данным мониторинга сейсмического шума в реальном или близком к нему времени, с использованием разработанного алгоритма и его программной реализации SpectrumSeism определяются значения частот и амплитуд малоамплитудных сигналов.

7. С использованием зависимости (п. 4) по амплитудам сигналов (п. 6) при сопоставлении их с нормальными значениями при безаварийной эксплуатации объекта (п. 5) определяются интервалы аномальных колебаний идентифицированных объектов для дистанционного выявления факторов, указывающих на начавшиеся разрушительные процессы в работающем оборудовании:

- при опасном увеличении вибрации промышленного оборудования возрастает амплитуда колебаний на его рабочей частоте (напр., на частоте вращения гидроагрегатов);

- при негативном воздействии на конструкции или сооружения работающего оборудования (резонансного эффекта) возрастает амплитуда собственных колебаний.

Итак, для дистанционного контроля разрушительных процессов при эксплуатации крупных промышленных объектов разработана малозатратная методика надежного выявления таких процессов по малоамплитудным

сейсмическим сигналам [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Исходным материалом служат данные многолетнего мониторинга – сейсмограммы, регистрируемые в реальном времени высокочувствительными приборами сейсмических станций в окрестности до 30 км от объекта исследования [Лисейкин, Селезнев, 2024]. В техногенной составляющей сейсмического шума регистрируются малоамплитудные сигналы как отклики от механических колебаний (вибраций работающего оборудования и собственных колебаний зданий и технических сооружений) различных объектов. Такие колебания характеризуются определенными частотами и длительностью во времени, что дает возможность, с использованием специального программного обеспечения SpectrumSeism на основе спектрально-временного анализа [Лисейкин, Селезнев, 2024], отделять содержащиеся в сейсмическом шуме сигналы одних источников от других и повышать отношение сигнал/помеха. Разработаны методические приемы для идентификации источников возбуждения малоамплитудных сигналов. Методика позволяет не только контролировать вибрацию оборудования крупных промышленных объектов, но и оценивать взаимодействие работающего оборудования с окружающими конструкциями с обнаружением представляющих опасность резонансных эффектов. А с использованием накопленных за много лет данных мониторинга выполнять ретроспективный анализ с получением дополнительной информации необходимой для объективного расследования причин аварийных ситуаций на крупных промышленных предприятиях. Все перечисленное повышает достоверность контроля устойчивости сооружений и работающего оборудования в реальном времени, остро необходимого для предотвращения разрушений и анализа причин нештатных ситуаций.

Глава 3. ДИСТАНЦИОННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АНОМАЛИЙ В ЧАСТОТАХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПО МАЛОАМПЛИТУДНЫМ СИГНАЛАМ КАК ИНДИКАТОРА НАЧАВШИХСЯ РАЗРУШЕНИЙ ИХ КОНСТРУКЦИИ И/ИЛИ ОСНОВАНИЯ

3.1. Аналитический обзор известных решений

Как известно, значительное количество стратегически важных для Российской Федерации промышленных объектов (ГЭС, ТЭЦ, АЭС, заводы и др.), а также зданий и инженерных сооружений возведено десятки лет назад [Лисейкин, Селезнев, 2024]. Несомненно, что за долгий период эксплуатации, воздействие таких факторов, как изменение температуры, смена напряженно-деформированного состояния, вибрация, старение материалов конструкций, деградация грунта в основании и др., с течением времени приводит к появлению в сооружениях трещин, ослабленных зон, изменению граничных условий на контакте с внешней средой и др. Как следствие, ослабляется устойчивость сооружений, а риск их разрушения в сейсмоактивных регионах особенно велик [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Для контроля целостности конструкции на некоторых особо важных объектах с использованием контрольно-измерительной аппаратуры проводится мониторинг ряда характеристик (деформации, температуры, вибрации и др.) [Брызгалов, 1999]. Однако в конструкциях образуются и скрытые, недоступные для прямого обнаружения и также опасные для устойчивости дефекты.

Перечисленные изменения в конструкции сооружений, в свою очередь, становится причиной изменения характеристик их собственных колебаний (т.к. изменяются жесткость конструкции и граничные условия), в том числе значений частот. В связи с этим регулярное определение частот собственных колебаний сооружений по данным мониторинга с выделением их аномальных изменений дает возможность контролировать их исправное состояние и своевременно

предупредить риск разрушения. Такой контроль представляет существенный практический интерес в части предупреждения рисков разрушения сооружений. Однако, например, для крупных плотин по инструкции он должен выполняться один раз в пять лет с заполнением динамических паспортов без последующей обработки, анализа и интерпретации, без учета множества факторов, как, например, систематическое влияние на частоты собственных колебаний плотины суточных и сезонных вариаций температуры, промерзания и/или оттаивания конструкций [Типовой..., 1994]. В результате представление о состоянии плотины будет неполным, а его получение неоперативным [Лисейкин, Селезнев, 2024].

На сегодня известны разные способы определения частот собственных колебаний сооружений. Например, по зарегистрированным колебаниям, вызванным воздействием искусственных источников типа вибратор, или вследствие промышленных взрывов [Loh, Wu, 2000; Development..., 2007], или в результате природных землетрясений [Weng, Loh, 2010]. Трудоемкие и затратные (а кроме этого и потенциально опасные в силу вероятности повредить сооружение) способы с искусственными источниками, особенно в случае крупных сооружений (таких как плотины ГЭС), нечасто используются для решения задач оперативного контроля технического состояния сооружений. Редко применяются способы, основанные на записях природных землетрясений, в силу невозможности прогнозирования времени и места их возникновения. Тем не менее они реализуются с получением некоторой информации о техническом состоянии конструкций, хотя и с недостаточной точностью [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Известны также способы определения частот собственных колебаний сооружений по зарегистрированным фоновым микросейсмическим колебаниям объекта [Способ..., 1999]. Они основаны на известном факте, что практически в любом инженерном сооружении из-за его ограниченного объема при воздействии микросейсм формируется совокупность стоячих волн [Standing..., 2002]. В исследованиях ряда авторов частоты собственных колебаний сооружений

определяются по локальным максимумам спектров сейсмограмм, зарегистрированных в нескольких точках сооружения [Egorov et al., 2017; New..., 2017; Мониторинг..., 2024]. Этот способ прост в реализации, но из-за сложности геометрической формы стоячих волн в сооружениях возможны ошибки в идентификации их мод. Кроме того, на полезный сигнал могут накладываться колебания от работающего в сооружении оборудования, а при расположении датчиков вблизи узлов стоячих волн на сооружении определить их частоты практически невозможно [Liseikin et al., 2020]. Разработанным В.С. Селезевым и А.Ф. Емановым методом стоячих волн из зарегистрированных микросейсмических колебаний выделяются когерентные во времени и пространстве колебания (стоячие волны) на сколь угодно плотной сети наблюдений [Standing..., 2002]. Это позволяет определять детальные моды для каждой из частот собственных колебаний и исключает ошибки в их идентификации. Кроме того, информация о положении узлов стоячих волн, которую дает метод, важна при определении мест установки датчиков систем сейсмометрических наблюдений [Способ..., 2015]. Однако такой метод требует, прежде всего, больших временных, а также материальных затрат на регистрацию колебаний на плотной сети наблюдений, на обработку цифровых данных и интерпретацию результатов и не подходит для оперативного и регулярного (например, ежедневного) определения значений частот собственных колебаний сооружений [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

В последнее десятилетие рядом ученых активно развивается метод контроля устойчивости зданий и сооружений по данным мониторинга частот их собственных колебаний, возбуждаемых микросейсмическим фоном естественного и техногенного характера, т.е. без использования специальных источников возбуждения [Сейсмометрический..., 2013; Egorov et al., 2017; Sun et al., 2022; Effect..., 2024 и др.; Мониторинг..., 2024; Лисейкин, Селезнев, 2024]. Однако для его реализации необходимо, во-первых, чтобы на сооружении была установлена система мониторинга, регистрирующая в непрерывном режиме

микросейсмический шум. Во-вторых, остается нерешенным вопрос идентификации регистрируемых сигналов (определения соответствия «зарегистрированная частота» – «частота моды собственных колебаний») – для его решения необходимо априори знать характеристики собственных колебаний сооружений. В этом ключе, для выполнения мониторинга частот собственных колебаний, еще на этапе подготовительных работ необходимо провести детальные исследования, например, методом когерентного восстановления полей стоячих волн [Лисейкин, Селезнев, 2021], дающие необходимую информацию. Такие исследования выполнены на плотине Чиркейской ГЭС дважды, при минимальном и максимальном уровнях воды в водохранилище (Рисунок 3.1а) [Liseikin et al., 2020]. На усредненных амплитудных спектрах микросейсмического шума, зарегистрированного сейсмостанцией в теле плотины, видно, что их локальные максимумы совпадают с частотами, полученными [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023] в результате применения метода стоячих волн (Рисунок 3.1б).

На нескольких сооружениях проводится такой непрерывный и довольно длительный мониторинг. Так, на плотине Саяно-Шушенской ГЭС система сейсмометрического контроля в непрерывном режиме функционирует с 2016 г. [Egorov et al., 2017], на плотине Чиркейской ГЭС – с 2015 г. [New..., 2017]. Однако процессы накопления скрытых дефектов в конструкции плотины начинаются сразу после ее создания, т.е. десятки лет назад. Следовательно, нет полной картины в изменениях собственных колебаний этих сооружений [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Для расширения ее полноты могут быть использованы данные многолетнего мониторинга сейсмического шума, зарегистрированного высокочувствительной сейсмологической аппаратурой в окрестности сооружения. Так, исследования Ф.Н. Юдахина и его коллег убеждают, что здания и сооружения, совершающие свободные колебания под воздействием ветра, являются источником сейсмических волн, распространяющихся в геологической среде и регистрирующихся сейсмическими станциями [Об использовании..., 2005]. Несомненно, что чем

далее находится станция от объекта исследования, тем слабее регистрируемые от него сигналы. Таким образом, задача сводится к разработке методики выделения из сейсмического шума малоамплитудных сигналов, источником которых является сооружение, совершающее собственные колебания, и определении по ним значений частот.

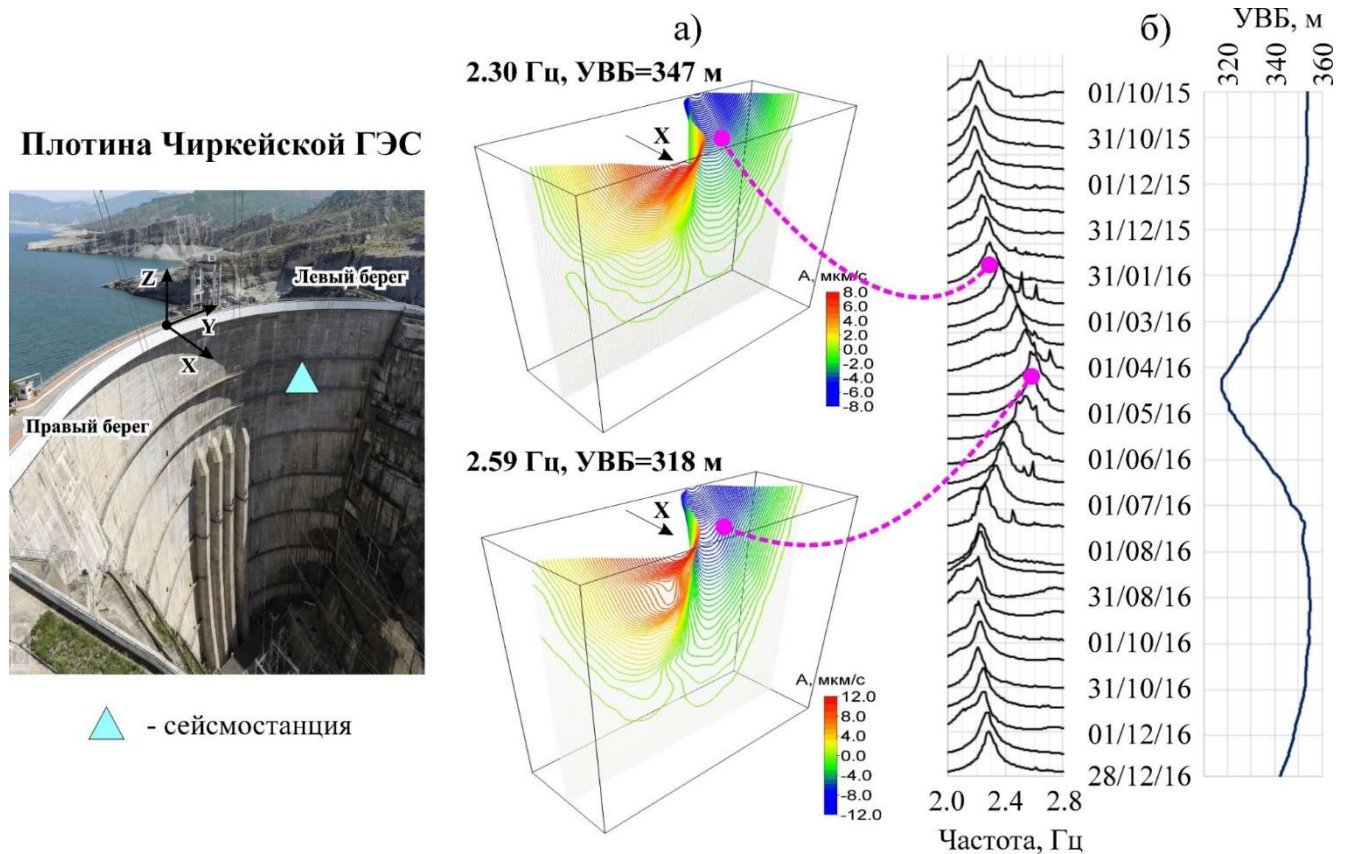


Рисунок 3.1 – Плотина Чиркейской ГЭС: 2-я мода ее собственных колебаний по данным метода стоячих волн (а) и суточные усредненные амплитудные спектры сейсмического шума, зарегистрированного одной сейсмостанцией в сопоставлении с уровнем воды в водохранилище (б)

Контроль технического состояния зданий и сооружений по частотам их собственных колебаний значительно затруднен в связи с тем, что значения этих частот варьируются в связи с изменениями в среде вокруг изучаемых объектов [Изменение..., 2024]. Ранее, вероятно из-за ограниченного количества данных мониторинга, исследователями предполагалось, что частота собственных колебаний – величина постоянная при условии неизменности технического состояния здания или сооружения [Об использовании..., 2005]. На сегодня многочисленными исследованиями показано, что частоты собственных колебаний

объектов изменяются в значительных пределах в зависимости от различных факторов внешней среды. Так, от уровня воды в водохранилище для плотины Саяно-Шушенской ГЭС (Российская Федерация) изменения составляют 0.1-0.2 Гц (5-10 %) [Брызгалов, 1999; Пересчет..., 2002]; для Чиркейской ГЭС (Российская Федерация) – 0.1-0.4 Гц (7-11 %) [Liseikin et al., 2020] (см. Рисунок 3.1); для Итайпу ГЭС (Бразилия) – 0.2-0.3 Гц (2-7 %) [Effect..., 2024]. От сезонных и суточных изменений температуры в зданиях вариация частот достигает 10 % и более [Контроль..., 2023; Изменение..., 2024]. От промерзания или оттаивания грунта в основании сооружений изменения также достигают порядка 10 % [Корепанов, Цветков, 2014; Контроль..., 2023]. Нет сомнения, что для одного и того же здания или сооружения имеет место совместное воздействие нескольких факторов внешней среды, одновременно влияющих на текущее значение частоты собственных колебаний. Эти факторы необходимо определять и учитывать при контроле технического состояния сооружений с целью исключения неверных выводов об обнаружении начавшихся разрушительных процессов [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

3.2. Разработка методики на примере оценки состояния плотины

Саяно-Шушенской ГЭС

Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС является самой крупной в России. Расположена в зоне высокой сейсмической активности (9 баллов по карте ОСР-97С). Плотина представляет важный объект исследования ее собственных колебаний, характеристики которых в результате природной сейсмичности и техногенного воздействия могут изменяться. Важно разработать новые подходы, позволяющие контролировать техническое состояние не только этой плотины, но и любых других инженерных сооружений для предупреждения рисков их разрушения. Известны исследования 1993-1995 гг. материалов, полученных с использованием мощного дебалансного вибратора [Брызгалов, 1999]. В 1997-1998 гг. выполнены исследования методом когерентного

восстановления полей стоячих волн [Standing..., 2002], по результатам анализа которых определены частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при минимальном и максимальном заполнении водой водохранилища (Таблица 3.1). Из анализа табличных данных следует, что при максимальном уровне воды значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины на 0.1-0.2 Гц меньше, чем при минимальном. Специалистами такая разница в значениях частот объясняется общеизвестным «эффектом присоединенной массы»: чем выше уровень воды в водохранилище, тем больше совместная масса плотины с присоединенной водой, следовательно, частоты собственных колебаний сооружения становятся меньше. Обращает внимание разница в значениях частот, определенных при одном и том же уровне воды в водохранилище, но в разные годы – она составляет от 0.005 до 0.072 Гц. В публикациях [Брызгалов, 1999; Standing..., 2002] не дается объяснения, чем она вызвана: это или недостаточная точность определения частот, или влияние на значения частот дополнительных факторов, не учтенных исследователями. Вместе с тем, из анализа результатов численного конечно-элементного моделирования колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС следует, что при появлении трещин в модели сооружения частоты собственных колебаний понижаются на величину до 0.05 Гц относительно их значений в модели без трещин [Hsu et al., 2020]. Из этого следует вывод, что для контроля технического состояния этой плотины необходимы более полные и точные данные о значениях частот ее собственных колебаний [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

В последнее десятилетие (начиная с 2016 г.) ведется непрерывный мониторинг колебаний в ряде точек плотины Саяно-Шушенской ГЭС автоматизированной системой сейсмометрического контроля, установленной по заказу ПАО «РусГидро». Известны исследования по определению частот собственных колебаний плотины по спектрам микросейсмических колебаний, записанных этой системой [Саранцев, 2017]. Однако до 2016 г. такой мониторинг не проводился из-за отсутствия непрерывно регистрирующей аппаратуры. Вместе

с тем, изменение технического состояния плотины, связанное, например, со старением материалов конструкции, как известно, длится годами, даже десятилетиями [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Таблица 3.1 – Значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

Номер Моды	Значения при максимальном уровне воды, Гц		Разни- ца частот, Гц	Значения при минимальном уровне воды, Гц		Разни- ца частот, Гц
	Исследо- вания 1993–1995 гг. [Брызгалов, 1999]	Исследо- вания 1997–1998 гг. [Emanov et al., 2002]		Исследо- вания 1993–1995 гг. [Брызгалов, 1999]	Исследо- вания 1997–1998 гг. [Emanov et al., 2002]	
1	1.1	1.129	–0.029	1.25	1.236	0.014
2	1.2	1.217	–0.017	1.33	1.325	0.005
3	1.5	1.527	–0.027	1.65	1.633	0.017
4	1.85	1.921	–0.071	2.0	2.035	–0.035
5	2.4	2.448	–0.048	2.5	2.531	–0.031
6	2.9	2.972	–0.072	3.1	3.064	0.036
7	3.6	3.635	–0.035	3.7	3.679	0.021

Результаты исследований доказывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС, колеблющаяся на частотах собственных колебаний, является источником упругих волн с такими же частотами [Лисейкин и др., 2014]. Эти волны распространяются в среде и фиксируется станциями сейсмологической сети на расстояниях даже в несколько километров, несмотря на их существенно более низкую амплитуду (на несколько порядков ниже) по сравнению с общим уровнем сейсмического шума [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Из результатов спектрального анализа зарегистрированных на сеймостанции «Черемушки» в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС сейсмограмм, следует, что по локальным максимумам спектров, усредненных за длительный период времени (до пяти суток), определяются частоты, соответствующие значениям частот первых семи мод собственных колебаний плотины [Об изменении..., 2014]. Сейсмограммы со станций сейсмологической сети ФИЦ ЕГС РАН передаются в обрабатывающие

центры оперативно (большинство станций передают в режиме реального времени). Они хранятся в цифровом виде неограниченное время (с момента ввода в эксплуатацию современной цифровой регистрирующей аппаратуры два-три десятилетия назад), что дает возможность выполнять их обработку и интерпретацию для регулярного определения частот собственных колебаний сооружения за многолетний период мониторинга. Это актуально как для оперативного, так и для длительного контроля за изменением технического состояния плотины под воздействием таких факторов, как старение материалов конструкции, растрескивание горных пород в основании плотины, их обводнение, заиливание дна водохранилища в области примыкания к плотине и др. [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Из публикаций [Standing..., 2002; A Study..., 2017; Dynamic..., 2018; Liseikin et al., 2020; Influence..., 2021] известно, что определяемое при мониторинге изменение частот собственных колебаний сооружений вызывается не столько разрушительными процессами в конструкции (старением материалов, появлением различных дефектов), сколько воздействиями внешней среды, как правило, сезонного характера. Так как Саяно-Шушенская ГЭС расположена в регионе, где среднемесячные температуры зимой – до минус 20 °С, а летом – до плюс 20 °С, то это обстоятельство необходимо учитывать (в дополнение к воздействиям от колебания уровня воды в водохранилище), поскольку частоты собственных колебаний изменяются при изменении температуры материалов конструкций [Influence..., 2021]. Кроме того, исследователями отмечается, что изменение частот собственных колебаний сооружений при смене температур с отрицательных на положительные и наоборот (при промерзании/оттаивании материалов конструкций) имеет свои особенности, что существенно затрудняет их учет [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

В настоящем исследовании по многолетним цифровым записям на одной из станций сейсмологической сети Алтае-Саянского региона – «Черемушки» (международный код CERR), расположенной в 4.4 км от Саяно-Шушенской ГЭС,

определяются частоты первых семи мод собственных колебаний плотины за период 2001-2021 гг. [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Для цифровой обработки данных используется специальное программное обеспечение SpectrumSeism (см. Главу 1) [SpectrumSeism, 2021], основанное на алгоритмах, разработанных в исследовании [Об изменении..., 2014]. Выявлено с высокой детальностью и точностью изменение частот собственных колебаний плотины под воздействием внешней среды, таким как сезонные изменения уровня воды в водохранилище и температуры воздуха [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

3.2.1. Используемые данные, методы исследования, аппаратура

Исходной информацией для регулярного определения значений частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС служат данные мониторинга (2001–2021 гг.) со станции «Черемушки» (международный код CERR) локальной сейсмологической сети станций района Саяно-Шушенской и Майнской ГЭС, принадлежащей ПАО «РусГидро», цифровые сейсмические записи которой исследуются сейсмологами Алтае-Саянского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (АСФ ФИЦ ЕГС РАН) [Алтай..., 2022]. Используемая геофизическая аппаратура с 2001 по 2012 г. – регистраторы серии «Байкал» с сейсмометрами СМ-3КВ (Россия); с 2013 г. по настоящее время – широкополосные велосиметры CMG-3ESPCDE производства компании Guralp (Великобритания). Сейсмостанция расположена в 4.4 км с северо-востока от Саяно-Шушенской ГЭС на территории одноименного поселка (Рисунок 3.2) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Также при анализе используются материалы, полученные в ходе выполнения договорных работ с ПАО «РусГидро» сотрудниками ГС СО РАН в 2010–2014 гг. при регистрации в ряде точек плотины микросейсмических колебаний с помощью мобильных сейсмических регистраторов серии «Байкал» с датчиками российского производства: сейсмоприемниками GS-20DX, GS-One (ООО «Геоспейс

Технолоджис Евразия»). Эти колебания регистрируются в разное время года в течение нескольких дней для сопоставления и идентификации малоамплитудных сигналов, одновременно зарегистрированных сейсмостанцией «Черемушки». При анализе изменения частот собственных колебаний плотины в связи с изменением уровня воды в водохранилище используются значения уровня воды в верхнем бьефе, предоставленные сотрудниками ПАО «РусГидро» в рамках выполнения договорных работ (до 2016 г.) и заимствованные с Интернет-ресурса <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (с 2016 по 2021 г.) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

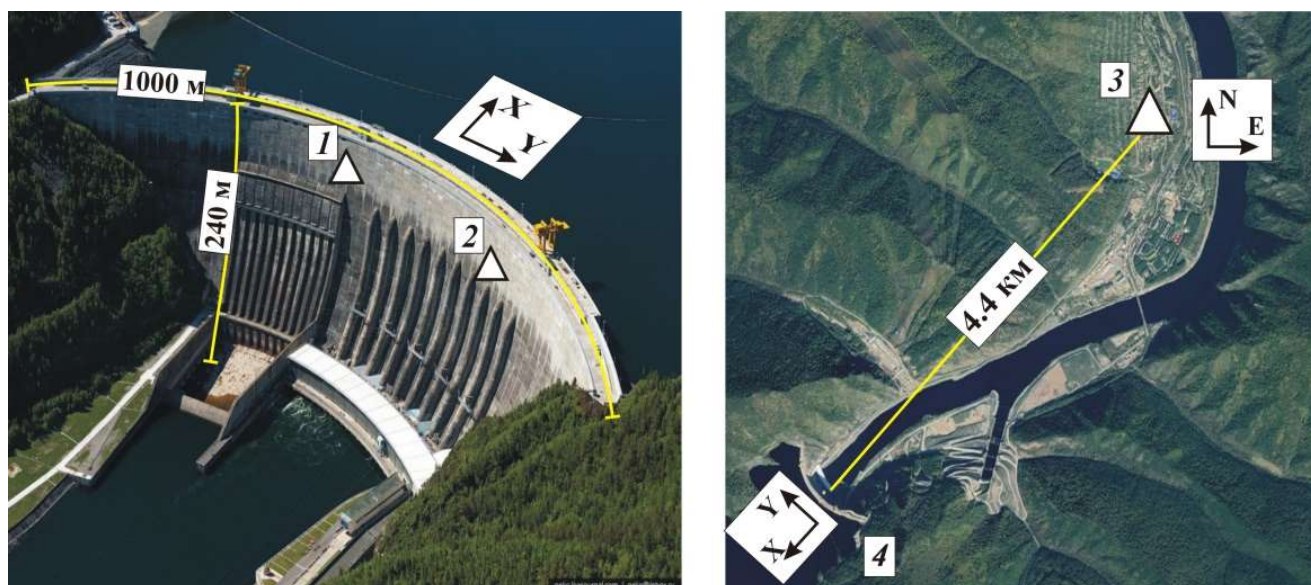


Рисунок 3.2 – Плотина Саяно-Шушенской ГЭС (<https://wikimapia.org/>), расположение ее и сейсмостанции «Черемушки» на снимке со спутника (<https://earth.google.com/>).

1, 2 – автономные сейсмические регистраторы серии «Байкал» для временной (несколько дней) регистрации сигналов; 3 – станция «Черемушки» сейсмологической сети для постоянной регистрации сигналов (обслуживается АСФ ФИЦ ЕГС РАН); 4 – плотина Саяно-Шушенской ГЭС [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

Из-за удаленности сейсмостанции «Черемушки» от ГЭС (в 4.4 км от нее) и повышенной сейсмической активности региона сейсмические записи «зашумлены» всевозможными помехами техногенного и природного происхождения, затрудняющими выделение малоамплитудных сигналов от собственных колебаний плотины и определение их частот (Рисунок 3.3а)

[Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Для повышения достоверности их выделения применяются следующие способы цифровой обработки данных, разработанные [Лисейкин и др., 2014] и реализованные в специальном программном обеспечении SpectrumSeism [Spectrum, 2021]. Прежде всего записи традиционно очищаются от высокоамплитудных помех (от движущегося транспорта, от природных или техногенных землетрясений и др.) обнулением участков записей с амплитудами колебаний выше фоновых значений. Затем полезный сигнал накапливается: сейсмическая запись разделяется на ограниченные по времени блоки, для каждого блока с использованием преобразования Фурье вычисляются единичные амплитудные спектры и усредняются. На усредненных амплитудных спектрах (Рисунок 3.3б), рассчитанных с ростом длины записи микросейсмического шума и ростом количества усреднений от 100 с (количество усреднений одно) до 51200 с (количество усреднений 512), видно, что при длине записи от 12800 с (около четырех часов, 128 усреднений) спектры сглаживаются и с дальнейшим увеличением длины записи не меняются [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

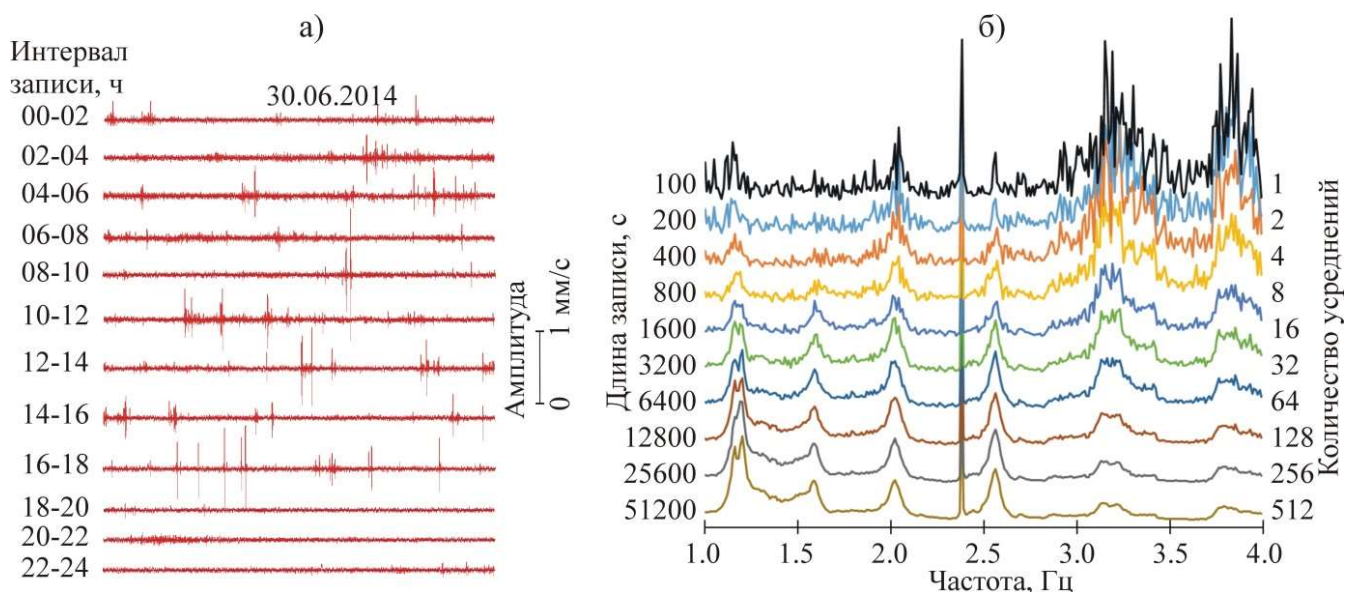


Рисунок 3.3 – Суточная запись микросейсмического шума на Е-компоненте сейсмостанции «Черемушки» (а) и набор усредненных амплитудных спектров с ростом длины записи и количества усреднений (б) [Определение..., 2023]

3.2.2. Определение частот собственных колебаний сооружения по данным мониторинга сейсмического шума в его окрестности

Из результатов спектрального анализа сейсмического шума, зарегистрированного на станции «Черемушки», следует вывод, что аргументы локальных максимумов усредненных амплитудных спектров (Рисунок 3.4б) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023] соответствуют частотам собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС. Для строгого доказательства этого вывода сопоставляются данные одновременной регистрации в двух точках плотины (Рисунок 3.4а) и на сейсмостанции «Черемушки» (Рисунок 3.4б,в). Из сопоставления спектров с двух разнесенных в плотине точек регистрации (Рисунок 3.4а) видно, что амплитуды колебаний плотины отличаются. Это происходит из-за различного положения точек регистрации относительно узлов и пучностей стоячих волн (где амплитуда минимальна и максимальна, соответственно). Для большей достоверности определения частот каждой из мод собственных колебаний их значения берутся с тех точек, где амплитуда локального максимума принимает наибольшее значение (такие точки расположены в местах, отличных от узлов соответствующей моды стоячей волны) [Способ..., 2015]. На усредненных спектрах (Рисунок 3.4б,в) сейсмического шума, зарегистрированного на сейсмостанции «Черемушки», видно, что аргументы локальных максимумов совпадают с таковыми при одновременной регистрации сейсмических сигналов в плотине (Рисунок 3.4а) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Необходимо отметить, что локальные максимумы усредненных спектров наиболее точно совпадают (разница не превышает 0.01 Гц) при сопоставлении с локальными максимумами среднеквадратичных по трем компонентам (N, E, Z) значений амплитуд усредненных спектров. Это отчетливо видно на графике (см. Рисунок 3.4в). Таким образом, из сопоставления усредненных спектров одновременных записей сейсмического шума в плотине и на удаленной в 4.4 км от нее сейсмостанции «Черемушки» следует, что по данным последней (а именно, по локальным максимумам усредненных амплитудных спектров сейсмического

шума) определяются частоты собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

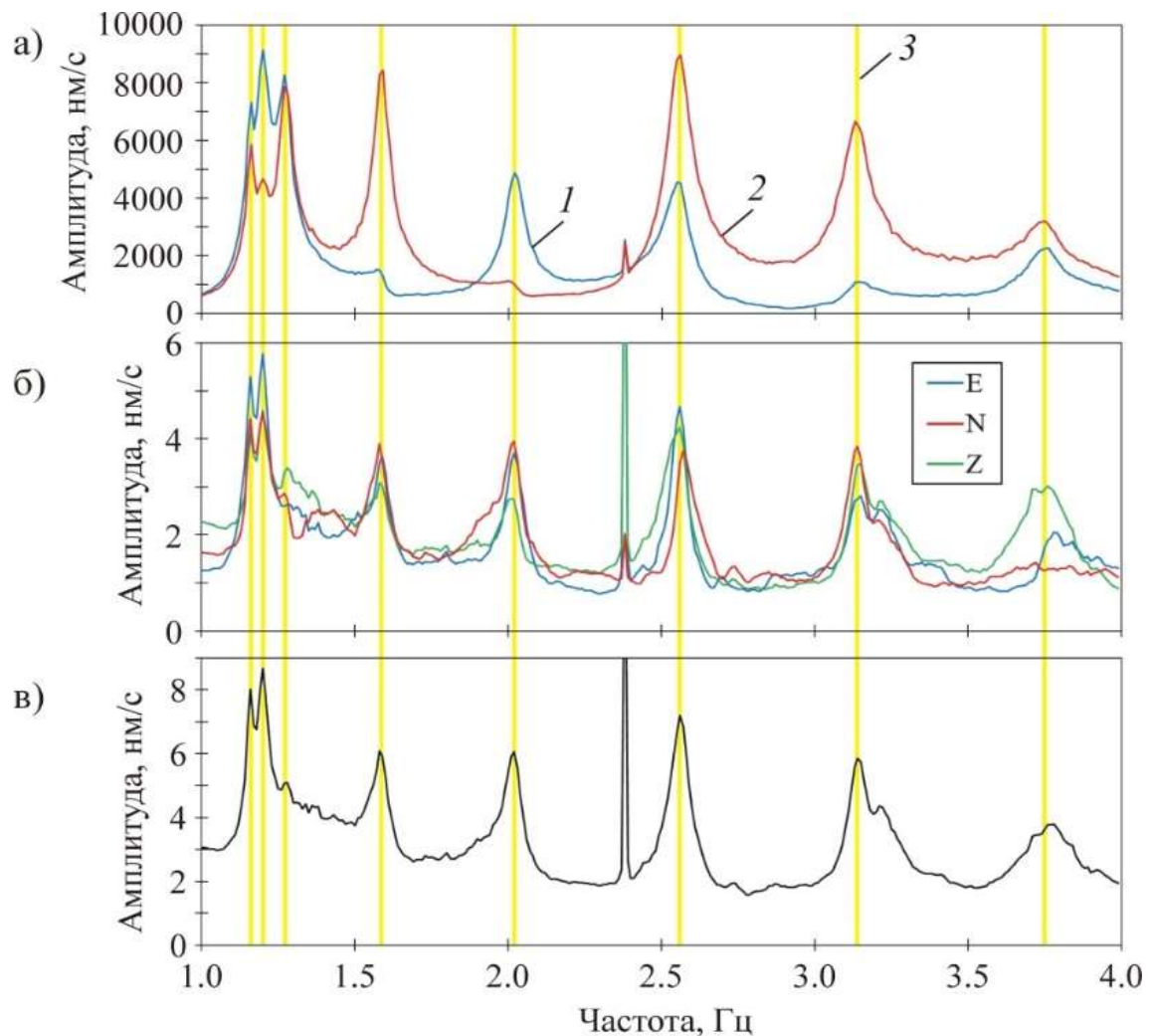


Рисунок 3.4 – Усредненные амплитудные спектры сейсмического шума в плотине Саяно-Шушенской ГЭС (а) и на сейсмостанции «Черемушки» (б, в) при одновременной регистрации 30.06.2014 г.

а – по радиальной X-компоненте в точках 1 (1) и 2 (2) на Рисунке 3.2 с выделенными локальными максимумами спектров (3); б – по трем (E, N, Z) компонентам сейсмостанции; в – график среднеквадратичных значений амплитуд спектров по трем компонентам [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

Погрешность значений частот собственных колебаний плотины оценивается по разности их определений в дневное (с 08:00 до 20:00) и ночное (с 20:00 до 08:00) местное время суток (Рисунок 3.5). Из графиков изменения частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС, определенной ежесуточно по спектрам микросейсмического шума сейсмостанции «Черемушки»

в дневное и ночное время 2021 г. с изменением уровня воды в водохранилище (см. Рисунок 3.5а), видно, что они почти идеально совпадают: из анализа гистограммы их разности следует, что погрешность определения частот незначительна и не превышает 0.01 Гц (Рисунок 3.5б).

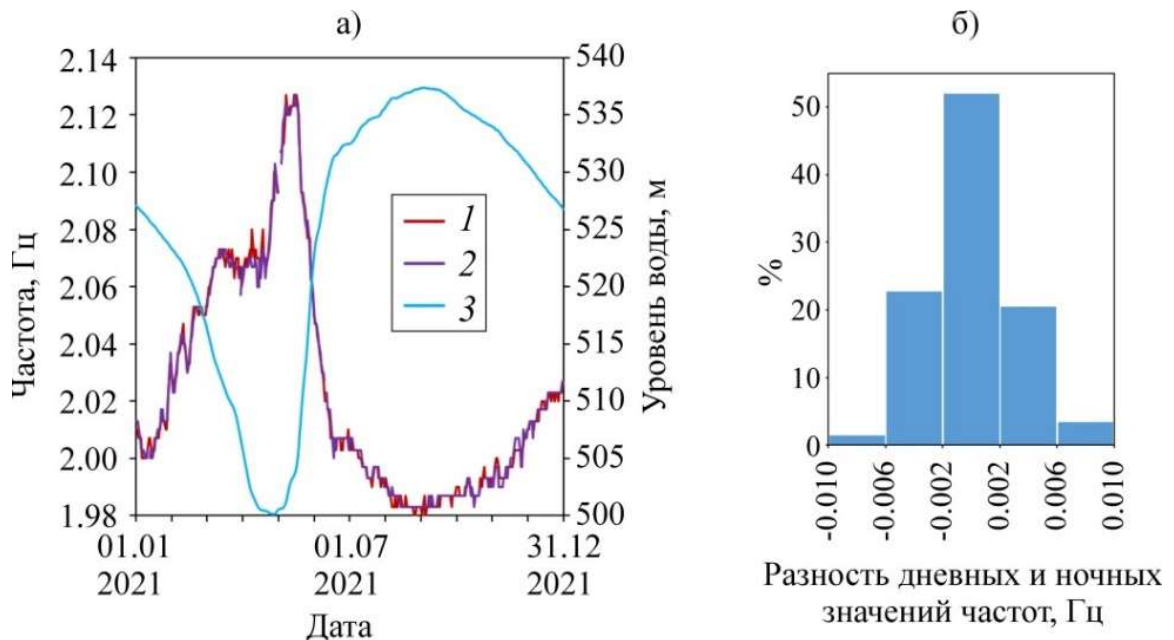


Рисунок 3.5 – Изменение частоты 4-й моды собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по спектрам микросейсмического шума сейсмостанции «Черемушки» с изменением уровня воды в водохранилище (а) и гистограмма разности дневных и ночных значений частот (б) за 2021 г.

1, 2 – значения частот в дневное и ночное время; 3 – уровень воды
[Определение..., 2023]

Количество спектров, необходимое для построения сглаженного усредненного спектра (см. Рисунок 3.3б, 3.4б,в), зависит как от уровня помех, так и от значений амплитуд «полезных» малоамплитудных сигналов. В известном исследовании [Влияние..., 2013] доказывается, что в разное время суток, в зависимости от режимов работы гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС (количества вырабатываемой электроэнергии), амплитуда собственных колебаний плотины значительно меняется (кратность изменения достигает 10-20 раз) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. На графике (Рисунок 3.6) видно, что соотношение между амплитудами спектров записей микросейсмического шума, зарегистрированных в плотине и на сейсмостанции в

4.4 км от ГЭС (на частоте 3.7-3.8 Гц, соответствующей 7-й моде собственных колебаний плотины), фактически линейное. Значит, амплитуда «полезного» малоамплитудного сигнала, регистрируемого на сейсмостанции «Черемушки», также пропорционально меняется в широких пределах (от единиц до десятков нм/с) в разные даты и время суток. Следовательно, для выделения таких сигналов по усредненным амплитудным спектрам микросейсмического шума в разное время требуется разное количество спектров, участвующих в усреднении. Например, известно, что при уменьшении амплитуды полезного сигнала в 10 раз, для сохранения соотношения сигнал/помеха [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023] на одном уровне, необходимо количество спектров в усреднении увеличить в 100 раз. Амплитуда помех, регистрируемых в разное время суток и года меняется в существенно более широких пределах – от десятков нм/с до нескольких мм/с. Такой значительный разброс связан с эпизодическим присутствием в записях волн от землетрясений с высокой амплитудой (например, амплитуда колебаний, вызванных Тувинским землетрясением 26.02.2012 г. на горизонтальных компонентах сейсмостанции «Черемушки» достигала 2 мм/с). Тем не менее, такие высокоамплитудные помехи достаточно кратковременные по сравнению с общим временем регистрации сейсмического шума (обычно, не более 1%, если не брать в расчет периоды регистрации афтершоковых активизаций после Чуйского землетрясения 2003 г. и Тувинских землетрясений 2011–2012 гг.) [Лисейкин, Селезнев, 2024]. После очистки сейсмограмм от таких высокоамплитудных помех, амплитуда сейсмического шума изменяется в значительно меньших пределах – от десятков до первых сотен нм/с. Из анализа спектров сейсмограмм, зарегистрированных в разное время года, следует, что для надежного выделения по данным сейсмостанции «Черемушки» сигналов, связанных с собственными колебаниями плотины Саяно-Шушенской ГЭС (при условии очистки сейсмограмм от высокоамплитудных помех), количество спектров, участвующих в усреднении, не превышает 500–1000. При этом необходимая длина сейсмической записи для расчета таких спектров и итогового

усредненного спектра составляет 0.5–1 сутки [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

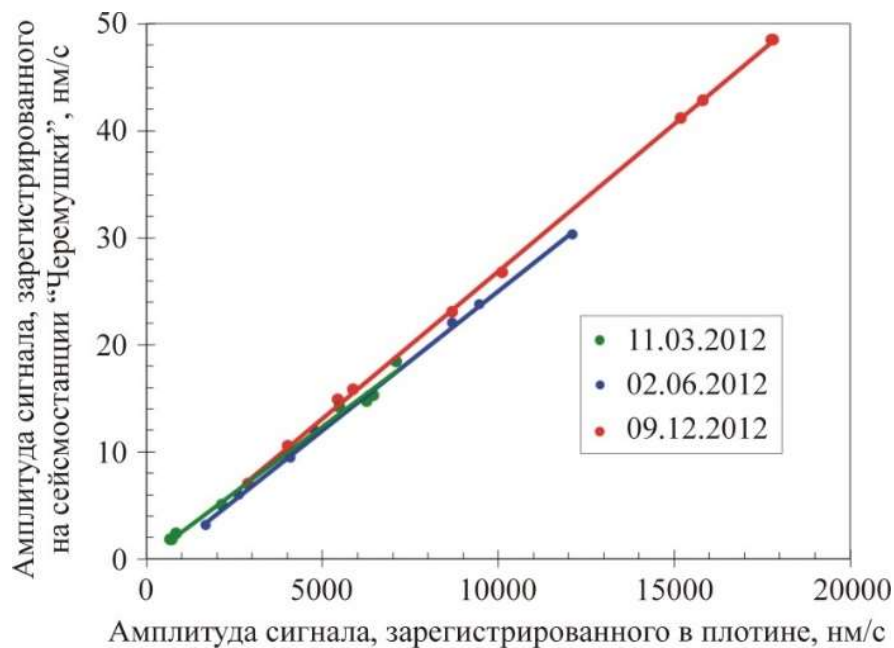


Рисунок 3.6 – Линейная связь между амплитудами сигнала (по локальным максимумам спектров сейсмического шума в области частоты 3.7-3.8 Гц) при одновременной его регистрации в верхней части плотины Саяно-Шушенской ГЭС и на сейсмостанции «Черемушки» для трех разных дат в разное время года [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

При вычислении каждого из амплитудных спектров (до их усреднения описанным выше способом в программе SpectrumSeism) необходимо знать критерии оценки временного интервала (окна) сейсмической трассы, по которым они вычисляются: общеизвестно, что разрешенность спектра по частоте обратно пропорциональна длине (размеру) временного окна указанной записи. Следовательно, чем больше размер окна, тем детальнее определяется значение частот собственных колебаний (при отсутствии помех), с одной стороны. С другой стороны, при большом окне уменьшается количество усреднений (при той же общей длине записи), а значит, уменьшается и соотношение «сигнал/помеха», спектры становятся менее гладкими и, как следствие, снижается качество определения значений частот. Для минимизации этого определяется оптимальный

размер окна для расчета амплитудных спектров следующим образом [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

При исследовании собственных колебаний сложных объектов, имеющих ряд степеней свободы и соответствующий ряд резонансных областей в частотной характеристике, разрешенность спектра соотносится с шириной этих резонансных областей и расстоянием по частоте между ними. Разрешенность спектра находится из сопоставления усредненных амплитудных спектров записи сейсмического шума в верхней части плотины, рассчитанных при разном размере окна. На графиках (Рисунок 3.7) видно, что при интервалах 10, 25 и 50 с усредненные амплитудные спектры существенно «изломаны», и это не позволяет точно определять значение частоты. А при окне размером 25 с и менее разрешенность спектра становится настолько низкой, что не позволяет различить сигналы, близкие по частоте. Поэтому окно для вычисления единичных спектров задается, как минимум, 100 с, при котором разрешенность спектра высокая и составляет 0.01 Гц [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

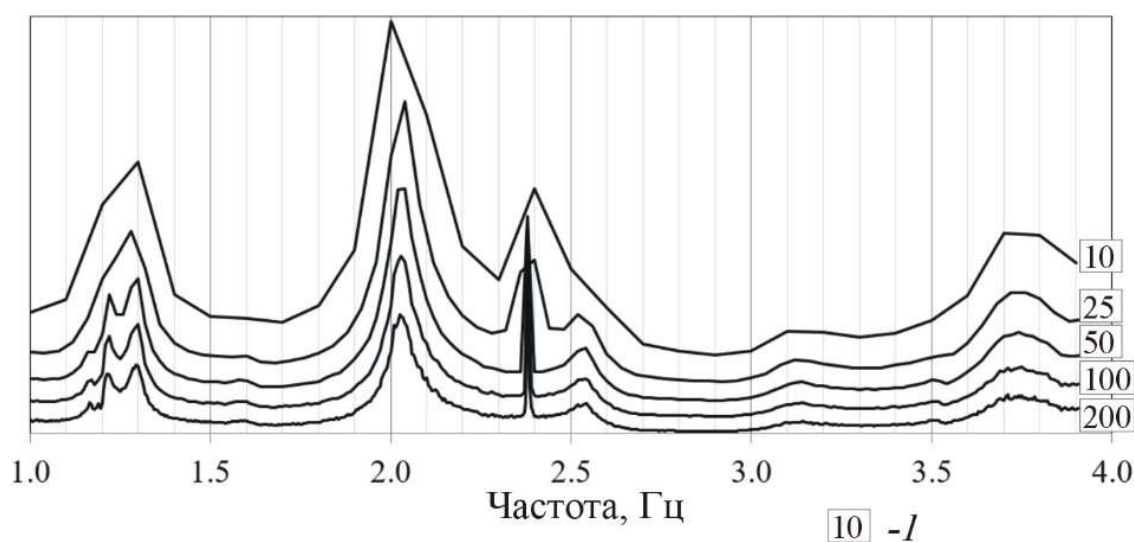


Рисунок 3.7 – Амплитудные спектры сейсмического шума на поперечной (в направлении X) компоненте в точке 1 (см. Рисунок 3.3) плотины Саяно-Шушенской ГЭС, при разной длине окна (регистрация 06.02.2015). 1 – длина окна, с [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

На графиках изменения во времени частот первых семи мод собственных колебаний плотины, определенных описанным выше способом по усредненным

спектрам сейсмического шума, зарегистрированного в течение 20 лет на сейсмостанции «Черемушки» (Рисунок 3.8б-з), видна их ежегодная (сезонная) периодичность, как и периодичность изменения уровня воды в водохранилище над уровнем моря (Рисунок 3.8а). При этом разброс частот составляет 0.16–0.22 Гц при изменении уровня воды на 35–39 м в разные годы в связи с разным гидрологическим режимом Саяно-Шушенского водохранилища. При линейной аппроксимации значений частот собственных колебаний плотины отмечается их увеличение в течение 20-летнего периода наблюдений по предварительной оценке на 0.02–0.03 Гц, что на порядок ниже значений их сезонных вариаций. При этом аппроксимированные значения уровня воды в водохранилище не изменяются за тот же временной период, несмотря на неодинаковость его изменения из года в год (Рисунок 3.8а). Отсюда следует вывод, что для повышения [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023] степени достоверности контроля технического состояния плотины по изменениям частот ее собственных колебаний необходимо учитывать влияние сезонных факторов на значения частот.

На графиках зависимости частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений на примере 1-7-й моды (Рисунок 3.9) видно, что в целом (при аппроксимации величин) с повышением уровня воды частота ее колебаний снижается. Как уже отмечалось, специалистами это объясняется эффектом «присоединенной массы» воды (чем выше уровень воды, тем больше масса колебательной системы, состоящей из плотины с присоединенной водой, и тем ниже частота собственных колебаний, соответственно) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023] и экспериментально подтверждается другими исследователями по однократным определениям частот при максимальном и минимальном уровне воды [Брызгалов, 1999; Standing..., 2002], а также по определениям частот собственных колебаний плотины по данным мониторинга в период 2016-2017 гг. [Саранцев, 2017].

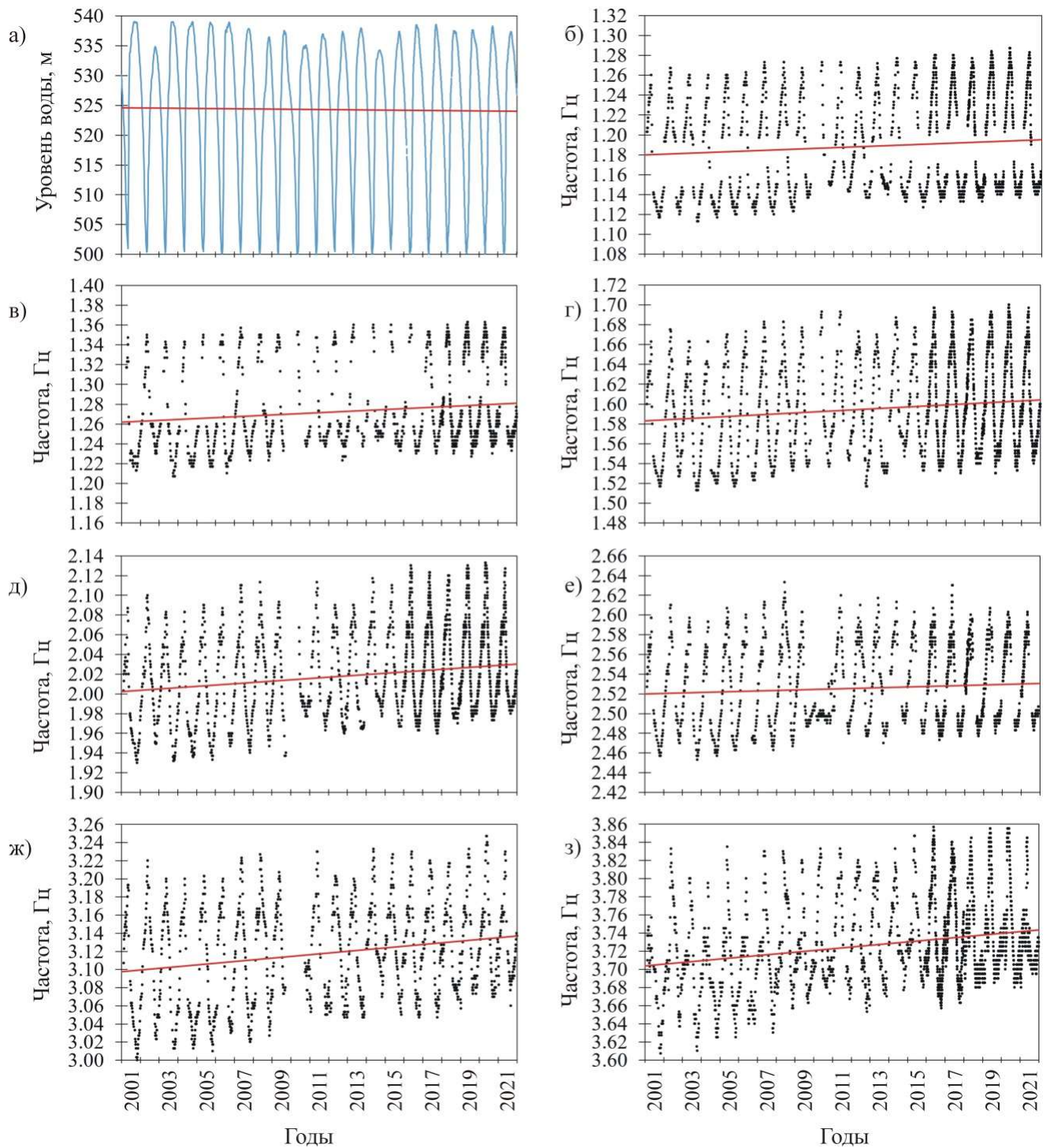


Рисунок 3.8 – Изменение уровня воды в водохранилище (а) и частот с 1-й по 7-ю моду собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС (б–з) за период 2001-2021 гг. Красная линия – линейная аппроксимация их значений [Определение..., 2023]

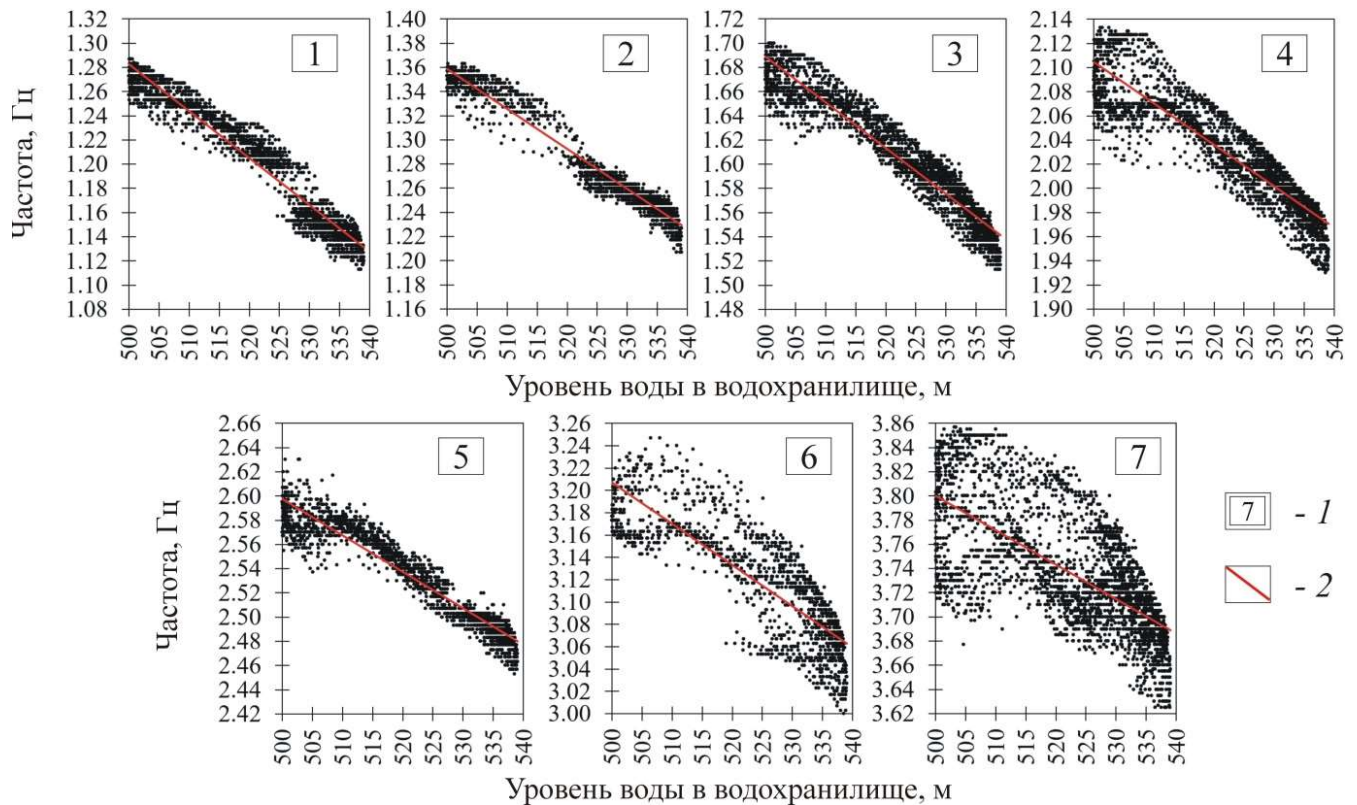


Рисунок 3.9 – Зависимости частот 1-7-й мод собственных колебаний плотины от уровня воды в водохранилище за 20-летний период наблюдений по малоамплитудным сигналам на сейсмостанции «Черемушки». 1 – номер соответствующей моды; 2 – линейная аппроксимация зависимостей [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

Некоторыми исследователями (например, [Dynamic..., 2018; Modal..., 2022]) при определении частот собственных колебаний плотин по данным мониторинга этот эффект учитывается с помощью корректирующей функции, зависящей только от уровня воды в водохранилище. Однако из анализа всей совокупности данных (ежедневных определений значений частот собственных колебаний плотины за 20-летний период мониторинга) следует, что связь между частотой и уровнем воды неоднозначна: при одном и том же уровне воды разброс частот составляет 0.04–0.14 Гц (разброс отличается как от моды к моде, так и от уровня воды на момент регистрации колебаний) при погрешности их определения не более 0.01 Гц. Это указывает на то, что изменение значений частот собственных колебаний плотины происходит не только от изменения уровня воды, но и от воздействия других факторов [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Так, М.И. Саранцевым предполагается, что дополнительным фактором изменения значения частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС может быть замерзание воды в водохранилище [Саранцев, 2017]. Отсюда следует вывод, что и промерзание/оттаивание бетона самой плотины в зимнее/весеннее время тоже влияет на частоту колебаний: она уменьшается или увеличивается [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Результаты анализа изменения частот собственных колебаний плотины во времени за 20-летний период мониторинга это предположение убедительно подтверждают. Из сопоставления графиков изменения частоты 4-й моды собственных колебаний плотины и уровня воды в водохранилище (Рисунок 3.10) следует, что в период с декабря по март, когда приток воды замедляется и уровень воды монотонно понижается (значит, частота должна увеличиваться, так как присоединенная масса уменьшается), частота собственных колебаний в ряде случаев, напротив, снижается на 0.02–0.03 Гц, а по прошествии одного-двух месяцев снова увеличивается. Это объясняется воздействием на плотину нескольких факторов в зимнее и весеннее время года, при этом достоверность результата контроля технического состояния плотины по частотам ее собственных колебаний снижается в связи с неразработанностью способа учета указанных изменений частот. В частности, масса намерзшего на плотине льда постоянно изменяется, так как снижение уровня воды в водохранилище при отрицательных температурах воздуха регулярно приводит как к дополнительному намерзанию, так и к отколу льда под действием силы тяжести. Глубина промерзания бетона на различных уровнях плотины также отличается в зависимости как от температуры окружающего воздуха, так и от уровня воды в водохранилище на момент регистрации колебаний и не поддается учету. В связи с этим частота собственных колебаний плотины на фоне ее плавного роста дополнительно меняется (уменьшается или увеличивается на 0.02–0.03 Гц) в холодное время года (начиная с декабря по март) (Рисунок 3.10) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Однако при мониторинге частот собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС в других климатических

условиях (без замерзания воды и промерзания бетона в зимнее время) описанное дополнительное изменение частот не отмечается [Liseikin et al., 2020].

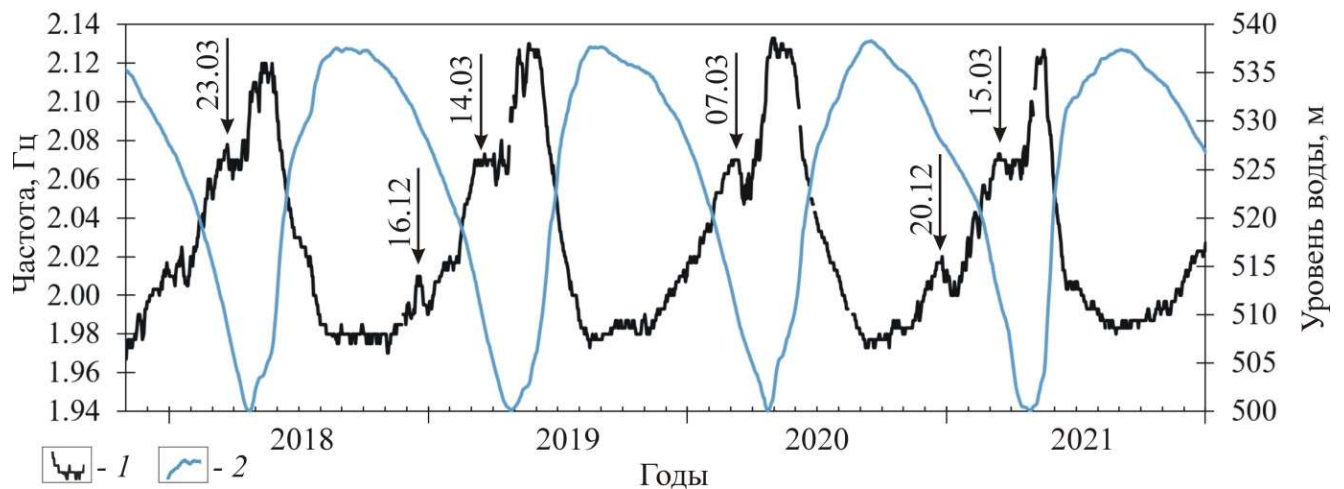


Рисунок 3.10 – Изменение во времени частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (1) с сезонным изменением уровня воды в водохранилище (2). Стрелками отмечены дополнительные изменения частоты

Из сопоставления графиков изменения частоты собственных колебаний плотины с сезонным изменением уровня воды в водохранилище (см. Рисунок 3.10) следует, что максимумы первых изменений запаздывают по времени относительно минимумов вторых. Аналогичное соотношение отмечается в изменении частоты собственных колебаний плотины Чиркейской ГЭС и уровня воды: по результатам многомесячного мониторинга (с октября 2015 по декабрь 2016 г.) установлено, что изменение частоты запаздывает относительно сезонного изменения уровня воды в водохранилище на 5-11 суток [Liseikin et al., 2020]. Это отчетливо видно на графиках (Рисунок 3.11) по петлевидному соотношению частот собственных колебаний плотин Саяно-Шушенской, Чиркейской ГЭС и уровня воды, разделенных по годам. Так, на графике изменения частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (Рисунок 3.11а) видно, что при одном и том же уровне воды, но в разное время года, определяются два значения частоты (например, при уровне 505 м – 2.06 и 2.13 Гц; при уровне 525 м – 2.01 и 2.05 Гц и т.д.). Причем во время наполнения водохранилища значения частоты более высокие, а во время понижения уровня воды (сработке) – пониженные. Так же, как и в случае с плотиной Чиркейской ГЭС (Рисунок 3.11б), это запаздывание

изменения частоты собственных колебаний сооружения относительно изменения уровня воды объясняется тепловой инертностью бетона: изменение уровня воды в водохранилище длится не один месяц, за это время происходит существенное изменение среднемесячной температуры окружающего воздуха, а именно от минус 10-20 °С – при сработке в зимнее время до плюс 10-20 °С – при наполнении в летние месяцы (Рисунок 3.12) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

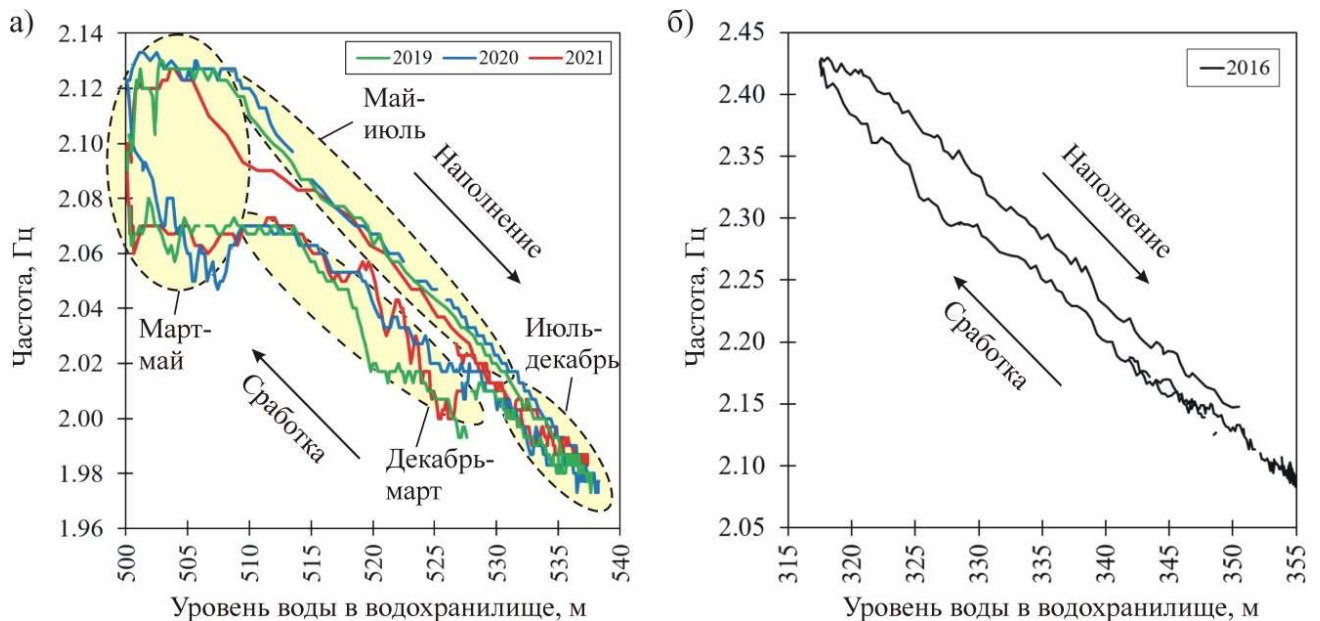


Рисунок 3.11 – Изменение частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС (а) и собственных колебаний 1-й моды плотины Чиркейской ГЭС (б) в связи с сезонным изменением уровня воды в водохранилищах [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

В результате анализа представленного на графике изменения частоты собственных колебаний 4-й моды плотины Саяно-Шушенской ГЭС в связи с изменением уровня воды в разное время года (см. Рисунок 3.11а), а также сезонного изменения уровня воды и изменения среднемесячной температуры воздуха (см. Рисунок 3.12) выделяются четыре условных периода (в изменении частот собственных колебаний остальных мод плотины получены аналогичные результаты анализа) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]:

1. Наполнение водохранилища водой с уровня 510 до уровня 530 м происходит, как правило, в течение 2–3 месяцев с мая по июль, характеризуется высокой скоростью наполнения (около 6–10 м/мес.) и, соответственно, высокой

скоростью монотонного снижения значений частоты собственных колебаний (около 0.03–0.05 Гц/мес.). Среднемесячные температуры в этом периоде фиксируются положительные (от +5 до +20°C), что, несомненно, сопровождается активным прогреванием бетона плотины (после зимнего-весеннего времени года).

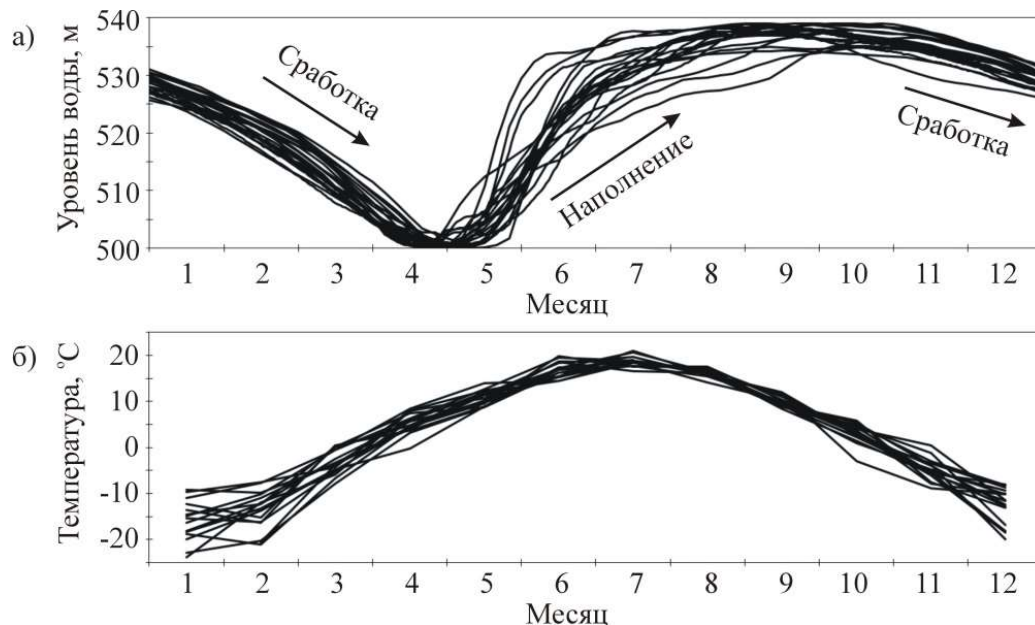


Рисунок 3.12 – Графики сезонного изменения уровня воды в Саяно-Шушенском водохранилище по данным мониторинга 2001–2021 гг. (а) и среднемесячной температуры воздуха в 40 км с северо-запада от ГЭС по данным ближайшей постоянно действующей метеостанции в п. Бея с 2005 по 2021 г. (<https://rp5.ru/>) (б) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]

2. Наполнение водохранилища водой с уровня 530 до 535–539 м (в разные годы) и последующая сработка воды до уровня 530 м происходят, как правило, в течение 5–6 месяцев (с июля по декабрь) до замерзания водохранилища. Этот период характеризуется низкой скоростью как наполнения, так и сработки (порядка 2–4 м/мес.) и, соответственно, низкой скоростью изменения частоты собственных колебаний плотины (около 0.01–0.02 Гц/мес.). Частота при этом изменяется монотонно (при увеличении уровня воды – уменьшается, при уменьшении – увеличивается).

3. Сработка воды из водохранилища с уровня 530 до уровня 510 м, происходит, как правило, в течение 3–4 месяцев с декабря по март (период, когда вода замерзает, среднемесячная температура окружающего воздуха составляет от

0 до $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$). В среднем, понижение уровня воды происходит со скоростью 5–6 м/мес., частота собственных колебаний при этом увеличивается со скоростью 0.01–0.02 Гц/мес. Однако в этом периоде изменение частоты не является монотонным: при интегральном увеличении частоты наблюдаются участки, где она внезапно снижается. Такое аномальное явление, как было отмечено выше, объясняется влиянием намерзания и откола льда и неравномерным промерзанием бетона плотины.

4. Сработка воды в водохранилище с уровня 510 до 500 м и последующее наполнение до уровня 510 м происходят, преимущественно, в течение 2–3 месяцев с марта по май. Среднемесячная температура воздуха изменяется с отрицательных ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) до положительных ($+15\text{ }^{\circ}\text{C}$), что сопровождается активным оттаиванием льда в водохранилище и прогреванием бетона плотины. При этом фиксируется существенное отличие значений частот собственных колебаний, определенных в период сработки и наполнения водохранилища, для одного и того же уровня воды. Например, при минимальном ее уровне 500 м частота колебаний 4-й моды увеличивается на 0.05 Гц, и это изменение происходит быстро, за считанные дни (в среднем, за 10–15 дней). Из этого следует, что для контроля технического состояния плотины недопустимо использовать значения частот собственных колебаний, определенных при минимальном уровне воды, так как это приведет к значительным погрешностям.

Итак, из анализа материалов следует вывод, что для наиболее точного определения частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС в разные годы необходимо использовать периоды мониторинга, при которых воздействие факторов внешней среды (прежде всего, температурных изменений) минимально. Этому условию удовлетворяет 2-й период длительностью 5–6 месяцев (приблизительно, с июля по декабрь) с наполнением водохранилища водой от уровня 530 до 535–539 м (в зависимости от степени наполнения в разные годы) и последующей сработкой воды до уровня 530 м [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023]. Значение частот собственных колебаний плотины

определяется для уровня 535 м (это наименьшее значение из всех максимумов уровней воды в водохранилище за период мониторинга 2001–2021 гг.) как среднее между всеми значениями в интервале уровней 534–536 м.

3.2.3. Обнаружение начавшихся разрушений конструкций и/или основания сооружения при учете многофакторного искажения частот при воздействии внешней среды

По материалам 20-летнего мониторинга сейсмического шума на сейсмостанции «Черемушки» разработана методика определения частот собственных колебаний сооружений по малоамплитудным сигналам в связи с контролем начавшегося разрушения их конструкции и/или основания, которая базируется на следующей концепции. По данным метода стоячих волн доказывалось, что частоты, определяемые по локальным максимумам амплитудных спектров записей сейсмического шума на объекте исследования, являются частотами его собственных колебаний. Затем проводится спектрально-временной анализ одновременных записей сейсмостанций, расположенных в нескольких километрах от исследуемого объекта, и записей на самом объекте для идентификации малоамплитудных сейсмических сигналов, связанных с собственными колебаниями объекта, и определения оптимальных параметров цифровой обработки сейсмограмм. Далее по набору данных, полученных в результате обработки сейсмических записей многолетнего мониторинга, и их ретроспективному анализу определяются закономерности в изменениях частот собственных колебаний в связи с воздействиями внешней среды, такими как изменение температуры, изменение уровня воды в периоды наполнения и сработки водохранилища, промерзание/оттаивание материалов конструкций и т.п. С учетом найденных закономерностей определяются аномальные изменения частот собственных колебаний сооружений и, как следствие, делаются выводы об изменении их технического состояния, возможных разрушительных процессах из-

за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п. [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

С использованием разработанной методики установлено, что частоты собственных колебаний первых семи мод плотины Саяно-Шушенской ГЭС на протяжении последних 20 лет непрерывно возрастают, при этом интегральный рост частот составляет 0.02–0.05 Гц (Рисунок 3.13) [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

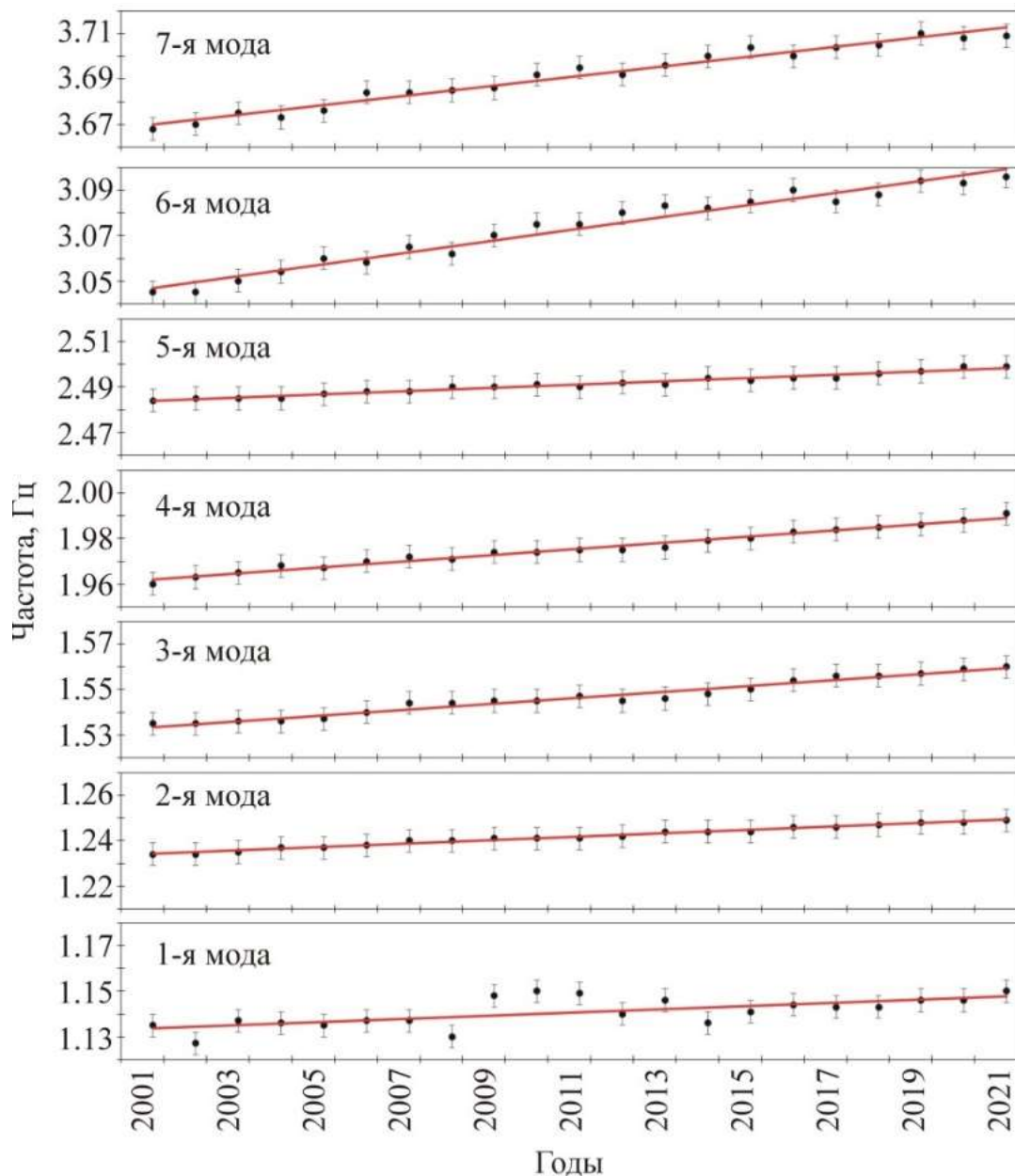


Рисунок 3.13 – Увеличение значения частот первых семи мод собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС при уровне воды в водохранилище 535 м за 20-летний период наблюдений в результате применения разработанной методики [Определение..., 2023]

Как уже отмечалось, появление трещин в модели сооружения приводит к понижению частот собственных колебаний [Hsu et al., 2020]. Следовательно, отсутствие фактического уменьшения частот дает основание сделать вывод, что целостность плотины из-за старения материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п. не нарушается. Фактическое увеличение частот объясняется или увеличением механической жесткости плотины, или длительным (десятилетиями) изменением граничных условий, продолжающимися и в настоящее время. В своем исследовании Н.А. Вульфович и Л.П. Потехин доказывают, что плотина Саяно-Шушенской ГЭС в последние годы эксплуатации (начиная с 2013 г.) перешла в так называемое «стабилизированное состояние», что, по данным геодезического мониторинга, проявляется в прекращении роста необратимых перемещений ее гребня [Vul'fovich, Potekhin, 2018]. Однако из анализа результатов мониторинга собственных колебаний плотины следует, что рост значений частот первых семи мод не прекращается и до настоящего времени, т.е. процесс, вызвавший этот рост, не стабилизируется.

В исследовании других ученых предполагается, что «адаптация плотины к своему основанию в случае плотины Саяно-Шушенской ГЭС продолжается, вместо ожидаемых нескольких лет, гораздо больший срок – 30 лет и более», а также «адаптационный процесс, вероятнее всего, обусловлен реологическими явлениями в бетоне плотины и основании» [Александров, Юсупов, 2018]. Отсюда следует вывод, что наблюдаемый рост значений частот собственных колебаний плотины связан с упомянутыми «адаптационными процессами». Однако этот рост не замедляется, а продолжается с одинаковым темпом за все 20 лет мониторинга (см. Рисунок 3.13).

Альтернативная версия причины упомянутого явления может быть также связана с заиливанием и накоплением наносов на дне водохранилища на участке, примыкающем к плотине, так как при этом неизбежно меняются граничные условия на контакте плотины и основания. Этот процесс идет непрерывно, что и вызывает медленное, но регулярное увеличение частот собственных колебаний из

года в год. Из публикаций неизвестно, проводились ли исследования по оценке роста мощности наносов именно вблизи плотины, однако некоторыми исследователями доказывается, что процессы разрушения берегов Саяно-Шушенского водохранилища идут непрерывно, а значит наносы вблизи плотины постоянно накапливаются [Кальная, 2014]. Какова бы ни была причина, такой продолжительный и не замедляющийся рост частот собственных колебаний плотины является показателем изменения технического состояния плотины необратимого характера, которое необходимо контролировать, чтобы предупредить ее разрушение [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

3.3. Реализация на примере оценки устойчивости отвалов угольных месторождений

Как известно, в настоящее время естественная сейсмичность на территории России определяется по результатам сейсмологических исследований Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) и учитывается при принятии различных решений федеральными и местными органами управления, опираясь на карты сейсмического районирования. Последние годы происходит значительное увеличение роли техногенной составляющей при наблюдениях за сейсмическими процессами в районах угольных разрезов, но кто должен следить за этими явлениями, какие системы наблюдений должны при этом использоваться, кто и какие действия должен предпринимать, получив данные по техногенной сейсмичности, на сегодня не определено [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

На угольных разрезах приборами сейсмологической сети станций регистрируется два типа сейсмических колебаний техногенного характера. Первый – это кратковременные колебания земной поверхности, возникающие при разработке крупных карьеров, весьма схожие с естественным землетрясением. Второй – регистрируемые сеймостанциями длительные и в какой-то мере

устойчивые во времени малоамплитудные колебания, как правило, характеризующиеся определенной частотой (или полосой частот) [Сейсмологические..., 2021; Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Если первый тип сейсмических колебаний как результат техногенного воздействия изучается (хотя и недостаточно) в Российской Федерации преимущественно по материалам сети временных сейсмологических станций (например, землетрясение с $M > 6$ в результате техногенного воздействия на Бачатском угольном разрезе [Еманов и др., 2020]), то второй тип исследован весьма слабо и для его изучения не разработано специальных систем наблюдения. В результате, лишь после аварии на объекте выясняются ее причины, оцениваются затраты на ее ликвидацию [What..., 2014; Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Результаты длительных сейсмических исследований [Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020] показывают, что сейсмический шум, зарегистрированный станциями, расположенными даже на значительном расстоянии от источника сейсмических сигналов (здания или инженерного сооружения), содержит богатую информацию об изменении его колебаний во времени, анализ которых дает сведения о техническом состоянии сооружений и работающих агрегатов (например, ГЭС). Как правило, большинство техногенных шумов удаленными сейсмостанциями регистрируется в составе сейсмического шума в виде малоамплитудных, длительных по времени колебаний, которые изменяются по известным законам как по интенсивности, так и по частоте. Записи таких сигналов накапливаются и хранятся [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Из публикации [Интервью..., 2020] известно, что 18 июля 2020 г., примерно в 21:15 местного времени, на северо-западном склоне Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита произошел оползень с предварительно оцененным объемом около 10% от массы отвала, причем деформация отвала

сопровождалась мощным селевым потоком. Это хорошо видно на видеозаписях, сделанных через несколько дней после происшествия (Рисунок 3.14) [<https://youtu.be/KhXGpzuzPCU>]. Создана комиссия по расследованию причины деформации, которая на сегодня не выяснена [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

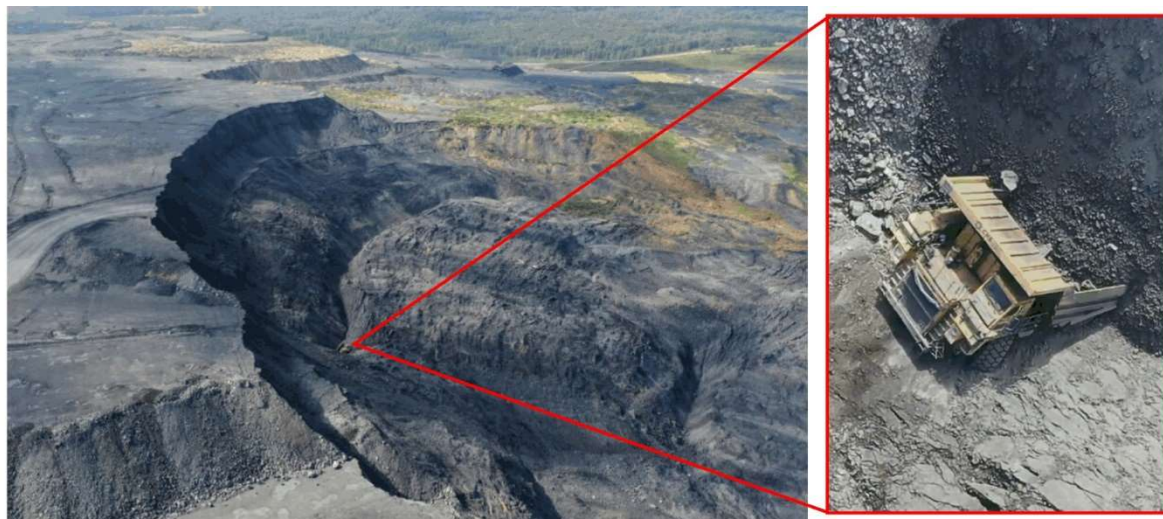


Рисунок 3.14 – Стоп-кадры видеосъемки Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза через несколько дней после оползня [<https://youtu.be/KhXGpzuzPCU>]

Фактический материал и способы исследования

Специалистами Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН по результатам анализа представительного материала постоянной сейсмологической сети из более

чем 50 сеймостанций оценивается сейсмичность в Алтае-Саянском регионе и прилегающих территориях как естественного, так и техногенного характера. Одна из станций, «Харино» (международный код K HAR, аппаратура CMG-3ESPC), находится приблизительно в семи километрах южнее Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита (Рисунок 3.15). Спектрально-временной анализ записей этой станции (с начала 2017 г), совместно с анализом снимков со спутника, доступных с 2002 по 2019 год (карты Google Earth), позволил разобраться в причине возникновения оползня [Сейсмологические..., 2021; Лисейкин и др. в статье «Определение устойчивости...», 2023].



Рисунок 3.15 – Схема сейсмологических наблюдений на карте угольных месторождений Новосибирской области [Карта..., 2020]

На снимке естественного ландшафта со спутника 2002 года (Рисунок 3.16) видно, что на месте будущего отвала в направлении на северо-восток прослеживается сезонный (весенне-осенний) водоток. К северо-западу от него виден еще один водоток, отделенный от первого водоразделом высотой 209-223 м над уровнем моря. На снимках 2013 и 2015 гг. (Рисунок 3.16) видно, что отвал препятствует естественному стоку воды, и его западная часть обводняется. Видно также, что в мае 2015 г. на месте временного водотока формируется запруда длиной

около 1 км, уровень воды в которой достигает, судя по снимку, около 220 м над уровнем моря, что тогда уже превышает среднюю высоту водораздела. На снимке 2019 г. (Рисунок 3.16) видно, что временный водоток уже полностью засыпан отвалами горных пород, из чего следует, что к 2020 г. обводненная часть отвала могла составлять первые десятки метров по высоте и около квадратного километра по площади. Из анализа снимков следует вывод, что прежде чем формировать отвал необходимо исследовать ландшафт предполагаемой площадки [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

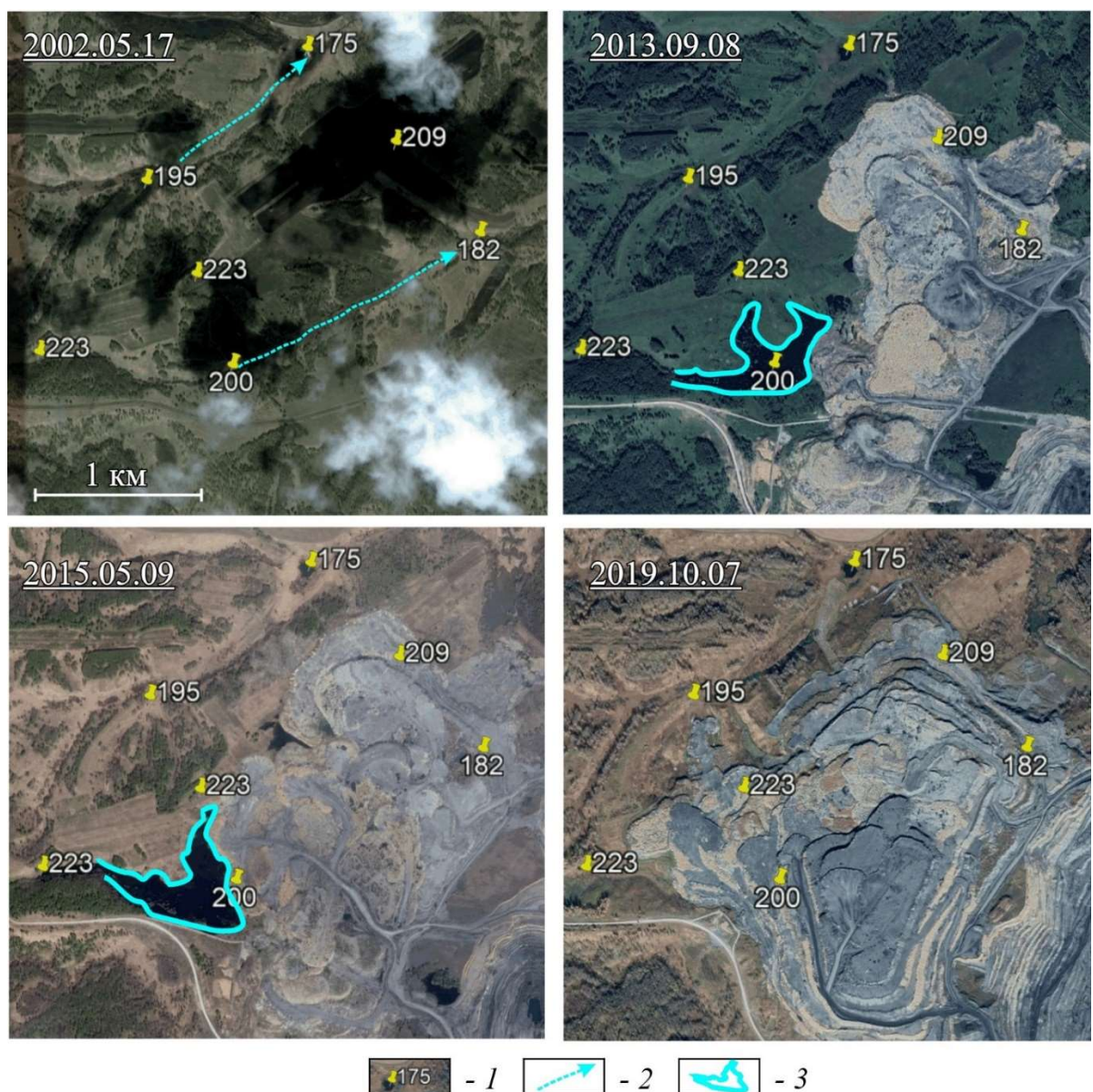


Рисунок 3.16 – Спутниковые снимки Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза [Google Earth Pro]. 1 – отметки высот нетронутой земной поверхности; 2 – направления сезонных (весенне-осенних) водотоков; 3 – границы запруды

В такой обстановке, чтобы начался оползень, достаточно лишь толчка. Однако на трехкомпонентных записях сейсмостанции «Харино» упругих колебаний, которые могли бы послужить таким толчком для деформации отвала, не зарегистрировано ни до, ни во время оползня, ни после его (Рисунок 3.17) [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

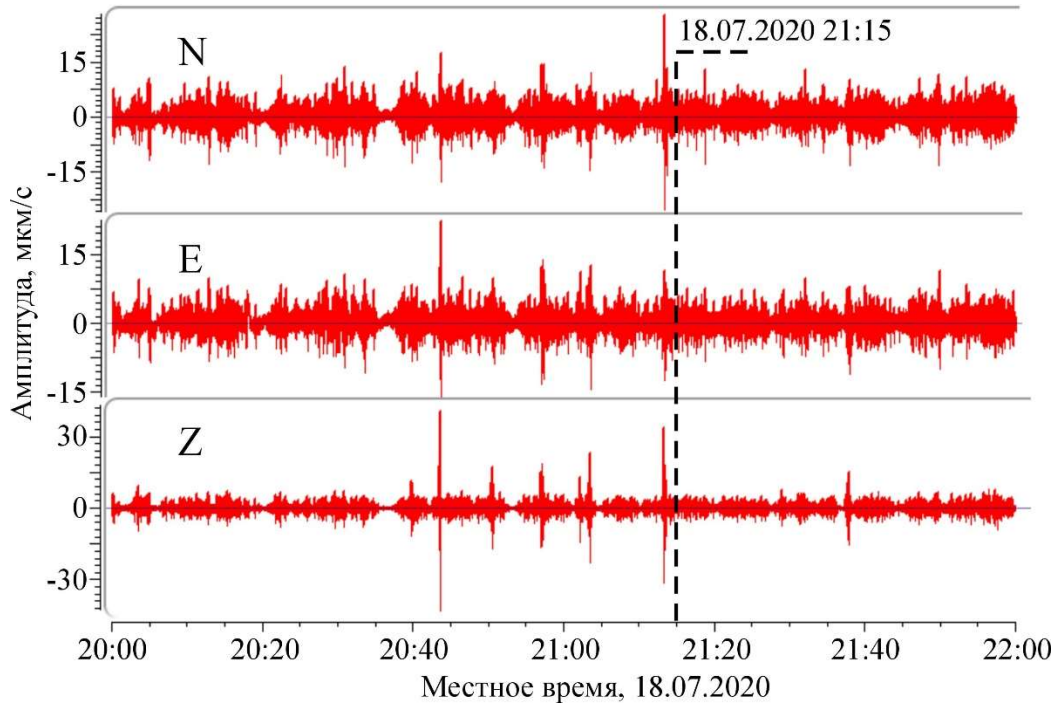


Рисунок 3.17 – Сейсмограмма зарегистрированных сигналов на сейсмостанции «Харино» перед и после деформации Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита

Как отмечалось выше, многолетний опыт исследований по спектрально-временному анализу сейсмического шума на сейсмологической сети станций показывает, что в спектрах содержится много полезной информации, характеризующей состояние источника колебаний, находящего на некотором удалении от сейсмостанции. Например, исследованиями [Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020] показано, что в сейсмическом шуме, зарегистрированном на расстоянии более чем 4 км от Саяно-Шушенской ГЭС, содержатся сигналы, источником которых являются как работающие гидроагрегаты, так и плотина, колеблющаяся на собственных частотах. Это дает основание предполагать, что и в сейсмическом шуме станции «Харино», оснащенной высокочувствительной сейсмологической аппаратурой, содержатся малоамплитудные сигналы, связанные с колебаниями

Елбашинского отвала, расположенного в 7 км от нее [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Чтобы определить эту связь, сначала на качественном уровне выполняется анализ изменений во времени амплитудно-частотных характеристик зарегистрированного сейсмического шума. Для этого строятся спектрограммы записей сейсмостанции (Рисунок 3.18). Обращают на себя внимание сигналы с частотой около 0.6 Гц, которые прослеживаются длительное время и непрерывно на трех компонентах записи и прерываются одновременно с оползнем. Это указывает на то, что они связаны с колебаниями отвала, физические параметры которого изменились после деформации [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

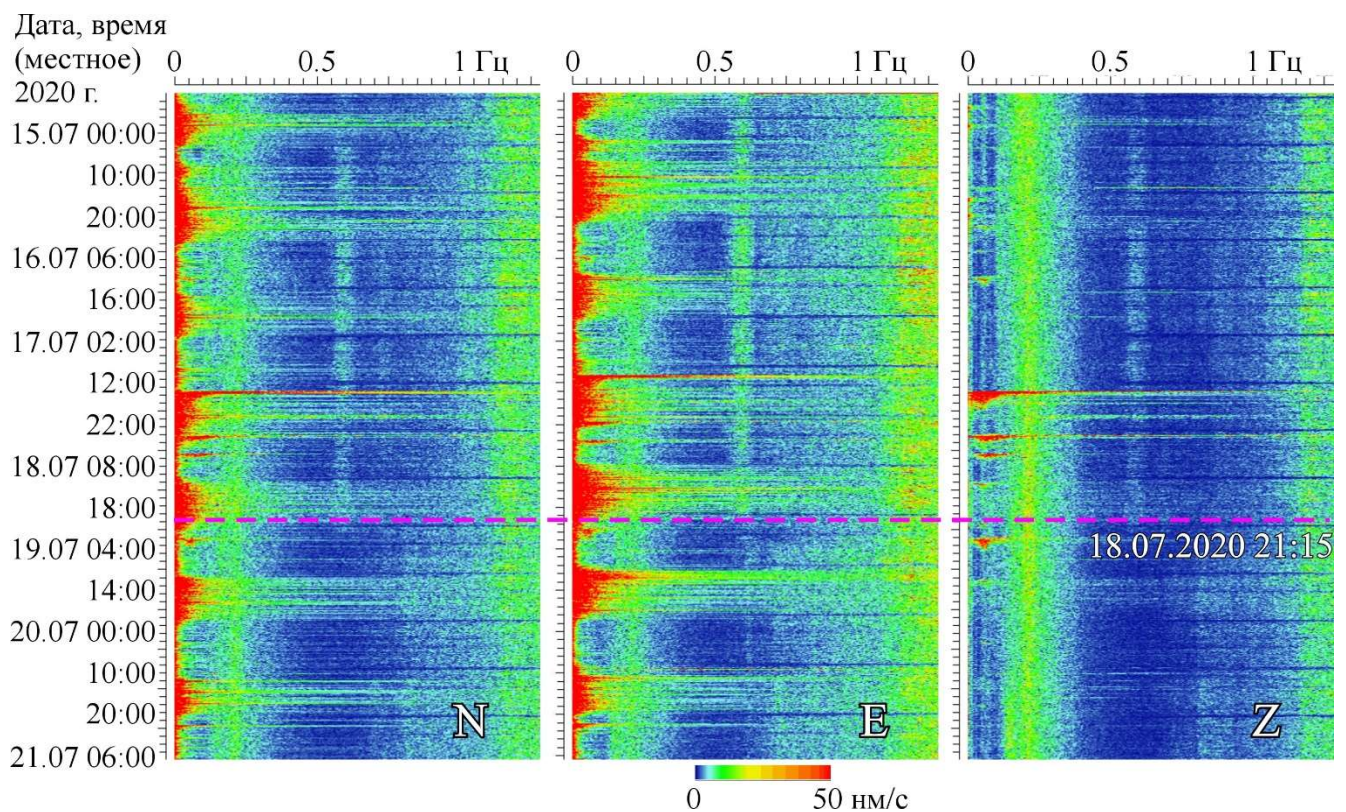


Рисунок 3.18 – Спектрограммы недельной регистрации сейсмического шума на станции «Харино» включающей периоды до и после оползня (его время отмечено пунктирной линией) [Сейсмологические..., 2021]

Известно, что в любом замкнутом объеме при распространении микросейсмических колебаний формируются стоячие волны с собственными частотами. По методике оценки значений частот М. Бата [Бат, 1980], частота 0.6 Гц

может быть собственной частотой Елбашинского отвала. Так, для отвала, имеющего горизонтальные размеры от 1.2 км до 1.8 км (значения по снимку со спутника 2019 года, см. Рисунок 3.16), при скорости продольных волн в горных породах 1400-1750 м/с (по результатам исследований Б.А. Канарейкина с коллегами [Первый..., 2022; Возможности сейсморазведки..., 2023]), первая собственная частота колебаний в горизонтальной плоскости, оцененная по формуле $f=V/2L$ (для объектов со свободными краями) составляет от 0.4 до 0.7 Гц. Наблюдаемые на спектрограммах сигналы с частотой 0.6 Гц не противоречат этой оценке. Таким образом, указанные сигналы интерпретируются как отклик от продольных колебаний отвала в горизонтальной плоскости, формирующих стоячую волну [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Возможность регистрации сейсмическими станциями, расположенными в нескольких километрах от крупных технических сооружений (например, плотины ГЭС) сигналов, источником которых является само сооружение, колеблющееся на собственных частотах, уже подтверждена результатами ряда исследований [например, Seleznev et al., 2014; Hsu et al., 2020]. Для выделения малоамплитудных сигналов используются современные способы обработки данных для повышения соотношения сигнал/помеха. Одна из функций, заложенная в программном обеспечении SpectrumSeism, предназначена для расчета усредненных амплитудных спектров в выбранном частотно-временном окне (см. Главу 1). В алгоритм их вычисления входит расчет наборов амплитудных спектров для заданных временных интервалов, на которые разделяется сейсмическая запись, с их последующим усреднением. Это позволяет по длинным во времени записям выделять из сейсмического шума техногенного характера квазигармонические сигналы с амплитудой на порядки ниже уровня помех [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

На фрагментах усредненных спектров (Рисунок 3.19), рассчитанных по сейсмическим записям с трех станций длительностью в 5 суток и охватывающих интервалы времен до и после оползня на Елбашинском отвале, видно, что после

описываемого события 18.07.2020 г. в 21:15 выделенные колебания с частотой около 0.6 Гц исчезают, что также позволяет относить их к собственным колебаниям отвала [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

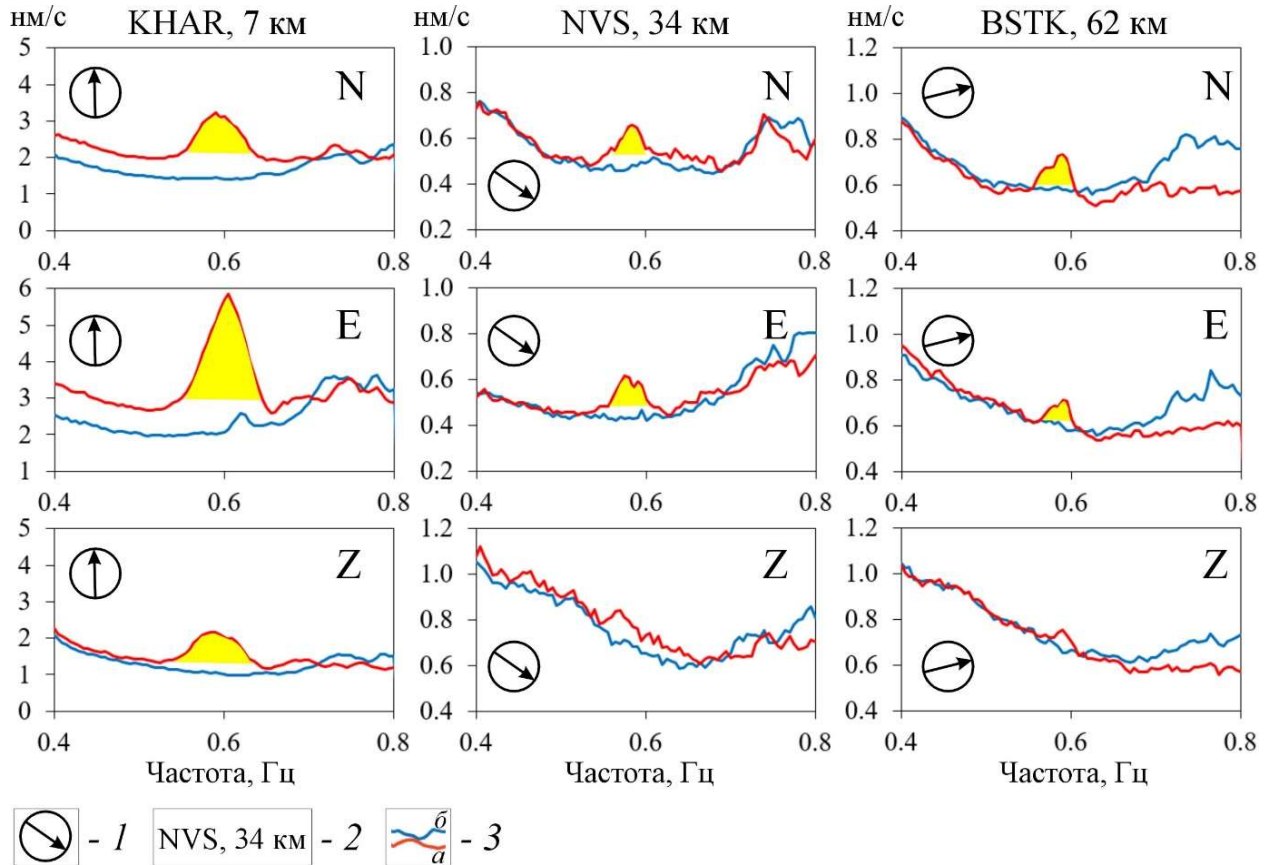


Рисунок 3.19 – Проявление в усредненных спектрах сейсмического шума станций малоамплитудных сигналов от колебаний Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита. 1 – направление на месторождение; 2 – код сеймостанции, расстояние до отвала; 3 – усредненные амплитудные спектры пятисуточных записей до (а) и после (б) оползня 18.07.2020 21:15.

Зарегистрированные на удаленных станциях сигналы объясняются распространением совокупности сейсмических волн (как поверхностных, так и объемных, разнополяризованных волн) от источника колебаний, которые интерферируют в точке регистрации. Разделить волны разного типа по амплитудным спектрам невозможно, однако, анализ амплитуд колебаний на различных компонентах позволяет сделать вывод, что преобладающая часть энергии колебаний переносится от источника в виде горизонтальных колебаний, поляризованных перпендикулярно направлению на источник. Это видно на

рисунке: на сейсмостанции «Харино» (KHAR), расположенной с юга от отвала, наибольшая энергия колебаний зарегистрирована на перпендикулярной (Е) компоненте, а на сейсмостанциях NVS и BSTK, расположенных с северо-запада и юго-запада соответственно, зарегистрированные амплитуды колебаний на горизонтальных N- и E-компонентах имеют близкие значения (см. Рисунок 3.19). Таким образом, описанный способ анализа амплитуд колебаний по спектрам записей сейсмического шума на сейсмостанциях сейсмологической сети может быть использован при оценке направления (приблизенно) на источник колебаний [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023]. Необходимо отметить, что аналогичный результат получили исследователи, анализирующие соотношение спектральных амплитуд сигналов от гидроагрегатов ГЭС на горизонтальных компонентах станций сейсмической группы НОРСАР (Норвегия) [Бунгум..., 1981].

Итак, из анализа зарегистрированных на сейсмостанции «Харино» сейсмограмм за 5 суток до описываемого события 18 июля 2020 г. следует, что колебания с частотой около 0.6 Гц – это собственные колебания Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита. На снимках со спутника (см. Рисунок 3.16) видно, что отвал формируется не менее восьми лет (с 2013 по 2020-й год), а значит, его собственные колебания регистрируются длительное время. При анализе архивных данных мониторинга сейсмического шума в период более чем четыре с половиной года – с 01.01.2017 по 31.07.2021 гг. [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023] (Рисунки 3.20-3.21) на множестве усредненных спектров (Рисунок 3.20) видны изменения фрагментов (в интервале частот 0.4-1.0 Гц) усредненных спектров десяти-, пяти- и односуточных сейсмических записей, а на графиках (Рисунок 3.21) – изменение значений частот колебаний отвала по усредненным амплитудным спектрам. Здесь и далее длина записи для вычисления каждого спектра составляет 200 с, что определяет высокую их разрешенность – 0.005 Гц. Как наиболее интенсивная по амплитуде анализируется Е-компонента сейсмической записи, а результат усреднения

соотносится с серединой соответствующего временного периода [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

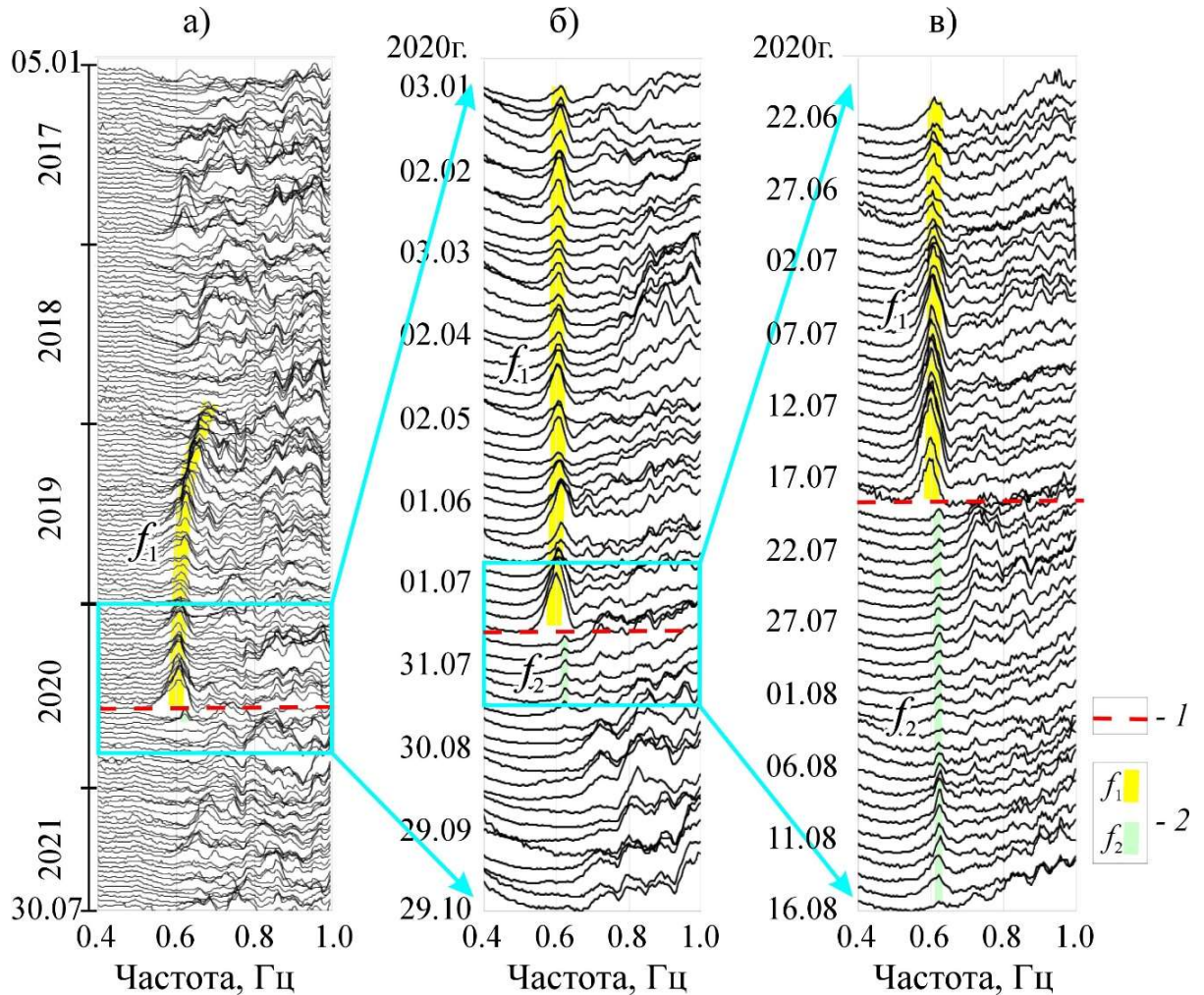


Рисунок 3.20 – Изменение колебаний Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита по Е-компоненте в рядах усредненных амплитудных спектров десяти- (а), пяти- (б) и односуточных (в) записей сейсмостанции «Харино». 1 – отметка времени оползня (18.07.2020 21:15); 2 – выделенные сигналы на собственной частоте отвала [Определение устойчивости..., 2023]

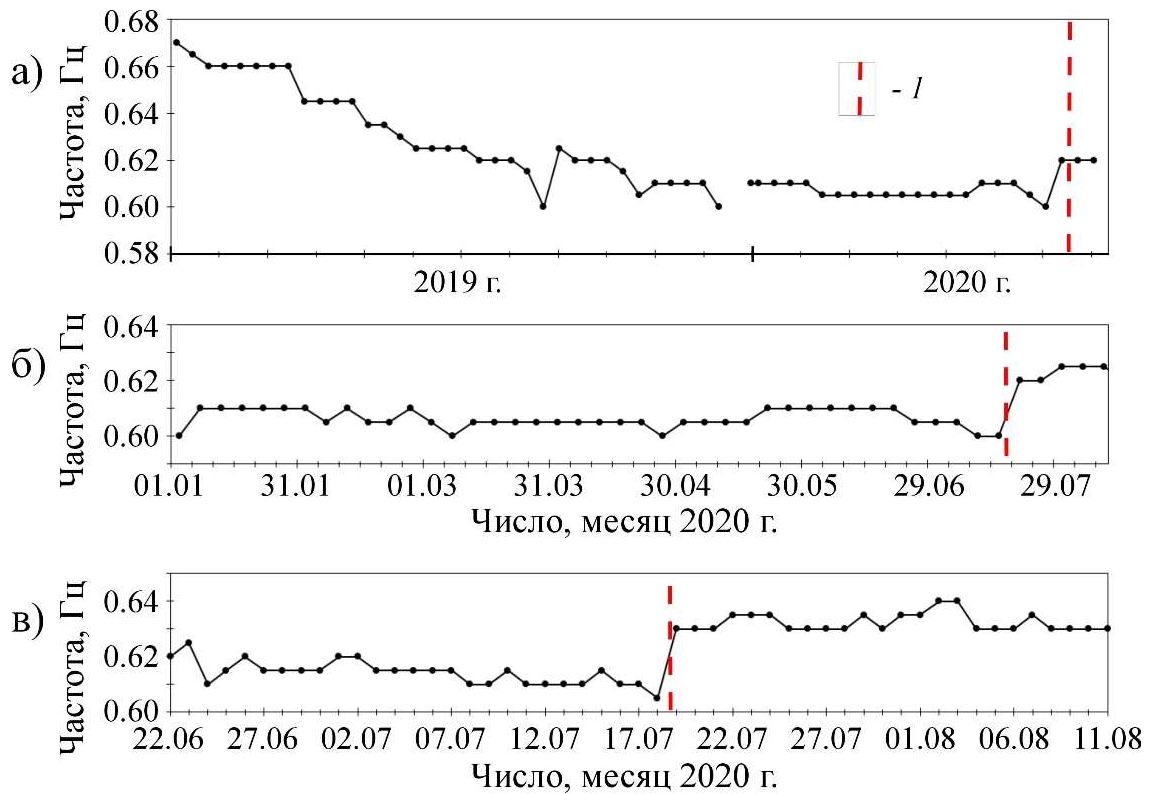


Рисунок 3.21 – Изменение частоты собственных колебаний Елбашинского отвала Колыванского месторождения антрацита по усредненным амплитудным спектрам десяти- (а), пяти- (б) и односуточных (в) записей сейсмостанции «Харино» (см. Рисунок 3.20). 1 – отметка времени оползня (18.07.2020 21:15) [Определение устойчивости..., 2023]

На множестве усредненных спектров периода наблюдений с 2017 по 2021 год (см. Рисунок 3.20) видно, что лишь с конца 2018 г. и до деформации отвала в июле 2020 г. отмечаются сигналы (f_1) с изменяющимися в пределах 0.60-0.67 Гц частотами, которые не фиксируются на записях после оползня. Также во времени отмечается плавное и монотонное уменьшение частоты колебаний (Рисунки 3.20а, 3.21а). Из анализа усредненных спектров пятисуточных записей и соответствующих им частот за более короткий период (Рисунки 3.20б, 3.21б) следует, что с начала 2020 г. и до момента оползня сигналы f_1 отмечаются на частотах 0.60-0.61 Гц, затем амплитуда колебаний уменьшается в несколько раз, а частота повышается до 0.620-0.625 Гц (сигналы f_2). После 30.08.2020 сигналы f_2 на записях становятся неразличимы на фоне помех, что указывает на значительное (более двух порядков) снижение значений их амплитуд. Для детального анализа изменения характеристик исследуемых сигналов строятся наборы усредненных

спектров за односуточные интервалы записей и определяются частоты колебаний (Рисунки 3.20в, 3.21в) [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

На графиках видно, что примерно за 20 дней до деформации отвала происходит постепенный рост амплитуд колебаний сигналов f_2 , а за 2 дня до оползня – их снижение (см. Рисунок 3.20). После оползня амплитуда колебаний сигналов f_2 примерно в 5-6 раз ниже амплитуды колебаний сигналов f_1 , наблюдаемых до деформации отвала. Итак, из анализа архивных данных мониторинга сейсмического шума следует, что собственные колебания Елабашинского отвала зарегистрированы в период с конца 2018 г. по август 2020 г., причем во времени характеристики колебаний (частота и амплитуда) менялись, что говорит об изменениях физических свойств отвала, прежде всего таких как размеры и масса [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Полученные результаты

Процессы, происходящие на Елабашинском отвале до и после его деформации, по результатам анализа данных мониторинга сейсмического шума в его окрестности, а также снимков со спутника и видеозаписей после происшествия, объясняются следующим [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

На стоп-кадрах видеосъемки последствий оползня (см. Рисунок 3.14) видно, что он распространяется подобно селевому потоку на расстояние, существенно превышающее высоту отвала. Такое происходит только при его значительном обводнении. Как видно на снимках со спутника (см. Рисунок 3.16), уровень воды в образовавшейся при отсыпке отвала запруде выше основания отвала на несколько десятков метров (около 30 м, если принимать средние высоты основания отвала и запруды соответственно 190 и 220 м от уровня моря). При площади отвала более чем 2 км², объем находящейся в нем воды составит не менее 6 млн. м³ (при среднем водонасыщении 10 %) [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Обводнение отвала – предполагаемая причина его неустойчивости. Из-за насыщения водой происходит размягчение грунта в его нижней части. Как следствие, изменяются граничные условия на контакте отвала с грунтом, а сам он становится более податливым к раскачиванию под воздействием окружающих микросейсмических колебаний. В таких условиях в теле отвала формируется стоячая волна, которая выражается в многомесячных колебаниях с частотой 0.60-0.67 Гц, регистрирующихся с конца 2018 г., характеристики которых меняются как в процессе формирования отвала, так и после его деформации. Очевидно, что обводнение отвала происходит постепенно и не сразу он теряет устойчивость – это объясняет то, что с 2017 г. по конец 2018 г. описанные сигналы не регистрируются [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Полная картина процессов, происходящих начиная с 2019 г., следующая. Отсыпка горных пород ведет к постепенному росту массы и размеров отвала. Это выражается в монотонном уменьшении на записях частоты колебаний сигналов f_1 с 0.67 Гц до 0.60-0.61 Гц. В результате оползня уменьшаются масса отвала и его геометрические размеры, как следствие – увеличивается собственная частота на величину около 3 % (см. Рисунки 3.20, 3.21). В таком же процентном отношении должна уменьшиться масса отвала, если пренебречь изменениями его размеров. После деформации огромные массы воды разрушают тело отвала и вместе с породой вытекают из него. Осушение приводит к увеличению устойчивости отвала, что проявляется в резком уменьшении амплитуд собственных колебаний. Несомненно, уже после оползня, какая-то часть воды постепенно продолжает выходить из отвала. Это выражается в том, что амплитуда сигналов f_2 постепенно снижается и примерно через месяц после события они уже не отмечаются на сейсмограммах [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Результаты анализа данных мониторинга сейсмического шума на станции «Харино» в течение полутора лет после оползня (см. Рисунок 3.20а) показывают, что формирующиеся в отвале собственные колебания по амплитуде уменьшились

на более чем 2 порядка по сравнению с ситуацией до деформации, что говорит о высокой степени его устойчивости в указанный период времени [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Таким образом из анализа записей упругих колебаний с 2017 по 2021 год сейсмостанции «Харино» сейсмологической сети станций Алтае-Саянского региона и снимков со спутника с 2002 по 2019 год следует, что обводнение отвала – основная причина его неустойчивости. А что же служит спусковым крючком для развития оползня? Какие явления способствуют его возникновению? Как было отмечено, в результате анализа записей сейсмологической сети станций, окружающих месторождение, не выявлено сейсмических воздействий, которые могли бы спровоцировать сход оползня. Результаты исследования говорят о том, что деформация отвала происходила по сценарию «последней капли» [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

Итак, из анализа данных сейсмического мониторинга, снимков со спутника и видеозаписей следует, что причиной неустойчивости Елбашинского отвала Колыванского угольного разреза является обводнение. Из-за насыщения водой происходит размягчение грунта в нижней части отвала, меняются граничные условия на контакте отвала с грунтом, а сам он становится более податливым к раскачиванию под воздействием окружающих микросейсмических колебаний. Это проявляется в формировании собственных колебаний отвала, отклик от которых регистрируется в виде малоамплитудных колебаний в сейсмическом шуме сейсмостанции «Харино», находящейся в 7 км на юг от отвала. Возможно, что собственные колебания отвала спровоцировали оползень, так как сейсмических воздействий перед оползнем по материалам сейсмологической сети станций в окрестностях Колыванского месторождения антрацита не зарегистрировано. Результаты исследования позволяют теперь ставить целенаправленно задачи по анализу зарегистрированных сейсмических шумов на аналогичных объектах, выделению их собственных колебаний и по изменениям амплитудно-частотных характеристик последних прогнозировать (а значит предотвращать) разрушения,

зачастую с человеческими жертвами, дорогостоящих технических сооружений, таких как отвалы угольных разрезов, плотины ГЭС, здания и сооружения крупных промышленных объектов и других подобных объектов [Лисейкин и др. в статье: «Определение устойчивости...», 2023].

3.4. Полученные результаты

По материалам многолетнего (более 20 лет) мониторинга сейсмического шума разработана методика дистанционного определения по малоамплитудным сигналам изменения частоты собственных колебаний зданий и сооружений (на примере плотин Саяно-Шушенской и Чиркейской ГЭС) как индикатора начавшегося разрушения их конструкции и/или основания, опубликованная в работе А.В. Лисейкина с соавторами [Определение..., 2023]. Методика включает следующие шаги:

1. По данным метода стоячих волн определяются моды и частоты собственных колебаний сооружения на дату и время регистрации сигналов.

2. По результатам спектрального анализа сейсмического шума, зарегистрированного в ряде точек на сооружении (но не в узлах стоячих волн), доказывається, что по локальным максимумам амплитудных спектров можно определить регулярные (например, ежедневные) частоты его собственных колебаний.

3. С использованием оконного преобразования Фурье, при разном временном окне, рассчитываются усредненные амплитудные спектры зарегистрированного (п. 2) сейсмического шума.

4. При сопоставления полученных спектров (п. 3) находится минимальный размер временного окна для последующего расчета спектров, при котором их разрешенность достаточна для определения с необходимой точностью частот собственных колебаний сооружения.

5. По зарегистрированному сейсмическому шуму на удаленной в несколько километров от объекта исследования сейсмостанции рассчитываются усредненные

амплитудные спектры с заданным (в п. 4) размером окна и от разной общей длины записи (и, соответственно, разного количества усреднений).

6. При сопоставлении полученных спектров (в п. 5) подбирается длина записи, необходимая для расчета устойчивого усредненного амплитудного спектра.

7. С использованием преобразования Фурье рассчитываются усредненные амплитудные спектры сейсмического шума, одновременно зарегистрированного на объекте исследования и на удаленной сейсмической станции с установленными в пп. 4, 6 параметрами. При этом из сейсмограмм устраняются высокоамплитудные помехи, искажающие спектры.

8. Результатом сопоставления полученных спектров (п. 7) доказываем, что частоты локальных максимумов усредненного амплитудного спектра сейсмического шума, зарегистрированного на удаленной от сооружения сеймостанции, являются частотами собственных колебаний сооружения. При этом делается вывод, по какой компоненте (или совокупности компонент) сейсмограммы частоты определяются с большей надежностью.

9. По материалам многолетнего мониторинга колебаний в виде непрерывных цифровых записей сейсмического шума, предварительно очищенного от высокоамплитудных помех, рассчитываются усредненные спектры с установленными в пп. 4, 6, 8 параметрами по локальным максимумам которых определяются регулярные частоты собственных колебаний сооружения.

10. Проводится анализ закономерности изменения частот (п. 9) за период безаварийной эксплуатации сооружения в связи с воздействием внешней среды (преимущественно сезонного характера, таких как изменение температуры, промерзание/оттаивание конструкций, изменение уровня воды в водохранилище и т.п.). В результате чего устанавливаются статистически значимые пределы нормальных значений частот собственных колебаний этого сооружения.

11. По поступающим новым данным мониторинга выявляется начавшаяся деградация сооружения и/или его основания (предположительно, из-за старения

материалов конструкций, образования трещин, ослабленных зон и т.п.) по аномальным значениям частот собственных колебаний сооружения с учетом воздействия внешней среды (п. 10).

Результаты спектрального анализа данных многолетнего мониторинга показывают, что разрушительные процессы при эксплуатации технических сооружений контролируются с использованием разработанной методики, мало затратной при реализации, простой в использовании, которая основывается на выделении и интерпретации малоамплитудных сейсмических сигналов от собственных колебаний объектов, регистрируемых станциями сейсмологической сети на расстоянии до несколько километров. Ее преимущество по сравнению с известными решениями заключается в возможности регулярного определения частот собственных колебаний различных важных объектов (плотины ГЭС, мосты, гражданские здания и др.), не оснащенных сейсмометрической аппаратурой, как в течение длительного времени, измеряемого годами и десятилетиями, так и в режиме, близком к реальному времени. Методика малозатратна по сравнению с решениями, основанными на специальной регистрации колебаний непосредственно на объектах исследования. Используется представительный материал, а именно накопленные многолетние данные мониторинга в виде непрерывных цифровых записей сейсмического шума, зарегистрированных сеймостанциями как побочный продукт одновременно с записями колебаний от землетрясений [Лисейкин, Селезнев, 2024].

Результаты исследования на примере мониторинга частот собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС убедительно доказывают, что эпизодическое их определение (что неизбежно при использовании дорогостоящих и затратных методик) дает неполную информацию об изменении частот. В частности, не определяется их изменение в связи с воздействием на сооружение внешней среды, а его неучет приводит к значительным ошибкам в контроле технического состояния сооружений.

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

В дальнейшем предполагается развитие этой методики в части как поиска более совершенных подходов к обработке данных, повышающих качество анализа малоамплитудных сигналов, так и исследования других факторов на изменение частот собственных колебаний других объектов, в окрестности которых расположены станции сейсмологической сети [Лисейкин и др., в статье: «Определение частот...», 2023].

Глава 4. ПОСТРОЕНИЕ РАЗРЕЗОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ВСЮ МОЩНОСТЬ ПО МАЛОАМПЛИТУДНЫМ СИГНАЛАМ ОТРАЖЕННЫХ ВОЛН РЕЧНОЙ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ МЕТОДОМ ОГТ

4.1. Аналитический обзор современных разработок: достоинства и недостатки

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 [Глубинное..., 2021]. 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 [Пузырев, 1997], однако на сегодня объем финансирования этих за пределами дорогих исследований значительно сокращен. Наиболее полная информация о разрезах земной коры территории России в систематизированном виде содержится в Атласе опорных геолого-геофизических профилей [Атлас..., 2013]. Вместе с тем, территории протяженностью в сотни километров остаются не исследованными методами глубинного сейсмического зондирования. В последние 2-3 десятка лет развивается метод глубинного ОГТ, заимствованный из традиционной сейсморазведки на нефть и газ и отличающийся увеличенной мощностью источника возбуждения упругих волн и увеличенными расстояниями источник-приемник, а также рядом специальных методических приемов для обработки материалов [Берзин, Павленкова, 2001; Выявление..., 2007; Глубинное..., 2018].

Такие исследования проводятся в составе комплексных геофизических работ вдоль опорных профилей (2-ДВ, 3-ДВ, 1-СБ и др.), однако из-за их высокой стоимости в последние годы объем таких работ тоже значительно сокращен. Одним из рациональных путей построения разрезов средней и нижней частей земной коры, несомненно, является переобработка архивных материалов речной сейсморазведки методом общей глубинной точки с использованием сейсмограмм увеличенной длительности на примере рек Лена, Витим, Нижняя Тунгуска в Восточной Сибири [Методика..., 2022; Возможности речной..., 2023].

Специалистами ФИЦ ЕГС РАН около двух десятков лет совершенствуется технология речной сейсморазведки методом ОГТ 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» [Пневматический..., 2000; Бадиков, Гуленко, 2009], 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 Ангара-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 [Мосягин, Ефимов, 2021].

Специалисты ФИЦ ЕГС РАН начали выполнять морские сейсморазведочные работы с 1983 г. в Черном море на научно-исследовательском судне «Евпатория» водоизмещением 3050 тонн [Фильтрогенные..., 1990]. В 1994-1995 гг. возникла

необходимость проведения аналогичных исследований на Телецком озере, где самым большим судном была самоходная баржа водоизмещением лишь 30 тонн [The structure..., 1995; Structure..., 1996]. Сотрудникам ФИЦ ЕГС РАН пришлось полностью модернизировать регистрирующую и возбуждающую части сейсмической аппаратуры. Это позволило в дальнейшем реализовать сейсморазведочные работы методом ОГТ на реках Сибири (Лена, Витим, Енисей, Нижняя Тунгуска, Обь, Вах) [Детальная..., 2002; Сейсмические..., 2004; Детальные..., 2006; Речная..., 2007; Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. 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») [Детальная..., 2002; Бадиков, Гуленко, 2009]. Опыт применения регистрирующей аппаратуры на р. Лена в Восточной Сибири (2006-2007 гг.) 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 [Рыбушкин, Терешкин, 2021], которые устанавливаются вдоль речного профиля на берегу реки, а запись сигналов осуществляется в непрерывном режиме [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022]. При этом используются высокочувствительные (80 В/(м/с))

сейсмоприемники GS-One (производства ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия», г. Уфа) 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 оказалась на 2-3 порядка ниже, чем при регистрации на дне реки [Мосягин, Ефимов, 2021].

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, 2022]. 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 км [Лисейкин, Селезнев, 2021].

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 [Глубинное..., 1991]. Следовательно, ожидается, что при использовании сейсмограмм с большим временем регистрации отраженных волн можно без существенных затрат строить сейсмические разрезы средней и нижней частей земной коры на участках отработки речных сейсморазведочных профилей [Лисейкин, Селезнев, 2021].

Однако при использовании источника возбуждения упругих волн, предназначенного для получения сечения только верхней части земной коры, амплитуда волн, отраженных от границ средней и нижней ее частей, несомненно, будет ниже, а значит корректность построения сейсмических разрезов по таким материалам остается под вопросом [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. Кроме этого, использование сейсморазведочной системы наблюдения с максимальными удалениями источник-приемник в несколько километров, затруднит проведение скоростного анализа отраженных волн в методе ОГТ, т.к. глубина до границ в средней и нижней частях земной коры будет значительно больше таких удалений. В этом случае лучи отраженных волн будут близвертикальными, а значит такой подход не дает информации о распределении скорости сейсмических волн в изучаемой среде, а также не учитываются в должной мере искажающие эффекты, обусловленные трехмерностью и криволинейностью границ.

Тем не менее, есть положительный опыт использования близвертикальных отраженных волн при плотных системах профильных наблюдений с многократными перекрытиями для детального изучения разреза кристаллической литосферы [Barazangi, Braun, 1986; Moony, 1989]. Этот подход, заимствованный из сейсморазведки на нефть и газ методом ОГТ в осадочных бассейнах, позволил получить принципиально новые, большой геологической значимости сведения об особенностях геометрической структуры литосферы. Следовательно, ожидается, что и при использовании сейсмограмм речной сейсморазведки методом ОГТ

увеличенной длительности можно построить сейсмические разрезы также для более глубоких частей земной коры.

В результате проведения экспериментальных полевых работ вдоль русла рек Лена, Витим и Нижняя Тунгуска, на профилях общей длиной около 2700 км (Рисунок 4.1), получен и хранится в архивах значительный объем цифровых сейсмических данных: непрерывные записи сейсмического шума, включающего сигналы от пневмоисточников с интервалом между воздействиями 20-25 с. Далее, на примере 60-километрового участка профиля, расположенного в нижнем течении р. Лена и выполненного методом речной сейсморазведки ОГТ, обосновывается возможность использования полученных материалов и разрабатывается методика определения структуры земной коры на всю глубину, включая поверхность Мохоровичича [Лисейкин, Селезнев, 2021].

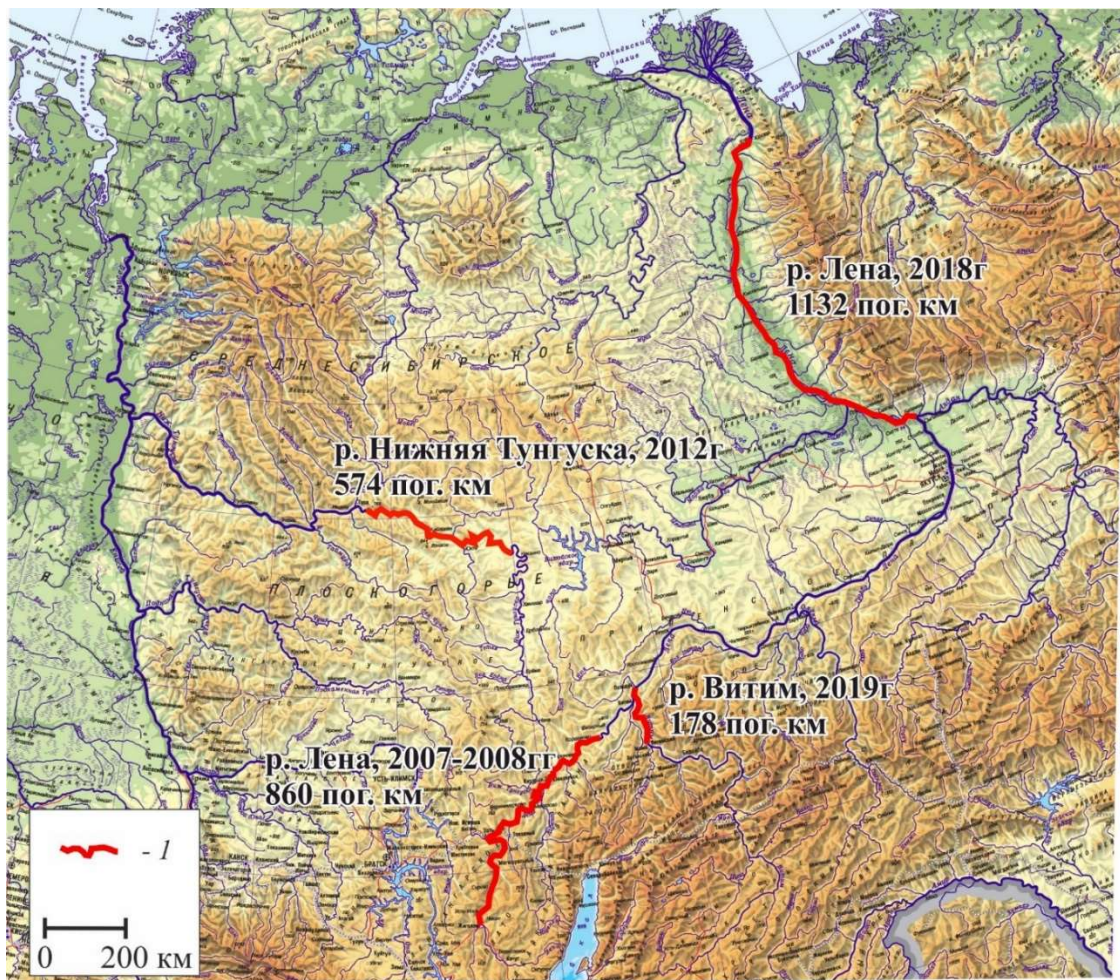


Рисунок 4.1 – Схема профилей речной сейсморазведки методом ОГТ (1), по которым имеются архивные данные с возможностью их переинтерпретации для изучения строения земной коры на всю мощность [Лисейкин, Селезнев, 2021]

3.2. Разработка методики по материалам сейсморазведки на р. Лена

3.2.1. Постановка задачи

Экспериментальной базой исследования являются наборы непрерывных сейсмических записей, полученных автономными регистраторами «Байкал-7», расставленными по берегу реки (Рисунок 4.2) [Лисейкин, Селезнев, 2021]. Полевые сейсмические работы в нижнем течении р. Лена заказаны АО «Иркутскгеофизика» и в 2018 году были выполнены силами ООО НППГА «Луч» с привлечением сотрудников ФИЦ ЕГС РАН. Источники возбуждения – группа из 10-ти пневмоисточников типа «Малыш», суммарный ее объем – 15 л, давление сжатого воздуха 140-150 атм. Основные параметры системы наблюдения представлены в Таблице 4.1. Как отмечалось, для разработки и апробирования методики выбран 60-километровый участок профиля, расположенный в нижнем течении р. Лена (Рисунок 4.2а) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

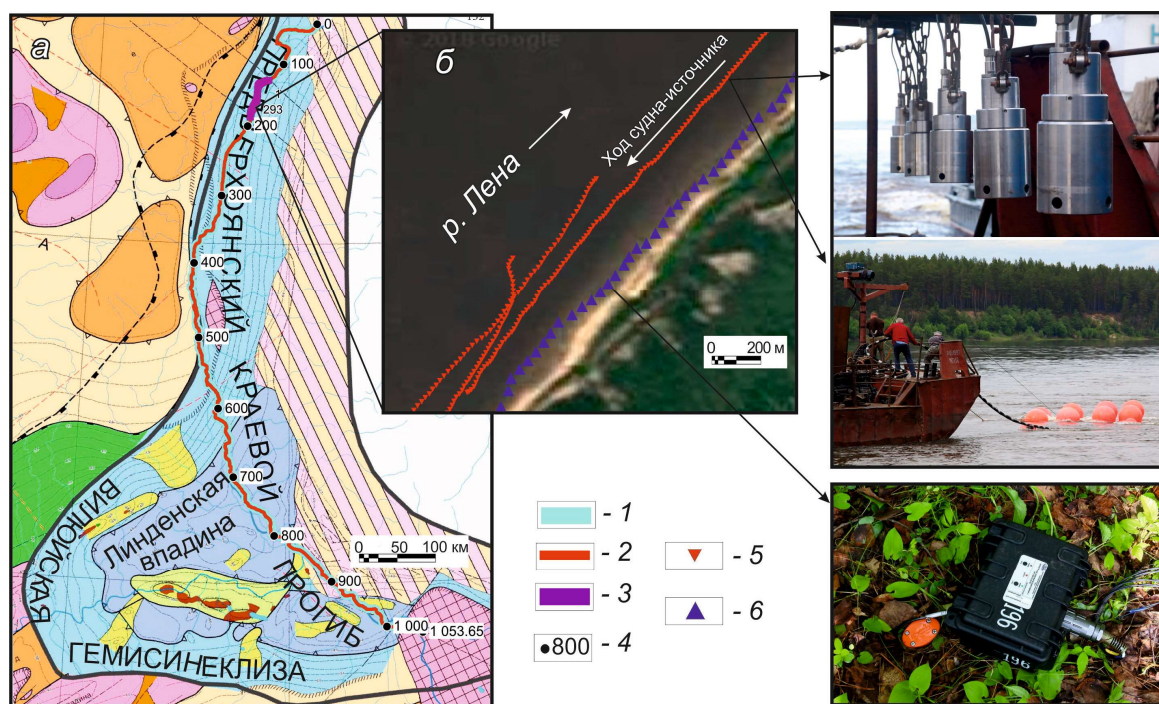


Рисунок 4.2 – Схема отработки речного сейсморазведочного профиля на р. Лена в 2018 г. (а) – профиль на структурно-тектонической карте, составленной в АО «СНИИГГиМС» (<http://www.sniiggims.ru/maps/strtect.html>), (б) – детальная схема отработки на основе спутникового снимка (<https://www.google.ru/maps/>). 1 – линия приема; 2 – линия источников; 3 – анализируемый участок профиля; 4 – отметки расстояния по региональному профилю, в км; 5 – пневмоисточники типа «Малыш»; 6 – пункты приема (регистраторы типа «Байкал»)

Таблица 4.1 – Основные параметры сейсморазведочных исследований на р. Лена, выполненных в 2018 г.

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

Разработанная специалистами сибирских филиалов ФИЦ ЕГС РАН методика речных сейсморазведочных исследований на примере работ по р. Лена предусматривает использование автономных регистраторов, 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 заключается 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 их 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 [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

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, А.В. Лисейкиным с соавторами разработано специальное программное обеспечение [SSlicer, 2022] (Рисунок 4.3) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. Назначение программы – монтаж сейсморазведочных сейсмограмм из непрерывных записей регистраторов «Байкал» (во внутреннем формате «Байкал-10») с использованием заданных таблично времен сейсмических воздействий и конфигурации системы наблюдения; сохранение результата в виде стандартной сейсморазведочной сейсмограммы в формате SEG-Y.

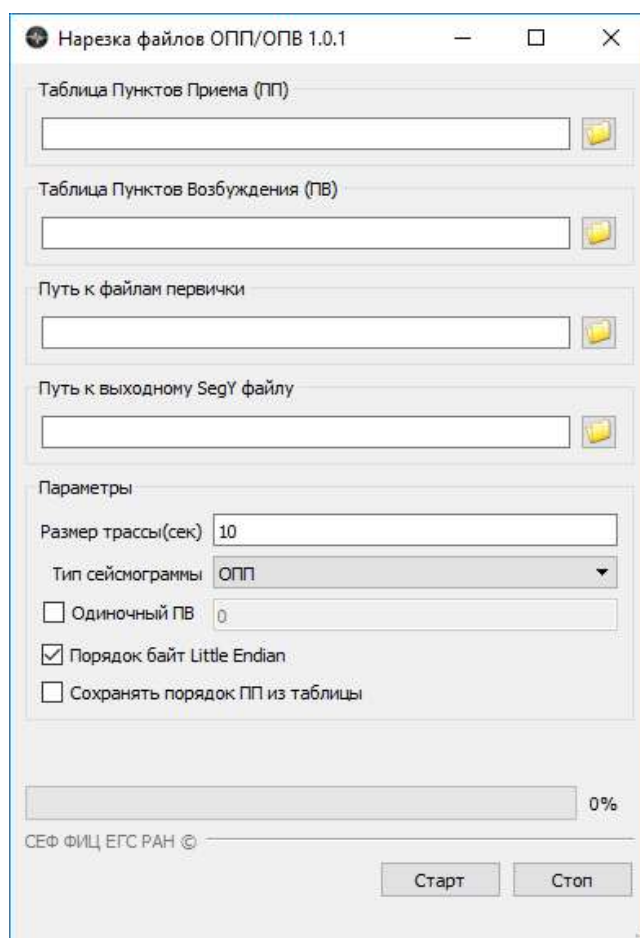


Рисунок 4.3 – Главное окно программы «SSlicer»

Алгоритм действий обработчика первичных материалов, реализованный в разработанном программном обеспечении SSlicer, состоит в следующем (Рисунок 4.4). 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 вместе с первичными записями сейсмических сигналов, представленными во внутреннем формате регистраторов «Байкал» и включающие серии сигналов от пневмоисточников. Также задается длительность формируемой сейсмограммы. На выходе программного обеспечения обработчик получает сейсмограммы общего пункта приема в традиционном формате SEG-Y (Рисунок 4.4 внизу).

Длина записи на результирующей сейсмограмме определена геологическим заданием исходя из глубинности исследований и составляла, в этом примере, 6 с. Кроме этого, геологическим заданием были ограничены и максимальные расстояния между источниками и приемниками до 8000 м. Подобные сейсмограммы, ограниченные временем регистрации и максимальным расстоянием, являлись результатом полевых сейсморазведочных работ и именно в таком виде сдавались заказчику. Исходные же непрерывные записи до настоящего времени не использовались в обработке, однако были сохранены в цифровых архивах и находятся в Сейсмологическом филиале ФИЦ ЕГС РАН. Таким образом, существует техническая возможность формировать сейсмограммы с большими удалениями источник-приемник и большей длительности, вплоть до интервала между воздействиями, который для исследуемого участка профиля составлял 23 с. Это даст возможность строить временные разрезы с существенно большей глубиной по сравнению с разрезами, получаемыми стандартной сейсморазведкой методом ОГТ [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

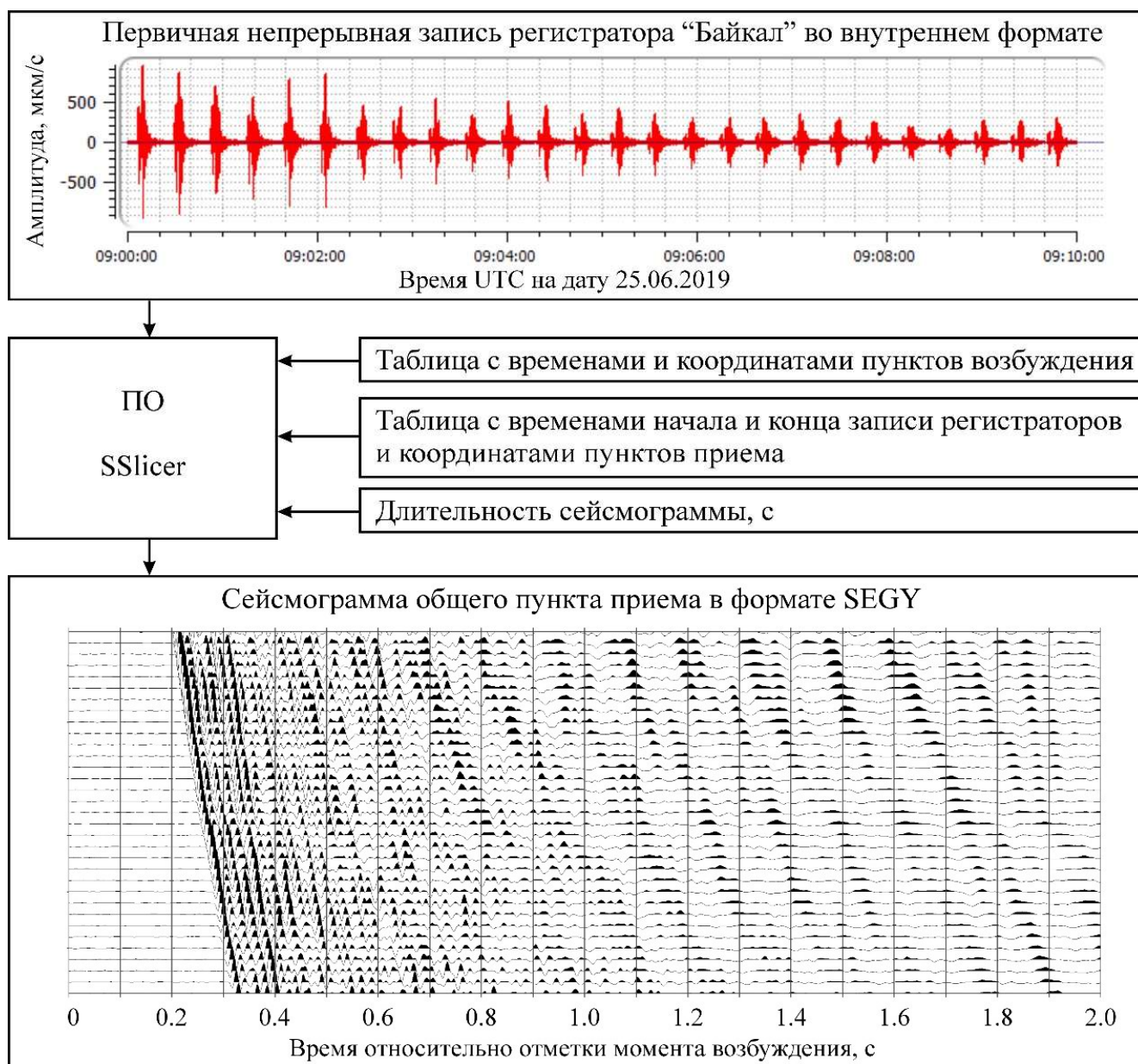


Рисунок 4.4 – Схема действий обработчика материалов с использованием программного обеспечения SSlicer для формирования сейсмограмм общего пункта приема из непрерывных сейсмических записей регистратора «Байкал»

Из анализа изученности района исследований методом глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) [Атлас ..., 2013] следует, что речной сейсморазведочный профиль не пересекается профилями ГСЗ, проходящими на расстояниях в 30-70 км с севера и с юга. Как пример, на Рисунке 4.5 представлен фрагмент временного разреза, полученного при производстве речных сейсморазведочных работ методом ОГТ. Здесь и далее начальная и конечная точки 60-километрового профиля соответствуют 130 и 190 км регионального профиля

(см. Рисунок 4.2). Видно, что разрез освещает лишь самую верхнюю часть земной коры до времен 1-3 с., в то же время глубинное строение (на всю мощность земной коры) указанного участка Предверхоянского прогиба ранее не было изучено [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

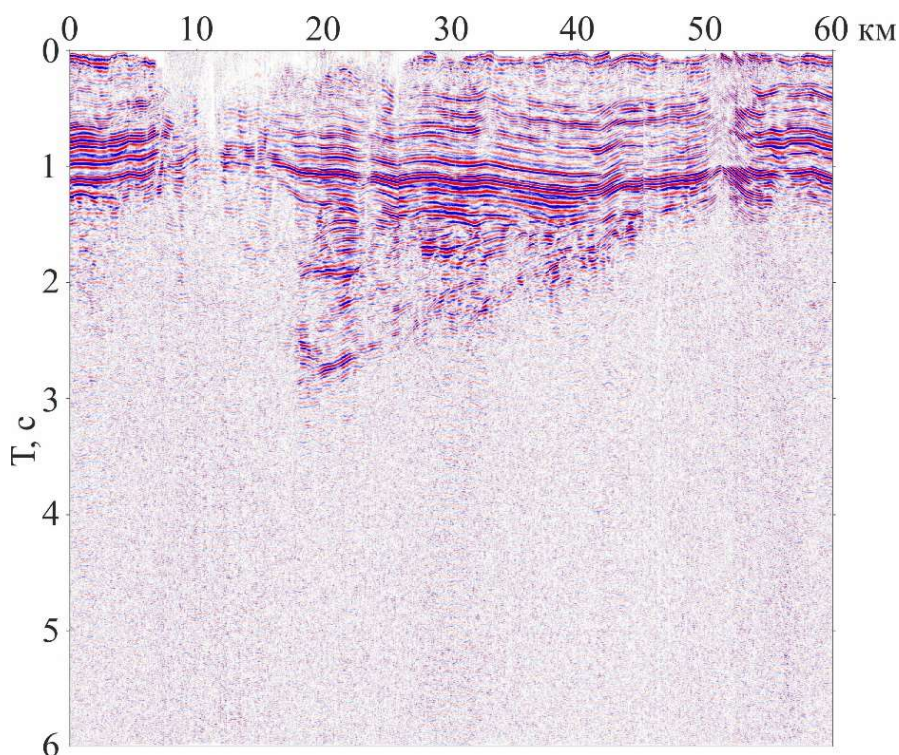


Рисунок 4.5 – Фрагмент временного разреза при экспресс-обработке материалов региональной речной сейсморазведки методом ОГТ на р. Лена в 2018 г. [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]

Из-за отсутствия сведений о строении земной коры на выбранном участке профиля, можно лишь приближенно оценить скоростную модель, используя данные с ближайших профилей ГСЗ («Шпат» и «Горизонт») [Атлас..., 2013; Кашубин и др., 2018]: глубина до поверхности Мохоровичича (далее – граница М) изменяется в пределах 42-46 км, а средняя скорость продольных волн составляет 6.6-6.7 км/с. Рассчитаны теоретические сейсмограммы отраженных волн от подошвы земной коры (видимая частота волн выбрана равной 10 Гц) в моделях с пониженными (глубина 42 км, скорость 6.6 км/с) и повышенными (глубина 46 км, скорость 6.7 км/с) значениями мощности (Рисунок 4.6). По этим данным приближенно оценивается до каких времен на разрезах следует ожидать проявлений отражающих границ – от 12.5 до 13.7 с. Необходимо отметить, что

величины средней скорости в земной коре, использованные при расчетах, несколько выше значений, взятых из другого источника [Глубинное..., 1991]: так при глубинах до M в 42-46 км скорость продольных волн не превышает 6.5-6.6 км/с. Если использовать указанные значения средней скорости, то при тех же глубинах до M , времена вступлений отраженных продольных волн будут составлять от 12.9 до 13.9 с [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

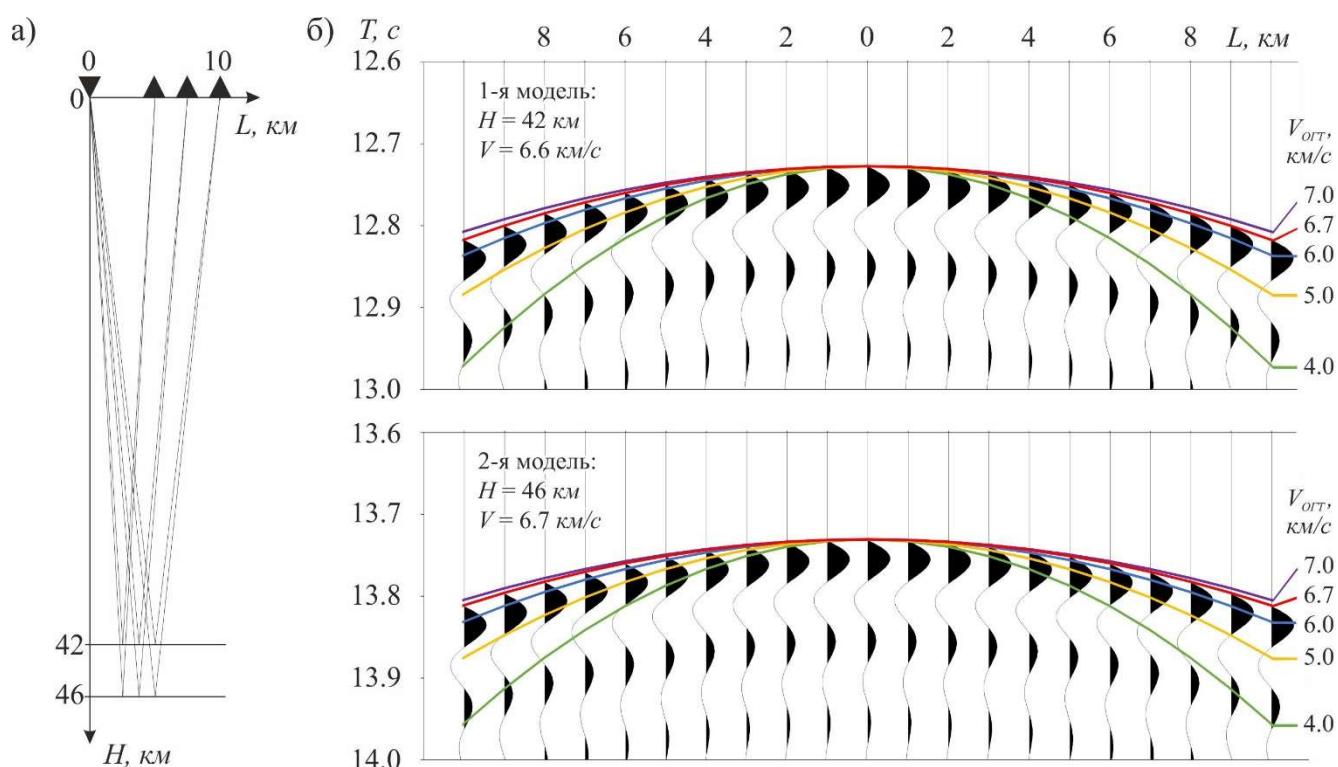


Рисунок 4.6 – Лучевая схема (а) и теоретические сейсмограммы (б) отраженных волн для однослойных однородных моделей земной коры ($H=42$ км, $V=6.6$ км/с и $H=46$ км, $V=6.7$ км/с, соответственно) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]

По представленным теоретическим расчетам можно заключить, что, с одной стороны, затруднено проведение традиционного скоростного анализа, а с другой, влияние неточностей в определении значений эффективной скорости ($V_{огт}$) на качество получаемого разреза методом ОГТ незначительно. Это объясняется малыми удалениями источник-приемник относительно глубины до границы – лучи отраженных волн практически вертикальные (см. Рисунок 4.6а). Так, при удалениях до 10 км, частоте сигнала в 10 Гц и вариации скорости $V_{огт}$ в пределах

6-7 км/с, различия кинематических поправок за счет разной кривизны годографов не превышают четверти видимого периода сигнала (см. Рисунок 4.6б) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

На Рисунке 4.7 в качестве примера представлен пример типичной сейсмограммы, полученной при речных сейсморазведочных исследованиях в нижнем течении р. Лена в 2018 г. Видно, что если на небольших временах (как правило, до 2 с) в волновом поле можно визуально проследить целевые отраженные волны, то на больших временах (порядка 13-14 с, где по предварительной скоростной модели следует ожидать вступлений отраженных волн от границы М) сигналы не прослеживаются [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

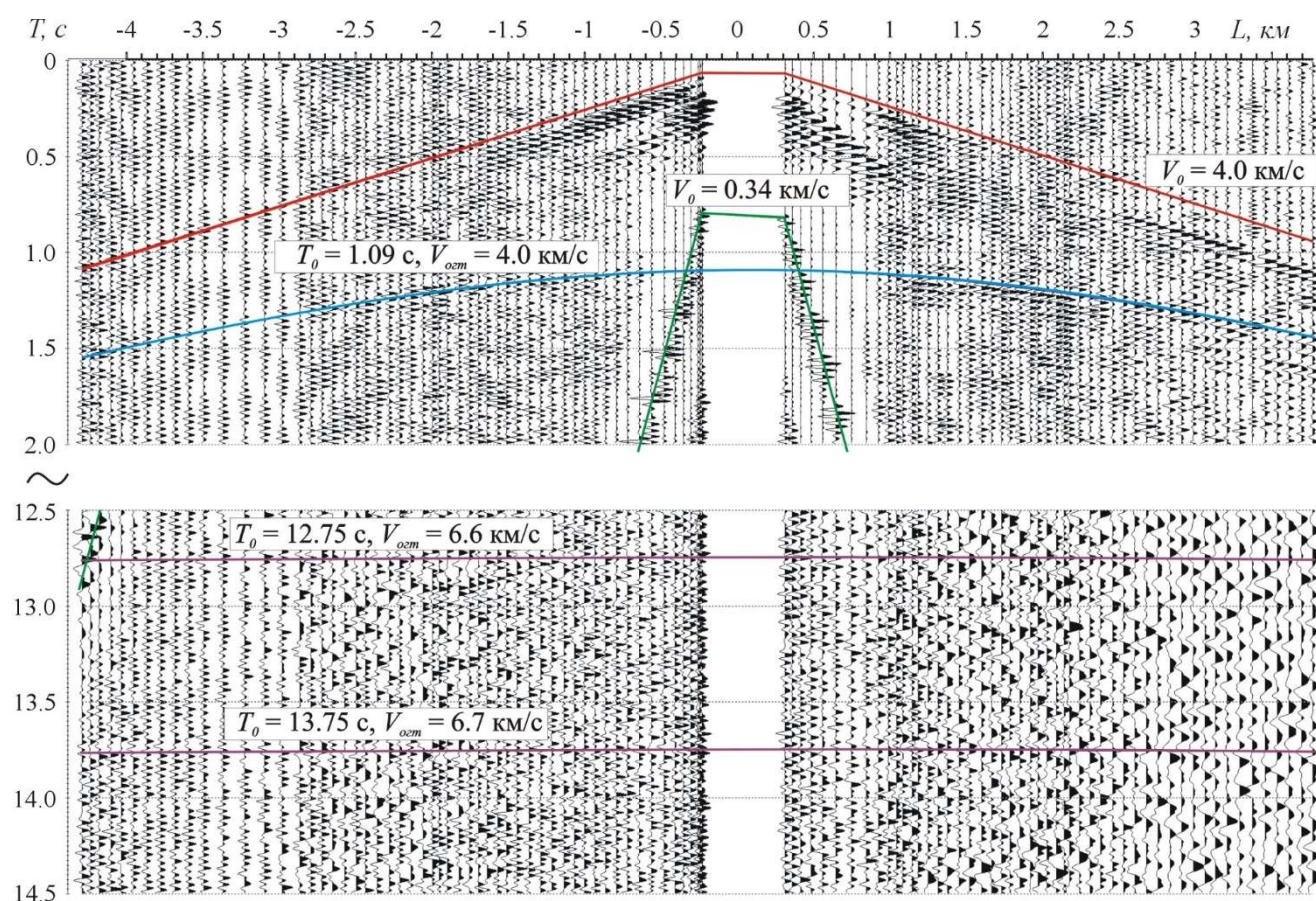


Рисунок 4.7 – Фрагмент типичной сейсмограммы при работах методом ОГТ в нижнем течении р. Лена в 2018 г.

3.2.2. Методика экспресс-обработки сейсмограмм увеличенной длительности

Как показано выше, на сейсмограммах речной сейсморазведки методом ОГТ на больших временах (порядка 13-14 с, где по оценкам следует ожидать вступлений отраженных волн от границы М) полезные сигналы не прослеживаются. Исходя из того, что был использован относительно слабый источник возбуждения упругих волн (предназначенный для построения разрезов верхней части земной коры) предполагается, что амплитуда волн, отраженных от глубинных границ в нижней части земной коры, значительно ниже амплитуды фоновое сейсмического шума. В таком случае для их выделения необходимо значительно повысить соотношение сигнал/помеха, что возможно при многократном суммировании сейсмических трасс при обработке методом ОГТ. Однако необходимо удостовериться, что чувствительность использованной сейсмической аппаратуры достаточна для регистрации таких слабых сигналов [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022].

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 аппаратного 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 4.8). Следовательно, чувствительности используемой аппаратуры достаточно для регистрации слабых сигналов с амплитудой, как минимум, до 100 раз ниже амплитуды сейсмического шума. Однако для выделения на временных разрезах таких малоамплитудных сигналов отношение сигнал/шум необходимо повысить в соответствующее число раз за счет увеличения кратности их суммирования.

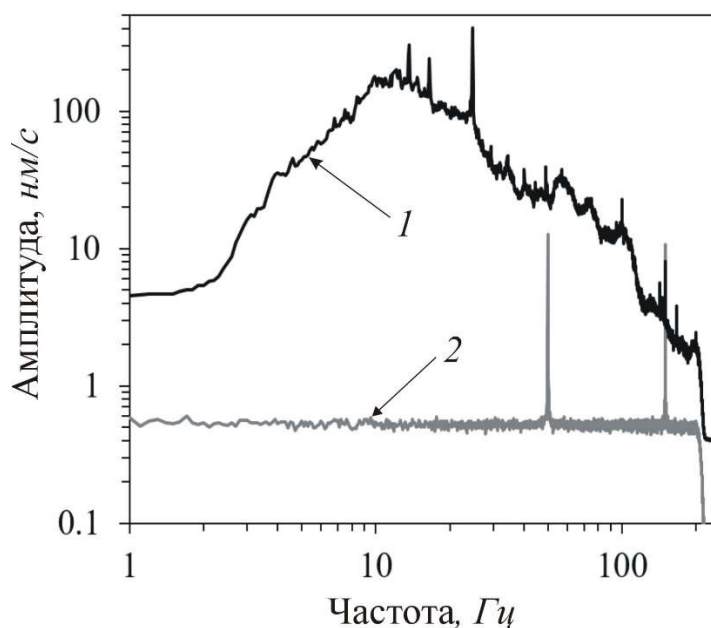


Рисунок 4.8 – Соотношение усредненных амплитудных спектров сейсмического (1) и аппаратного (2) шума при регистрации аппаратурой Байкал-7 с вертикальным сейсмоприемником GS-One [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022]

Высокую кратность предлагается получить за счет увеличения площади бина (при увеличении его размера по координате вдоль профиля). Как правило, при интерпретации данных сейсморазведки указанный размер задается равным половине от интервала между пунктами приема или возбуждения. Так, при обработке сейсморазведочных данных, полученных на р. Лена в 2018 г., он составлял 25 м. При этом ширина бина достигала 2500 м из-за существенной криволинейности речного профиля и разброса средних точек (Рисунок 4.9а). Кратность суммирования изменялась от 400 до 600 (Рисунок 4.9б) [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022].

Для изучения глубокозалегающих границ (в десятки километров), устанавливать малый размер бина (25 м) не имеет смысла. Указанный параметр можно увеличить в разы вдоль профиля, что приведет к росту кратности. Как пример, показана кратность, получившаяся после бинирования фрагмента профиля площадками размером 200x2500 м (Рисунок 4.9в). Видно, что кратность существенно увеличилась – до 5000. Дополнительный ее прирост возник также за счет использования всех имеющихся удалений источник-приемник (а не до 8000 м

согласно геологического задания). Следует отметить, что увеличение размера бина не только повышает кратность, но и одновременно приводит к уменьшению детальности разреза. Поэтому при обработке данных следует подобрать оптимальное его значение [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022].

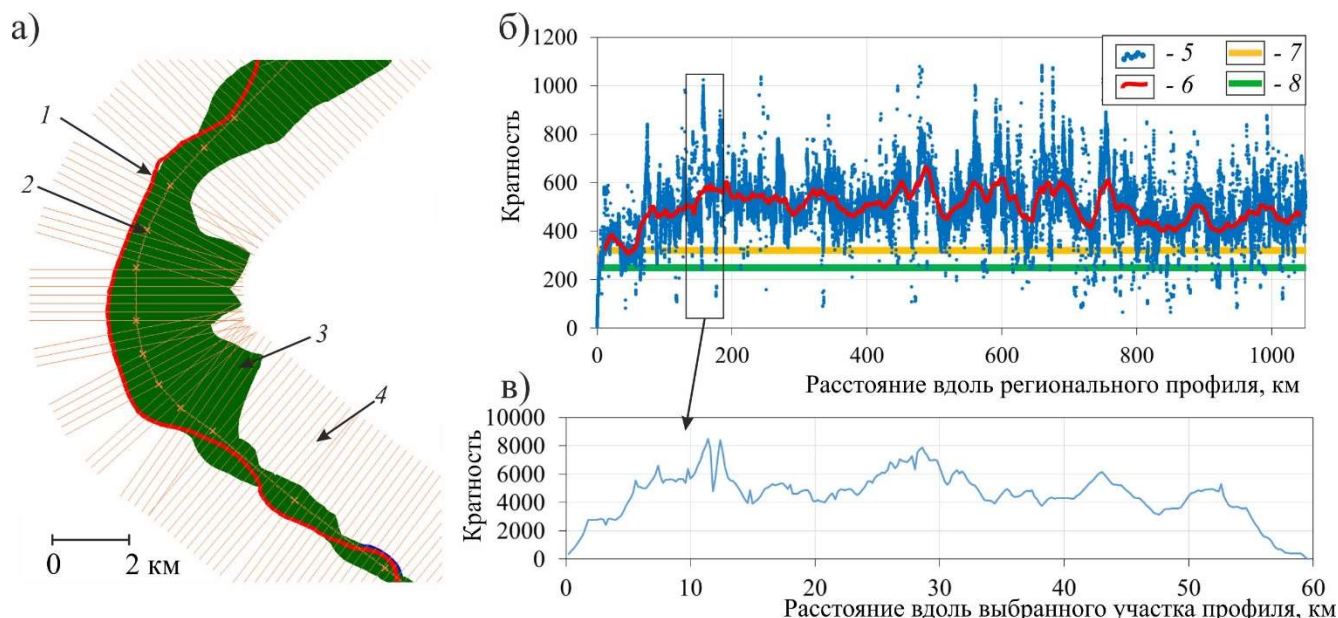


Рисунок 4.9 – Схема бинирования фрагмента речного сейсморазведочного профиля (а) и графики кратности (б, в): (б) – при размере бина 25x2500 м и ограничении максимальных удалений до 8000 м, (в) – при размере бина 200x2500 м и неограниченных удалениях. 1 – пневмоисточники; 2 – траверс-линия; 3 – множество средних точек; 4 – бины; 5-8 – кратности: 5, 6 – фактическая; 6 – усредненная; 7, 8 – соответственно, требуемая и минимально допустимая кратность по геологическому заданию [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022]

Для доказательства того, что в первичных материалах зарегистрированы полезные сигналы в виде малоамплитудных отраженных волн от границ в средней и нижней частях земной коры и могут быть выделены на временных разрезах в результате многократного суммирования, выполняется экспресс-обработка. Основные ее графы, такие как геометризация сейсмограмм, бинирование по криволинейному профилю, полосовая фильтрация, регулировка амплитуд, ввод кинематических поправок, суммирование с построением временных разрезов, выполнялись с использованием ПО «RadexPro», разработанного компанией ООО «Деко-геофизика СК».

На первом этапе сейсмограммы суммируются в области времен около 13-15 с, на которых предположительно находятся вступления близвертикальных продольных отраженных волн от границы М. Используются упрощенные параметры обработки, которые определяются методом подбора исходя из следующих соображений. Известно, что отраженные волны от поверхности М достаточно низкочастотные (как правило от первых герц до первого десятка герц) по сравнению с целевыми волнами, которыми оперируют при сейсморазведке (десятки герц). По этой причине первичные данные отфильтровываются наборами фильтров в полосах частот от 5 Гц до 10-14 Гц. Далее применяется процедура автоматического регулирования усиления (APU) с окном в 1 с для подавления высокоамплитудных помех, наличие которых, как известно, значительно снижает эффективность суммирования малоамплитудных сигналов. Далее выполняется сортировка данных по криволинейному профилю (бинирование) с площадками 100x2500 м, при которых кратность на исследуемом участке профиля составила от 2000 до 4000. Следующей процедурой вводятся кинематические поправки – они вычисляются с использованием принятой упрощенной скоростной модели (см. Рисунок 4.6). В результате последней процедуры суммирования получены фрагменты временных разрезов, с тремя разными параметрами фильтрации (Рисунок 4.10) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

Видно, что в разрезах на временах около 13-14 с прослеживаются сигналы, источником которых предположительно являются отраженные продольные волны от М (см. Рисунок 4.10). Наиболее контрастно они выделяются при подобранной полосовой фильтрации 5-10 Гц, поэтому в дальнейшем исследовании при обработке сейсмограмм использовалась эта полоса частот. Видимый период сигнала, прослеживаемого на укрупненных фрагментах разрезов при трех разных фильтрациях, составляет около 8 Гц (см. Рисунок 4.10) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

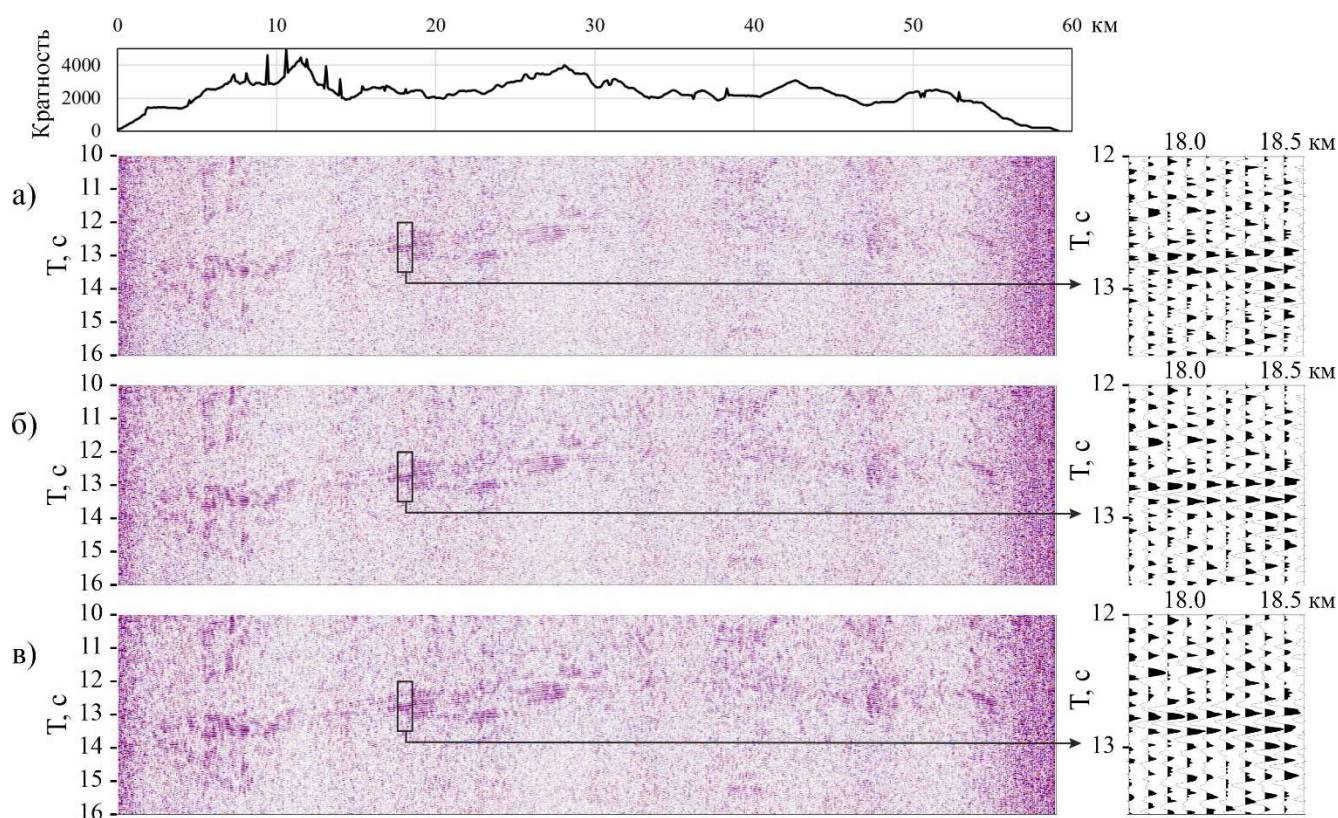


Рисунок 4.10 – Фрагменты временных разрезов при различной фильтрации исходных данных. (а, б, в) – применены полосовые фильтры 5-15 Гц, 5-12 Гц и 5-10 Гц, соответственно

Следующим этапом оценивается кратность суммирования, достаточная для прослеживания малоамплитудных отраженных волн на разрезах. Для этого рассчитываются фрагменты разрезов с различным значением кратности по различным наборам исходных данных (Рисунок 4.11). Пониженная кратность (относительно расчетов, представленных на Рисунке 4.10, где средняя кратность составляла 2500) получалась прореживанием данных (в обработке используется каждая 2-я или каждая 4-я трассы), а повышенная – увеличением размера бина вдоль линии профиля [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

Видно, что уменьшение кратности (до 600-1200) приводит к закономерному ухудшению качества разреза (снижается отношение сигнал/шум, фрагменты отражающих границ не прослеживаются). Увеличение кратности до 5000-10000, за счет увеличения размеров бина, приводит к увеличению соотношения сигнал/помеха (см. Рисунок 4.11). Однако дополнительной информации о структуре земной коры это не дает, зато детальность разреза по горизонтали

уменьшается. Поэтому для дальнейшей обработки материалов речной сейсморазведки используется бинирование с размером площадок 100x2500 м, при которых средняя кратность на исследуемом фрагменте профиля составляет 2500 [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

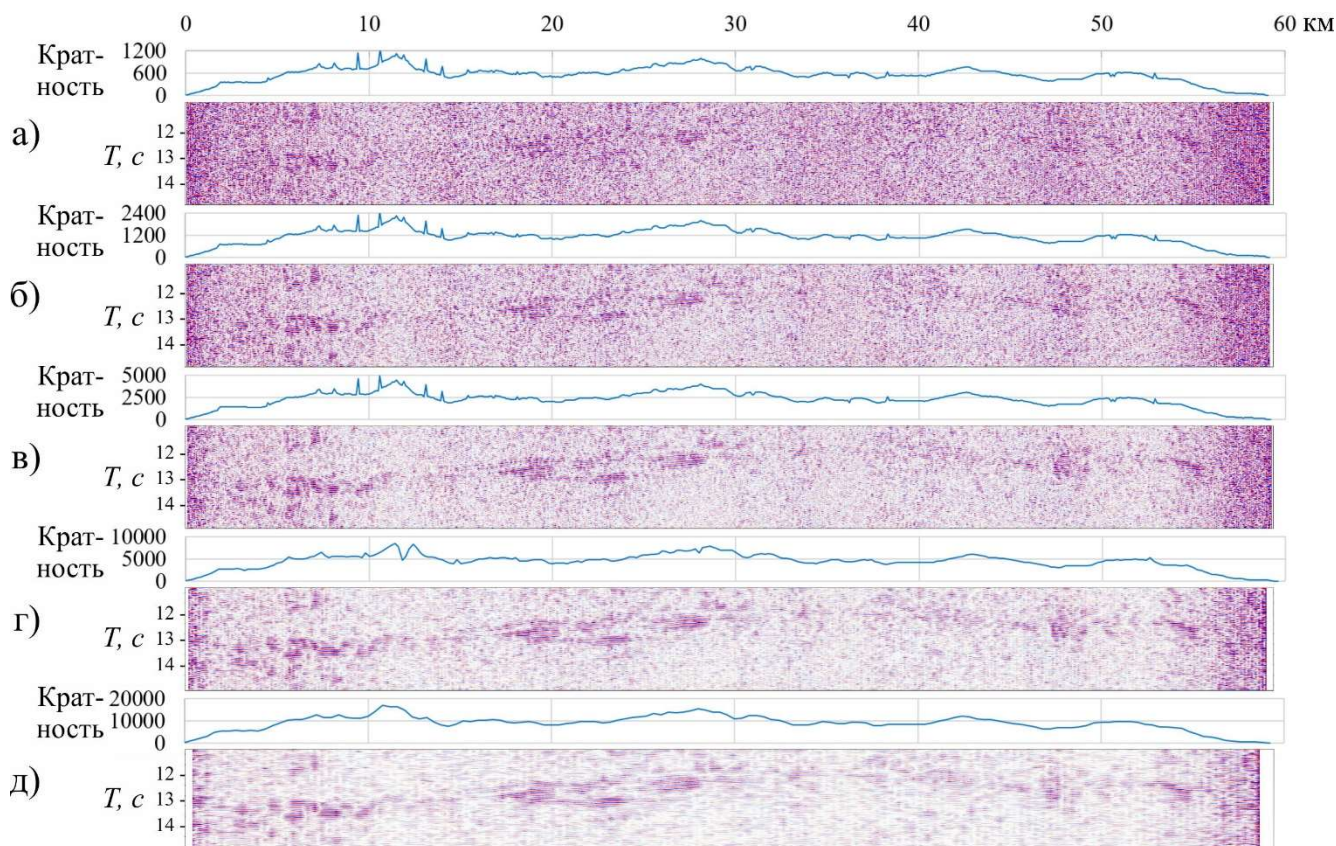


Рисунок 4.11 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при различной кратности. (а, б, в) – при размерах бинов 100x2500м, прореживание с оставлением 25 % (а) и 50 % (б) данных; (г, д) – при размерах бинов 200x2500 и 400x2500, соответственно [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]

Как отмечалось выше, анализ годографов теоретических отраженных от границы М продольных волн показал, что неточность значений эффективных скоростей для расчета кинематических поправок будет слабо влиять на качество временных разрезов. Это справедливо для использованной системы наблюдений с близвертикальными лучами отраженных волн (малые удаления источник-приемник относительно глубины до границы, низкая частота сигнала – 8 Гц), и в этом заключается одно из главных отличий настоящих исследований от традиционной сейсморазведки. По оценкам, изменения в средней скорости $V_{огт}$ (используемой для расчета кинематических поправок на временах 13-14 с) в

пределах 6-7 км/с не должно повлиять на качество построения разреза. Этот интервал значительно шире диапазона возможных значений средней скорости в земной коре, который для Восточной Сибири составляет 6.3-6.6 км/с [Глубинное..., 1991]. Как видно на фрагментах временных разрезов, рассчитанных при разных скоростях $V_{огт}$, их качество заметно ухудшается только при использовании значений скорости в 4-5 км/с, а это противоречит известным представлениям о скоростном строении земной коры (Рисунок 4.12). Таким образом, и теоретически, и экспериментально подтверждено, что для реализованной системы наблюдений, неточность задания $V_{огт}$ (в разумных пределах) не оказывает существенного влияния на качество построения временных разрезов [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

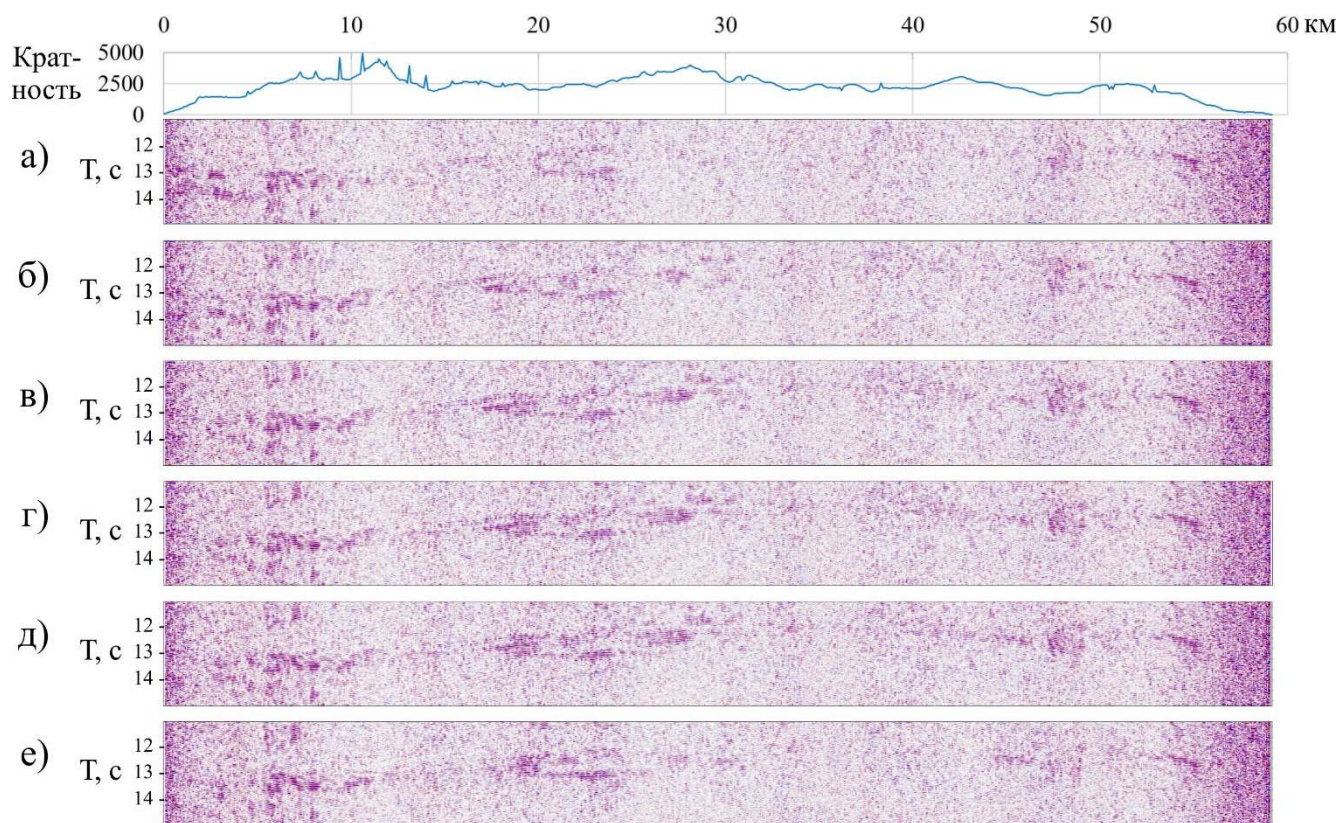


Рисунок 4.12 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных при разных скоростях для определения кинематических поправок: (а-д) – значения $V_{огт}$ 4.0, 5.0, 6.0, 6.5, 7.0 км/с, соответственно; (е) – кинематические поправки равны нулю (эквивалентно бесконечной $V_{огт}$) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]

При производстве и обработке данных сейсморазведочных работ особое внимание традиционно (в том числе согласно инструкций) уделяется борьбе с помехами. Как правило, если в исходных данных присутствуют трассы с повышенным фоном помех, то они исключаются из обработки. При выполнении речной сейсморазведки на малонаселенных территориях в нижнем течении р. Лена, где отсутствуют промышленные объекты, основным источником помех являлся ветер и, как одно из следствий, волны, воздействующие на берег, вдоль которого устанавливались сейсмоприемники. Хотя работы и проводились в тихую погоду, тем не менее, из-за больших пространств открытой воды (ширина реки в нижнем течении достигала десяти и более километров) ряд сейсмограмм содержал в себе высокие по уровню помехи (Рисунок 4.13). Из усредненных амплитудных спектров, рассчитанных для участков сейсмограммы, зарегистрированной как в тихую, так и ветреную погоду, видно, что частоты помех составляют от 20 Гц и выше (Рисунок 4.14). Это перекрывает частотный диапазон полезных волн, используемых при традиционной сейсморазведке на нефть и газ. Поэтому, такие данные считаются браком и исключаются из обработки [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

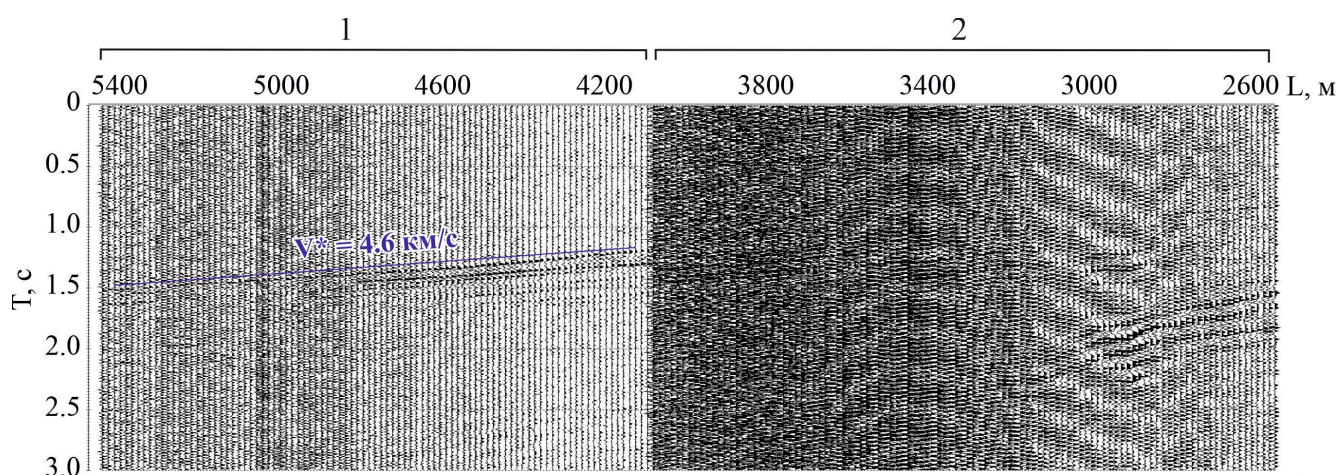


Рисунок 4.13 – Сейсмограмма общего пункта приема, часть которой зарегистрирована в тихую (1), а часть в ветреную (2) погоду. V^* - кажущаяся скорость волн в первых вступлениях

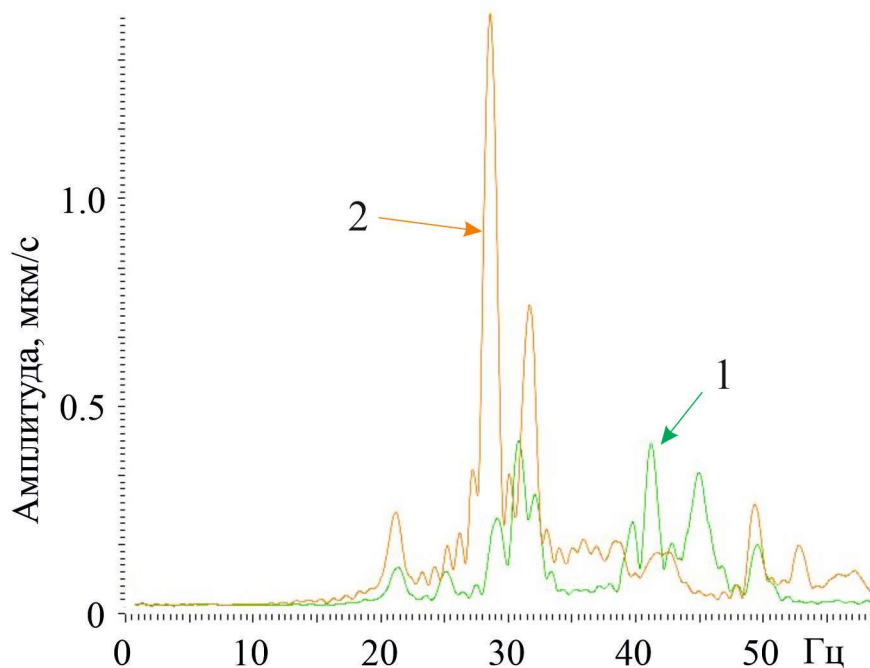


Рисунок 4.14 – Усредненные амплитудные спектры сейсмограммы, зарегистрированной в тихую (1) и ветреную (2) погоду

Как было показано выше, частоты полезных сигналов отраженных волн на временах около 13-14 с, существенно ниже частотного диапазона помех (см. Рисунок 4.10 и Рисунок 4.14). Из этого предполагается, что присутствие в материалах сейсмограмм, аналогичных изображенным на Рисунке 4.13, не ухудшает качество разреза на соответствующих временах. Для проверки этого предположения производятся расчеты фрагментов временных разрезов для разных выборок данных. В первую очередь рассчитывается разрез при использовании всего массива данных, включая сейсмограммы с повышенным уровнем помех. Затем для каждой трассы рассчитываются средние (по модулю) амплитуды сейсмического шума, отбраковываются трассы с повышенной амплитудой и рассчитываются соответствующие разрезы. Из сопоставления фрагментов разрезов, рассчитанных с использованием различных (по уровню помех) выборок данных, видно, что исключение зашумленных трасс не приводит к улучшению качества разреза на временах 13-14 с (Рисунок 4.15). Напротив, при исключении большого числа данных из обработки (50 %, 75 %), качество разреза значительно снижается вследствие уменьшения кратности суммирования [Лисейкин и др. в

статье: «Возможности речной...», 2023]. Таким образом, можно заключить, что данные, которые при традиционной сейсморазведке на нефть и газ из-за наличия ветровых помех считаются браком, в обработке для построения разрезов нижней части земной коры могут быть использованы.

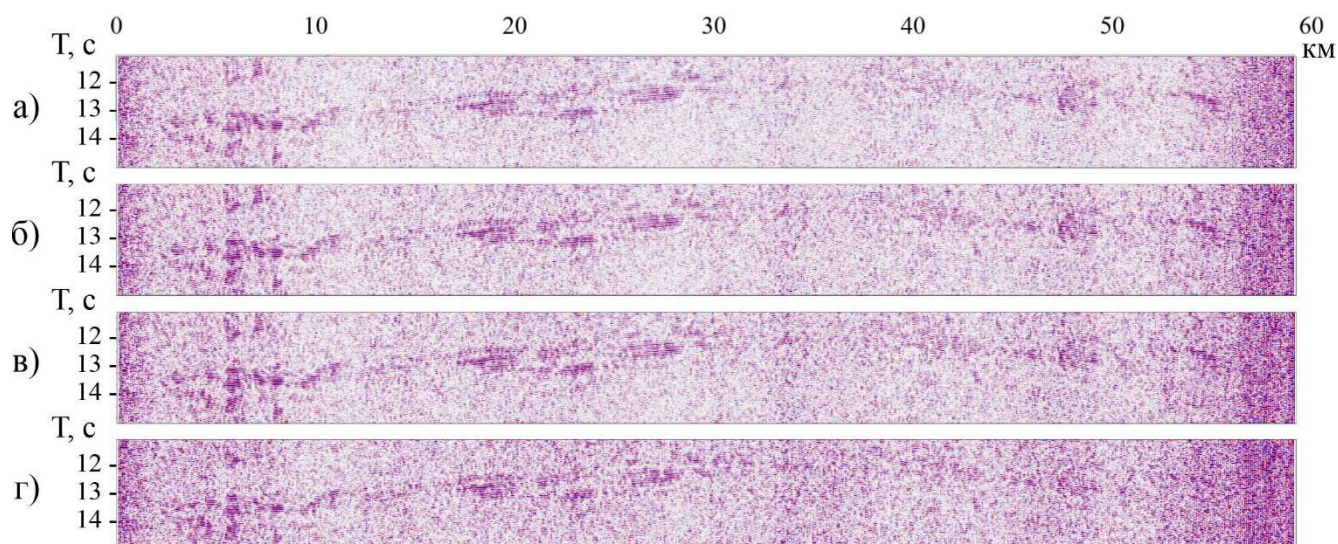


Рисунок 4.15 – Фрагменты временных разрезов, рассчитанных по разным выборкам данных: (а) – использован весь набор данных; (б, в, г) – из обработки исключены соответственно 25, 50 и 75 % наиболее шумных трасс

В результате экспресс-обработки методом ОГТ всей совокупности имеющихся данных для выделенного 60-километрового участка профиля в нижнем течении р. Лена [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022] построен временной разрез до 23 с (Рисунок 4.16). Обработка проводилась по упрощенному графу, аналогичному используемому обработчиками в полевых условиях для построения предварительных временных разрезов. Цель такой экспресс-обработки – подтвердить, что в первичных материалах речной сейсморазведки 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 [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

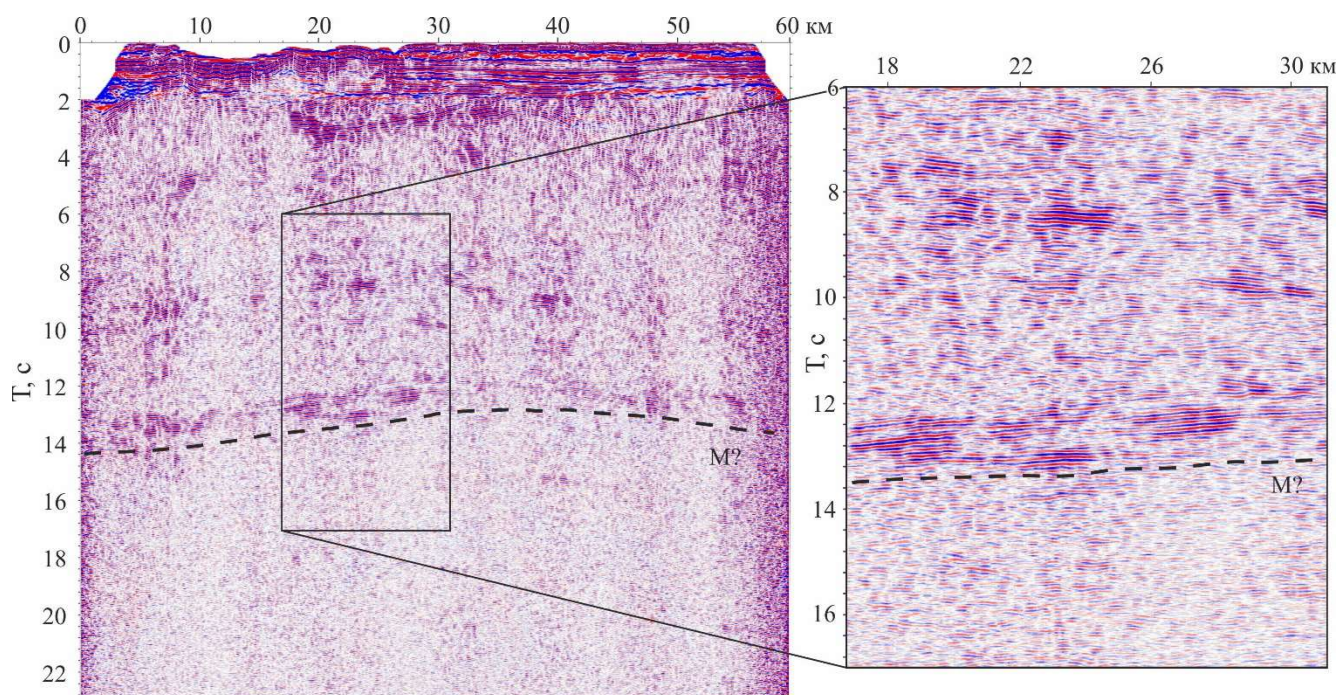


Рисунок 4.16 – Временной разрез на всю мощность земной коры в результате экспресс-обработки материалов речной сейсморазведки в нижнем течении р. Лена. Пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы Мохоровичича (М) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]

На временном сейсмическом разрезе пунктирной линией отмечено предполагаемое положение границы М (см. Рисунок 4.16). В соответствии с устоявшимися мнениями большинства исследователей, граница проводится как огибающая снизу локальных максимумов на временном разрезе, интерпретируемых как след отраженных продольных волн от границ в нижней части земной коры [Берзин, Павленкова, 2001; Глубинное..., 2018]. Хорошо видно, что время до отмеченной границы меняется от 13.0 до 14.2 с, а это двойное время пробега субвертикально отраженной волны. Тогда, с учетом того, что средняя скорость продольных волн в земной коре на данном участке составляет около 6.6 км/с, глубина до М достигает 43-47 км. Эти значения не противоречат имеющимся сведениям о мощности земной коры в близлежащих районах и существенно их дополняют, т.к. на исследуемом участке ранее не проводились работы по изучению глубинного строения земной коры. Таким образом, используемая современная технология речных сейсморазведочных исследований позволяет изучать строение не только верхней части земной коры, но и по всей ее

мощности, включая поверхность Мохоровичича [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

4.3. Реализация разработки на материалах речного сейсморазведочного профилирования по р. Витим

Исходный материал получен в 2019 г. при полевых сейсморазведочных исследованиях в нижнем течении р. Витим, выполненных сотрудниками НПП ГА «ЛУЧ» с привлечением специалистов СЕФ ФИЦ ЕГС РАН по методике, разработанной в сибирских филиалах ФИЦ ЕГС РАН и опробованной ранее на р. Лена в Восточной Сибири [Селезнев и др., 2007]. 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 4.17). 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 Ангара-Ленской моноклизой.

Для построения разреза верхней части земной коры используются данные профилирования методом ОГТ с характеристиками, представленными в таблице (Таблица 4.2). Из этих данных видно, что сейсмограммы были 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.

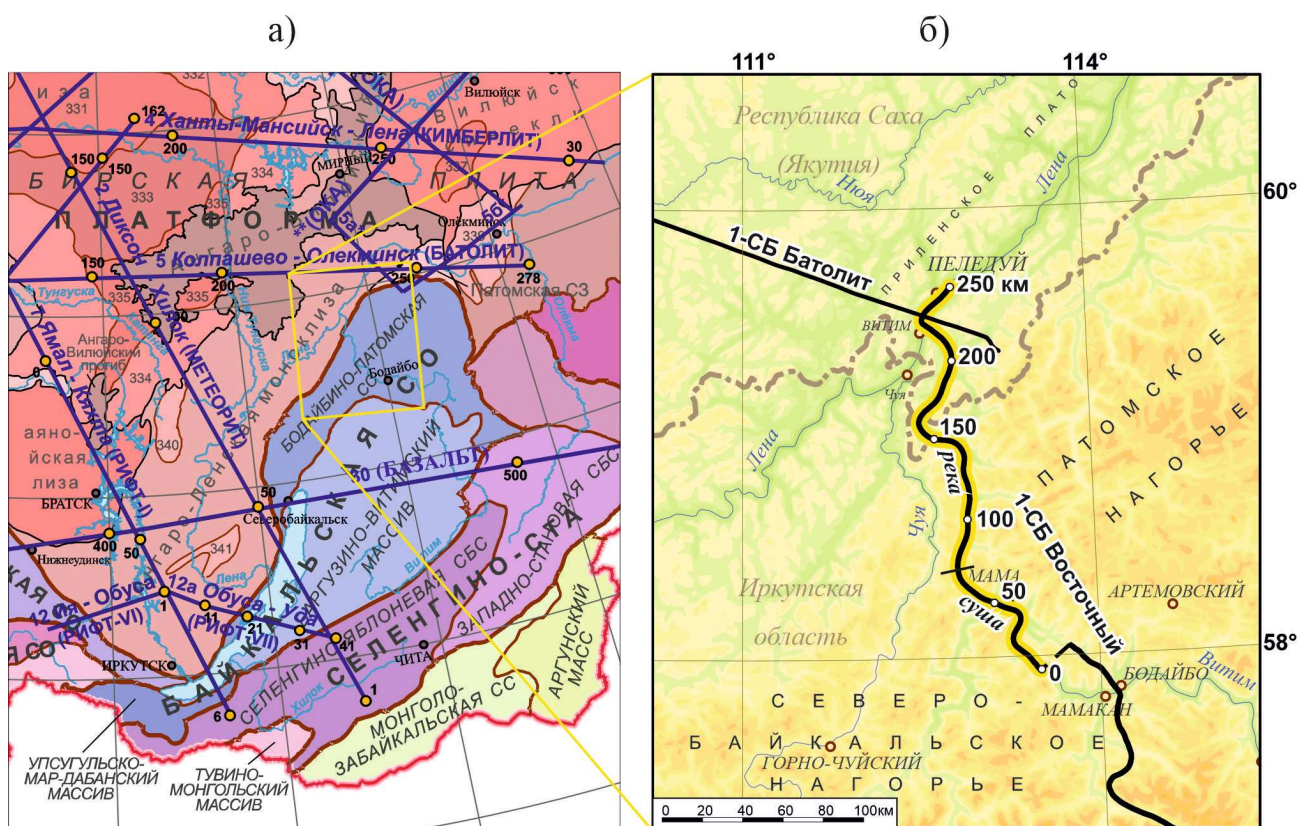


Рисунок 4.17 – Схема опорных профилей ГСЗ [Атлас..., 2013] (а) и схема опорного геолого-геофизического профиля 1-СБ-Восточный (дополненного участком речных сейсморазведочных работ, выполненных в 2019 г.) на физико-географической карте (б)

Таблица 4.2 – Основные характеристики систем возбуждения упругих волн и их регистрации при речной сейсморазведке методом ОГТ 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	19
	- не более, м	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

Длительность формируемых по материалам речного профилирования сейсмограмм задается пользователем и ограничена только интервалом между возбуждениями, составляющим 23 с (см. Таблицу 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 [Глубинное..., 1991], 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 [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022].

В результате обработки архивных (2019 г.) материалов речного сейсмического профилирования методом ОГТ по р. Витим сформированы в традиционном формате SEG-Y 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:

1. Отбраковка некондиционных записей, например, из-за обрыва электрической цепи сейсмического канала.

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

3. 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.

4. Экспорт «геометризованных» сейсмограмм в файлы формата SEG-Y 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 (Рисунок 4.18) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. Однако на больших временах (до 13-15 с), где учитывая результаты предыдущих исследований [Глубинное..., 1991] следует ожидать 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 только верхней части земной коры. Как следствие, амплитуда отраженных волн значительно ниже амплитуды сейсмического шума [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. 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.

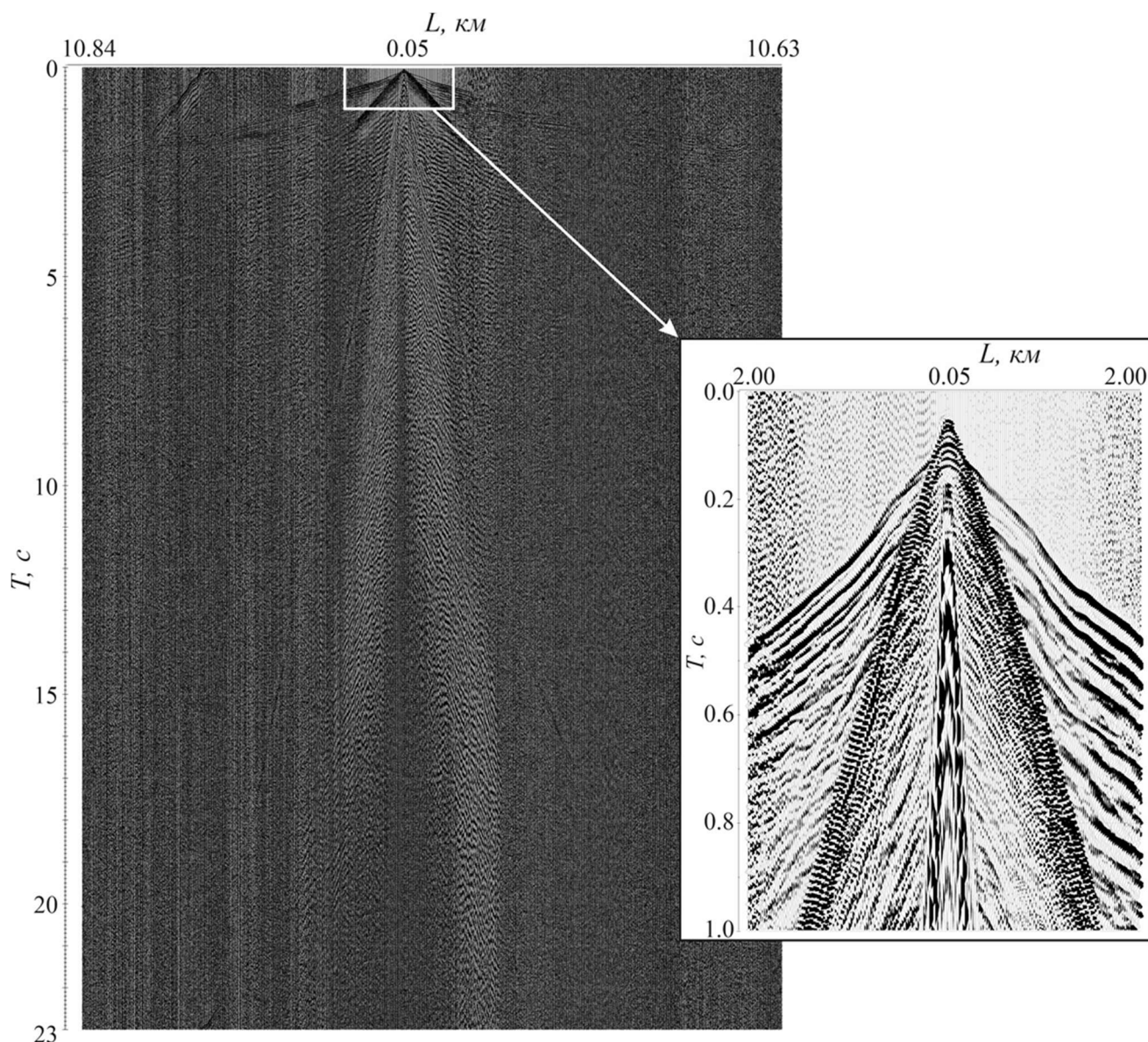


Рисунок 4.18 – Сейсмограмма общего пункта приема в результате обработки архивных (2019 г.) материалов речной сейсморазведки методом ОГТ на р. Витим

При сейсморазведочных работах на р. Витим в 2019 г. использовался тот же комплект регистрирующей аппаратуры, что и на р. Лена в 2018 г., а именно регистраторы «Байкал» и сейсмоприемники GS-One. Как отмечалось выше, из сопоставления спектров сейсмического и аппаратурного шума следует, что амплитуда первого более чем на два порядка выше второго (см. Рисунок 4.8). Значит, чувствительность аппаратуры достаточна 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 [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023].

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 4.19). 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. Как отмечалось, 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 4.20) [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022]. 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 повышает кратность, но и одновременно приведет к уменьшению детальности временного разреза. Поэтому при обработке данных необходимо подбирать оптимальное значение его размеров [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022], соответствующее кратности суммирования,

необходимой для выделения малоамплитудных волн, отраженных от границ в нижней и средней частях земной коры.

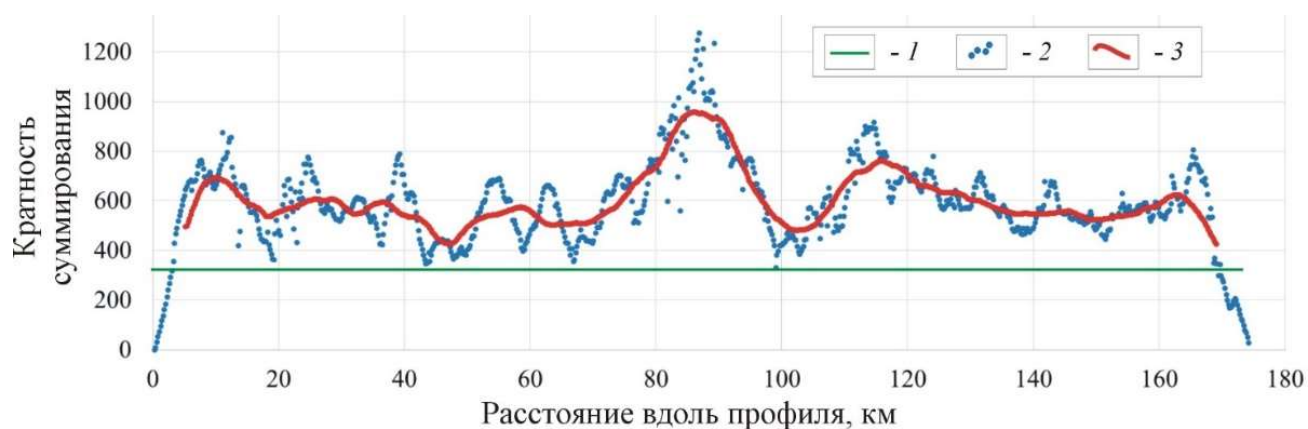


Рисунок 4.19 – Кратность суммирования сигналов в зависимости от расстояния по профилю по результатам обработки архивных материалов сейсморазведки методом ОГТ по р. Витим в 2019 г. (размер бина 12.5x3000 м). 1 – требуемая кратность по геологическому заданию при изучении верхней части земной коры; 2 – фактическая кратность (количество средних точек в пределах каждого бина); 3 – усредненные значения фактической кратности

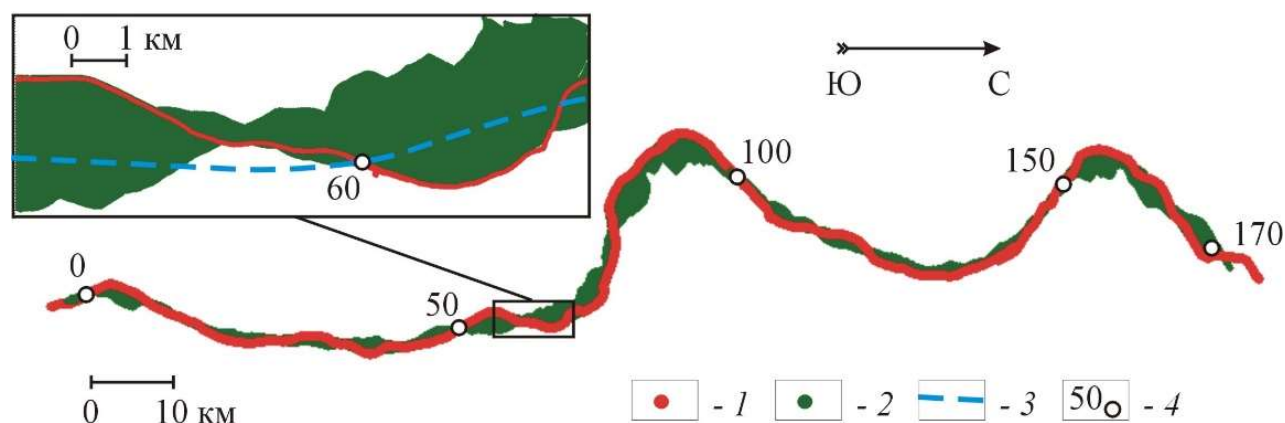


Рисунок 4.20 – Схема сейсмического профиля. 1 – пункты возбуждения; 2 – средние точки; 3 – траверс-линия; 4 – отметки расстояния вдоль профиля (км)

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 [Особенности..., 2019], где глубина последней меняется в пределах 44-46 км, а эффективная скорость отраженной волны ($V_{огм}$) – 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) [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023] значениями мощности земной коры (Рисунок 4.21). По расчетным сейсмограммам видно, что времена пробега волн, отраженных от границы Мохоровичича, составляют около 14 с. Значит, вступления продольных волн, отраженных от границ в средней и нижней частях земной коры, находятся на меньших временах.

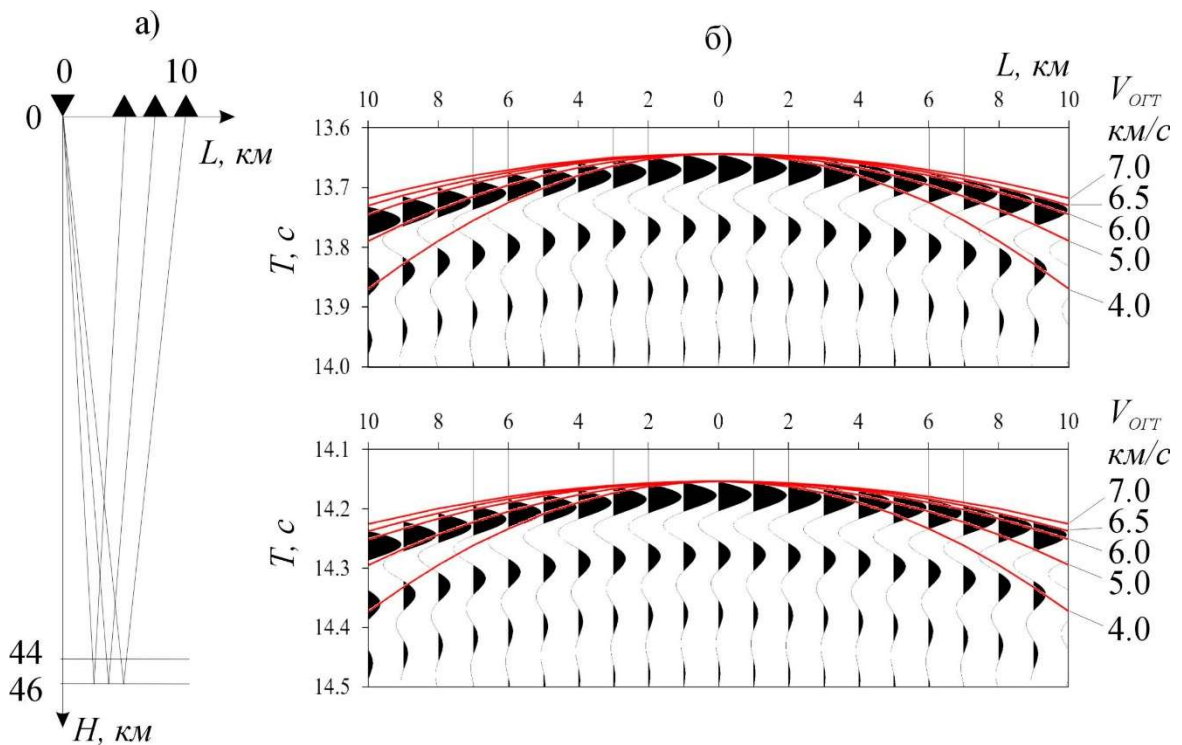


Рисунок 4.21 – Лучевая схема (а) и рассчитанные сейсмограммы (б) отраженных от границы Мохоровичича продольных волн для однослойных однородных моделей с пониженным (глубина 44 км, скорость 6.45 км/с) и повышенным (глубина 46 км, скорость 6.50 км/с) значениями мощности земной коры

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 (см. Рисунок 4.21а), что затрудняет определение значения эффективной скорости. Так, при небольшом (относительно глубины до границы М) удалении источник-приемник до 10 км и частоте сигнала в 10 Гц, вариации скорости $V_{огт}$ в пределах 6-7 км/с, различие кинематических поправок за счет разной кривизны годографов не превышает

четверти видимого периода сигнала (см. Рисунок 4.21б). Таким образом, основное ограничение способа, с учетом специфики имеющихся материалов, состоит в невозможности определить значение эффективной скорости для отраженных от границ средней и нижней частей земной коры волн [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023]. Кроме этого, не представляется возможным учесть в должной мере искажающие эффекты, обусловленные криволинейностью и трехмерностью рельефа отражающих границ.

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 настолько низкая, что они не прослеживаются на сейсмограммах, а значит анализ их волнового поля практически невозможен.

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 [Особенности..., 2019]. Результатом такой экспресс-обработки является временной разрез, из которого видно, что на временах 11.0-13.7 с прослеживаются волны с частотой около 7-8 Гц [Лисейкин и др. в статье: «Возможности речной...», 2023], предположительно отраженные от границ в нижней части земной коры (Рисунок 4.22). 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 [Лисейкин и др. в статье «Методика...», 2022], что согласуется с результатами, полученными методом ГСЗ на ближайшем профиле 1-СБ-Восточный [Особенности..., 2019].

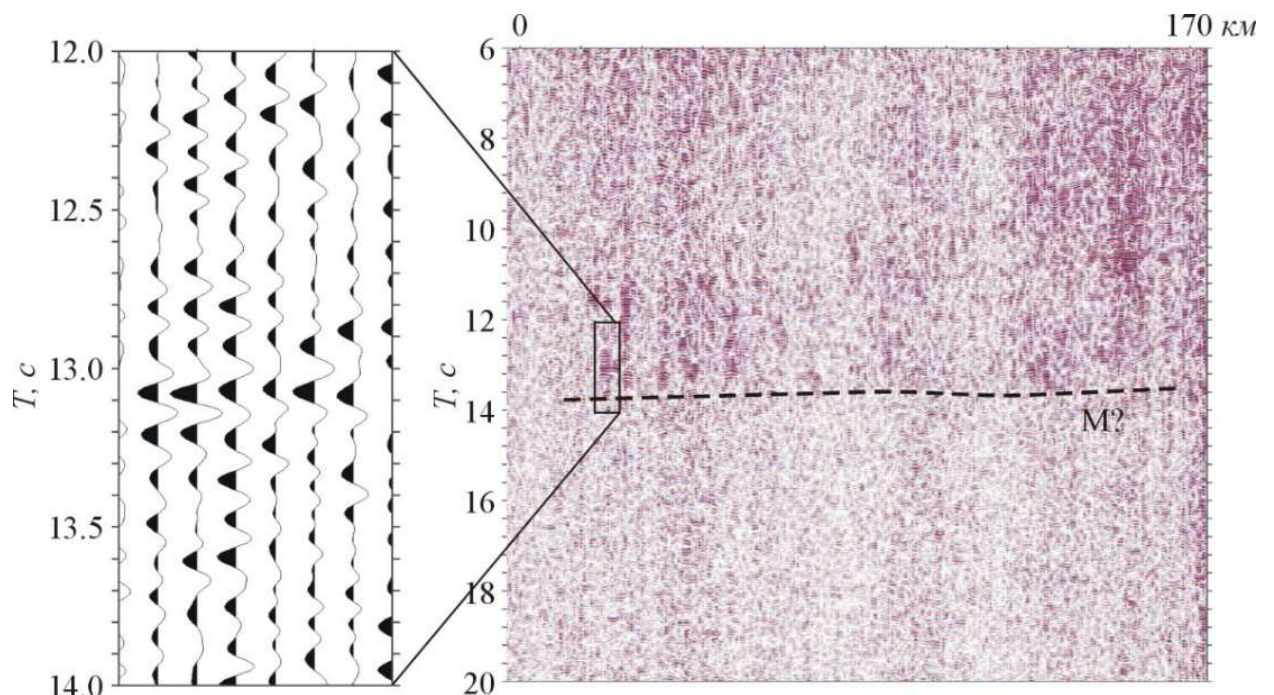


Рисунок 4.22 – Временной разрез при экспресс-обработке архивных материалов речной сейсморазведки по р. Витим. На врезке показан увеличенный фрагмент разреза. Пунктирной линией отмечена предполагаемая граница Мохоровичича

Таким образом, результаты экспресс-обработки подтверждают, что в первичных материалах речного профилирования методом ОГТ, 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 по р. Витим, а именно с использованием подготовленных сейсмограмм с увеличенными до 23 с длительностями и до 10-15 км удалениями источник-приемник.

В рамках совместных работ со специалистами ФГБУ «Институт Карпинского» (Контракт № 12/20-4 от 08.06.2020г.) обработаны данные с профиля по р. Витим (см. Рисунок 4.17). На основе методики, разработанной по материалам речной сейсморазведки на р. Лена [Методика..., 2022; Возможности речной..., 2023], А.В. Лисейкиным (СЕФ ФИЦ ЕГС РАН) выполнена предварительная экспресс-обработка материалов речной сейсморазведки по р. Витим, показавшая применимость использования методики для получения разреза земной коры на всю мощность (см. Рисунок 4.22). По подготовленным сейсмограммам увеличенной длительности (результат принадлежит Д.В. Кречетову, СЕФ ФИЦ ЕГС РАН) далее выполнена окончательная (углубленная) обработка на основе методик, разработанных и применяемых неоднократно к материалам опорных геолого-геофизических профилей, характеризующимся высокой гетерогенностью среды, повышенными скоростями и слабым уровнем сигнала [Обработка..., 2001; Глубинные..., 2007]. Результаты углубленной обработки материалов принадлежат Н.Г. Заможней и А.Ю. Каширскому (Московский филиал ФГБУ «Институт Карпинского») [Построение..., 2025]. Для построения верхней части разреза (0-2 с) ими учитывался опыт обработки Е.В. Мосягиным с соавторами по материалам речной сейсморазведки на реках Восточной Сибири (Нижняя Тунгуска, Лена и ее притоки) [Геолого-геофизические..., 2021; Мосягин, Ефимов, 2021]. 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.

Авторы (Н.Г. Заможная и А.Ю. Каширский) отмечают, что обработка данных речной сейсморазведки от обработки наземных материалов глубинного ОГТ отличается рядом особенностей, обусловленных, главным образом, методикой полевых сейсмических работ [Построение..., 2025]. К таковым относятся: большой объем исходных данных, криволинейность трассы профиля, несовпадение положения линий приема и возбуждения, нерегулярность системы наблюдений, малые базы зондирований и относительно высокий уровень фона помех различного рода. Специфика решаемых задач наложила закономерные ограничения на применяемую последовательность процедур обработки речных сейсмических данных, которая была по возможности унифицирована с графом обработки сухопутных вибрационных глубинных сейсмических материалов. Отличие заключалось в стремлении повысить информативность сейсмического разреза именно в его глубинной части, а верхней части разреза, соответствующей осадочному чехлу, было уделено меньшее внимание. Это упрощение допустимо для сопоставимости масштабов выходной информации.

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 показывает хорошую сходимость волновых полей во всем временном интервале (Рисунок 4.23). 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.

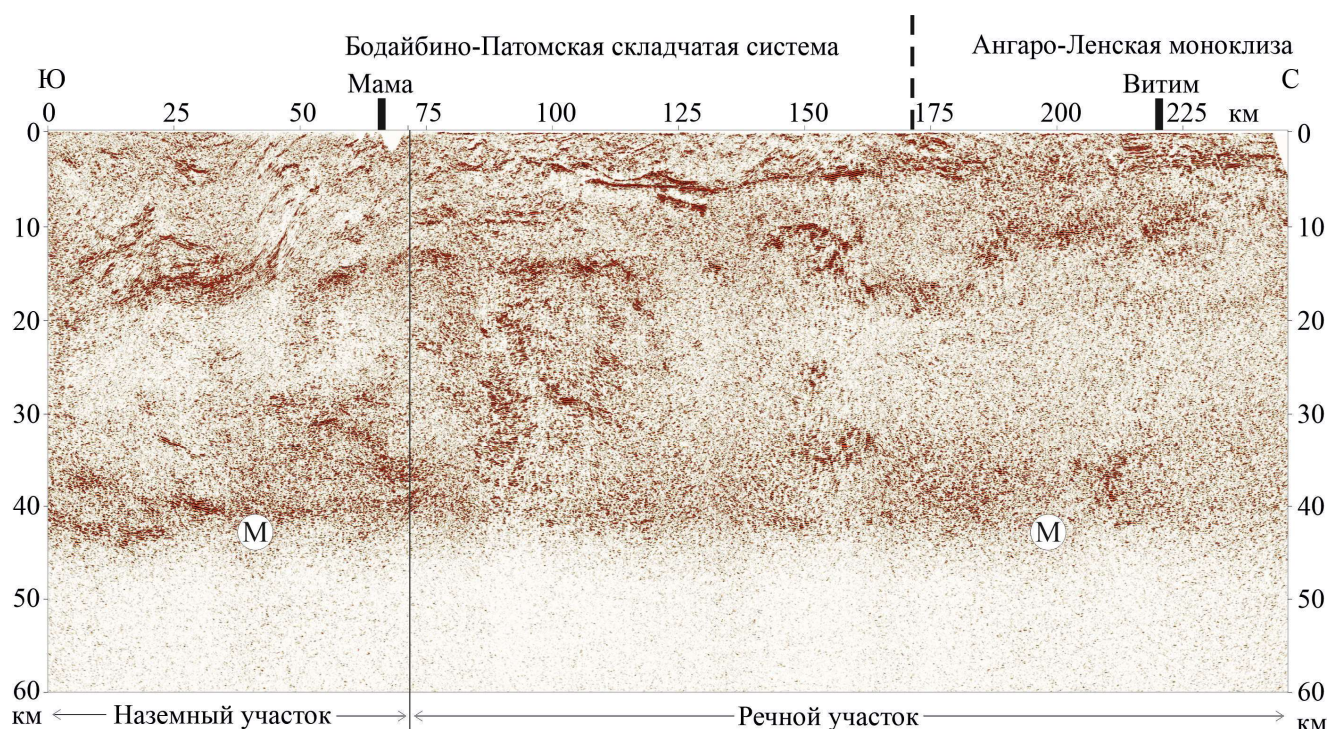


Рисунок 4.23 – Композитный сейсмический глубинный разрез МОВ-ОГТ (суша + река) по опорному профилю 1-СБ-Восточный [Построение..., 2025]

4.4. Полученные результаты

Разработана методика построения разрезов земной коры на всю мощность по выделенным из сейсмического шума малоамплитудным сигналам отраженных волн на увеличенных временах вступлений (на примере данных профилирования методом ОГТ на реках Лена и Витим в 2018-2019 гг.) [Возможности речной..., 2023]. Методика включает следующие шаги:

1. Выполняется сопоставление усредненных спектров Фурье сейсмического и аппаратного шумов, из которого следует, что чувствительности сейсмической аппаратуры достаточно для регистрации малоамплитудных сигналов отраженных волн.

2. Из зарегистрированного при профилировании сейсмического шума берутся отраженные волны на временах от момента возбуждения до времен вступлений отраженных волн от поверхности Мохоровичича по априорным данным.

3. При проведении опытных работ на участке профиля получить набор кондиционных геометризованных сейсмограмм увеличенной длительности.

4. Выполняется экспресс-обработка сейсмограмм (п. 3), с подбором параметров, при которых на временном разрезе прослеживаются малоамплитудные отраженные волны от границ в нижней части земной коры до поверхности Мохоровичича:

4.1. Сортируются (бинируются) трассы вдоль профиля с подобранными увеличенными размерами бина.

4.2. Фильтруются сейсмограммы в подобранной полосе частот.

4.3. Определяется частотный диапазон малоамплитудных сигналов отраженных волн и отбраковываются сейсмические трассы с помехами, частотный диапазон которых перекрывает диапазон исследуемых сигналов.

4.4. Выполняется автоматическая регулировка усиления с параметрами, полученными методом подбора.

4.5. С учетом известного распределения скоростей упругих волн в земной коре (напр., по данным с ближайших профилей ГСЗ), рассчитываются кинематические поправки к отраженным волнам для полученных сейсмограмм (п. 4.4).

4.6. В пределах каждого бина суммируются сейсмограммы (п. 4.5) с получением временного разреза.

5. Качественно оценивается полученный при экспресс-обработке разрез: прослеживаются границы отражающих волн до времен вступления продольных волн от границы Мохоровичича. При положительной оценке профилирование продолжается, при отрицательной – параметры полевой съемки меняются: увеличивается мощность источника возбуждения, повышается чувствительность регистрирующей аппаратуры, устанавливаются предельно допустимые значения помех и т.д., чтобы получить качественный разрез.

6. Выполняется речное сейсмическое профилирование с параметрами, подтвержденными или уточненными результатами опытных работ (п. 3-5).

7. С использованием методик, разработанных и неоднократно применяемых к материалам опорных геолого-геофизических профилей, с высоко гетерогенной

средой, повышенными скоростями и слабым уровнем сигнала [Обработка..., 2001; Глубинные..., 2007; Мосягин, Ефимов, 2021], выполняется обработка материалов речной сейсморазведки (п. 3) с получением окончательного глубинного сейсмического разреза земной коры на всю мощность.

8. Полученный разрез верифицируется сопоставлением с полученными ранее соседними разрезами.

Результаты исследования дали возможность нарастить опорный геолого-геофизический профиль 1-СБ-Восточный речным Витимским фрагментом (170 пог. км). Получены данные о глубинном строении неизученной ранее территории, где затруднено в силу орографических условий проведение сухопутных глубинных сейсмических работ методом ОГТ. Ранее при создании сети опорных профилей не использовались материалы речной сейсморазведки. Выполненное 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, близвертикально отраженных от любой из границ в земной коре вплоть до границы Мохоровичича. Во-вторых, высокая чувствительность 24-разрядной аппаратуры «Байкал», в сочетании с сейсмоприемниками 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. 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 относительно дешевой информации о глубинном строении земной коры по профилям, которые будут выполнены методом речной сейсморазведки ОГТ. 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 глубиной исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Соискателем найден и реализован оригинальный подход к решению научной проблемы: по данным мониторинга сейсмического шума разработан и реализован эффективный алгоритм выделения малоамплитудных сейсмических сигналов и с их использованием разработаны две методики дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации технических сооружений (ГЭС, ТЭЦ, АЭС и др.) и методика определения структуры земной коры на всю ее мощность, что имеет важное практическое и экономическое значение. Найденные новые решения имеют ряд преимуществ по сравнению с известными.

Во-первых, применение разработанного комбинированного алгоритма выделения в сейсмическом шуме малоамплитудных сигналов, повышает качество спектрально-временного анализа данных мониторинга. Реализованные в программном обеспечении удобные функции интерактивного изменения параметров расчета, визуализации спектрограмм и их масштабирования по осям частоты и времени позволяют обработчику оперативно обнаруживать в сейсмическом шуме не только слабые по амплитуде сигналы, но и сигналы, локализованные в относительно небольших ограниченных частотой и временем интервалах. Отображение спектрограммы на экране одновременно с инструментами количественного определения амплитудно-частотных характеристик сигналов дает возможность обработчику быстро оценить влияние на них разного рода помех, что уменьшает вероятность ошибки. Наличие в составе программного обеспечения SpectrumSeism функций интегрирования, дифференцирования и деконволюции сейсмических трасс расширяет технические возможности используемой сейсмической аппаратуры, что существенно увеличивает полноту извлекаемой из сейсмограмм информации.

Во-вторых, в результате применения разработанной методики дистанционного обнаружения разрушительных процессов в работающем оборудовании крупных промышленных объектов увеличивается полнота данных для анализа за счет получения информации как о характеристиках механических

колебаний объектов, недоступных для прямого их измерения, так и о взаимодействии работающих агрегатов и механизмов с окружающими конструкциями и сооружениями, приводящем к негативным резонансным эффектам. К тому же, накопленные за длительный период мониторинга данные используются при необходимости как «черный ящик» для исследования механики процессов, происходящих на промышленных объектах задолго до и во время развития аварий, необходимого для выяснения их причин.

В-третьих, методика дистанционного определения частот собственных колебаний зданий и сооружений по малоамплитудным сигналам при многолетнем мониторинге сейсмического шума в их окрестности позволяет определять длительные (годы, десятилетия) предположительно деструктивные процессы в конструкциях, что не доступно без организации специального мониторинга на этих объектах.

В-четвертых, разработанная методика построения разрезов земной коры на всю мощность по малоамплитудным сигналам отраженных волн на увеличенных временах вступлений в материалах речной сейсморазведки методом ОГТ позволяет существенно снизить затраты на полевые исследования.

Разработанные методики имеют ряд ограничений в применении. В большей мере они обусловлены низкой амплитудой исследуемых сигналов по сравнению с помехами. Для достижения приемлемого соотношения сигнал/шум необходимо использовать длительные интервалы регистрации сейсмического шума, а это ведет к снижению разрешающей способности методик. Из-за затухания упругих волн при распространении в среде расстояния до объекта, на которых возможно устойчивое выделение полезного сигнала, по опыту проведенного исследования не превышают первых десятков километров. Аналогичное ограничение возникает при построении разрезов земной коры по малоамплитудным сигналам отраженных волн: необходимо существенно увеличить кратность суммирования за счет увеличения площади бина, что влечет снижение разрешающей способности разреза. К тому же

теряется некоторые возможности обработки методом ОГТ таких данных (напр., затруднено проведение скоростного анализа).

Несомненно, что разработки в исследуемой области должны быть продолжены. В рамках найденного подхода к решению задачи дистанционного обнаружения разрушительных процессов при эксплуатации крупных промышленных объектов целесообразно дальнейшее развитие алгоритмов обработки и методик интерпретации данных мониторинга с повышением не только качества выделения малоамплитудных сейсмических сигналов, но и ее оперативности. Последнее наиболее актуально в связи со значительным объемом, в сотни терабайт, исходного цифрового материала, включающего сейсмограммы с сети станций, зарегистрированные за десятки лет мониторинга. В этом плане представляется прогрессивным использовать технологии искусственного интеллекта для обработки и анализа такого колоссального объема данных.

В связи со значительным сокращением в последние годы финансирования дорогостоящих методов определения глубинной структуры земной коры, необходимо и дальше развивать найденный подход по использованию для этих целей выделенных в сейсмическом шуме малоамплитудных отраженных волн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акт технического расследования аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале «РусГидро» - «Саяно- Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного». Федеральная служба по экономическому, технологическому и атомному надзору, 2009 г. // [<http://www.energystate.ru/news/files/Sayano-Shushenskaya-GES--akt-rassledovaniya.pdf>]
2. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками: монография / А.С. Алексеев [и др.]. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, Филиал «Гео», Изд-во СО РАН, 2004. 387 с.
3. Алгоритм обработки микросейсм методом H/V для оценки параметров двуслойной скоростной модели на основе расчета эллиптичности поверхностной волны Рэлея / А.В. Яблоков, П.А. Дергач, А.В. Лисейкин [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2024. – Т. 51. – № 1. – С. 95-108. <https://doi.org/10.21455/VIS2024.1-7>
4. Алтай и Саяны / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев [и др.] // Землетрясения России в 2019 году. Под ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 37-44.
5. Алтай и Саяны / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев [и др.] // Землетрясения России в 2020 году. Под ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. – С. 38-44.
6. Антоновская Г.Н. Сейсмический мониторинг промышленных объектов: проблемы и пути решения / Г.Н. Антоновская, Н.К. Капустян, Е.А. Рогожин // Сейсмические приборы. – 2015. – Т. 51, № 1. – С. 5-15.
7. Атлас «Опорные геолого-геофизические профили России». Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год» [Электронное издание] // СПб.: ВСЕГЕИ, 2013, 94 с. URL: <https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/> (дата обращения: 23.11.2024).
8. Афтершоки Тувинского-I землетрясения 27 декабря 2011 г. с $M_l=6.7$ и Тувинского-II - 26 февраля 2012 г. с $M_l=6.8$ (Республика Тува) / А.Ф. Еманов, А.А.

Еманов, А.В. Фатеев [и др.] // Землетрясения Северной Евразии. 2012 год. – Обнинск, 2018. – С. 302-312.

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

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

11. Бах А.А. SVMOD V1.0 / А.А. Бах, А.В. Дураченко, А.Ф. Еманов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2019665597; RU; № 2019619827, заявл. 06.08.2019, опубл. 26.11.2019.

12. Башнин О.И. Саяно-Шушенская катастрофа – синхронный гидроакустический резонанс? / О.И. Башнин // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 7. – С. 29-45.

13. Берзин Р.Г. Сопоставление данных методов отраженных и преломленных волн по профилю Кемь-Ухта / Р.Г. Берзин, Н.И. Павленкова // Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: профиль Кемь-Калевала. Петрозаводск: Кар. НЦ РАН. – 2001. – С. 64-77.

14. Берлин В.В. О статье В.Н. Тарасова «Гидроупругие колебания агрегатов ГЭС» / В.В. Берлин, О.А. Муравьев // Гидротехническое строительство. – 2012а. – № 1. – С. 24-25.

15. Берлин В.В. Исследование резонансных явлений в напорных водоводах и отсасывающих трубах ГЭС / В.В. Берлин, О.А. Муравьев // Гидротехническое строительство. – 2012б. – № 7. – С. 46-58.

16. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Производственное издание / В. И. Брызгалов. Красноярск: Сибирский изд. дом "Суриков", 1999. – 561 с.

17. Бунгум Х. Использование сейсмических колебаний, генерируемых плотиной гидроэлектростанции, для изучения вариаций сейсмических скоростей /

Х. Бунгум, Э. Хьертенберг, Т. Ризбо // Исследование Земли невзрывными источниками. Под ред. А.В. Николаева, И.Н. Галкина. – М.: Наука, 1981. – С. 248-259.

18. Бутырин П.Г. Единая система хранения и доступа к геофизическим данным. Традиции и новые подходы / П.Г. Бутырин, С.А. Красилов // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 77-87.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.05>

19. Вишератин К.Н. Практические методы оценивания спектральных параметров / К.Н. Вишератин, Ф.И. Карманов // Учебное пособие по курсу «Вычислительные методы в инженерных расчетах». – Обнинск: ИАТЭ, 2008. – 60 с.

20. Влияние работы гидроагрегатов на собственные колебания плотины Саяно-Шушенской ГЭС / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, Р.Ш. Альжанов [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2013. – №7. – С. 2-7.

21. Возможности речной сейсморазведки для изучения строения земной коры и верхней мантии территории Сибири / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 2. – С. 280-292.
<https://doi.org/10.15372/GiG2022104>

22. Возможности сейсморазведки при изучении складчатой структуры антрацитов / Б.А. Канарейкин, А.С. Сальников, Д.В. Напреев [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2023. – № 2 (54). – С. 33-40.

23. Воронков О.К. Отзыв на статью Сашурина А.Д. «Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации» / О.К. Воронков // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 43-44.

24. Выявление особенностей глубинного строения земной коры Южно-Магаданского фрагмента опорного профиля 2-ДВ на основе статистическо-динамического анализа отраженно-рассеянных волн МОГТ / А.Л. Ронин, П.А. Лебедин, Ю.М. Эринчек [и др.] // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений им. В.В. Федынского. – Тверь: ООО «Изд-во ГЕРС», 2007. – С. 55-63.

25. Газиев Э.Г. О проблеме нестационарного состояния плотины и скального основания Саяно-Шушенской ГЭС / Э.Г. Газиев, А.М. Замахеев, А.И. Савич // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 45-47.

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

27. Глубинное строение земной коры северо-восточной Евразии и ее континентальных окраин / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, С.П. Шокальский [и др.] // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – Т. 12, № 2. – С. 199-224. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0521>

28. Глубинное строение земной коры и верхней мантии Северо-Восточной Евразии / С.Н. Кашубин, О.В. Петров, Е.Д. Мильштейн [и др.] // Региональная геология и металлогения. – 2018. – № 76. – С. 9-21.

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

30. Глубинные сейсмические исследования отраженными волнами / А.К. Сулейманов, Н.Г. Заможная, Ю.Н. Андрющенко [и др.] // Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным. – Новосибирск. – Издательство «Наука». – 2007. – С. 22-27.

31. Гольдин С.В. Линейные преобразования сейсмических сигналов // М., «Недра». – 1974. – 352 с.

32. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. – 1999.

33. Громыко П.В. О причинах увеличения амплитуд собственных колебаний плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции / П.В. Громыко, В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2016. – Т. 2, № 2. – С. 148-151.

34. Громыко П.В. Об изменении уровня динамических колебаний элементов сооружения Саяно-Шушенской ГЭС при газонасыщении жидкости в проточной части гидроагрегата / П.В. Громыко, В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2017. – Т. 2, № 3. – С. 88-93.

35. Губайдуллин Д.А. Акустические волны в жидкости с твердыми частицами и пузырьками газа / Д.А. Губайдуллин, Ю.В. Федоров // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2018. – №2. – С. 77-83.

36. Дергач П.А., Юшин В.И. О «запредельных» возможностях электродинамических сейсмоприемников // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 4. С. 33–42. <https://doi.org/10.21455/si2016.4-3>

37. Детальная высокоразрешающая сейсморазведка при нефтегазовых работах в зонах шельфа, речной и озерной сети в условиях сверхмалых (0.5-1м) глубин / В.С. Селезнев, А.П. Сысоев, А.М. Игнатов [и др.] // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа. Пятая научно-практическая конференция, Том 1, Ханты-Мансийск, Издательство «Путиведь», 2002, с. 301-309.

38. Детальные сейсмические исследования на акваториях и в транзитных (вода-суша) зонах / В.С. Селезнев, В.М. Соловьев, А.П. Сысоев [и др.] // Пути повышения эффективности геолого-разведочных работ на нефть и газ в Восточной Сибири и Республике Саха (Якутия). Материалы всероссийской конференции, СНИИГГиМС, г. Новосибирск. – 2006. – С. 212-215.

39. Дягилев Р.А. Уникальная научная установка «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга российской федерации, сопредельных территорий и мира» / Р.А. Дягилев, И.А. Сдельникова // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2-0591>

40. Егоров А.Ю. Определение собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС по показаниям сейсмометрической аппаратуры и расчетными

методами / А.Ю. Егоров, В.С. Костылев, М.И. Саранцев // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 8. – С. 45–50.

41. Еманов А.Ф. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 48–61.
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>

42. Журавлев В.И. Особенности временных вариаций микросейсмического шума на сейсмических станциях в Таджикистане / В.И. Журавлев, А.А. Лукк // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 4. – С. 18–37. DOI:
<https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.4.02>

43. Изменение значений частот собственных колебаний зданий и сооружений в зависимости от внешних факторов / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, И.В. Коковкин [и др.] // Геология и геофизика. – 2024. – С. 1036-1044.
<https://doi.org/10.15372/GiG2024102>

44. Изучение периодического сейсмического сигнала от Нурекской ГЭС / А.Л. Александров [и др.] // Исследование Земли невзрывными сейсмическими источниками / Под ред. А.В. Николаева, И.Н. Галкина. – М.: Наука, 1981. – С. 260-265.

45. Изучение сейсмических воздействий на площадку строительства ЦКП «СКИФ» / А.А. Еманов, А.Ф. Еманов, Е.Б. Левичев [и др.] // Вопросы инженерной сейсмологии. – 2022. – № 49 (3). – С. 5–38. <https://doi.org/10.21455/VIS2022.3-1>

46. Исследования и измерения характеристик высокочувствительных сейсмоприемников на экспериментальной базе «Обнинск» / А.Ю. Эльтеков, О.А. Герасимчук, П.М. Уткин [и др.] // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, №2. – С. 52-69. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.2.04>

47. Кальная О.И. Особенности функционирования Шагонарского плеса Саяно-Шушенского водохранилища и его влияние на экологическое состояние окружающей среды / О.И. Кальная, О.Д. Аюнова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-7. – С. 1452–1462. – EDN: TFTKEN

48. Камчатка и Командорские острова / Д.В. Чебров, С.Я. Дрознина, С.Л. Сенюков [и др.] // В сборнике: Землетрясения России в 2020 году. Ежегодник. – Обнинск, 2022. – С. 73-84.

49. Карпик А.П. К вопросу о причинах аварии и оценка состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС / А.П. Карпик, А.П. Епифанов, Н.И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 2. – С. 24-28.

50. Карта месторождений полезных ископаемых, увязанная с государственным балансом запасов РФ. Горючие ископаемые. Новосибирская область. Сибирский федеральный округ. 2020. Электронный ресурс ФГБУ “ВСЕГЕИ” <http://atlaspacket.vsegei.ru/#23927122f784997b6> (последнее обращение 11.10.2021).

51. Колосов М.А. Надежность направляющего аппарата турбины Саяно-Шушенской ГЭС / М.А. Колосов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 3. – С. 7-10.

52. Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения // М.: Наука. – 1975. – 153 с.

53. 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) / Е.Э. Косякина, А.В. Лисейкин, П.В. Громыко [и др.] // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 3. – С. 45-58.

54. Копылова Г.Н. Новая прогностическая технология анализа вариаций низкочастотного сейсмического шума (на примере районов Дальнего Востока России) / Г.Н. Копылова, А.А. Любушин, Л.Н. Таранова // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 75-91. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.05>

55. Корепанов В.В. Сезонные изменения собственных частот колебаний здания на свайном фундаменте / В.В. Корепанов, Р.В. Цветков // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – №2. – С. 153-167. [10.15593/perm.mech/2014.2.07](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2014.2.07)

56. Ключах А.А. К вопросу об оценке вибрационного состояния гидроагрегатов ГЭС / А.А. Ключах // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 5. – С. 40-44.

57. Кудрявый В.В. Системные причины аварий / В.В. Кудрявый // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 2. – С. 29-37.

58. Лисейкин А.В. Важнейшие результаты научной деятельности Сейсмологического филиала ФИЦ ЕГС РАН в 2016-2020 гг. (сейсмические исследования) / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 54-74.

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

60. Лисейкин А.В. Результаты исследования здания с резинометаллической сейсмоизоляцией методом стоячих волн (на примере здания гражданского строительства Национального университета Тайваня, г. Тайбэй) / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, А.А. Брыксин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2017. – Т. 1, № 2. – С. 53-59.

61. Лобановский Ю.И. Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов / Ю.И. Лобановский // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 7. – С. 39-45.

62. Марчук А.Н. Геологические и геодинамические аспекты в комплексе причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС / А.Н. Марчук, Н.А. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 48-57.

63. Методика изучения строения земной коры на всю мощность средствами речной сейморазведки / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев [и др.] // Докл. РАН. Науки о Земле. – 2022. – Т. 502, № 2. – С. 101-106.

64. Методы оценки сейсмических воздействий (пособие) / В.В. Штейнберг, М.В. Сакс, Ф.Ф. Аптикаев [и др.] // Задание сейсмических воздействий. М.: Наука, 1993. – С. 5-94.
65. Мишаткин В.Н. Системы сейсмических наблюдений / В.Н. Мишаткин // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Под ред. Н.В. Шарова, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукина. Кн. 1: Землетрясения. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. – С. 67-93.
66. Мосягин Е.В. О речной сейсморазведке: история, опыт применения, возможности на современном этапе исследований Сибирской платформы / Е.В. Мосягин, А.С. Ефимов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2021. – № 3. – С. 48-60. <https://doi.org/10.20403/2078-0575-2021-3-48-60>
67. Мониторинг технического состояния здания сейсмическим методом / А.А. Курданова, М.Н. Воскресенский, Е.А. Косоротова [и др.] // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2024. – Т. 20, № 5. – С. 479-490. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-5-479-490>
68. Мультифрактальные и энтропийные статистики сейсмического шума на Камчатке в связи с сильнейшими землетрясениями / А.А. Любушин, Г.Н. Копылова, В.А. Касимова [и др.] // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15, № 6. – С. 1507-1521. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2023-15-6-1507-1521>
69. Николаев А.В. Изучение литосферы сейсмическим шумом / А.В. Николаев, П.А. Троицкий, И.Я. Чеботарева // ДАН СССР. 1986. Т. 286. № 3. С. 586-591.
70. О причине аварии на Саяно-Шушенской ГЭС с точки зрения сейсмолога / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, А.А. Брыксин [и др.] // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 136-140.

71. О собственных акустических колебаниях в водоводах гидротурбин Саяно-Шушенской ГЭС / В.С. Селезнев, В.Б. Курзин, А.В. Лисейкин [и др.] // Гидротехническое строительство. – 2016. – № 7. – С. 41-45.

72. Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, А.А. Бах [и др.] // Геофизические методы исследования земной коры. Материалы Всероссийской конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Н.Н. Пузырева. – 2014. – С. 182-186.

73. Об использовании ветровых колебаний сооружений для сейсмического просвечивания / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская [и др.] // Докл. РАН. – 2005. – Т. 402, № 2. – С. 255-259.

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

75. Определение устойчивости отвалов угольных разрезов по собственным колебаниям (по данным мониторинга на Колыванском месторождении антрацита, Новосибирская область) / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов [и др.] // Геология и геофизика. – 2023. – Т. 64, № 5. – С. 754-763.

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

77. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции / П.А. Дергач, Ц.А. Тубанов, В.И. Юшин [и др.] // Сейсмические приборы. – 2018. – № 54 (3). – С. 22–34. <https://static.ifz.ru/10.21455/si2018.3-2>

78. Особенности сейсмического строения Забайкалья в створе опорного профиля 1-СБ «Восточный» по данным разнополяризованных Р- и S-волн /

В.М. Соловьев, Н.А. Галева, А.С. Сальников [и др.] // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. – 2019. – № 3 (39). – С. 57-71.

<https://doi.org/10.20403/2078-0575-2019-3-57-71>

79. Первый опыт изучения складчатой структуры угольных пластов в Горловском антрацитовом бассейне методом сейсморазведки / Б.А. Канарейкин, А.С. Сальников, Д.В. Напреев [и др.] // Интерэкспо «ГеоСибирь-2022». – 2022. – Т.2. – С. 1-8.

80. Пересчет стоячих волн при детальном инженерно-сейсмологических исследованиях / А.Ф. Еманов, В.С. Селезнев, А.А. Бах [и др.] // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43. – № 2. – С. 192–207.

81. Пневматический источник сейсмических сигналов / Н.В. Бадиков, А.М. Игнатов, Ю.А. Москаленко [и др.] // Патент на изобретение RU 13705, 10.05.2000. Заявка № 2000102011/20, 24.01.2000.

82. 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) / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, В.М. Соловьев [и др.] // Геология и геофизика. – 2025. – Т. 66, № 1. – С. 109-123.

83. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. Введение в общую сейсмологию // Новосибирск: Изд-во СО РАН: НИЦ ОИГГМ, 1997. – 301 с.

84. Раутиан Т.Г. Об определении энергии землетрясений на расстоянии до 3000 км // Экспериментальная сейсмика. (Труды ИФЗ АН СССР; № 32(199)). – М.: Наука, 1964. – С. 88–93.

85. Региональная сеть сейсмологических наблюдений на территории Дагестана: состояние и перспективы развития / Х.Д. Магомедов, Д.Г. Таймазов, З.А. Адилов [и др.] // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 4. – С. 79-96.

86. Речная сейсморазведка на востоке России / В.С. Селезнев, В.М. Соловьев, А.П. Сысоев [и др.] // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края: Сборник материалов научно-практической конференции. Красноярск: КНИИГиМС. – 2007. – С. 143–146.

87. Рыбушкин А.Ю. Современные сейсмические станции серии «Байкал» / А.Ю. Рыбушкин, Д.О. Терешкин // В книге: Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XV Международной сейсмологической школы. Обнинск, 2021. – С. 76.

88. Салтыков В.А. О возможности использования приливной модуляции сейсмических шумов в целях прогноза землетрясений / В.А. Салтыков // Физика Земли. – 2017. – № 2. – С. 84-96. <https://doi.org/10.7868/S0002333717010124>

89. Саранцев М.И. Определение собственных частот колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным инженерно-сейсмометрических наблюдений // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева. – 2017. – Т. 283. – С. 72–81. – EDN: ZRJGEN

90. Сашурин А.Д. Истоки и причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС: возможное развитие ситуации / Сашурин А.Д. // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 37-43.

91. Сейсмические исследования на акваториях: проблемы, результаты, перспективы / В.С. Селезнев, В.М. Соловьев, А.П. Сысоев [и др.] // Пути реализации нефтегазового потенциала Ханты-Мансийского автономного округа: Материалы седьмой научно-практической конф. Том 1, Ханты-Мансийск, Издательский дом «ИздатНаукаСервис». – 2004. – С. 204-212.

92. Сейсмологические наблюдения во время оползня на отвале Колыванского месторождения антрацита (Новосибирская область) / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, А.Ф. Еманов [и др.] // Докл. РАН. Науки о Земле. – 2021. – Т. 499, № 1. – С. 65-70.

93. Сейсмометрический мониторинг технического состояния несущих строительных конструкций зданий и сооружений по динамическим

характеристикам / Е.П. Золотухин, А.П. Кузьменко, В.С. Сабуров [и др.] // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18, № S1. – С. 29-36.
<http://www.ict.nsc.ru/jct/getfile.php?id=1645>

94. Селезнев В.С. Были ли повышенные колебания второго гидроагрегата до аварии на Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 г.? / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, П.В. Громыко // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 10. – С. 48-50.

95. Селезнев В.С. Способ непрерывного мониторинга физического состояния зданий и/или сооружений и устройство для его осуществления : пат. 2461847 Российская Федерация / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, А.А. Брыксин ; заявитель и патентообладатель Новосибирск. ООО «Геофизическая служба». – 2010128394/28 ; заявл. 08.07.2010 ; – опубл. 20.09.2012, Бюл. №26, - 10 с.

96. Синева С.И. Изучение динамических характеристик сейсмического шума по данным цифровых станций Казахстанской сети / С.И. Синева, Н.Н. Михайлова, И.И. Комаров // Геофизика и проблемы нераспространения: Вестник НЯЦ РК. – 2000. – Вып. 2. – С. 24-30.

97. Способ мониторинга возникновения недопустимой вибрации гидроагрегата вследствие гидродинамических пульсаций / Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская, А.В. Данилов [и др.] // Патент на изобретение RU 2680105 С2, № 2017121727, завл. от 20.06.2017, опубл. 15.02.2019.

98. Способ определения физического состояния зданий и сооружений / В.С. Селезнев, А.Ф. Еманов, В.Г. Барышев [и др.] / Патент на изобретение RU 2140625 С1 от 27.10.1999. – EDN: EZZJKN

99. Способ организации непрерывного сейсмометрического мониторинга инженерных сооружений и устройство для его осуществления : пат. 2546056 Российская Федерация / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, Р.Ш. Альжанов [и др.] ; заявитель и патентообладатель Новосибирск. ГС СО РАН. – 2013127923/28; заявл. 18.06.2013 ; – опубл. 10.04.2015, Бюл. №10, - 6 с.

100. Тарасов В.Н. Гидроупругие колебания агрегатов ГЭС / В.Н. Тарасов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 13-23.
101. Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций и инструкция по его заполнению / РАО "ЕЭС России". – 1994.
102. Трофименко С.В. Изучение спектров микросейсм до и после землетрясений / С.В. Трифименко, К.С. Рябинкин, В.В. Пупатенко // Успехи современного естествознания. – 2016. – № 11. – С. 191-196.
103. Фильтрогенные газовые гидраты в Черном море (21-й рейс НИС «Евпатория») / Г.Д. Гинсбург, А.Н. Кремлев, М.Н. Григорьев [и др.] // Геология и геофизика. – 1990. – № 3. – С. 10-20.
104. Ширман А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев // М.: 1996. – 276 с.
105. Экспериментальное изучение сейсмических шумов на накопительном кольце ЦКП «СКИФ» / П.А. Дергач, Г.Н. Баранов, К.Ю. Карюкина [и др.] // Геофизические технологии. – 2023. – № 4. – С. 64–74. <https://doi.org/10.18303/2619-1563-2023-4-64>
106. Юдахин Ф.Н. Инженерно-сейсмические исследования геологической среды и строительных конструкций с использованием ветровых колебаний зданий / Ф.Н. Юдахин, Н.К. Капустян, Г.Н. Антоновская // Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 155 с.
107. Юркевич Б.Н. Отзыв на статью Лобановского Ю.И. «Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов» / Б.Н. Юркевич // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 51-55.
108. Юшин В.И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра / В.И. Юшин // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 5. – С. 852-863.
109. Яновская Т.Б. К теории метода микросейсмического зондирования / Т.Б. Яновская // Физика Земли. – 2017. – №6. – С. 18-23. <https://doi.org/10.7868/S0002333717060072>

110. A Study of Temperature and Aging Effects on Eigen-frequencies of Concrete Bridges for Health Monitoring / V.H. Nguyen, J. Mahowald, S. Schommer [et al.] // Engineering. – 2017. – V. 9. – P. 396–411. <https://doi.org/10.4236/eng.2017.95023>

111. Ambient noise surface wave tomography of Quaternary structures derived from a high-density array in the central Hebei Depression, North China / Q. Wu, Q. Li, X. Hu [et al.] // Geosci J. – 2023. – V. 27. – P. 177–190. <https://doi.org/10.1007/s12303-022-0033-y>

112. Anthony R.E. The widespread influence of Great Lakes microseisms across the Midwestern United States revealed by the 2014 polar vortex / R.E. Anthony, A.T. Ringler, D.C. Wilson // Geophys. Res. Lett. – 2018. – V. 45. – P. 3436–3444. <https://doi.org/10.1002/2017GL076690>

113. Ardila Y.V. An Automated Procedure for Continuous Dynamic Monitoring of Structures: Theory and Validation / Y.V. Ardila, I.D. Gómez-Araújo, J.D. Villalba-Morales // J. Vib. Eng. Technol. 12, 4313–4333 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42417-023-01121-1>

114. Barazangi M. Reflection Seismology. A global perspective / M. Barazangi, L. Braun // American Geophysical Union, Geodynamic Series. – Washington, 1986. – V. 14. – 339 p.

115. Cooley, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series / J. W. Cooley, J. W. Tukey // Mathematics of Computation. – 1965. – Vol. 19. – P. 297-301. <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1>

116. Coseismic and post-seismic velocity changes detected by Passive Image Interferometry: comparison of one great and five strong earthquakes in Japan / M. Hobiger, U. Wegler, K. Shiomi [et al.] // Geophysical Journal International. – 2016. – V. 205, Issue 2. – P. 1053–1073. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw066>

117. Deep-Learning-Based Seismic-Signal P-Wave First-Arrival Picking Detection Using Spectrogram Images / S. Choi, B. Lee, J. Kim [et al.] // Electronics. – 2024. – 13. – 229. <https://doi.org/10.3390/electronics13010229>

118. Development of a monitoring system to Cabril dam with operational modal analysis / P. Mendes, C. Oliveira Costa, J. Almeida Garret [et al.] // The Proceedings of the 2nd Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures (EVACES'07). – Porto, Portugal, 2007. – P. 1015–1023.

119. Dynamic monitoring of a concrete arch dam during the first filling of the reservoir / S. Pereira, F. Magalhães, J.P. Gomes [et al.] // Engineering Structures. – 2018. – V. 174 (1). – P. 548–560. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.076>

120. Effect of environmental factors on modal identification of a hydroelectric dam's hollow-gravity concrete block / Y.V. Ardila-Ardila, I.D. Gómez-Araújo, J.D. Villalba-Morales [et al.] // J Civil Struct Health Monit (2024). <https://doi.org/10.1007/s13349-024-00828-3>

121. Egorov A.Y. Determining the natural frequencies of the dam at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant based on data from a seismometer system and computations / A.Y. Egorov, V.S. Kostylev, M.I. Sarantsev // Power Technology and Engineering. – 2017. – V. 50, N 5. – P. 506–510. <https://doi.org/10.1007/s10749-017-0740-0>

122. Geofilters / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, Д.Б. Севостьянов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022613238; RU; № 2022613181, заявл. 11.03.2022, опубли. 12.03.2022.

123. Hjorten E. Monochromatic Components of the Seismic Noise in the NORSAR Area / E. Hjorten, T. Risbo // Geophysical Journal International. Volume 42. Issue 2. August 1975. P. 547–554. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1975.tb05877.x

124. Hydropower Dam State and Its Foundation Soil Survey Using Industrial Seismic Oscillations / G. Antonovskaya, N. Kapustian, I. Basakina [et al.] // Geosciences. 2019 (9), 187. DOI: 10.3390/geosciences9040187.

125. Influence of temperature on the natural vibration characteristics of simply supported reinforced concrete beam / Y. Cai, K. Zhang, Zh. Ye [et al.] // Sensors. – 2021. – V. 21 (12). – 4242. <https://doi.org/10.3390/s21124242>

126. Investigating Short-Period Lake-Generated Microseisms Using a Broadband Array of Onshore and Lake-Bottom Seismometers / C.J.W. Carchedi, J.B. Carcherdi, S.C. Webb [et al.] // Seismol. Res. Lett. – 2022. – V. 93. – P. 1585-1600. <https://doi.org/10.1785/0220210155>
127. Jung, H. Rotor Fault Diagnosis Method Using CNN-Based Transfer Learning with 2D Sound Spectrogram Analysis / H. Jung, S. Choi; B. Lee // Electronics. – 2023. – 12. – 480. <https://doi.org/10.3390/electronics12030480>
128. La Rocca M. Day-night cycle of seismic noise HVSR and comparison with body waves and T waves / M. La Rocca, G.D. Chiappetta // Geophys. J. Int. – 2022. – V. 231, Iss. 3. – P. 1535–1544. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac265>
129. Liseikin A.V. Monitoring of the natural frequencies of Chirkey arch dam / A.V. Liseikin, V.S. Seleznev, Z.A. Adilov // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – V. 4 (96). – P. 15–20. <https://engstroy.spbstu.ru/article/2020.96.2/>
130. Loh C.H., Wu T.C. System identification of Fei-Tsui arch dam from forced vibration and seismic response data // Journal of Earthquake Engineering. – 2000. – V. 4 (4). – P. 511–537. <https://doi.org/10.1080/13632460009350381>
131. Modal tracking under large environmental influence / S. Pereira, F. Magalhães, Á. Cunha, F. Magalhães, J.P. Gomes [et al.] // Journal of Civil Structural Health Monitoring. – 2022. – V. 12(1). – P. 179-190. <https://doi.org/10.1007/s13349-021-00536-2>
132. Mooney W.D. Seismic methods for determining earthquake source parameters and lithospheric structure // in Pakiser, L.C., and Mooney, W.D., Geophysical framework of the continental United States: Boulder, Colorado, Geological Society of America Memoir 17. – 1989. – P. 71-109.
133. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring / G.N. Antonovskaya, N.K. Kapustian, A.I. Moshkunov [et al.] // Journal of Seismology. – 2017. – T. 21. – № 5. – P. 1039-1053. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>

134. Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales / T.G. Rautian, V.I. Khalturin, K. Fujita [et al.] // Seismological Research Letters. – 2007. – 78(6). – P. 579-590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>

135. Podolskiy E.A. Cryoseismology / E.A. Podolskiy, F. Walter // Reviews of Geophysics. – 2016. – V. 54. – P. 708–758. <https://doi.org/10.1002/2016RG000526>

136. Smalls P.T. Lake-Bottom Seismograph Observations of Microseisms in Yellowstone Lake / P.T. Smalls, R.A. Sohn, J.A. Collins // Seismolog. Res. Lett. – 2019. – V. 90. – P. 1200–1208. <https://doi.org/10.1785/0220180242>

137. SpectrumSeism / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, Д.Б. Севостьянов [и др.] // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021666241; RU; № 2021665611, заявл. 11.10.2021, опубл. 11.10.2021.

138. SSlicer / А.В. Лисейкин, В.С. Селезнев, Д.Б. Севостьянов [и др.] // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022613238. Заявка № 2022613181 от 11.03.2022, опубл. 12.03.2022.

139. Standing waves in engineering seismology / A.F. Emanov, V.S. Seleznev, A.A. Bakh [et al.] // Russian Geology and Geophysics. – 2002. – V. 43, N 2. – P. 181–196. – EDN: TNSYOL

140. Structure of sedimentary cover in the Teletskoye Lake: seismic data / V.S. Seleznyov, V.G. Nikolaev, M.M. Buslov [et al.] // Continental Rift tectonics and Evolution of Sedimentary Basins: Internentional Workshop intas joint Russian-Belgian research project. Novosibirsk, May 22-24. – 1996. – P. 67-70.

141. Sun M. Investigation of long-term modal properties of a supertall building under environmental and operational variations / M. Sun, Q. Li, X. Han // Journal of Building Engineering. – 2022. – V. 62. – Art. 105439. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105439>

142. The structure of sedimentary deposits of Lake Teletskoe according to the data of continuous one-channel seismic profiling / V.S. Seleznev, V.G. Nikolaev, M.M. Buslov [et al.] // Russian Geology and Geophysics. 1995. 36(3). P. 113-121.

143. Using ambient seismic noise to monitor ocean bottom pressure / B. Luo, Sh. Zhang, N. Takeuchi [et al.] // ESS Open Archive. – March 21, 2024. <http://dx.doi.org/10.22541/essoar.171104010.09103770/v1>

144. Vul'fovich N.A. Development of unrecoverable displacements of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant while in use under design load parameters (1990–2016) / N.A. Vul'fovich, L.P. Potekhin // Power Technology and Engineering. – 2018. – V. 51, N 5. – P. 525–531. <https://doi.org/10.1007/s10749-018-0867-7>

145. Weng J.H. Structural health monitoring of arch dam from dynamic measurements / J.H. Weng, C.H. Loh // 12th Biennial Inter-national Conference on Engineering, Construction, and Operations in Challenging Environments; and Fourth NASA/ARO/ASCE Workshop on Granular Materials in Lunar and Martian Exploration. – Honolulu, Hawaii, 2010. – P. 2518–2534. [https://doi.org/10.1061/41096\(366\)235](https://doi.org/10.1061/41096(366)235)

146. What caused the accident at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant (SSHPP): a seismologist's point of view / V.S. Seleznev, A.V. Liseikin, A.A. Bryksin [et al.] // Seismological Research Letters. – 2014. – V. 85, № 4. – P. 817–824. <https://doi.org/10.1785/0220130163>