ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ НЕФТЕГАЗОВОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ИМ. А.А.ТРОФИМУКА
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ДЕРГАЧ Петр Александрович

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОФОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

1.6.9 - Геофизика

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
Антон Альбертович Дучков,
канд. физ.-мат. наук

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 4

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ.....16

1.1. Методы и устройства для калибровки и поверки короткопериодных сейсмометров и геофонов..... 17

1.2. Методы коррекции амплитудно-частотной характеристики геофонов..... 20

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ГЕОФОНОВ СТУПЕНЬЮ СМЕЩЕНИЯ.....26

2.1. Разработка метода абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения... 29

2.2. Создание стенда для абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения..... 33

2.3. Причины погрешностей метода и пути их снижения..... 34

2.4. Примеры калибровки и применения корректирующих процедур..... 37

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ.....46

3.1. Программная реализация алгоритма низкочастотной деконволюции в частотной области.....46

3.2. Оценка погрешности метода низкочастотной деконволюции в зависимости от точности задания параметров геофона..... 50

3.3. Разработка способа определения допустимой предельной частоты с использованием записи аппаратурного шума сейсмического регистратора.....52

3.4. Разработка методики оценки применимости комплекта геофон-регистратор для сейсмологических наблюдений различного уровня.....57

3.5. Методика обработки сейсмологических записей методом низкочастотной деконволюции..... 66

ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ..... 68

4.1. Верификация алгоритма деконволюции в частотной области посредством сопоставления результатов с записями широкополосных сейсмометров..... 69

4.2. Проверка качества результатов низкочастотной деконволюции с использованием специально разработанного низкочастотного стенда маятникового типа..... 74

4.3. Сопоставление результатов программной и аппаратной коррекции..... 79

4.4. Апробация способа расчета предельного значения для расширения частотного диапазона методом низкочастотной деконволюции на примере Камчатского землетрясения 29.07.2025 (Mw 8.8, R=4800 км)..... 82

4.5. Апробация методики обработки записей методом низкочастотной деконволюции на примере сейсмологической сети ИНГГ СО РАН в дельте р. Лена..... 84

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 93

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ..... 96

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 97

ВВЕДЕНИЕ

Объект исследования – метод низкочастотной деконволюции записей современных геофонов на предмет развития методической составляющей при проектировании сейсмологических сетей и обработке сигналов от землетрясений.

Актуальность исследования

В последнее время повышается актуальность задач, связанных с использованием плотных сейсмологических сетей при проведении высокодетальных наблюдений. Все активнее используются временные сети для решения множества различных задач: мониторинг разработки месторождений полезных ископаемых [Bommer et al., 2006; Сердюков и др., 2015; Плотницкий и др., 2017; Eaton et al., 2018; Kendall et al., 2019; Костылев и Богинская, 2022], детальное изучение активных континентальных окраин, разломных структур и очаговых зон крупных землетрясений [Еманов и др., 2020; Кобелева и др., 2020; Тубанов и др., 2021а; Тубанов и др., 2021б; Еманов и др., 2022; Чебров и др., 2024; Medved and Polat, 2025], изучение активизаций вулканов [Чебров и др., 2013; Koulakov et al., 2017; Kuznetsov et al., 2017; Сенюков и др., 2024; Senyukov et al., 2024], а также поиск источников гидротермальной энергии [Belovezhets et al., 2026]. Во всех этих задачах предъявляются повышенные требования к точности локализации гипоцентров землетрясений, на которую напрямую влияет число пунктов регистрации и их пространственное распределение. К примеру, для научно обоснованного определения местоположения очага землетрясения необходимо иметь записи хорошего качества с шести пунктов, а уже для более сложных исследований его свойств необходимо иметь такие записи с 10-15 станций, обеспечивающих хорошее азимутальное покрытие вокруг изучаемого объекта [Havskov et al., 2012b]. Для решения задач с повышенными требованиями к точности локализации гипоцентров количество используемых широкополосных станций может достигать нескольких сотен [Birkelo et al., 2012].

Как правило, современные сейсмологические сети оснащены дорогостоящими широкополосными сейсмометрами [Havskov and Alguacil, 2004; Seneviratne et al., 2016; Костылев, 2021; Гвишиани и др., 2024; Гоев и др., 2025; Резниченко и др., 2026]. Высокая стоимость таких датчиков, трудоемкость их установки, обеспечения электропитания и последующего обслуживания делают такие работы крайне дорогостоящими. В этой связи все большее внимание при выборе сейсмологических датчиков привлекают современные геофоны, массово выпускаемые для решения задач сейсморазведки. Их использование позволяет в несколько раз снизить стоимость регистрирующей аппаратуры и, как следствие, появляется возможность увеличить плотность сетей. Дополнительное преимущество – геофоны не требуют источников электропитания, что позволяет в несколько раз снизить емкость батарей, используемых на автономном сейсмологическом пункте, и дополнительно снизить эксплуатационные расходы. Кроме того, геофоны менее чувствительны к наклону. По паспортным характеристикам, допустимый угол наклона от оси чувствительности составляет 5^0, однако в реальности датчик работает с минимальными искажениями формы сигналов и при углах наклона вплоть до нескольких десятков градусов. Большинство широкополосных сейсмометров при таких углах наклона корпуса попросту перестают работать. Это обстоятельство является крайне актуальным при установке временных сетей сейсмологического мониторинга, в особенности в зонах распространения сезонной мерзлоты, когда по мере сезонных процессов промерзания и оттаивания приповерхностных грунтов сейсмометр выходит из допустимых значений его наклона.

Основным препятствием для применения геофонов во всех вышеперечисленных задачах является относительно высокая собственная частота (диапазон рабочих частот сейсморазведочных датчиков обычно начинается с 10-15 Гц), так как она накладывает существенные ограничения на регистрацию сигналов от землетрясений в области низких частот. Ситуация стала резко меняться в последние годы благодаря прогрессу в разработке и производстве геофонов: появились модификации со значениями собственной частоты вплоть до

4.5-5.0 Гц. Наиболее представительными примерами таких геофонов являются GS-ONE LF (Geospace Technologies, США) и SG-5 (Sercel, Франция). Однако и этих значений недостаточно для корректной регистрации низкочастотной составляющей сигналов от землетрясений. Это может привести к ошибкам в определении времен прихода целевых волн, а также занижению амплитуд сигналов и, следовательно, магнитуд сейсмических событий [Bormann et al., 2013].

Для восполнения этого пробела могут быть использованы специальные методы восстановления сейсмических сигналов в диапазоне ниже значений собственной частоты геофонов [Scherbaum, 1996; Юшин, 2001; Havskov and Alguacil, 2004]. Существует два подхода к расширению рабочей полосы геофонов в область низких частот: аппаратный и программный. В первом случае используются дополнительные схемы коррекции частотной характеристики аналогового сигнала до его оцифровки. Однако в этом случае мы получаем модифицированный сейсмометр, паспортные характеристики которого фиксируются на этапе проектирования корректирующей схемы [Lennartz Electronic GmbH, 2016; Anthony et al., 2019].

Второй подход, заключающийся в программной обработке уже зарегистрированных записей был, в частности, предложен и детально описан в работах В.И. Юшина [Юшин, 2000a; Юшин, 2001]. Преимуществом программного подхода является его гибкость – пользователь сам может выбрать, до какой низкой предельной частоты необходимо «расширить» спектр записи геофона (как правило, значение находится на 1-2 порядка ниже его собственной частоты). Это может оказаться полезным, т.к. в зависимости от амплитуд целевого сигнала и сейсмического шума можно адаптировать алгоритм расширения частотного диапазона под решение конкретных задач, таких как регистрация сигналов от слабых локальных и региональных землетрясений в частотных диапазонах от 0.50 и 0.01 Гц соответственно. Однако обратной стороной гибкости программного подхода является отсутствие фиксированных и понятных пользователю паспортных характеристик, которые можно было бы использовать при проектировании сейсмологических сетей и массовой обработке сигналов от

землетрясений. Таким образом, необходима методика, позволяющая рассчитывать предельное значение для расширения низкочастотного диапазона записей, произведенных комплектом регистрационной аппаратуры с конкретными техническими характеристиками, а также прогнозировать его возможности для использования в сейсмологических сетях различного уровня [Дергач и др., 2026].

Кроме того, важным является вопрос влияния погрешностей задания паспортных параметров геофонов, а именно: собственной частоты, коэффициента демпфирования и чувствительности, на результаты обработки их записей методом низкочастотной деконволюции [Беседина и др., 2013], а также получения их актуальных значений посредством калибровки. Заводская калибровка, как правило, производится на прецизионных вибростендах и малодоступна рядовому потребителю. Таким образом, актуальной задачей является разработка метода, а также легко воспроизводимого при помощи простейших механических приспособлений устройства для абсолютной калибровки геофонов. Это позволит производить калибровку как в рабочем частотном диапазоне геофонов, так и в низкочастотной области, не сертифицированной производителем, что крайне важно для верификации результатов деконволюции.

Цель исследования:

Повышение детальности сейсмологических наблюдений без потери их точности за счет использования плотной сети современных сейсморазведочных геофонов и методики обработки их записей с использованием низкочастотной деконволюции.

Научно-техническая задача исследования:

Разработать методику обработки записей сейсморазведочных геофонов с использованием низкочастотной деконволюции, позволяющую рассчитывать допустимые пределы для расширения частотного диапазона, а также оценивать применимость комплекта регистрирующей аппаратуры с заданными

техническими параметрами для сейсмологических наблюдений различного уровня.

Основные подзадачи:

1. Разработка метода и создание устройства для абсолютной калибровки геофонов, использование которых позволит повысить точность результатов низкочастотной деконволюции;
2. Разработка способа оценки предельных значений частоты для обработки сейсмологических данных методом низкочастотной деконволюции с использованием технических параметров геофонов и экспериментальной записи аппаратурного шума;
3. Разработка методики оценки применимости геофонов для сейсмологических наблюдений различных уровней на основе технических параметров регистрирующей аппаратуры.

Теория, фактический материал, методы исследования, программное обеспечение, аппаратура

Теоретической основой исследования является решение задачи низкочастотной деконволюции, предложенной российским геофизиком В.И. Юшиным, под которой понимается восстановление истинного движения корпуса сейсмометра в полосе частот, включающей как рабочую полосу датчика, расположенную в области (и выше) его собственной частоты, так и часто́ты, лежащие значительно ниже собственной, вплоть до нулевой [Юшин, 2000а; Юшин, 2001].

Фактическим материалом являются сейсмологические данные, лично полученные автором на сейсмологических пунктах Алтае-Саянского, Бурятского и Якутского филиалов ФИЦ ЕГС РАН; на территории геофизической обсерватории «Ключи» ИНГГ СО РАН, расположенной в Новосибирской области, а также в сейсмологических сетях ИНГГ СО РАН в районе НИС «Остров Самойловский»

(Республика Саха, Якутия) и ООО «Геофизические технологии» на острове Сахалин.

Верификация результатов калибровки и обработки записей геофонов с помощью низкочастотной деконволюции производилась методом сравнительного анализа с результатами, полученными для откалиброванных короткопериодных и широкополосных сейсмометров, используемых на стационарных сейсмологических пунктах.

В экспериментальных исследованиях использовалась регистрирующая аппаратура, имеющаяся в наличии в ИНГГ СО РАН и организациях-партнерах: сейсмические регистраторы БАР3.1, входящие в состав бескабельной системы SCOUT (СКБ «Сейсмического приборостроения», Россия), DATA-CUBE^3 (DiGOS Potsdam GmbH, Германия), РОСА-А (АО «СНИИГГиМС», Россия), Байкал-АСН86 и АСН88 (ООО «Экспас», Россия), D-REG (ООО «ИМ», Россия), Guralp CMG-DM24mk3 (Güralp Systems Ltd., Великобритания), Centaur (Nanometrics Inc., Канада), низкочастотные геофоны GS-ONE LF (5 Гц) и ZF-4.5 (4.5 Гц), геофоны GS-20DX и GS-ONE (10 Гц) и OMNI-2400 (15 Гц), короткопериодные сейсмометры СК-1П и MARK L-4C3D (1 Гц), широкополосные сейсмометры Guralp CMG-6T (30 с) и CMG-3ESPC (120 с), GL-CS60 (60 с), скважинные сейсмометры Trillium Compact Posthole (20 с), молекулярно-электронные сейсмометры СМЕ 4211 (30 с) и СМЕ 4311 (60 с), а также сейсмометры с аппаратурной частотной коррекцией Lennartz 3D-Lite (1 Гц) и OSOP Sixaola (2 с, совмещен с регистратором).

В основе используемого математического аппарата лежат методы и процедуры цифровой обработки и спектрального анализа сейсмических сигналов, реализованные соискателем лично на языке программирования MATLAB с использованием встроенных функций и специализированных пакетов: Fast Fourier transform, DSP System Toolbox, Filter Design Toolbox и т.д.

Защищаемые научные результаты:

Разработана методика обработки записей сейсморазведочных геофонов на основе метода низкочастотной деконволюции, включающая:

1. Теоретически обоснованный метод абсолютной калибровки электродинамических сейсмоприемников с помощью однократного воздействия на корпус датчика импульсом в форме ступени смещения, а также корректирующих процедур, позволяющих нейтрализовать влияние внешних помех и компенсировать неидеальность калибровочного импульса.

2. Разработанный способ расчета допустимых пределов для расширения низкочастотного диапазона записей геофонов методом низкочастотной деконволюции в зависимости от технических параметров датчика, а также уровней аппаратурного шума и целевых сейсмических сигналов.

3. Разработанную методику оценки применимости комплекта регистрирующей аппаратуры, состоящего из сейсмического регистратора и современного сейсморазведочного геофона, для сейсмологических наблюдений различного уровня.

Научная новизна

Разработаны метод и устройство для абсолютной калибровки геофонов и короткопериодных электродинамических сейсмометров, отличающиеся простотой практической реализации и, соответственно, доступностью для рядового пользователя.

Предложен оригинальный способ, позволяющий определить предельные значения для частотной коррекции записей современных геофонов, используя их технические параметры, полученные из паспорта либо посредством калибровки, и экспериментальную запись аппаратурного шума сейсмического регистратора. Способ отличается от известных аналогов универсальностью, а именно – отсутствием необходимости верификации результатов методом сопоставления с записью калиброванного широкополосного сейсмометра.

Впервые разработана методика обработки записей современных геофонов методом низкочастотной деконволюции, позволяющая произвести оценку применимости комплекта регистрационной аппаратуры, состоящей из сейсмического регистратора и современного геофона, для сейсмологических наблюдений различного уровня (локальных, региональных или телесейсмических), а также выбирать предельное значение для частотной коррекции на основании сопоставления спектральных амплитуд целевого сигнала и аппаратурного шума после деконволюции.

Личный вклад

Все основные результаты, представленные в диссертационной работе, получены лично соискателем:

1. Проведение теоретических исследований, направленных на обоснование метода абсолютной калибровки электродинамических сейсмоприемников с помощью однократного воздействия на корпус датчика импульсом в форме ступени смещения, а также сборка калибровочного стенда и проведение экспериментов с целью демонстрации практической реализации метода. Разработка ПО и обработка экспериментальных записей с калибровочного стенда.

2. Сборка низкочастотного маятникового стенда и проведение лабораторных экспериментов, направленных на оценку качества деконволюции записей геофонов в низкочастотной области.

3. Разработка, программная реализация и апробация методики оценки допустимых пределов расширения частотного диапазона записей геофонов в область низких частот в зависимости от параметров датчика, а также уровней аппаратурного шума и целевых сейсмических сигналов.

4. Участие в экспедициях и полевых выездах на постоянные и временные сейсмологические пункты с целью записи низкочастотных сигналов от землетрясений (Новосибирская область, Республика Алтай, Республика Саха (Якутия), Республика Бурятия, Забайкальский край, о. Сахалин, п-ов Камчатка).

5. Обработка сейсмологических данных с локальных и региональных сетей в рамках грантов и хоздоговорных работ.

Разработка и программная реализация всех процедур цифровой обработки и спектрального анализа сейсмических сигналов производилась лично автором на языке программирования MATLAB с использованием встроенных специализированных пакетов: DSP System Toolbox, Filter Design Toolbox и т.д.

Практическая и экономическая значимость

Значительное снижение стоимости регистрирующей аппаратуры за счет замены широкополосных сейсмометров, а также отсутствия необходимости обеспечения дополнительного электропитания. При фиксированном бюджете это позволяет увеличить плотность сетей и, следовательно, повысить информативность результатов, а также снизить вес оборудования и эксплуатационные расходы.

Апробация результатов

Метод абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения апробирован на специально сконструированном калибровочном стенде на примере калибровки вертикального 10-герцового сейсморазведочного геофона.

Разработанный способ расчета допустимых пределов для расширения низкочастотного диапазона записей геофонов методом низкочастотной деконволюции апробирован на примере крупного техногенного Колыванского землетрясения с магнитудой 4.3, произошедшего и зарегистрированного в Новосибирской области, где была продемонстрирована возможность расширения частотного диапазона 4.5-герцового геофона до значения 0.3 Гц. На примере Камчатского мегаземлетрясения 29.07.2025 года (Mw=8.8), зарегистрированного в Новосибирской области, продемонстрирована возможность расширения частотного диапазона 5-герцового геофона до значения 0.01 Гц.

Методика оценки применимости комплекта регистрирующей аппаратуры, состоящего из сейсмического регистратора и современного геофона, для сейсмологических наблюдений различного уровня апробирована на этапе проектирования сейсмологической сети ИНГГ СО РАН, расположенной в дельте р. Лена.

Результаты были представлены соискателем лично на ряде всероссийских и международных конференций, в том числе наиболее представительных:

- Серии международных научных конференций «Недропользование. Горное дело. Направления и технологии поиска, разведки и разработки месторождений полезных ископаемых. Экономика. Геоэкология» в 2013, 2017, 2019 и 2025 гг. (ИНГГ СО РАН, г. Новосибирск, Россия);
- IV Всероссийской конференции с международным участием «Триггерные эффекты в геосистемах» в 2017 г. (ИДГ РАН, г. Москва, Россия);
- Международной Юбилейной научной конференции «Воздействие внешних полей на сейсмический режим и мониторинг их проявлений» в 2018 г. (НС РАН, г. Бишкек, Республика Кыргызстан);
- 82nd EAGE «Annual Conference and Exhibition» в 2021 г. (г. Амстердам, Нидерланды, выступал во ВКС);
- 23-й конференции по вопросам геологоразведки и разработки месторождений нефти и газа «EAGE. Геомодель 2021» (г. Геленджик, Россия);
- VI Международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» в 2022 г. (ИДГ РАН, г. Москва, Россия);
- IV Всероссийской научной конференции «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений» в 2025 г. (ИТПЗ РАН, г. Москва, Россия).
- XX Международной сейсмологической школе «Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных» в 2026 г. (г. Санкт-Петербург, Россия).

Результаты были опробованы в рамках договоров на проведение НИР «Изучение сейсмичности на территории горно-металлургического комбината “Удокан” для задач сейсмического микрорайонирования».

Часть материалов диссертационной работы была получена в рамках исследований, выполненных при поддержке грантов ФСИ №7501ГУ/2015, РФФИ №17-35-50148, РФФИ №19-45-540007, РНФ №23-17-00237, РНФ №22-27-20146, а также проектов ФНИ FWZZ-2022-0017 и FWZZ-2026-0052. Кроме того, соискатель являлся получателем стипендии Президента Российской Федерации по теме «Повышение эффективности сейсмического мониторинга разработки месторождений углеводородов в Арктических условиях» (№СП-75.2019.1).

Публикации по материалам диссертации

Материалы диссертации изложены в 26 научных работах. В рецензируемых журналах из списка ВАК (К1) и «Белого списка» (У1) опубликовано 6 статей, из них 6 входят в международную базу цитирования Web of Science, 3 – в Scopus. Опубликован один патент на изобретение и получено одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы из 127 наименований, а также 35 рисунков. Общий объем – 112 страниц.

Благодарности

Соискатель выражает искреннюю признательность и благодарность своему научному руководителю к.ф.-м.н. Дучкову А.А. за помощь в постановке задач, многолетнее сопровождение и оказанную поддержку на протяжении всего времени проведения исследований, а также научному консультанту – доктору технических наук, основоположнику метода низкочастотной деконволюции Вячеславу Ивановичу Юшину, ушедшему из жизни в 2024 году, за неоценимый

вклад в становление как исследователя-практика, а также наставления и мудрые советы на всех этапах работы.

Соискатель выражает глубокую благодарность д.т.н., академику РАН Эпову М.И.; д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН Кулакову И.Ю.; д.т.н. Колесникову Ю.И.; д.ф.-м.н. Протасову М.И.; Самойловой В.И.; к.ф.-м.н. Яскевичу С.В. за экспертный анализ и полезные замечания в процессе подготовки текста диссертации; к.г.-м.н. Тубанову Ц.А.; Дробчику А.Н.; д.т.н. Лисейкину А.А.; д.ф.-м.н. Коновалову А.В.; Шибаеву С.В.; Белкину В.В.; д.т.н. Сердюкову С.В. за проявленный интерес и содействие в проведении исследований, а также доступ к откалиброванному оборудованию и стационарным сейсмологическим пунктам.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ИЗВЕСТНЫХ СОВРЕМЕННЫХ РЕШЕНИЙ, ИХ ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

В настоящее время самым распространенным типом сейсмических датчиков являются электродинамические индукционные сейсмоприемники. Такое широкое распространение они получили прежде всего из-за больших, в сравнении с сейсмологией и другими приложениями, объемов производственных сейсморазведочных работ. За рубежом, а в последнее время и в России, их чаще называют геофонами. Конструктивной особенностью геофонов является наличие только одной рабочей (сигнальной) катушки.

В основе конструкции и уравнения движения геофонов лежит механический сейсмоприемник, который представляет из себя маятник (инерционный груз), упруго подвешенный в жестком корпусе [Гамбурцев, 1959; Гик, 1972; Юшин, 2002; Рыжов, 2009]. Пожалуй, самыми распространенными моделями сейсморазведочных геофонов на современном мировом рынке являются «SG-10» и «GS-20DX» от французской компании Sercel и американской компании Geospace Technologies, соответственно. Последние, что немаловажно, официально производятся на территории Российской Федерации компанией ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия». Датчики других производителей могут отличаться по паспортным характеристикам, но, как правило, незначительно.

Под ***современными геофонами*** в данной работе подразумеваются электродинамические сейсмоприемники с собственной частотой от 4.5 до 10 Гц и чувствительностью 80-100 В/м/с и выше. Для сравнения, стандартные геофоны, используемые для задач сейсморазведки имеют собственную частоту от 10 Гц и выше, а также более низкую чувствительность (20-30 В/м/с). Для современных геофонов со значениями собственной частоты 4.5-5.0 Гц, как правило, используют термин «низкочастотные геофоны». Наиболее представительными примерами таких датчиков являются геофоны «SG-5» (5 Гц, 80 В/м/с) и «GS-ONE LF» (4.5 или 5.0 Гц, 100.4 В/м/с) от тех же компаний Sercel и Geospace, соответственно.

Необходимо отметить, что формально под определение «геофон» подходят короткопериодные электродинамические сейсмометры, например: 1-герцовые «Sercel L-4C» [Sercel geophones: техническое описание], «MARK L-4C-3D» [MARK L-4C-3D: техническое описание] (сняты с производства), а также отечественный «СК-1П» (производился в СССР на заводе «Казгеофизприбор», в настоящее время не производится), и все результаты и выводы, полученные в данном исследовании справедливы и для них. Однако эти сейсмометры имеют на порядок большие вес, габариты и стоимость, поэтому в данном исследовании не рассматриваются в качестве целевых.

1.1. Методы и устройства для калибровки и поверки короткопериодных сейсмометров и геофонов

Калибровка и последующая поверка сейсмометров необходима для корректного преобразования записей их сигналов в физические величины, как правило – единицы движения: ускорение либо скорость. Постановка задачи калибровки может быть различной: как более, так менее полной.

Для полноценной калибровки всякого сейсмометра необходимо выполнение, по крайней мере, двух условий. Первое состоит в измеримости тестового воздействия в физических единицах (в данном случае, в каких-либо единицах движения, таких как перемещение, скорость или ускорение). Второе заключается в знании общего математического закона, согласно которому тестовое воздействие преобразуется в выходной сигнал. Это второе условие может быть описано дифференциальным уравнением либо аналитическим выражением передаточной или импульсной переходной функции. Сопоставление экспериментальной записи реакции датчика на известное калибровочное воздействие с его теоретическим откликом позволяет вычленить из него основные параметры датчика. Без знания уравнения движения результат калибровки может быть представлен лишь графиком или табличной функцией. При этом в области малых значений передаточной функции ошибки могут оказаться недопустимо высокими из-за

неизбежного воздействия сторонних помех во время проведения калибровочного эксперимента [Дергач и Юшин, 2014].

Для короткопериодных электродинамических сейсмометров и, в частности, геофонов, калибровка означает определение трех важнейших параметров: собственной частоты недемпфированных колебаний, коэффициента демпфирования и коэффициента преобразования скорости в электрический сигнал (чувствительности) [Гамбурцев, 1959; Гик, 1972; Гурвич и Боганик, 1980; Юшин, 2000б; Юшин, 2002; Wielandt, 2012b; Дергач и Юшин, 2014]. Получив эти параметры, можно рассчитать амплитудную и фазовую частотные характеристики калибруемого электродинамического сейсмометра.

Заводская калибровка сейсмометров, как правило, выполняется на прецизионных вибростендах в соответствии с [ГОСТ Р 8.800-2012; ГОСТ ISO 16063-11-2013] и малодоступна рядовому потребителю. Особенно это касается методов, дающих коэффициент преобразования в абсолютных единицах движения, так как не все вибростенды оснащены контрольными датчиками, измеряющими перемещения платформы в целевом частотном диапазоне и с необходимой точностью. Суть такой калибровки заключается в генерации серии гармонических колебаний заданной амплитуды на различных частотах [Батраков, 1977; Бромберг и др., 1984; Чистяков и Трифонов, 1990], с целью получения амплитудной и фазовой частотной характеристик, из которых уже рассчитываются конструктивные параметры калибруемого сейсмометра. Распространенные на рынке модели вибростендов, предназначенные для испытаний различных устройств на виброустойчивость, как правило не позволяют генерировать вибрационные колебания в области частот ниже значения 5 Гц, и лишь в редких случаях достигают значений порядка 1-2 Гц [Ding et al., 2011; Tira Vibration Test Systems: руководство по выбору].

В теории, для получения частотной характеристики сейсмометра вместо генерации серии гармонических колебаний можно использовать отклик по скорости в виде дельта-функций полученный посредством смещения корпуса сейсмометра на определенную величину. На этом принципе основано устройство,

разработанное Эрхардом Виландтом, известное в западной литературе как «Step-table» [Wielandt, 2012b], а также ряд схожих по конструкции и принципу действия устройств [CT-EW1: техническое описание; OSOP Calibration Table: техническое описание]. Преимуществом данного подхода перед вибрационными стендами является сравнительная простота реализации и доступность потребителю. Однако он имеет несколько существенных недостатков, которые не позволяют использовать его в качестве полноценного средства для калибровки. К таким недостаткам можно отнести высокую степень влияния внешних шумов на результаты, а также завал высоких частот, возникающий из-за неидеальности калибровочного импульса.

Поверка индукционных сейсмометров выполняется аффилированными организациями в соответствии с [ГОСТ Р 8.669-2009] и, как и калибровка, подразумевает использование специализированных вибростендов [Волченко и Корнеев, 2013]. Более доступные методы для поверки индукционных сейсмоприемников, относящиеся к обширному семейству импульсных методов [Asten, 1977; Архангельский и Шварцбург, 1977; Аранович и др., 1979], позволяют определить значения собственной частоты и коэффициента демпфирования, а также рассчитать чувствительность в рабочей полосе частот. Однако расчет чувствительности производится с использованием конструктивных параметров сейсмометра, а не определяется напрямую посредством калибровки. Устройства на основе этих методов, в современности более известные как «тестеры геофонов», представляют из себя одноканальный сейсмический регистратор с генератором импульсных электрических сигналов. Недостатком такого подхода является тот факт, что калибровочное воздействие создается подачей импульсов тока на катушку электродинамического сейсмоприемника, то есть калибровка проводится не по реальному смещению корпуса калибруемого сейсмоприемника. В связи с этим могут возникнуть погрешности в определении его амплитудно- и фазо-частотной характеристик.

Еще одним доступным и широко распространенным способом поверки сейсмометров является сопоставление и сравнительный анализ их записей с

записями эталонного сейсмометра [Калинюк и др., 2017; Воскресенский и др., 2025]. Этот способ не позволяет напрямую определить амплитудно- и фазо-частотные характеристики либо технические параметры сейсмометров, а лишь позволяет определить их отклонения от предварительно откалиброванного либо поверенного «эталонного» сейсмометра, и на основании этого сделать вывод об их исправности и, с некоторой погрешностью, соответствии паспортным характеристикам. Еще очевидным минусом такого подхода является то, что для его реализации в любом случае необходим как минимум один сейсмометр, прошедший процедуру калибровки или поверки.

1.2. Методы коррекции амплитудно-частотной характеристики геофонов

Задача расширения частотного диапазона записей электродинамических сейсмометров представляет собой частный случай сформулированной еще в начале прошлого века академиком Б.Б. Голицыным проблемы нахождения «истинного движения почвы» по записи сейсмографа, которую он рассматривал в качестве основной проблемы сейсмометрии [Пономарев и Сидорин, 2012]. Основные принципы решения этой проблемы были развиты еще в «доцифровую эпоху» в работах [Саваренский и Кирнос, 1955; Рыков, 1972; Перепелица, 1974; Богданов и Грайзер, 1976; Саваренский и др., 1977; Грайзер, 1979; Грайзер, 1984] и ряде других работ. Более детально история вопроса рассмотрена в работе [Дергач и Юшин, 2016а].

Восстановление сейсмических сигналов электродинамических сейсмометров в диапазоне ниже значений их собственной частоты осуществляется двумя способами: аппаратным и цифровым (программным). В первом случае используются дополнительные устройства коррекции частотной характеристики датчика, во втором – производится программная обработка уже состоявшихся записей. Обзор подходов приведен в работе [Дергач и др., 2026], далее рассмотрены их особенности.

Разработке и созданию специализированных схем и устройств коррекции частотной характеристики электродинамических сейсмометров посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых [Гик и Карандеев, 1962; Havskov and Alguacil, 2004; Dai et al., 2015; Song et al., 2016; Vitale et al., 2018; Mihaylov and El Naggar, 2021; Gilyazov et al., 2023; Ma et al., 2023; Zhang et al., 2025]. Существуют различные подходы к реализации таких схем, основными из которых являются введение обратной связи при помощи отрицательного сопротивления, а также проектирование аналогового обратного фильтра, аппроксимирующего обратную передаточную функцию сейсмометра.

Особенно стоит отметить значительный вклад в разработку схем частотной коррекции научного коллектива сотрудников Института динамики геосфер РАН и Института физики земли РАН [Кабыченко и др., 2007; Кабыченко и др., 2011; Беседина и др., 2011а; Беседина, 2014; Кабыченко и др., 2020; Беседина и др., 2020; Кабыченко и др., 2024; Беседина и др., 2024]. Ряд работ коллектива посвящен разработке и исследованию аналоговых схем расширения рабочего частотного диапазона короткопериодных электродинамических сейсмометров. Предложены реализации обратных фильтров на операционных усилителях, в том числе с двумя последовательными интегрирующими RC-звеньями, компенсирующими низкочастотный спад чувствительности [Кабыченко и др., 2017; Беседина и др., 2019]. Наряду с ними рассмотрены схемы увеличения электромагнитного затухания посредством отрицательного сопротивления и компенсации индуктивности катушки синтетической отрицательной индуктивностью для подавления паразитного высокочастотного резонанса [Беседина и др., 2019].

Лабораторные и натурные испытания подтвердили возможность расширения рабочей полосы геофона GS-20DX с 10 до приблизительно 2 Гц [Беседина и др., 2019]. Для сейсмометра СМ-3КВ реализована двухкаскадная схема коррекции с нижней рабочей частотой около 0.07 Гц [Беседина и др., 2020]; её последующее усовершенствование, включавшее стабилизацию нуля, позволило проводить регистрацию сейсмических сигналов на частотах от 0.06 Гц при

превышении сигналом инструментального шума [Беседина и др., 2024]. Дополнительно разработана методика синтеза универсального корректирующего фильтра на основе биквадратной передаточной функции и представлены расчетные схемы снижения нижней границы АЧХ СМ-3КВ до 0.02 Гц и GS-20DX до 1 Гц [Кабыченко и др., 2024].

Кроме того, известны серийно выпускаемые устройства, со встроенными схемами частотной коррекции. К ним относятся широко известные и используемые для задач сейсмологии по всему миру сейсмометры Lennartz «LE 3D-Lite» и «LE 3D/5s» (1 и 0.2 Гц соответственно) [Wielandt, 2012a; Lennartz Electronic GmbH, 2016], а также линейка совмещенных в едином корпусе регистратора и геофона «OSOP Raspberry Shake» [Anthony et al., 2019; Paul et al., 2023] и их более ранние версии «OSOP Sixaola» (0.5 Гц).

Цифровой (программной) частотной коррекции уже состоявшихся записей, также посвящен ряд работ отечественных и зарубежных ученых. Одним из первых этой задачей начал заниматься д.т.н. Юшин В.И. (ИНГГ СО РАН). В его работах [Юшин, 2000а; Юшин, 2001], представлены и детально описаны метод и интерактивный алгоритм цифровой частотной коррекции записей электродинамических сейсмометров, а также приведены примеры обработки записей телесейсмических землетрясений, произведенных сейсмометром СМ-3КВ.

Следует отметить работы научного коллектива из Института динамики геосфер РАН, посвященные цифровой частотной коррекции: ее теоретическому и методическому обоснованию [Беседина и др., 2011б; Беседина и др., 2013; Беседина и Кабыченко, 2014]. В рамках исследований впервые экспериментально определены границы применимости метода программной коррекции на примере записей сильных землетрясений, произведенных короткопериодным датчиком СМ-3КВ и высокочастотным геофоном GS-20DX с учетом условий проведения измерений [Беседина, 2014; Беседина и Кабыченко, 2016].

В работах зарубежных ученых за последние десятилетия [Brincker et al., 2005; Bertram and Margrave, 2011; Maxwell and Lansley, 2011; Chiu et al., 2013] в

основном исследуются возможности применения сейсмических датчиков-геофонов для задач сейсморазведки (высокоамплитудные сигналы в частотном диапазоне от 1 Гц и выше). Все экспериментальные данные приводятся на примерах записей наиболее популярных моделей датчиков, а задача исследования пределов расширения частотного диапазона в низкочастотную область не ставится вовсе. Для частотной коррекции записей зачастую предлагается использовать простейшие обратные фильтры, спроектированные на основе АЧХ геофона с оптимальным затуханием. Так, в работе [Bertram and Margrave, 2011] для построения обратного фильтра использовалась импульсная характеристика ФНЧ Баттерворта 2-го порядка, с которой производилась свертка сигнала 10-герцового геофона. Для геофонов с неоптимальным коэффициентом затухания такой способ является приближенным и не учитывает всех особенностей восстанавливаемого сигнала, в результате чего сигнал геофона после коррекции не будет совпадать с сигналом эталонного низкочастотного сейсмометра.

Резюмируем преимущества и недостатки двух подходов к частотной коррекции электродинамических сейсмометров: аппаратного и программного.

Основными преимуществами аппаратной частотной коррекции являются фиксированные метрологические характеристики, а также отсутствие необходимости в дополнительной обработке сигнала. Т.е. конечный пользователь получает модифицированный сейсмометр, с понятными паспортными характеристиками: собственной частотой, коэффициентом демпфирования и чувствительностью. Недостатками такого подхода являются: наличие дополнительной схемы либо устройства, необходимые для модификации существующей аппаратуры; частотный диапазон, ограниченный снизу фиксированным значением, в то время как для целевых сигналов определенного уровня это значение может быть значительно ниже.

Основными преимуществами программной частотной коррекции являются отсутствие каких-либо дополнительных устройств для частотной коррекции их АЧХ и возможность обработки уже состоявшихся записей. Последнее, в частности

делает возможным приведение электродинамических сейсмометров с различными параметрами, используемыми в рамках единой сейсмологической сети, к единому стандарту. К недостаткам цифрового способа можно отнести необходимость дополнительного этапа обработки записей с использованием специализированного программного обеспечения, а также важность тщательного подбора регистрационной аппаратуры на этапе планирования эксперимента.

Метод низкочастотной деконволюции

Более подробно остановимся на методе низкочастотной деконволюции, который в данном исследовании был выбран в качестве базового для частотной коррекции записей современных геофонов. Определение и физические предпосылки метода подробно рассмотрены в работах [Юшин, 2001; Дергач и Юшин, 2016а]. Под ***низкочастотной деконволюцией*** понимается математическая процедура преобразования записи реального датчика с электродинамическим преобразователем в запись виртуального датчика такого же типа, но с более низкой собственной частотой. Физической предпосылкой возможности такого преобразования служит тот факт, что любой сейсмический датчик, в действительности, реагирует на все частотные компоненты сигнала, а не только на те, на которые он номинально сертифицирован. Как правило, датчик является линейной динамической системой, для которой существует и известен оператор преобразования входного сигнала в выходной. Основным условием возможности деконволюции является степень соответствия передаточной функции датчика его известной линейной теоретической модели, особенно, в области подавленных низких частот. Ядром преобразования сейсмического воздействия во временной области служит импульсная переходная функция $h(t)$ датчика, а в частотной – его комплексная частотная характеристика $H(i\omega)$. Обе указанные функции однозначно связаны преобразованием Фурье: $H(i\omega) \leftarrow F \rightarrow h(t)$.

Исходя из конструктивных особенностей, комплексно-частотная характеристика (КЧХ) геофонов однозначно описывается двумя параметрами –

собственной частотой недемпфированных колебаний и безразмерным коэффициентом демпфирования [Юшин, 2002]:

$$\widehat{g}\left(f; d, f_0\right) = \frac{-f^2\left(f_0^2 - f^2\right) + i2df_0f^3}{\left(f_0^2 - f^2\right)^2 + \left(2df_0f\right)^2}, \qquad (1.1)$$

где f_0 – собственная частота геофона, d – безразмерный коэффициент демпфирования, i – мнимая единица, f – частота.

Алгоритм низкочастотной деконволюции состоит в применении к записи геофона фильтра обратного к (1.1). В работе [Юшин, 2001], он был реализован во временной области, где обратная фильтрация принимает вид:

$$V(t) = y(t) + \left(4\pi df_0\right)\int_0^t y(t)dt + \left(2\pi f_0\right)^2 \int_0^t\int_0^t y(t)(dt)^2, \qquad (1.2)$$

где $y(t)$ – исходный сигнал геофона, f_0 – собственная частота геофона, d – коэффициент демпфирования геофона.

Полученную после деконволюции запись $V(t)$ далее необходимо привести к записи желаемого «виртуального» геофона с новой собственной частотой f_n. Для этого в простейшем варианте можно использовать рекурсивный фильтр высоких частот Баттерворта 2-го порядка, параметры которого с высокой точностью соответствуют модели датчика с оптимальным затуханием.

Таким образом, применение метода низкочастотной деконволюции на этапе обработки записей геофонов позволяет избавиться от частотной характеристики исходного датчика и заменить ее на частотную характеристику «виртуального» с требуемыми техническими параметрами (f_n,d_n). Помимо значительного удешевления системы регистрации, это может быть полезно при сравнении записей различных электродинамических сейсмометров, а также приведения их к единому стандарту.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ АБСОЛЮТНОЙ КАЛИБРОВКИ ГЕОФОНОВ СТУПЕНЬЮ СМЕЩЕНИЯ

Теоретическое обоснование и методика калибровки в настоящей главе изложены на основе работы [Дергач и Юшин, 2014].

Теория электродинамического сейсмометра

В основе конструкции и уравнения движения большинства сейсмометров лежит механический сейсмоприемник, представляющий собой упруго подвешенный в жестком корпусе инерционный груз (маятник) [Гамбурцев, 1959; Гик, 1972; Юшин, 2002]. В силу линейности такой системы гармонические колебания корпуса вызывают гармонические перемещения маятника относительно корпуса с той же частотой, но другими амплитудой и фазой. Характер установившихся вынужденных гармонических колебаний маятника отображается в частотной области комплексной частотной передаточной функцией по смещению, определяемой как

$$W(i\omega) = \frac{Y(i\omega)}{X(i\omega)}, \tag{2.1}$$

где $X(i\omega)$ и $Y(i\omega)$ комплексные спектры входного и выходного колебаний, соответственно, причем входным колебанием $x(t)$ назначается смещение корпуса в инерциальной системе координат, а выходным $y(t)$ – смещение корпуса относительно маятника.

Механический сейсмоприемник характеризуется двумя типами параметров: конструктивными и динамическими. К первым относятся величина упруго подвешенной внутри корпуса инерционной массы M, жесткость пружины K и вязкость демпфера колебаний H [Гамбурцев, 1959]. Динамическими параметрами являются две константы: собственная частота недемпфированных колебаний ω_0 и безразмерный коэффициент демпфирования d:

$$\omega_0 = \sqrt{K/M} \tag{2.2}$$

$$d = \frac{H}{2\sqrt{KM}} \tag{2.3}$$

Иногда удобнее использовать несколько измененные динамические параметры, такие как постоянная затухания ε и «видимая» частота собственных колебаний ω_1:

$$\varepsilon = d\omega_0, \tag{2.4}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \varepsilon^2} = \omega_0\sqrt{1 - d^2}. \tag{2.5}$$

С учетом введенных обозначений комплексная частотная характеристика (КЧХ) механического сейсмоприемника выражается через его динамические параметры любым из следующих соотношений:

$$W(i\omega) = \frac{(i\omega)^2}{(i\omega)^2 + 2\varepsilon(i\omega) + \omega_0^2} = \tag{2.6}$$

$$= \frac{(i\omega)^2}{(i\omega + \varepsilon)^2 + \omega_1^2} = \tag{2.7}$$

$$= \frac{-\omega^2\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + \left(2d\omega_0\omega\right)^2} + i\frac{2d\omega_0\omega^3}{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + \left(2d\omega_0\omega\right)^2}. \tag{2.8}$$

Модуль КЧХ, или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) выражается как

$$W(\omega) = |W(i\omega)| = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + \left(2d\omega_0\omega\right)^2}} \tag{2.9}$$

Функция фазы комплексной частотной характеристики, то есть, фазочастотная характеристика (ФЧХ) механического сейсмоприемника имеет вид (2.10). Здесь необходимо уточнить, что это выражение справедливо лишь в ограниченном диапазоне частот. Более общее определение приведено в работе [Юшин, 2000б].

$$\Phi(\omega) = -\ arctg\left(\frac{2d\omega_0\omega}{\omega_0^2-\omega^2}\right), \tag{2.10}$$

и, следовательно, КЧХ может быть выражена в виде:

$$W(i\omega) = W(\omega)exp(i\Phi(\omega)). \tag{2.11}$$

Фазовая характеристика датчика однозначно связана с амплитудной через его динамические параметры.

Чтобы механический сейсмоприемник стал измерительным прибором, он снабжается преобразователем движения маятника относительно корпуса в электрический сигнал. По многим причинам самыми распространенными являются электродинамические преобразователи, вырабатывающие сигнал, пропорциональный скорости. Такие датчики называются велосиметрами. К этому типу относится большинство современных сейсмоприемников – геофонов. Кроме велосиметров, широко распространены пьезоэлектрические акселерометры, а вот датчиков вибраций с чувствительным элементом, реагирующем непосредственно на смещение, на рынке пока что нет. Все существующие так называемые «датчики смещений», в действительности, являются акселерометрами или велосиметрами, дополненными встроенной электронной коррекцией частотной характеристика. В данной работе рассматривается калибровка только велосиметров.

Пусть K_V – коэффициент скоростного преобразования чувствительного элемента, имеющий размерность [В/(м/с)]. Здесь и далее двухбуквенный индекс при символе передаточной функции будет означать, соответственно, вид входной и выходной величин: S – смещение, V – скорость, A – ускорение, U – напряжение, R – цифровой код записи регистратора (безразмерный, но для удобства последующих преобразований будем характеризовать условной размерностью «квант»). Соответственно, КЧХ *по смещению* корпуса такого сейсмоприемника выразится как

$$W_{SV}(i\omega) = K_V i\omega W(i\omega), \tag{2.12}$$

размерность которой, очевидно, будет [В/м]. Если же входным сигналом назначить не смещение, а скорость его корпуса, то соответствующая частотная характеристика по скорости $W_{VU}(i\omega)$ (вход – скорость, выход – напряжение) с точностью до коэффициента K_V повторит характеристику механического сейсмоприемника. Действительно:

$$W_{VU}(i\omega) = \frac{W_{SU}(i\omega)}{i\omega} = K_V W(i\omega), \tag{2.13}$$

и, следовательно, размерность $W_{VU}(i\omega)$ определяется коэффициентом K_V и имеет вид [В/(м/с)]. Однако в большинстве случаев пользователь имеет дело не с электрическим сигналом датчика, а с его безразмерной цифровой записью. Для удобства обозначения такой «безразмерной размерности» введем понятие [квант], которым будем характеризовать просто цифровой код записи. Частотная передаточная функция цифрового регистратора $G_{UR}(i\omega)$, включающего в себя усилитель, фильтр и АЦП будет характеризоваться размерностью [квант/В], а «сквозная» КЧХ (вход – скорость корпуса датчика, выход – цифровой код регистратора) получит размерность [квант/(м/с)] и выразится как

$$W_{VR}(i\omega) = K_V G_{UR}(i\omega) W(i\omega). \tag{2.14}$$

2.1. Разработка метода абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения

В данной работе принимается следующее определение [Дергач и Юшин, 2014]. Откалибровать геофон, значит, определить три его важнейших параметра: собственную частоту, коэффициент демпфирования и коэффициент преобразования скорости в электрический сигнал (чувствительность). Задача определения верхней границы рабочего частотного диапазона датчика не рассматривается, поскольку она более эффективно решается другими методами.

Идея метода. Как известно [Бесекерский и Попов, 1972], всякая линейная динамическая система исчерпывающим образом характеризуется не только

комплексной частотной характеристикой $B(i\omega)$, но и импульсной переходной функцией $b(t)$, представляющей собой реакцию данной системы на дельта-функцию, и однозначно связанную с КЧХ обратным преобразованием Фурье:

$$b(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} B(i\omega) exp(i\omega t) d\omega. \quad (2.15)$$

Поэтому теоретически КЧХ может быть получена из импульсной реакции системы с помощью преобразования Фурье:

$$B(i\omega) = \int_{0}^{\infty} b(t) exp(-\ i\omega t) dt. \quad (2.16)$$

Стало быть, КЧХ $B(i\omega)$ и ее модуль АЧХ $|B(i\omega)|$ можно найти, располагая экспериментальной записью реакции системы на «хороший», то есть, достаточно короткий тестовый импульс. Качество тестового импульса определяется степенью постоянства его амплитудного спектра в рабочей полосе частот датчика. Однако, если импульс недостаточно короткий, но спектр его известен, то результат такой калибровки можно эффективно скорректировать.

Особенности метода. Для калибровки датчика-велосиметра по скорости тестовое воздействие в виде дельта-функции скорости создается путем резкого смещения корпуса датчика на заданную фиксированную величину h. Такое воздействие, для краткости, будем называть «степ-тестом». Смещение корпуса датчика $x(t)$ во время степ-теста идеализированно можно отобразить формулой:

$$x_h(t) = h \cdot 1_S(t), \quad (2.17)$$

где выражение

$$1_S(t) = \begin{cases} 0, & t<0 \\ 1, & t\geq 0 \end{cases}. \quad (2.18)$$

обозначает единичную ступенчатую функцию (функцию Хевисайда), или, просто, ступень смещения единичной амплитуды. Производная от (2.17) пропорциональна дельта-функции и амплитуде ступени h:

$$x'_h(t) = \frac{d\left(x_h(t)\right)}{dt} = h\left(\frac{d\left(1_S(t)\right)}{dt}\right) = h\delta_V(t). \quad (2.19)$$

Таким образом, мгновенное смещение корпуса датчика на расстояние h равноценно воздействию в виде дельта-функции скорости с условной «амплитудой» h. Поскольку размерность дельта-функции всегда обратна размерности ее аргумента, размерность импульса (2.19) как производной от ступени смещения оказывается размерностью скорости [м/с]. Следовательно, реакция датчика на такое идеальное воздействие будет пропорциональна его импульсной переходной функции по скорости.

Реальный степ-тест будет заметно отличаться от идеального. Предположим, что существует специальный датчик, способный без искажений зарегистрировать истинную скорость реального воздействия, которую обозначим как $z_h(t)$. Калибруемый датчик откликнется на это воздействие сигналом $u_h(t)$. Обозначим спектры указанных сигналов как $Z_h(i\omega)$ и $U_h(i\omega)$, соответственно. Очевидно по определению, что КЧХ калибруемого датчика выражается как

$$W_{VU}(i\omega) = \frac{U_h(i\omega)}{Z_h(i\omega)}, \quad (2.20)$$

где

$$U_h(i\omega) = \int_0^\infty u_h(t)exp(-\ i\omega t)dt, \quad (2.21)$$

$$Z_h(i\omega) = \int_0^\infty z_h(t)exp(-\ i\omega t)dt. \quad (2.22)$$

Функция (2.20) может быть экспериментально определена при всех ω, при которых модуль спектра входного воздействия (2.22) $\left|Z_h(i\omega)\right| \neq 0$. Практически это требование всегда выполняется. Хотя сигнал вышеупомянутого специального датчика «истинной» скорости $z_h(t)$ должен быть записан одновременно с откликом $u_h(t)$ калибруемого датчика на степ-тест, нет необходимости заботиться

о его представлении в абсолютных физических единицах. Действительно, из (2.22) следует, что на нулевой частоте это выражение не зависит от формы импульса и равно просто амплитуде ступени смещения:

$$Z_h(0) = \int_0^\infty z_h(t)dt = h, \tag{2.23}$$

Определим нормированный амплитудный спектр «истинной» скорости $z_h(t)$ как

$$Z_0(\omega) = \frac{|Z_h(i\omega)|}{Z_h(0)} = \frac{Z_h(\omega)}{h}. \tag{2.24}$$

Из выражений (2.20) и (2.24) следует:

$$W_{VV}(\omega) = \frac{U_h(\omega)}{h \cdot Z_0(\omega)}. \tag{2.25}$$

Таким образом, частотная характеристика датчика-велосиметра $W_{VV}(\omega)$ по скорости равна размерному спектру его экспериментальной реакции на ступень смещения, масштабированному фактической величиной ступени, и скорректированному нормированным безразмерным спектром входного импульса «истинной» скорости.

Основные этапы калибровки. Из вышеизложенного вытекает следующая практическая технология калибровки датчика-велосиметра [Дергач и Юшин, 2014]:

1. Выполнить степ-тест, то есть, записать сигнал реакции датчика на резкое смещение его корпуса на известную величину h в естественной размерности регистратора – безразмерных числах (квантах). Обязательное требование: рабочая полоса частот регистратора должна включать нулевую частоту – постоянную составляющую входного сигнала.
2. Центрировать запись путем вычитания из нее аппаратурного начального смещения. Тем самым, будет получен сигнал, обозначенный выше как $u_h(t)$.
3. Выполнить преобразование Фурье сигнала $u_h(t)$, в результате чего будет получен комплексный спектр $U_h(i\omega)$ (2.21) и найти его модуль $U_h(\omega)$ –

амплитудный спектр. (При использовании алгоритма БПФ результат умножается на интервал дискретизации времени)

4. Масштабировать амплитудный спектр $U_h(\omega)$ делением на высоту ступени h:

$$W_{VV}(\omega) = \frac{U_h(\omega)}{h}. \quad (2.26)$$

Полученная функция представляет собой АЧХ первого приближения, выраженная числовым рядом. Она может сопровождаться некоторым «завалом» верхних частот, вызванным неидеальностью тестового воздействия.

5. Далее, если необходимо, можно скорректировать полученную АЧХ в области верхних частот. Способы коррекции рассмотрим ниже (после ознакомления с возможной конструкцией калибровочного устройства).
6. Завершается процедура калибровки аппроксимацией полученной экспериментальной характеристики теоретической АЧХ вида

$$V(\omega) = \frac{K_V \omega^2}{\sqrt{\left(\omega_0^2 - \omega^2\right)^2 + \left(2d\omega_0\omega\right)^2}} \quad (2.27)$$

параметры которой K_V, ω_0 и d, подбираются так, чтобы обеспечивать наилучшую близость к экспериментальной характеристике (2.26) по некоторому физически разумному критерию.

2.2. Создание стенда для абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения

Конструкция стенда для абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения детально описана в работе [Дергач и Юшин, 2014], а на устройство получен патент [Дергач и Юшин, 2016б].

На рисунке 2.1 представлена одна из простейших схем калибровочного стенда, поясняющая общий принцип калибровки ступенью смещения.

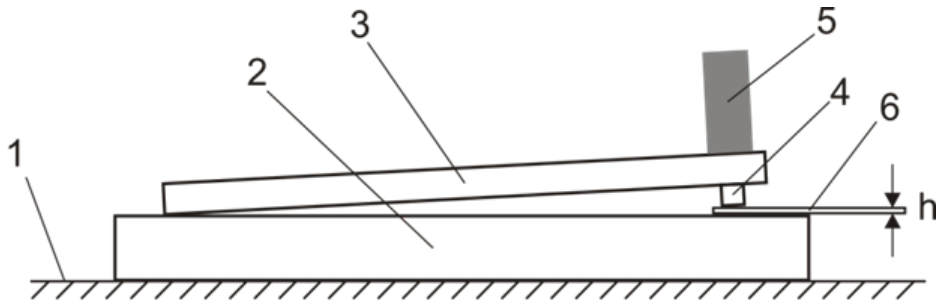

Рисунок 2.1. Принципиальная схема калибровки сейсмического датчика ступенью смещения [Дергач и Юшин, 2014]: 1 – фундамент, 2 – станина, 3 – подвижная платформа, 4 – упор, 5 – тестируемый датчик, 6 – калиброванный щуп.

На жестком фундаменте (1) установлена неподвижная металлическая станина (2), имеющая плоскую гладкую верхнюю поверхность. На станину свободно положена подвижная платформа (3), имеющая форму параллелепипеда, на нижней плоскости которой вблизи середины одного из рёбер расположен упор (4). Сверху на платформе над упором устанавливается тестируемый датчик (5). При такой конструкции платформа будет опираться на станину точкой (упором) и линией (ребром, противолежащим упору). Это положение платформы относительно станины однозначно и устойчиво. Если под упор подвести пластину-щуп (6) известной толщины h, то край платформы, на котором закреплен тестируемый датчик, приподнимется на толщину этого щупа. Такое положение платформы так же однозначно и устойчиво, как и первое. При быстром вытаскивании щупа платформа с датчиком упадёт на станину и примет первоначальное положение. В результате, датчик резко сместится практически точно на толщину щупа [Дергач и Юшин, 2014].

2.3. Причины погрешностей метода и пути их снижения

На практике реальное движение будет несколько отличаться от идеальной ступени. Во-первых, свободное падение платформы с датчиком произойдет не мгновенно, а займет, хотя и малое, но конечное время, что приведет к отклонению тестового воздействия от дельта-функции и, как следствие, к последующему «завалу» верхних частот спектра $U_h(i\omega)$ отклика датчика. Во-вторых, при ударе упора платформы о станину возможны отскоки. В-третьих, поскольку не всегда

удаётся обеспечить установку станины на достаточно массивный и жесткий фундамент, она вместе с платформой и датчиком после воздействия некоторое время будет совершать собственные колебания, причем к последним, возможно, добавятся ещё и естественные внешние сейсмические шумы.

Нейтрализация вышеупомянутых искажений и помех может быть достигнута следующими способами. Колебания станины можно синхронно зарегистрировать вспомогательным датчиком, идентичным калибруемому, и затем вычесть из тестового отклика. Несколько сложнее коррекция неидеальности фронта ступени смещения. Видятся две возможные процедуры определения корректирующей функции: прямое измерение и расчет по косвенным данным. Для прямого измерения тестового воздействия $z_h(t)$ необходимо применить специальный датчик относительной скорости платформы и станины, имеющий, в отличие от сейсмоприемника, плоскую АЧХ, начиная с нулевой частоты. При этом можно не заботиться о правильной размерности сигнала степ-теста, поскольку его амплитудный спектр $Z_h(\omega)$ после нормирования согласно (2.25) по значению на нулевой частоте обратится в безразмерную функцию $Z_0(\omega)$, которая затем и будет использована для коррекции АЧХ в соответствии с (2.24).

На рисунке 2.2 приведена принципиальная схема конструкции датчика относительной скорости:

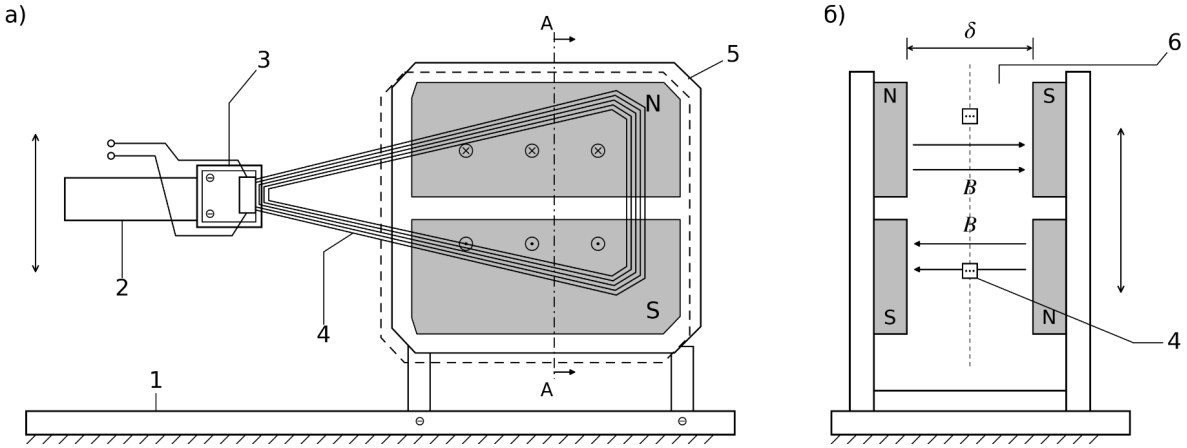

Рисунок 2.2. Принципиальная схема конструкции датчика относительной скорости: а – вид в плоскости рамки, б – разрез по линии А–А.
1 – станина; 2 – подвижная платформа; 3 – консольное крепление;
4 – катушка-рамка; 5 – магнитная система; 6 – рабочий зазор.

Датчик истинной скорости состоит из плоской катушки-рамки, закрепленной консольно на подвижной платформе, и установленной на станине магнитной системы, в активном зазоре которой рамка перемещается при вертикальном движении платформы. В данном случае в качестве составных частей датчика относительной скорости применены детали от двигателя позиционирования магнитной головки компьютерного жесткого диска.

На рисунке 2.3 приведена фотография главной части калибровочного стенда, где видны упомянутые дополнительные устройства, не показанные на рисунке 2.1.

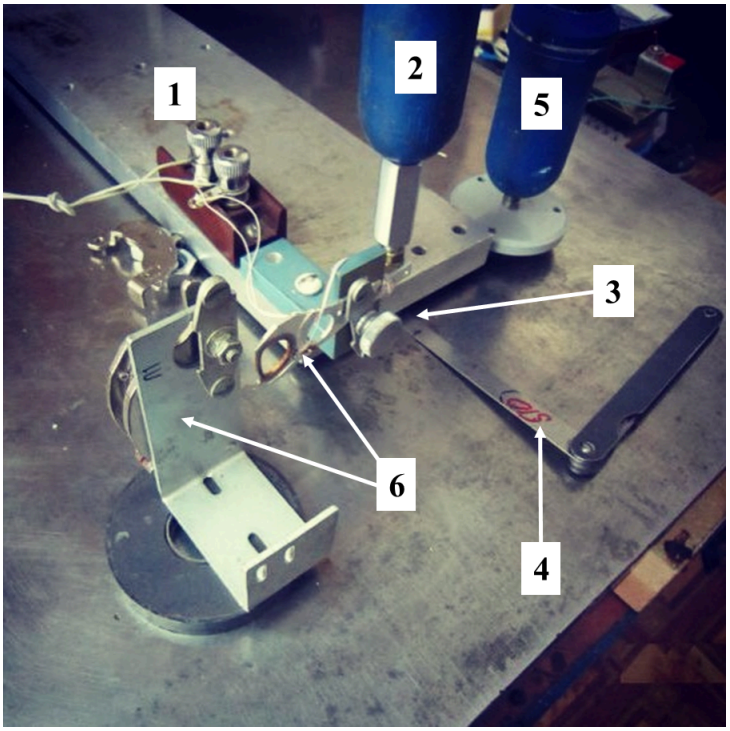

Рисунок 2.3. Фото стенда для калибровки сейсмоприемников ступенью смещения. 1 – подвижная платформа; 2 – калибруемый датчик; 3 – точечный упор; 4 – калиброванный щуп; 5 – компенсационный датчик; 6 – датчик относительной скорости.

Стенд был сконструирован на поверхности поверочной плиты, выполняющей функцию станины. Подвижная платформа представляет собой дюралевый брус, на край которого крепится калибруемый датчик. Снизу платформы, под датчиком расположен упор, под который подводится калиброванный щуп. На станину вблизи калибруемого датчика справа установлен

вспомогательный (компенсационный) датчик, идентичный основному. Он устанавливается на станину при помощи магнитного крепления.

Косвенный способ получения степ-теста $z_h(t)$ состоит в элементарном расчете функции скорости равноускоренного движения по известному пути и времени. Путь h – толщина щупа, а интервал времени извлекается непосредственно из записи калибруемого сейсмоприемника. Синтезированная таким способом функция скорости падения платформы затем подвергается той же процедуре спектрального преобразования и нормирования, что и измеренная непосредственно. Важно подчеркнуть, что в обоих случаях вышеупомянутое свойство нормированности корректирующей функции (2.23) избавляет от необходимости знания величины скорости в абсолютных единицах.

2.4. Примеры калибровки и применения корректирующих процедур

В данном разделе рассматриваются примеры калибровки и применения корректирующих процедур, опубликованные в работе [Дергач и Юшин, 2014].

Пример 1. Калибровка 10-герцового геофона ступенью смещения с мягким «приземлением» платформы

На примере калибровки 10-герцового геофона GS-20DX покажем значение вспомогательных корректирующих процедур. Сначала рассмотрим влияние недостаточной жесткости станины. Чтобы выделить только этот эффект, устраним сопутствующий ему эффект отскока платформы. С этой целью несколько изменим конструкцию по сравнению с рисунком 2.1, удалив точечный упор. Теперь платформа, падая после выдергивания щупа, будет ложиться на станину всей своей нижней плоскостью, и вытесняемый ею воздух плавно погасит скорость, практически предотвратив отскок. На рисунке 2.4 приведена в двух масштабах по ординате (2.4а – 1:1 и 2.4б – 10:1) запись отклика сейсмоприемника на ступень смещения 400 мкм. Кроме того, на рисунке 2.4б показан еще и отклик компенсационного датчика, установленного на станине. На обоих датчиках виден протяженный «хвост» собственных колебаний станины с частотой около 20 Гц.

Эти колебания связаны с недостаточной жесткостью лабораторного стола под станиной.

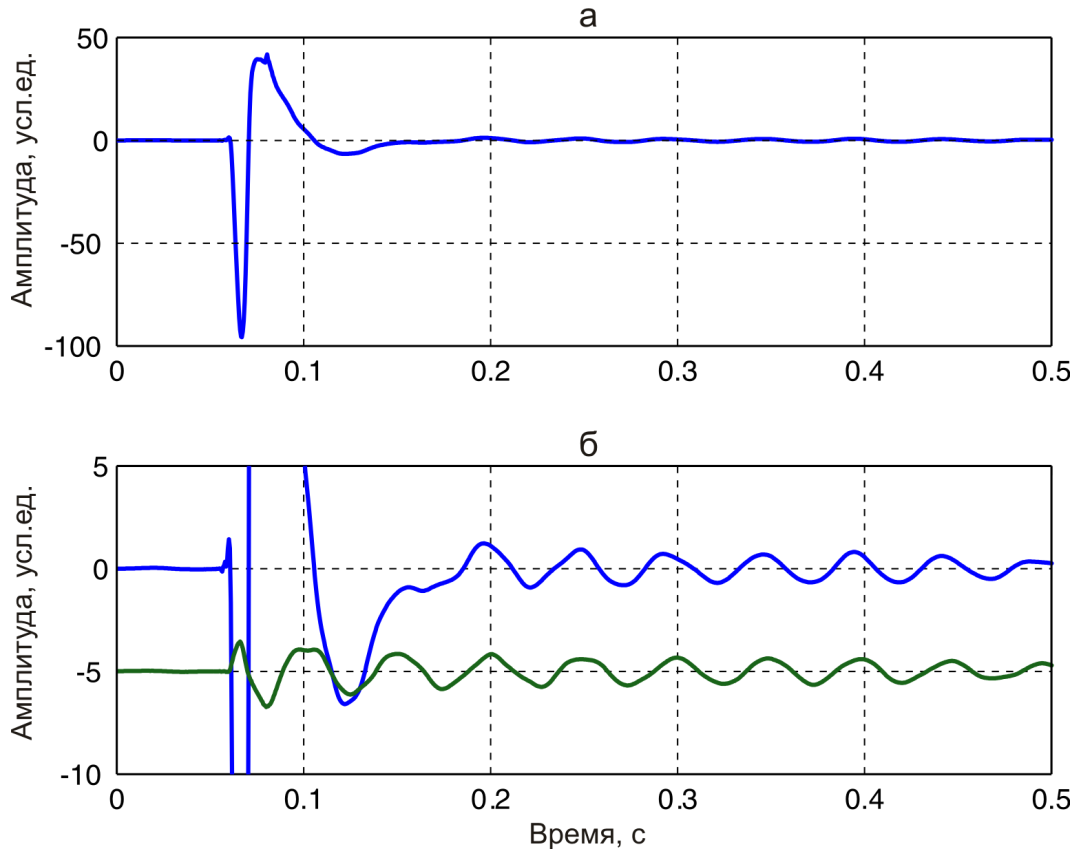

Рисунок 2.4. Запись реакция 10-герцового вертикального сейсмоприемника GS-20DX на ступень смещения 400 мкм в двух амплитудных масштабах: а – в полном диапазоне, б – с 10-кратным увеличением, при котором виден протяженный «хвост» паразитных собственных колебаний станины. Нижняя трасса на рисунке (б) – запись колебаний станины компенсационным датчиком [Дергач и Юшин, 2014].

Амплитудные спектры нескорректированного и скорректированного (разностного сигнала между калибруемым и компенсационным датчиками) приведены на рисунке 2.5. Видно, как коррекция устранила артефакт собственных колебаний станины на частоте около 20 Гц и восстановила значения АЧХ на более высоких частотах. Эта процедура попутно освобождает тестовый сигнал от внешнего сейсмического шума, поскольку калибруемый и компенсационный датчики реагируют на него одинаково.

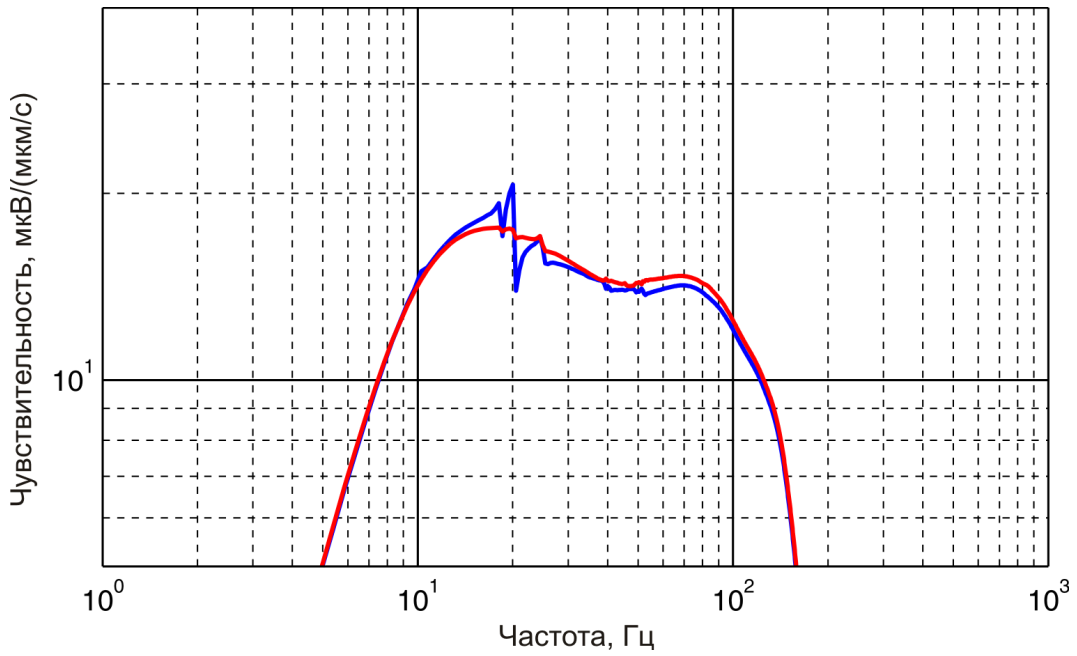

Рисунок 2.5. Амплитудные спектры нескорректированного за колебания станины отклика (синяя линия) и скорректированного, разностного между калибруемым и компенсационным датчиками сигнала (красная линия) [Дергач и Юшин, 2014].

В то же время, бросается в глаза, что спектр на рисунке 2.5 характеризуется сильным затуханием верхних частот, что обусловлено «мягким приземлением» платформы с датчиком в процессе степ-теста, причиной которого является упомянутое выше воздушное демпфирование. Заметим также, что помимо обеднения калибровочного воздействия высокими частотами, использование большой плоскости контакта платформы со станиной может привести к ошибке определения абсолютного значения коэффициента преобразования. Дело в том, что в случае отклонения соприкасающихся поверхностей платформы или станины от плоскости, толщина калибровочного щупа может не соответствовать действительной амплитуде ступени смещения. Поэтому упор, выступающий за нижнюю плоскость платформы, играет важную метрологическую роль: он не только расширяет спектр тестового сигнала в область верхних частот, но и предотвращает возможную ошибку измерения амплитуды ступени смещения из-за неровности поверхности или присутствия микроскопических частиц под платформой.

Пример 2. Калибровка 10-герцового сейсмоприемника с жестким падением платформы на точечный упор.

На рисунке 2.6 показаны с наложением на одном графике три разных записи реакций калибруемого сейсмоприемника (рисунок 2.6а), отличающиеся только амплитудой ступени смещения (450, 300 и 200 мкм) и их интегралы (рисунок 2.6б).

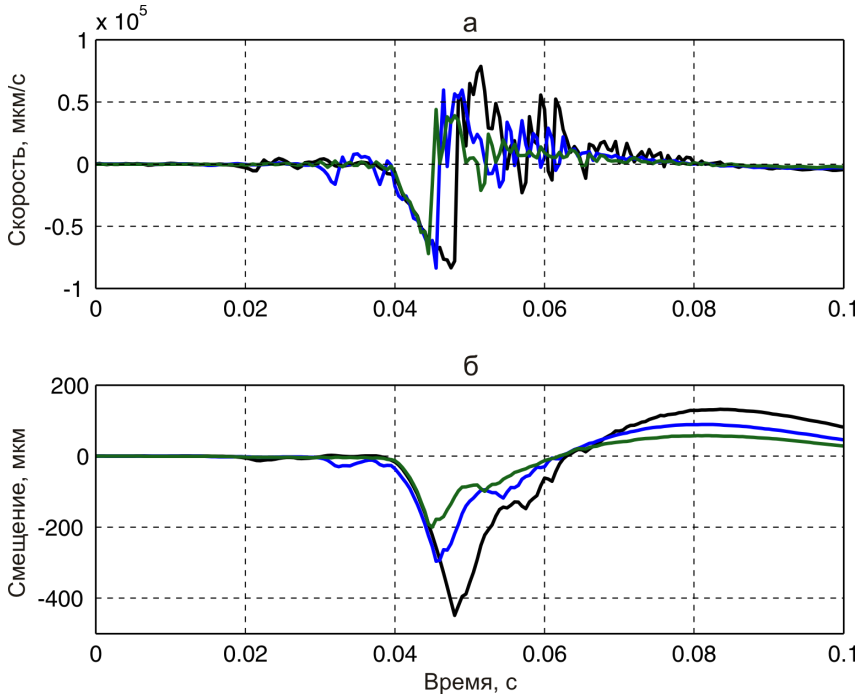

Рисунок 2.6. Записи трех откликов сейсмоприемника GS-20DX на ступени смещения амплитудой 450, 300 и 200 мкм (а) и их интегралы (б) [Дергач и Юшин, 2014].

Легко понять, исходя из принципа работы геофона, что сигналы на рисунке 2.6а пропорциональны скоростям перемещения его катушки относительно корпуса. Несмотря на «грязный» дребезговый вид этих откликов (в отличие от предыдущего примера: см. рисунок 2.4), их интегралы (рисунок 2.6б), пропорциональные смещениям катушки в корпусе, выглядят более свободными от дребезга, причем пиковые значения интегралов четко пропорциональны амплитудам соответствующих ступеней-щупов. Наблюдаемый на рисунке 2.6а приблизительно линейный рост выходного сигнала датчика в момент степ-теста означает, что скорость маятника подчиняется закону постоянного ускорения, хотя и не обязательно, равного g. Этот факт дает право проводить коррекцию спектра

за конечность времени реального воздействия амплитудным спектром синтетической треугольной функции скорости, единственным экспериментальным параметром которой будет служить фактическое время падения платформы с датчиком, которое уверенно опознается по линейному участку выходного сигнала сейсмоприемника или параболическому участку его интеграла.

Коррекция высоких частот АЧХ с помощью записи относительной скорости платформы и станины специальным датчиком. Более точный способ высокочастотной коррекции АЧХ состоит в измерении и учете фактической скорости платформы. С этой целью, как упоминалось выше, в конструкции стенда применен электродинамический датчик относительной скорости, отличающийся от сейсмоприемника–велосиметра тем, что его магнит укреплен непосредственно на станине, а катушка–рамка жестко установлена на подвижной платформе (см. фото рисунке 2.3). Типичный вид записи этого датчика во время степ-теста показан на рисунке 2.7 черной линией. Интеграл этой записи (синяя линия), представляющий собой путь платформы, показывает, что после первого касания станины платформа испытывает отскок амплитудой более 10% амплитуды калибровочной ступени, на который накладываются еще и собственные колебания измерительной рамки.

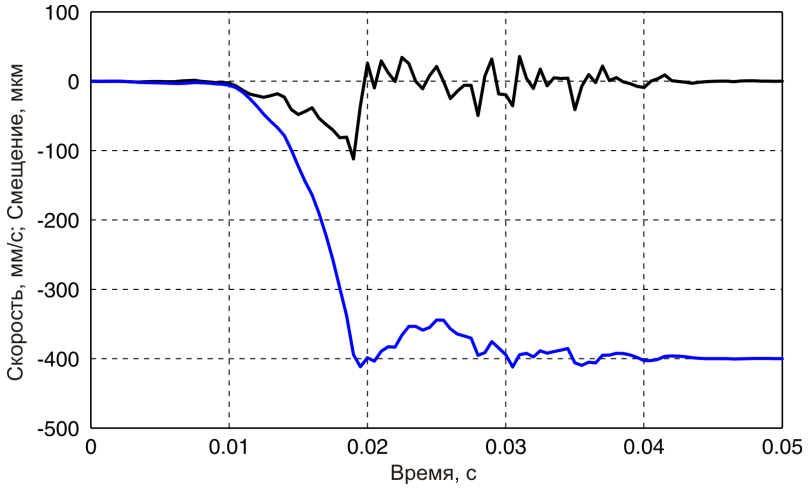

Рисунок 2.7. Типичная запись свободного падения платформы датчиком относительной скорости [Дергач и Юшин, 2014]: черная линия – скорость платформы с датчиком, синяя – ее интеграл, то есть, смещение. Видны колебания отскока платформы при ударе о станину с периодом около 10 мс и высокочастотные колебания рамки датчика относительной скорости, прикрепленной к платформе консольно.

Теоретически деление амплитудного спектра отклика калибруемого датчика на амплитудный спектр контрольного датчика относительной скорости в соответствии с (2.25) в дискретной форме даст истинную КЧХ до частоты Найквиста. Однако на практике паразитные высокочастотные колебания платформы с установленным на ней калибруемым датчиком недостаточно синфазны с колебаниями датчика истинной скорости, в результате чего полной компенсации на высоких частотах не происходит, и скорректированная АЧХ в области верхних частот оказывается сильно осциллирующей. Ослабить проявления этого эффекта можно грубым способом, сглаживая высокочастотную часть АЧХ скользящим по частоте окном. На рисунке 2.8 показан результат вычисления АЧХ сейсмоприемника GS-20DX по записи ступени смещения амплитудой 300 мкм (линия 1) и ее последующие коррекции (линии 2, 3 и 4).

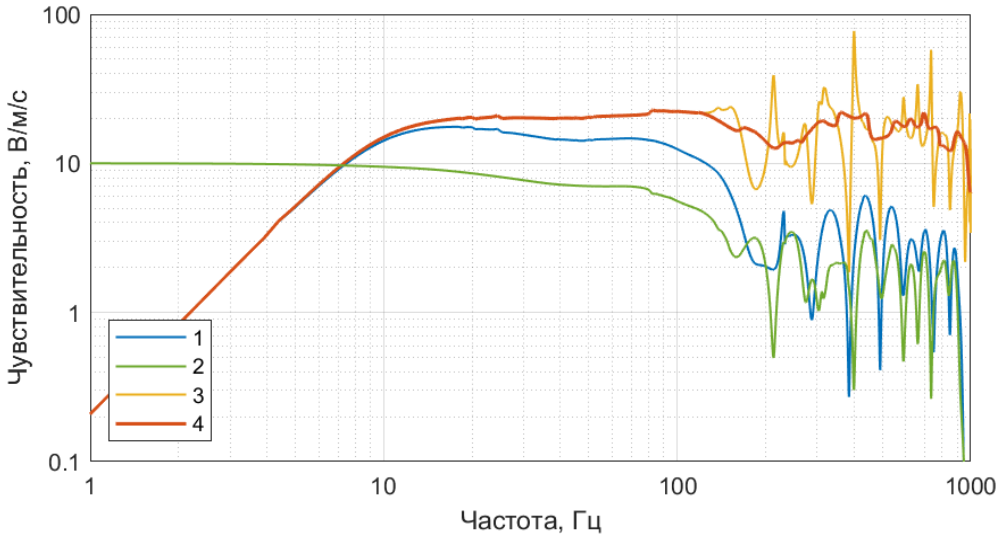

Рисунок 2.8. АЧХ сейсмоприемника GS-20DX по скорости, полученная по записи ступени смещения 300 мкм с падением на упор. Линия 1 – АЧХ, скорректированная только за колебания станины; линия 2 – нормированный амплитудный спектр отклика контрольного датчика относительной скорости; линия 3 – АЧХ, скорректированная спектром 2; линия 4 – АЧХ, скорректированная за конечность времени падения (то есть, линия 3, сглаженная в области частот 120-1000 Гц скользящим по частоте окном шириной 100 Гц).

Этот результат, следует интерпретировать так. Безусловно, достоверной является калибровка низко- и среднечастотной области АЧХ, в данном случае примерно до 70 Гц. Здесь относительная среднеквадратичная ошибка, оцененная

экспериментально по разбросу результатов 10 повторных воздействий, не превысила 3%. В области высоких частот, там, где пришлось прибегнуть к сглаживанию осцилляций дребезга, максимальная относительная ошибка может достигать 15%, но общий тренд все же свидетельствует, что сейсмоприемник «GS-20DX» имеет чувствительность, близкую к номинальной среднечастотной, по крайней мере, до 800 Гц, а не до 250 Гц, гарантированных производителем [GS-20DX: техническое описание; Дергач и Юшин, 2014]. Правда, реализовать такую чувствительность возможно только в жесткой, например, скальной породе или искусственных железобетонных сооружениях и при условии прочного контакта сейсмоприемника с объектом.

Аппроксимация экспериментальной АЧХ теоретической является конечным этапом калибровки. Заменяя круговую частоту ω на циклическую f, обозначим экспериментальную АЧХ (2.25) как W_f и представим модуль соответствующей теоретической АЧХ (2.27) как

$$V(f) = \frac{K_V f^2}{\sqrt{\left(f_0^2 - f^2\right)^2 + \left(2df_0 f\right)^2}} \tag{2.28}$$

Введем понятие полосы достоверности, определив его как интервал частот $\left[f_1, f_2\right]$, наиболее чувствительный к изменению основных параметров датчика. Обычно это диапазон частот от $0.1f_0$ до $5.0f_0$, но может быть взят и шире. Близость теоретической и экспериментальной АЧХ целесообразно оценивать по разностно-квадратичному критерию в двойном логарифмическом масштабе их представления. Оптимум достигается при минимуме функционала вида:

$$\Lambda = \int_{f_1}^{f_2} f^{-1}\left[lgW(f) - lgV\left(f, f_0, d, K_V\right)\right]^2 df, \tag{2.29}$$

где f_0, d, K_V – варьируемые параметры, f_1 и f_2 – частоты, ограничивающие полосу достоверности экспериментального отклика. На рисунке 2.9 представлен в

графической форме результат оптимального подбора основных параметров калибруемого сейсмоприемника GS-20DX по критерию (2.29).

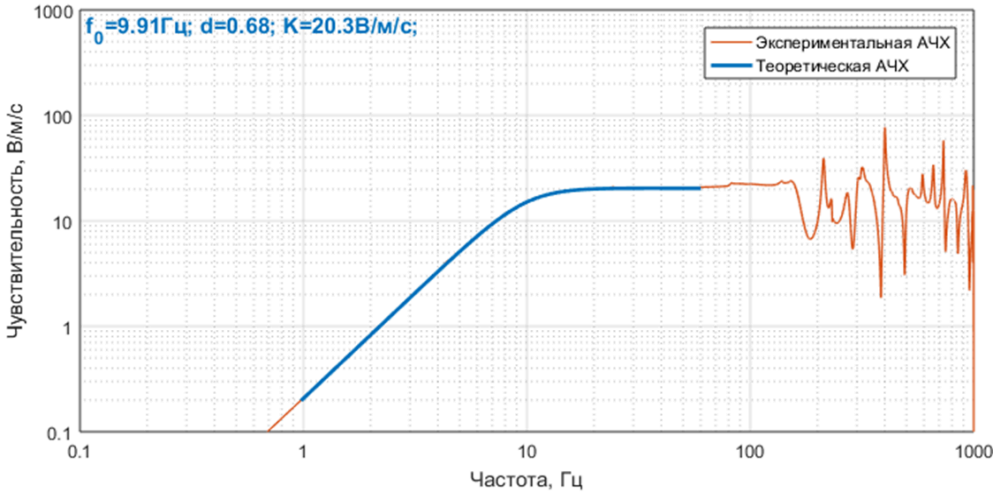

Рисунок 2.9. Результат оптимального выбора основных параметров калибруемого сейсмоприемника. Красная линия – экспериментальная АЧХ, синяя линия – теоретическая АЧХ.

В данном случае для минимизации целевого функционала (2.29) были использованы средства программного пакета MATLAB «Curve Fitting Toolbox». В результате были получены следующие оценки: $f_0 = 9.91$ Гц, $d = 0.68$, $K_V = 20.3$ В/м/с. Эти значения попадают в диапазон точности, заявленный производителем: $f_0 = 10 \pm 0.5$ Гц, $d = 0.7 \pm 0.07$, $K_V = 19.8 \pm 1.98$ В/м/с

Предлагаемый метод в представленном в настоящей работе виде подходит не для всех типов датчиков. Более всего он пригоден для пассивных электродинамических датчиков с собственными частотами, по крайней мере, от 0.5 Гц до 30 Гц – проверено на практике. В это множество попадают все современные и ранее выпускавшиеся геофоны, а также такие широко распространенные датчики как «СК1П», «СМ3» и им подобные.

Вместе с тем, этот метод может оказаться слишком «суровым» для «нежных» конструкций сейсмометров с собственными периодами более 10 с. Что же касается активных датчиков скорости и смещения, построенных на основе пьезокерамических акселерометров, то к их тестированию методом ступени надо подходить с большой осторожностью, поскольку преобразования сигнала,

происходящие во внутренней схеме, не поддаются внешнему контролю, и перегрузки в этой части могут существенно исказить результат.

Следует далее отметить, что требования к технологии калибровки несколько отличаются для датчиков с разной рабочей полосой частот. Так, при калибровке средне- и высокочастотных датчиков, верхняя частота которых превышает 100 Гц, существенное влияние на результат оказывает неидеальность импульса воздействия, вследствие чего коррекция АЧХ за форму степ-теста обязательна. При калибровке более длиннопериодных датчиков-сейсмометров с более низкой верхней границей частоты конечностью воздействия можно вообще пренебречь.

Если калибровка выполняется с помощью сейсмостанции, регистратор которой не рассчитан на большие амплитуды входных сигналов, необходимо предусмотреть подключение датчика через калиброванный аттенюатор. Если же используется цифровой осциллограф, обычно вырабатывающий малоразрядный код амплитуд, целесообразно назначить предельно возможную частоту дискретизации с тем, чтобы «разменять» ее затем на фильтрацию с децимацией, что повысит амплитудную разрешенность [Дергач и Юшин, 2014].

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБРАБОТКИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ ЗАПИСЕЙ МЕТОДОМ НИЗКОЧАСТОТНОЙ ДЕКОНВОЛЮЦИИ

3.1. Программная реализация алгоритма низкочастотной деконволюции в частотной области

Метод частотной коррекции или низкочастотной деконволюции позволяет извлекать информацию о колебаниях, частоты которых находятся ниже рабочей полосы датчика на этапе цифровой обработки записей геофона [Юшин, 2001]. Программная реализация алгоритма низкочастотной деконволюции в частотной области на языке программирования MATLAB подробно представлена в работе автора [Дергач и др., 2018]. Формально алгоритм можно записать в виде выражения:

$$\widehat{y_n}(f) = \frac{\widehat{g}\left(f; d_n, f_n\right)}{\widehat{g}\left(f; d_0, f_0\right)} \widehat{y_0}(f), \tag{3.1}$$

где $\widehat{y_0}(f)$ – спектр Фурье исходной записи (комплексный); $\widehat{g}\left(f; d_0, f_0\right)$ – теоретическая частотная характеристика исходного геофона, которая задается двумя параметрами d_0, f_0 – коэффициентом демпфирования и собственной частотой; $\widehat{g}\left(f; d_n, f_n\right)$ – частотная характеристика желаемого «виртуального» геофона с новыми параметрами d_n, f_n; $\widehat{y_n}(f)$ – спектр Фурье записи после деконволюции [Дергач и др., 2026].

Частотная характеристика геофона однозначно определяется двумя параметрами, собственной частотой f_0 и безразмерным коэффициентом демпфирования d_0, которые можно взять из технического описания геофона или получить посредством калибровки [Asten, 1977; van Kann and Winterflood, 2005; Дергач и Юшин, 2014]. Для проведения частотной коррекции необходимо задаться желаемой предельной частотой f_n. Соответствующий коэффициент

демпфирования для нее может быть рассчитан из паспортных характеристик геофона f_0, d_0 и требования постоянства амплитудно-частотной характеристики «виртуального» геофона.

Перед делением на $\widehat{g}\left(f; d_0, f_0\right)$ рекомендуется принудительно задать значение на нулевой частоте равным 1 (чтобы избежать деления на ноль). Эта процедура корректна с той точки зрения, что нулевая частота по сути является смещением сигнала на постоянную составляющую и не имеет никакого отношения к работе геофона. К примеру, низкочастотный дрейф, зачастую наблюдаемый в сейсмических записях, появляется вследствие прохождения сигнала через усилитель цифрового регистратора [Lee, 2009; Дергач и др., 2018].

Таким образом, цифровой алгоритм деконволюции, реализованный в частотной области состоит из поэлементного перемножения КЧХ исходного сигнала геофона, фильтра деконволюции и КЧХ «виртуального» сейсмометра с собственной частотой f_n. В некоторых случаях для стабилизации решения (то есть для лучшего подавления низкочастотного шума, возрастающего в результате обратной фильтрации) может потребоваться отфильтровать низкочастотную составляющую результата деконволюции на значение, равное половине частоты деконволюции ($\frac{f_n}{2}$).

Продемонстрируем работу алгоритма на синтетических данных с использованием модели отклика геофона на дискретный аналог дельта-функции по скорости. На рис. 3.1 показаны амплитудный (а) и фазовый (б) спектры для модели отклика стандартного 10-герцового геофона (синим), результат применения низкочастотной деконволюции и приведения к частоте $f_n = 1$ Гц (красным), точный отклик «контрольного» 1-герцового геофона (пунктир). Частота дискретизации $f_s = 100$ Гц.

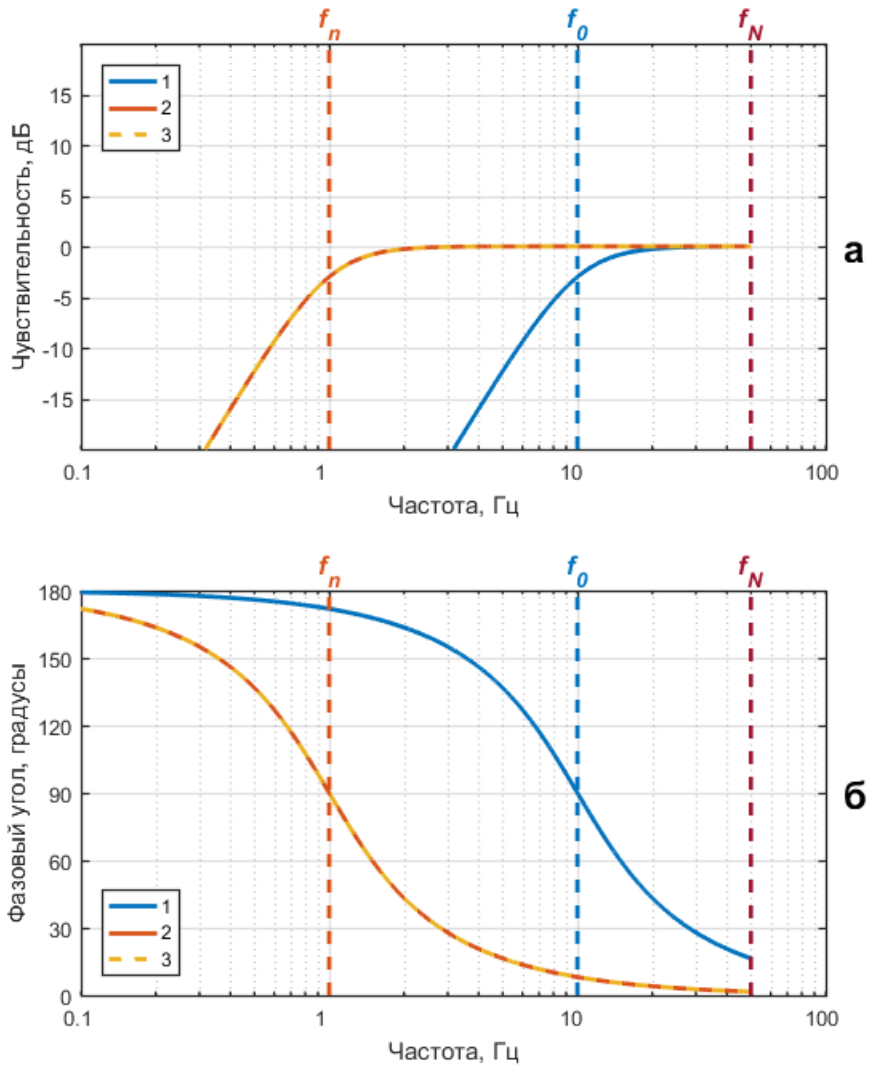

Рисунок 3.1. Синтетические АЧХ (а) и ФЧХ (б). 1 – модель отклика 10-герцового геофона; 2 – результат обработки алгоритмом низкочастотной деконволюции к собственной частоте (f_n=1 Гц); 3 – 1-герцовый «контрольный» сейсмометр. Частота дискретизации f_s=100 Гц. [Дергач и др., 2018]

Из рисунка видно, что амплитудный и фазовый спектры 1-герцового «контрольного» сейсмометра и результата деконволюции 10-герцового геофона к частоте 1 Гц идентичны. Следовательно, алгоритм низкочастотной деконволюции, реализованный в частотной области, работает корректно.

Наглядно проиллюстрируем работу алгоритма низкочастотной деконволюции на примере обработки записи Колыванского землетрясения с магнитудой 4.3, произошедшего 09.01.2019 [Еманов и др., 2019; Дергач и др., 2026]. Запись была произведена с использованием 4.5-герцового геофона ZF (Zhaofeng Geophysical, Китай) приблизительно в 30 км от эпицентра

землетрясения. Исходный сигнал, записанный геофоном, а также результат расширения его частотного диапазона с 4.50 до 0.45 Гц показан на рисунке 3.2а и б, соответственно.

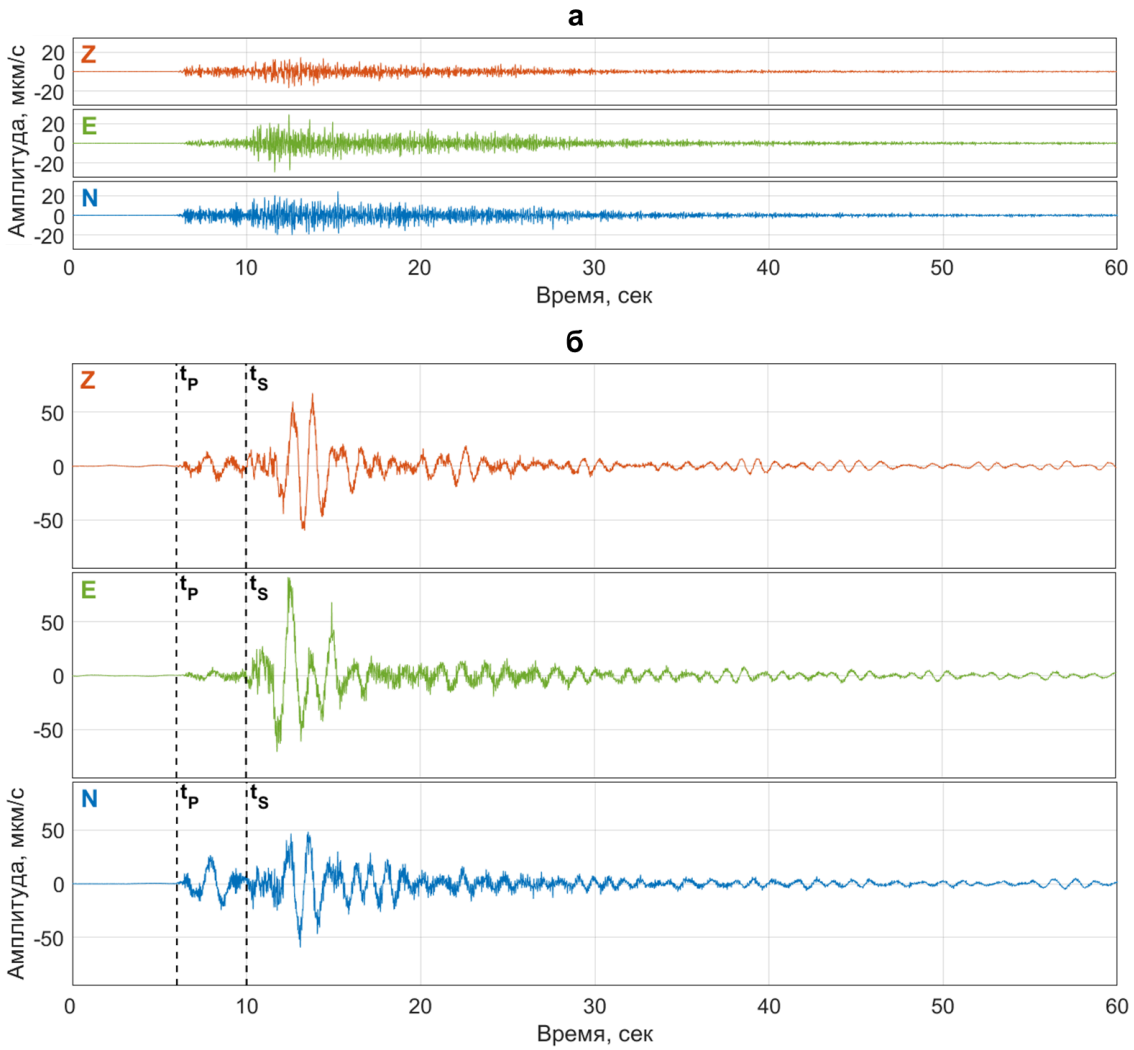

Рисунок 3.2. Результат обработки трехкомпонентной записи Колыванского землетрясения (M4.3) методом низкочастотной деконволюции [Дергач и др., 2026]. Частотный диапазон исходной записи геофона (а) был расширен на порядок, вплоть до значения 0.45 Гц (б). Черными пунктирными линиями показаны времена прихода P- и S-волн, определенные по записям с расширенным частотным диапазоном.

После расширения частотного диапазона записи стало возможным корректное определение амплитуды (возросла более чем в 3 раза) и периода низкочастотных поперечных волн, которые используется для расчета магнитуды землетрясения. Кроме того, заметно упростился процесс идентификации фаз и определения времен прихода целевых волн (см. рисунок 3.2б).

Дополнительным преимуществом реализации алгоритма в частотной области является то, что он позволяет скорректировать записи геофонов с неоптимальным затуханием, а именно «спрямить» амплитудно-частотную характеристику без потери чувствительности, как это происходит в случае использования шунтирующего резистора.

Алгоритм низкочастотной деконволюции был программно реализован автором в виде модуля на языке MATLAB [Дергач и др., 2018; Дергач, 2020].

3.2. Оценка погрешности метода низкочастотной деконволюции в зависимости от точности задания параметров геофона

Несовпадение реальных и паспортных технических параметров геофонов может приводить к искажению результатов низкочастотной деконволюции [Беседина и др., 2013]. Причем значимые отличия могут наблюдаться даже при задании параметров в пределах погрешности, заявленной производителем. Оценить влияние погрешности на результат низкочастотной деконволюции позволяет синтетический «степ-тест» тест (по аналогии с методом абсолютной калибровки, описанным в Главе 2). В качестве примеров были выбраны современные модели геофонов [GS-ONE: техническое описание; GS-ONE-LF-4.5-HZ: техническое описание; GS-ONE-LF-5-HZ: техническое описание], распространенные на рынке Российской Федерации (производитель – ООО «Геоспейс Технолоджис Евразия»), основные технические характеристики которых приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Основные технические характеристики современных моделей геофонов при отсутствии шунтирующего резистора.

Модель геофона	**Собственная частота, Гц**	**Коэффициент демпфирования**	**Чувствительность, В/м/с**
GS-ONE	10 ± 0.35 Гц	от 0.48 до 0.54	85.8 ± 3.5%
GS-ONE LF (5 Гц)	5.0 ± 0.25 Гц	от 0.31 до 0.45	100.4 ± 5%
GS-ONE LF (4.5 Гц)	4.5 ± 0.75 Гц	от 0.32 до 0.52	100.4 ± 10%

На рисунке 3.3 приведены амплитудно- и фазо-частотные характеристики, полученные с использованием синтетических откликов геофонов после низкочастотной деконволюции к значению 0.5 Гц, и рассчитанные в рамках предельных случаев погрешностей паспортных параметров «виртуальных» геофонов.

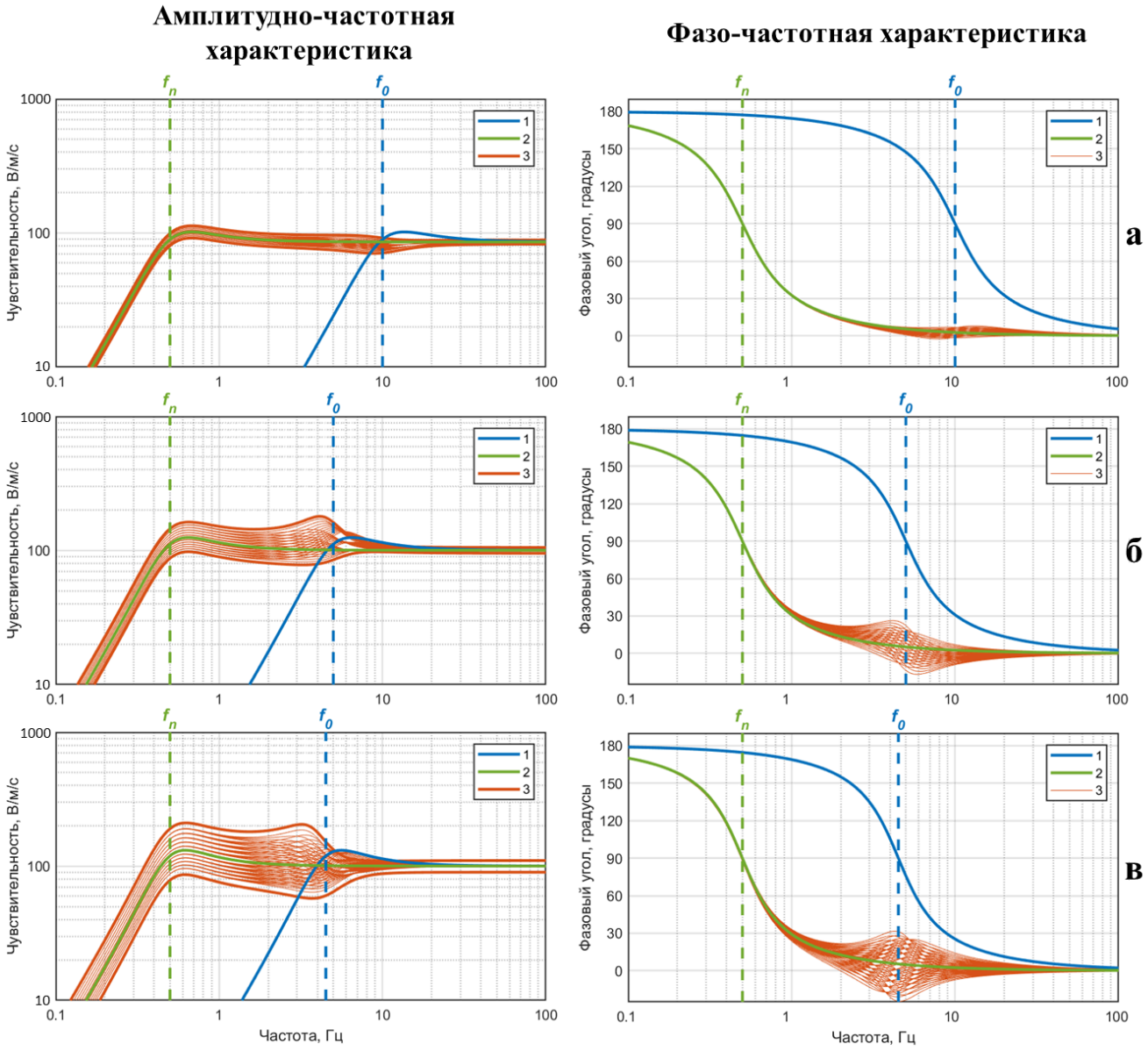

Рисунок 3.3. Расчетные АЧХ и ФЧХ популярных моделей геофонов до (1) и после деконволюции (2), а также с учетом предельных значений погрешностей паспортных характеристик (3), приведенных в таблице 3.1. Модели геофонов: а – GS-ONE (10 Гц); б – GS-ONE LF (5.0 Гц); в – GS-ONE LF (4.5 Гц).

Как видно из рисунка 3.3, при несовпадении паспортных и реальных технических параметров геофона даже в пределах заявленной производителем

погрешности, искажение значений амплитуды и фазы для «виртуального» геофона выходят за пределы погрешности реального датчика. Особенно это актуально для низкочастотных геофонов, где чувствительность «виртуального» датчика, а, следовательно, и амплитуда восстанавливаемого сигнала, может отличаться от прогнозируемой в несколько раз (210 либо 58 В/м/с вместо прогнозируемых 100.4), а сдвиг по фазе достигать значений вплоть до 30 градусов. Сопоставление результатов показывает, что с точки зрения влияния точности задания технических характеристик на результаты низкочастотной деконволюции лучшим вариантом является 10-герцовый геофон «GS-ONE». Однако, как будет показано в следующих разделах, относительно высокое значение собственной частоты и низкая чувствительность негативно влияют на предельные значения частоты для расширения диапазона записей в низкочастотную область, а минимизировать погрешности технических характеристик геофонов позволяет их калибровка (Глава 2).

3.3. Разработка способа определения допустимой предельной частоты с использованием записи аппаратурного шума сейсмического регистратора

Способ определения значения допустимой предельной частоты с использованием записи аппаратурного шума сейсмического регистратора детально описан и опубликован в работе [Дергач и др., 2026].

Одним из основных ограничений при расширении спектра записи в низкочастотную область является уровень аппаратурных шумов регистрирующего устройства. В работе [Clinton and Heaton, 2002] было наглядно продемонстрировано, что амплитудный и частотный диапазон сигналов, регистрируемых при помощи современной аппаратуры, зависит от технических характеристик не только самого датчика. В частности, аппаратурный шум (наибольший вклад в который вносит шум операционного усилителя) оказывается основным ограничением при использовании метода низкочастотной деконволюции. Он не позволяет восстанавливать сколь угодно низкие частоты колебаний, т.к. после некоторого значения чувствительности датчика перестает

хватать, чтобы его реакция превысила возросший аппаратурный шум. Точка превышения аппаратурного шума для каждого землетрясения и сейсморегистрирующего комплекта на самом деле уникальна и имеет смысл индивидуальный подбор параметров процедуры расширения спектра частотной характеристики [Дергач и др., 2026].

Получить оценки уровня аппаратурного шума регистрационного тракта можно различными способами [Беседина и др., 2021; Эльтеков и др., 2024]. Существующие модели шума показывают, что рост его спектральной плотности мощности (СПМ) должен быть пропорционален $1/f$, см. [Lee, 2009]. Продемонстрируем аппаратурный шум регистратора путем осуществления записи с зашунтированным выходом. Сопротивление шунта выбрано эквивалентным сопротивлению геофона. Покажем, что уровень аппаратурного шума сейсмического регистратора действительно растет на низких частотах. На рисунке 3.4 приведен пример спектральных плотностей мощности (СПМ) записей аппаратурного шума для различных сейсмических регистраторов, полученные соискателем экспериментально, цветными линиями показаны СПМ регистраторов, используемых для демонстрации результатов данной работы, чёрным – другие регистраторы без конкретизации модели. Важно отметить, что уровень шума регистраторов может отличаться на несколько порядков. Это значительно влияет на результаты низкочастотной деконволюции и показывает важность тщательного выбора регистратора при проектировании сетей сейсмологического мониторинга.

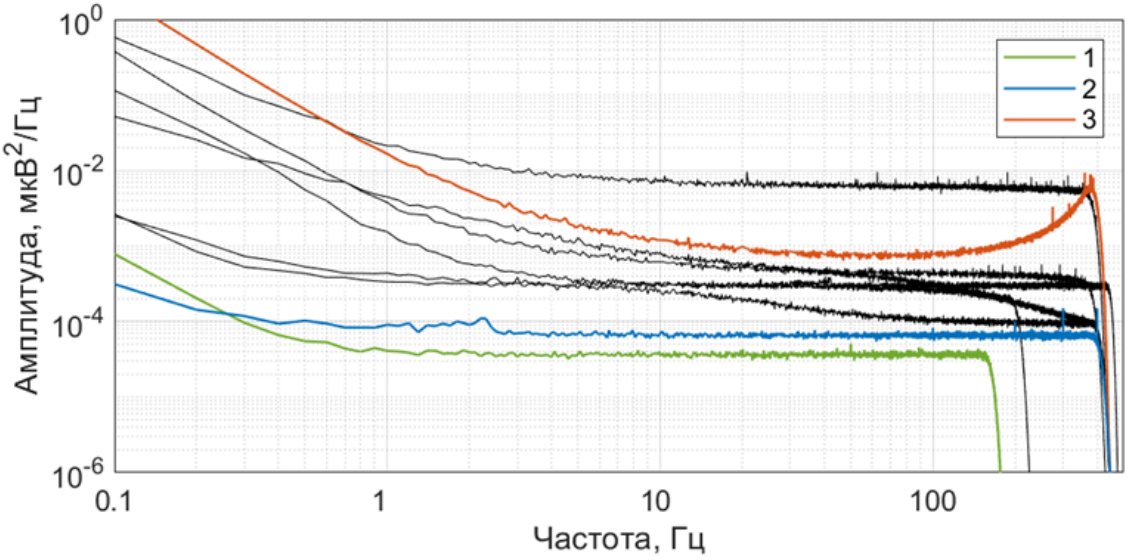

Рисунок 3.4. СПМ экспериментальных записей различных моделей сейсмических регистраторов [Дергач и др., 2026]. Цветом выделены СПМ регистраторов, записи которых использовались в данном исследовании. 1 – DATA-CUBE^3, характеризующийся низким уровнем шумов во всей исследуемой частотной области; 2 – БАР3.1, входящий в состав бескабельной сейсмосистемы SCOUT (с отключенным модулем WiFi) [Погрецкий и др., 2017]; 3 – устаревшая модель сейсмического регистратора, характеризующаяся сравнительно высоким уровнем шумов.

Предельное значение частоты для коррекции конкретной записи сейсмического события, произведенной конкретным комплектом регистрирующей аппаратуры, можно определить итеративно. Суть предлагаемого подхода заключается в сравнении октавных спектров аппаратурного шума сейсмического регистратора (пересчитанного в единицы скорости с учетом чувствительности используемого геофона) с октавным спектром записи сигнала от сейсмического события, сделанного той же аппаратурой. Обе записи итеративно обрабатываются алгоритмом низкочастотной деконволюции для разных значений собственной частоты f_n [Дергач и др., 2026].

Использование октавных спектров обусловлено тем, что они пригодны для сравнительных оценок шумоподобных и импульсных сигналов, к которым в данном случае можно отнести сигналы от землетрясений. Переход от СПМ аппаратурных шумов к октавным спектрам среднеквадратических отклонений (СКО) осуществляется по формуле [Юшин, 2003]:

$$q(f) = \sqrt{f \cdot S(f)}, \tag{3.2}$$

где $S(f)$ – СПМ сигнала, f – абсолютная частота в Гц.

Пример итеративного перебора значения частоты деконволюции приведен на рисунке 3.5. Слева последовательно приведены сигналы горизонтальной компоненты (E), полученные для f_n равных 4.5, 1.0, 0.3, 0.1 и 0.045 Гц. Справа приведено сопоставление октавных спектров этих сигналов и аппаратурного шума комплекта после деконволюции к этим же значениям.

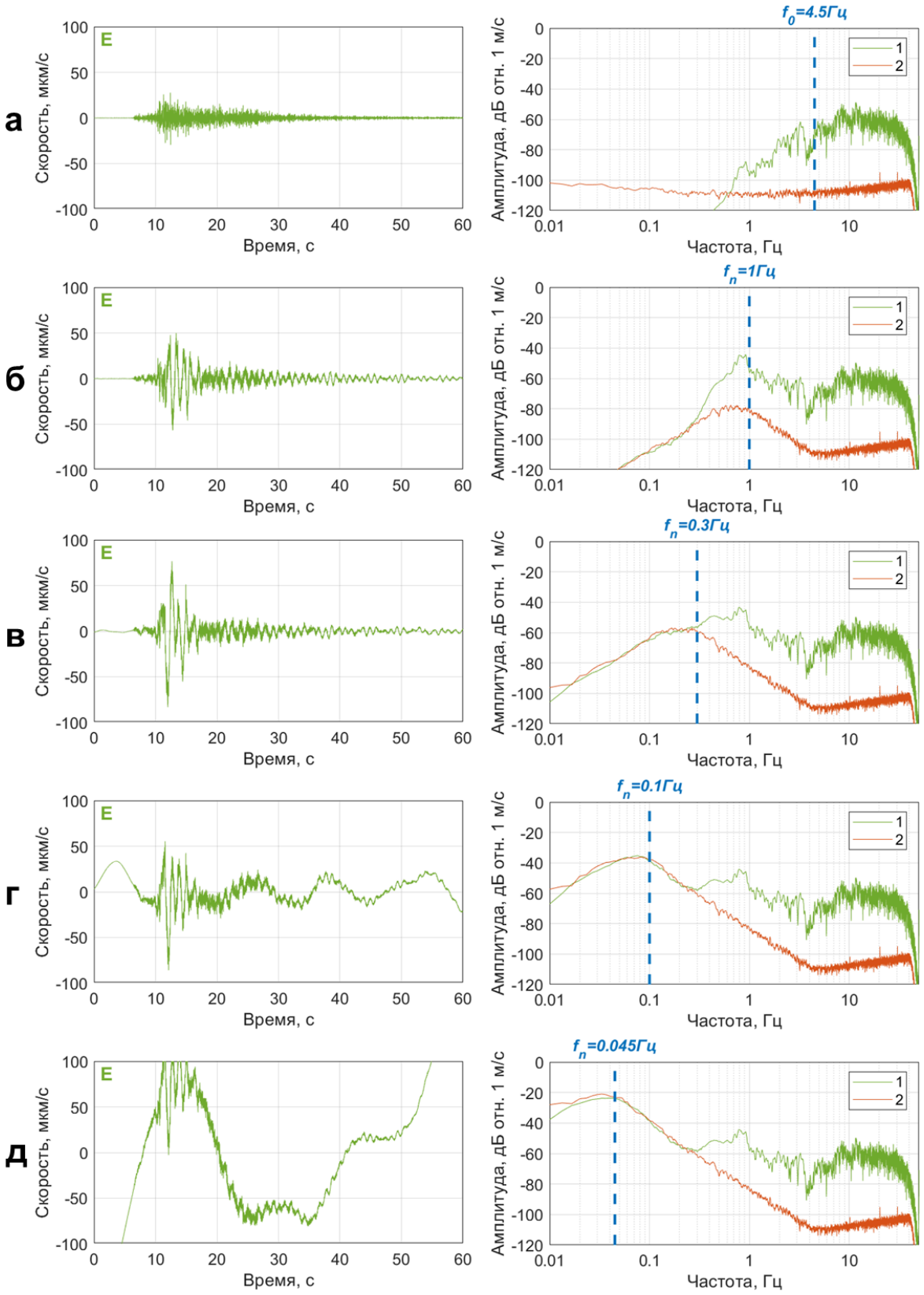

Рисунок 3.5. Результаты обработки экспериментальных записей Колыванского землетрясения и аппаратурного шума к различным значениям деконволюции [Дергач и др., 2026]: а – 4.5 Гц (исходная запись), б – 1 Гц, в – 0.3 Гц, г – 0.1 Гц, д – 0.045 Гц. Для каждого случая приводится полученный сигнал (левая панель), а также сопоставление октавных спектров: 1 – сигнал и 2 – аппаратурный шум (правая панель).

Рисунок 3.5а иллюстрирует исходное соотношение октавных спектров сигнала и аппаратурного шума. Видно, что в этом случае и на первом этапе расширения частотного диапазона (рисунок 3.5б) октавный спектр сигнала значительно выше спектра аппаратурного шума. При дальнейшем снижении желаемой собственной частоты f_n спектры сейсмического сигнала и аппаратурного шума начинают совпадать: для значений 0.3 Гц и ниже (рисунок 3.5в). При дальнейшем снижении f_n рост уровня аппаратурного шума обгоняет рост полезного сигнала и при расширении в низкие частоты амплитуда низкочастотного шума начинает превышать амплитуду полезного сигнала (в целевом диапазоне частот). Во временной области этот эффект также проявляется в виде паразитных низкочастотных колебаний, превышающих амплитуду полезного сигнала (рисунок 3.5г и 3.5д).

Таким образом, располагая экспериментальной записью аппаратурных шумов регистратора, можно определить допустимое значение для f_n – когда спектральная амплитуда аппаратурного шума и записи начинают совпадать. Это значит, что запись полностью определяется аппаратурным шумом. В данном случае для записи Колыванского землетрясения, произведенной конкретным комплектом регистрирующей аппаратуры, минимальное допустимое f_n составляет 0.3 Гц [Дергач и др., 2026].

3.4. Разработка методики оценки применимости комплекта геофон-регистратор для сейсмологических наблюдений различного уровня

Основные положения методики, а также последовательность ее реализации изложены по работе [Дергач и др., 2026]. Для сейсмологов крайне важным также является предварительная оценка возможности применения того или иного аппаратурного комплекта. Рассмотрим более подробно методику оценки характеристик конкретного комплекта регистратор-геофон для решения различных задач сейсмологии. Амплитудный диапазон комплекта аппаратуры в рабочей полосе частот геофона показан голубой областью №1 на рисунке 3.6, см.

обсуждение в [Clinton and Heaton, 2002]. Этот диапазон снизу ограничен аппаратурным шумом сейсмического регистратора, пересчитанного в единицы скорости с учетом чувствительности геофона. Сверху он ограничен клиппингом регистратора, который определяется разрядностью аналого-цифрового преобразователя, а также зависит от выбранного коэффициента усиления и чувствительности геофона. Частотный диапазон слева ограничен собственной частотой геофона, справа – частотой Найквиста, которая зависит от частоты дискретизации записи и выбирается в зависимости от задачи.

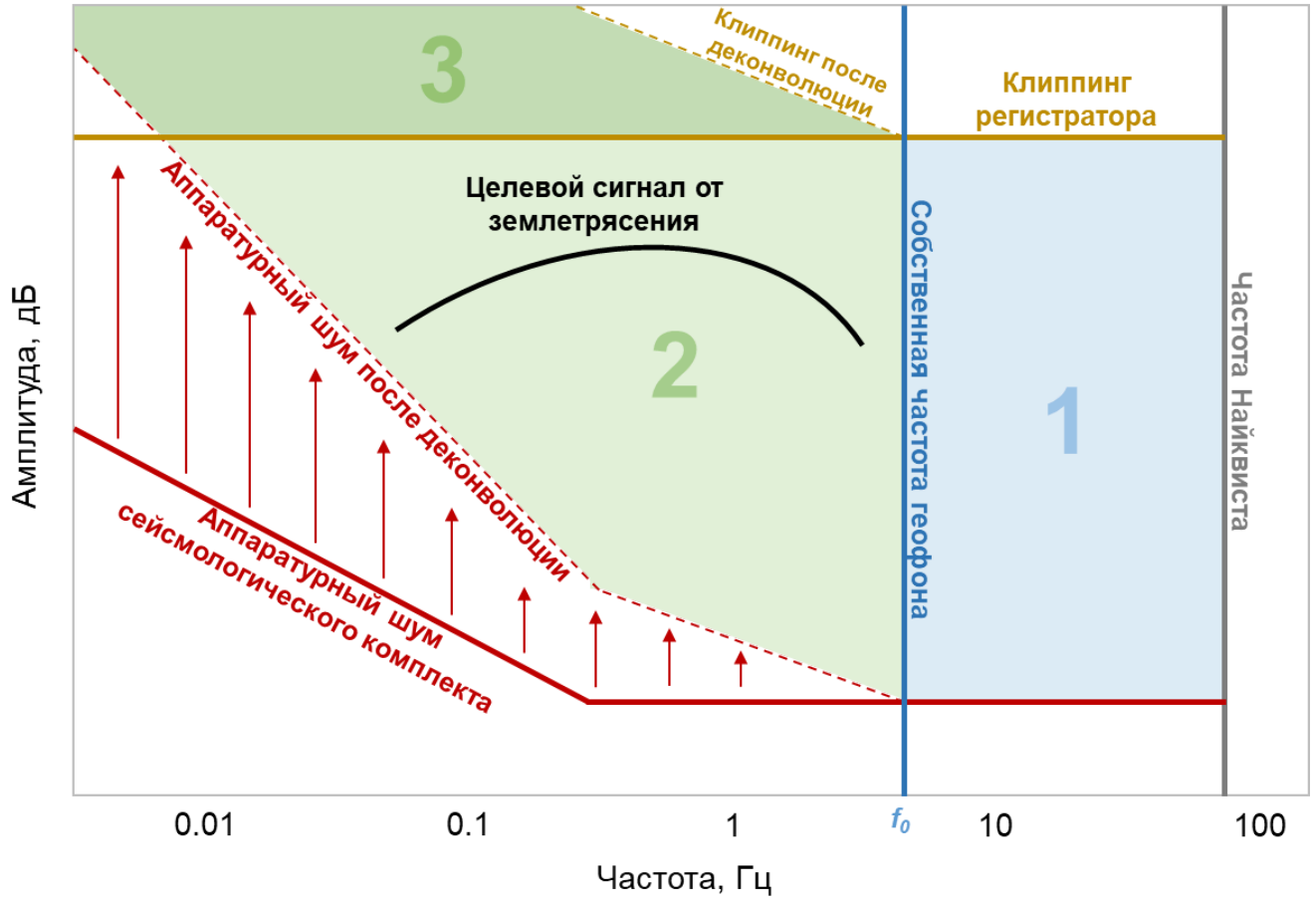

Рисунок 3.6. Схематичное изображение амплитудно-частотного диапазона комплекта сейсмический регистратор-геофон согласно [Дергач и др., 2026]. Область 1 – исходный амплитудно-частотный диапазон записей геофона с собственной частотой f_0, области 2 и 3 – после обработки записей методом низкочастотной деконволюции. Черной линией схематично изображен октавный спектр целевого сигнала от землетрясения.

Использование низкочастотной деконволюции позволяет расширить рабочую область комплекта геофон-регистратор в область низких частот, см.

зеленые области 2 и 3 на рисунке 3.6. При этом следует отметить, что аппаратурный шум сам по себе растет с понижением частоты (см. [Lee, 2009]), как схематически показано сплошной красной линией на рисунке 3.6. После процедуры деконволюции аппаратурный шум для частот в полосе, находящейся ниже собственной частоты геофона, дополнительно возрастает в зависимости от коэффициента демпфирования датчика, см. красную пунктирную линию на рисунке 3.6. Таким образом амплитуда минимального регистрируемого сигнала для заданного комплекта растет с понижением частоты. Заметим, что верхняя граница клиппинга также возрастает для низких частот вследствие низкочастотной деконволюции (желтая пунктирная линия), за счет чего расширяется не только частотный, но и амплитудный диапазон сейсмических записей (область 3 на рисунке 3.6).

Выбору коэффициента усиления регистратора необходимо уделять особое внимание, так как кроме максимально допустимой амплитуды регистрируемых сигналов, он определяет чувствительность всего комплекта и напрямую влияет на разрешение (квантование) слабых сигналов по амплитуде. Так при коэффициенте усиления K=1 раз чувствительность системы регистрации, состоящей из регистратора и современного геофона, составляет 100 В/м/с; при K=16 раз – уже 1600 В/м/с, что сопоставимо с чувствительностью сейсмологических сейсмометров; при максимальном же коэффициенте усиления K=64 раз, чувствительность системы составляет 6400 В/м/с. Соответственно пользователю необходимо сохранять баланс между разрешающей способностью применительно к слабым сигналам и динамическим диапазоном записи.

Таким образом, располагая экспериментальной записью аппаратурного шума, а также техническими параметрами регистратора и геофона можно рассчитать амплитудно-частотный диапазон регистрируемых сейсмических сигналов в спектральной области. Тогда можно проверить, попадают ли спектральные характеристики целевых сигналов в этот диапазон. Это дает возможность оценить применимость рассматриваемого комплекта

геофон-регистратор для решения поставленных задач сейсмологического мониторинга.

Для оценки амплитуд целевых сигналов от землетрясений различной магнитуды на различных гипоцентральных расстояниях предлагается использовать соответствующие усредненные спектральные оценки для сейсмологических записей, см. [Clinton and Heaton, 2002]. В первоисточнике спектральные оценки землетрясений представлены в виде графиков зависимости максимальной амплитуды сейсмологических записей землетрясений с различными магнитудами на различных эпицентральных расстояниях, отфильтрованных набором полосовых фильтров шириной в одну октаву, от частоты. Далее условимся называть такое представление октавными спектрами максимальных амплитуд. Чтобы корректно сопоставить амплитудно-частотный диапазон, полученный для определенного сейсмологического комплекта, с октавными спектрами землетрясений необходимо привести все спектральные оценки к единой размерности. Отличие октавных спектров максимальных амплитуд землетрясений и октавных спектров СКО аппаратурного шума заключается лишь в выборе способа оценки амплитуды целевого сигнала в октавной полосе частот: максимум абсолютного значения либо среднеквадратическое отклонение, соответственно. С учетом того, что для аппаратурного шума отношение его удвоенной амплитуды (peak-to-peak) к среднеквадратическому отклонению составляет приблизительно 6 раз [Smith, 1999], можно корректно осуществлять их сопоставление с учетом поправочного коэффициента равного 3.

Кратко пошагово резюмируем предложенную методику:

1. Экспериментальная запись аппаратурного шума регистратора с переводом в единицы скорости с учетом чувствительности используемого геофона. Запись должна иметь достаточную продолжительность для построения релевантной СПМ (по нашему опыту, достаточно часовой записи) и, желательно, производиться непосредственно на пункте регистрации.

2. Расчет нижнего предела рабочей области (см. рисунок 3.6). Обработка записи аппаратурного шума методом низкочастотной деконволюцию до минимальной частоты (зависит от длительности записи, например – 0.001 Гц) с учетом технических характеристик геофона (собственной частоты f_0 и коэффициента демпфирования d_0).
3. Расчет верхнего предела рабочей области (см. рисунок 3.6) по амплитуде клиппинга регистратора с использованием старшего разряда АЦП и выбранного коэффициента усиления (старший разряд для 24-битных АЦП, как правило, составляет 22-23 бита).
4. Анализ применимости выбранного комплекта оборудования для задач сейсмологии. Если спектральные характеристики землетрясений определенных магнитуд (локальных, региональных или телесейсмических) попадают в рабочую область (находятся внутри зеленой и голубой области на рисунке 3.6), то выбранный комплект сейсмологической аппаратуры пригоден для решения поставленной сейсмологической задачи.

Рассчитаем рабочую область (амплитудно-частотный диапазон) сейсмологического комплекта, состоящего из широко применяемого сейсмологами регистратора DATA-CUBE^3 (DiGOS Potsdam GmbH, Германия) и низкочастотного геофона GS-ONE LF (собственная частота 5 Гц, чувствительность 100.4 В/м/с). Рабочая область для данного комплекта аппаратуры показана зеленым на всех панелях на рисунке 3.7. Далее было проведено ее сопоставление с частотными характеристиками землетрясений на разных эпицентральных расстояниях [Clinton and Heaton, 2002]: локальные (0-20 км) и региональные (90-110 км) на рисунке 3.7а, телесейсмические (3000 км) на рисунке 3.7б. Дополнительно, на рисунке 3.7 нанесены глобальные модели фонового сейсмического шума Земли: минимальная (NLNM) и максимальная (NHNM), согласно [Peterson, 1993]. Описание разных уровней наблюдений за сейсмичностью (локальный, региональный, телесейсмический) также можно найти в требованиях к сейсмическим сетям и станциям, интегрируемым в

Федеральную сеть сейсмологических наблюдений ФИЦ ЕГС РАН [Требования …, 2017].

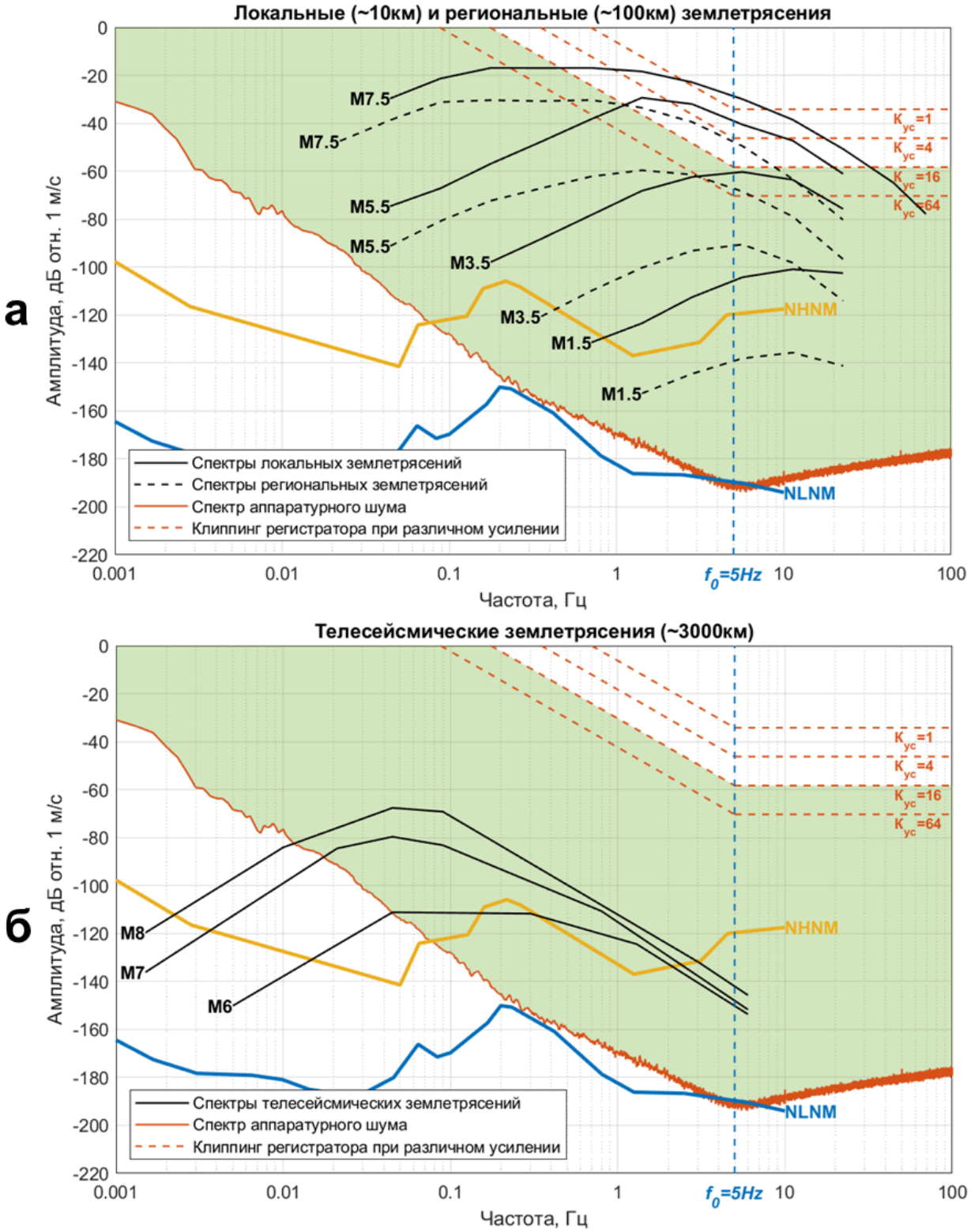

Рисунок 3.7. Амплитудно-частотный диапазон сейсмологического комплекта, состоящего из регистратора DATA-CUBE^3 и 5-герцового геофона GS-ONE LF со скорректированной частотной характеристикой [Дергач и др., 2026]. Применимость для регистрации локальных и региональных (а), а также телесейсмических (б) землетрясений.

Данный пример наглядно иллюстрирует, что выбранный сейсмологический комплект с чувствительностью 1606.4 В/м/с (Кус=16 раз) подходит для регистрации землетрясений в диапазоне от самых слабых до М3.5 для локальных (0-20 км) и М5.5 для региональных (90-110 км). В то же время, для корректной регистрации телесейсмических землетрясений (3000 км) данный комплект не подходит, так как, скорее всего амплитуда целевого сигнала будет либо занижена, либо сопоставима с уровнем возросшего шума деконволюции.

Следует отметить, что успешное применение низкочастотной деконволюции возможно в том случае, если задается уровень сейсмологических наблюдений: локальный, региональный или телесейсмический. Уровень аппаратурных шумов после низкочастотной деконволюции довольно быстро растет с понижением частоты. Но для выбранного уровня наблюдений сигналы от более мощных землетрясений имеют более высокую амплитуду и обогащены низкими частотами. На рисунках 3.7а и 3.7б мы видим смещение спектральных кривых сейсмических спектров влево и вверх с ростом магнитуды, так что они остаются в рабочей зоне аппаратурного комплекта геофон-регистратор. Отсюда становится понятным, что даже для самого лучшего по шумовым характеристикам из приведенных регистраторов геофоны с низкочастотной деконволюцией не работают для корректной регистрации телесейсмических событий, т.к. сигналы от удаленных сильных землетрясений имеют как низкие частоты, так и низкие амплитуды, см. рисунок 3.7б. Однако использование малошумящих регистраторов, особенно в низкочастотной области, а также геофонов с более высокой чувствительностью может помочь преодолеть и это ограничение.

С использованием предложенной методики можно для выбранного комплекта оборудования построить потенциальную область, в которой возможно восстановить записи сигналов от землетрясений методом низкочастотной деконволюции (рисунок 3.6 и рисунок 3.7). Но необходимо пояснить, что процедура обработки массива непрерывных данных еще требует формализации. Сигнал локального землетрясения магнитудой М4.2 можно восстановить до

частоты 0.1 Гц (рисунок 3.7а). Но если расширять спектр всех записей до частоты 0.1 Гц, то это возможно будет приводить к искажениям низкоамплитудных сигналов от слабых землетрясений (рисунок 3.5).

Отметим важность правильного подбора оборудования. Именно использование современных низкочастотных геофонов и регистраторов с низким уровнем аппаратурных шумов дает возможность решать сейсмологические задачи. Пример построения рабочей области разных комплектов аппаратуры геофон-регистратор приведен на рисунке 3.8. Расчет амплитудно-частотных диапазонов производился для трех комплектов регистрирующей аппаратуры с использованием экспериментальных записей аппаратурных шумов, приведенных на рисунке 3.4, а также технических параметров геофонов и регистраторов:

1. Геофон GS-ONE LF (4.5 Гц) и регистратор DATA-CUBE^3, характеризующийся низким уровнем аппаратурных шумов (зеленая область на рисунке 3.8). Чувствительность комплекта составила 1600 В/м/с.
2. Геофон GS-ONE LF (5 Гц) и регистратор БАР3.1 (SCOUT), характеризующийся низким уровнем аппаратурных шумов (синяя область на рисунке 3.8). Чувствительность комплекта составила 1600 В/м/с.
3. Геофон GS-20DX (10 Гц) и устаревшая модель регистратора, характеризующаяся высоким уровнем аппаратурных шумов (красная область на рисунке 3.8). Чувствительность комплекта составила 200 В/м/с.

Видно, что устаревшее оборудование не может быть корректно использовано для регистрации землетрясений, т.к. не обеспечит запись сигналов без искажений в области низких частот.

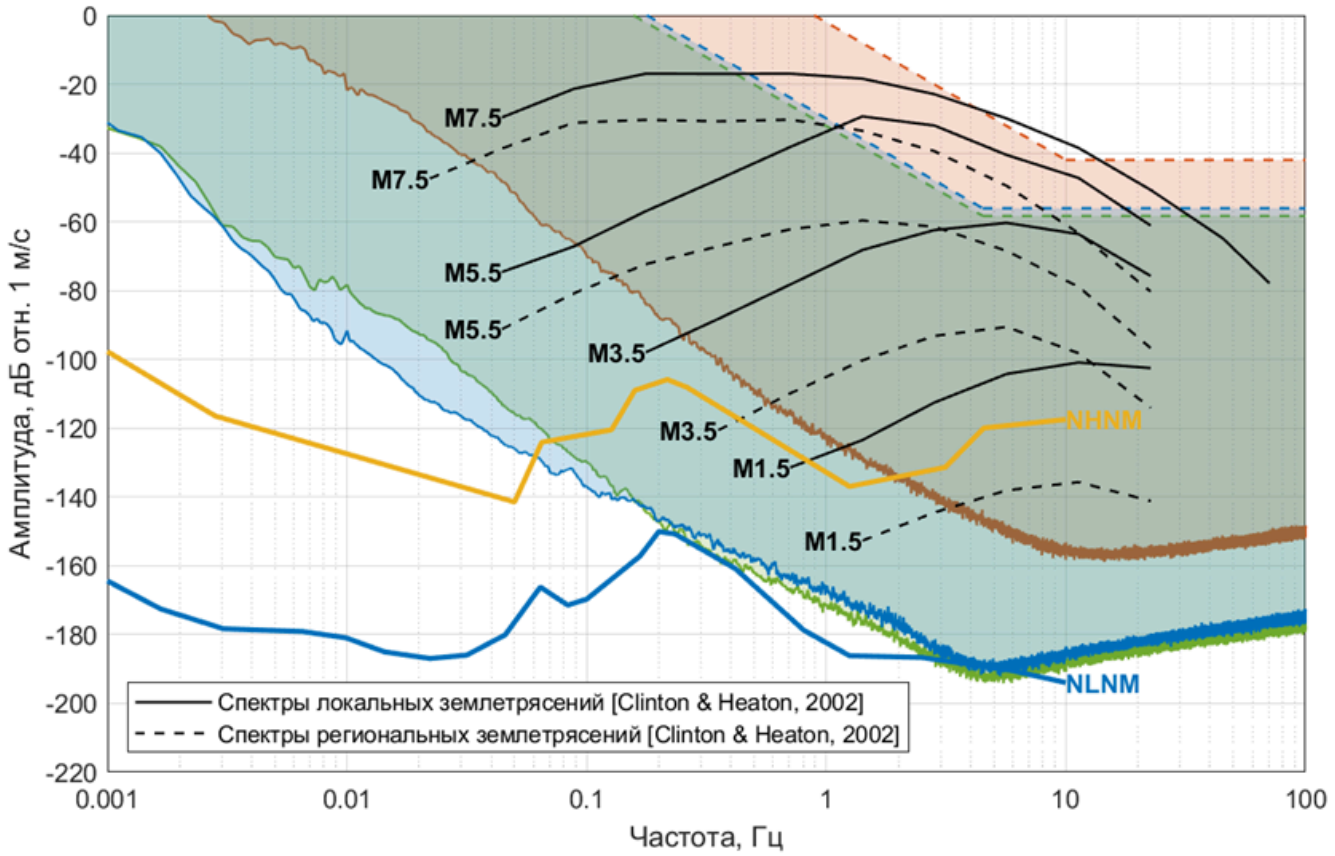

Рисунок 3.8. Сопоставление амплитудно-частотных диапазонов, рассчитанных для трех комплектов геофон-регистратор, с наложенными октавными спектров локальных (сплошная линия) и региональных (пунктирная линия) землетрясений [Дергач и др., 2026]. Зеленая область – GS-ONE LF (4.5 Гц) и DATA-CUBE^3; синяя область – GS-ONE LF (5 Гц) и БАР3.1 (SCOUT); красная область – GS-20DX (10 Гц) и устаревшая модель регистратора.

Предложенная в работе методика оценки применимости комплекта аппаратуры позволяет не только обосновать выбор конкретного типа геофона и регистратора, но также подобрать оптимальные параметры регистрации. В частности, изменение коэффициента усиления позволяет увеличивать верхний предел амплитуд рабочей области. Например, для мониторинга в дельте р. Лена можно использовать регистратора DATA-CUBE^3 и геофона GS-ONE LF с общей чувствительностью 1606.4 В/м/с (Кус=16 раз). Это подойдет для регистрации сигналов от землетрясений в диапазоне от самых слабых до M3.5 для локальных (0-20 км) и M5.5 для региональных (90-110 км). При проектировании временной сейсмологической сети для района Камчатки следует учитывать более интенсивную сейсмичность. Тогда для этого района стоит уменьшить

коэффициент усиления. Регистратора DATA-CUBE^3 и геофона GS-ONE LF с общей чувствительностью 100.4 В/м/с (Кус=1) подойдет для регистрации локальных и региональных землетрясений вплоть до высоких значений магнитуд 5.5 и 7.5, соответственно, что является проблемой для высокочувствительных сейсмологических сейсмометров.

3.5. Методика обработки сейсмологических записей методом низкочастотной деконволюции

На основании разработанных автором метода и устройства для абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения, способа определения допустимой предельной частоты для конкретной записи с использованием записи аппаратурного шума регистратора, а также методики оценки применимости комплекта геофон-регистратор для сейсмологических наблюдений различного уровня можно сформулировать основные этапы методики обработки сейсмологических записей методом низкочастотной деконволюции.

1. Получение точных значений технических параметров геофона (собственной частоты недемпфированных колебаний, коэффициента демпфирования и чувствительности) одним из предложенных способов:
   1.1. Используя паспортные характеристики датчика. Если датчик новый и, соответственно, прошел заводскую калибровку.
   1.2. Посредством калибровки, например, с использованием разработанных автором метода и устройства для абсолютной калибровки геофонов ступенью смещения (Глава 2).
2. Получение экспериментальной записи аппаратурного шума сейсмического регистратора одним из предложенных способов:
   2.1. Выход сейсмического регистратора предварительно шунтируется с использованием резистора со значением сопротивления, эквивалентным сопротивлению катушки используемого геофона. Рекомендуемая длительность записи – 1 час.

2.2. Геофон укладывается на мягкое основание под углом 90^0 от рекомендуемого рабочего положения таким образом, чтобы подвижная масса внутри датчика легла на упор, и он перестал реагировать на сейсмические колебания.

3. Оценка применимости выбранного комплекта геофон-регистратор для сейсмологических наблюдений различного уровня с использованием методики, разработанной автором (Глава 3, раздел 3.4).

4. В случае, если комплект подходит для целевого уровня сейсмологических наблюдений, программная частотная коррекция сигналов от землетрясений производится в соответствии со способом определения допустимой предельной частоты конкретной записи с использованием записи аппаратурного шума регистратора, разработанного автором (Глава 3, раздел 3.3).

ГЛАВА 4. ВЕРИФИКАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апробация и верификация результатов производилась с использованием экспериментальных записей, полученных соискателем лично в лабораторных условиях, на сейсмологических пунктах Алтае-Саянского, Бурятского и Якутского филиалов ФИЦ ЕГС РАН, на территории геофизической обсерватории «Ключи» ИНГГ СО РАН, расположенной в Новосибирской области, а также в сейсмологических сетях ИНГГ СО РАН в районе НИС «Остров Самойловский» (Республика Саха, Якутия) и ООО «Геофизические технологии» на острове Сахалин (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1. Карта с указанием местоположения основных сейсмологических пунктов и сетей, на которых производилась запись экспериментальных данных.

4.1. Верификация алгоритма деконволюции в частотной области посредством сопоставления результатов с записями широкополосных сейсмометров

Сигналы от большинства сравнительно крупных локальных, региональных и телесейсмических землетрясений заведомо содержат частоты ниже значения собственной частоты сейсморазведочного геофона [Clinton and Heaton, 2002], что удобно для апробации результатов обработки их записей алгоритмом низкочастотной деконволюции. Чтобы произвести верификацию результатов, необходимо произвести одновременную запись на одном и том же пункте с использованием тестируемого геофона и широкополосного, либо короткопериодного сейсмометра, имеющего известную частотную характеристику. В данном исследовании верификация производится на примере двух землетрясений с магнитудами 3.5 и 6.4, имеющими эпицентральные расстояния 136 и 600 км, соответственно.

Сейсмологический пункт Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН

В данном примере использовались записи, произведенные соискателем на сейсмологическом пункте «Максимиха» сети Бурятского филиала ФИЦ ЕГС РАН с использованием геофона GS-ONE (10 Гц, 85.8 В/м/с) и сейсмического регистратора «Байкал АСН86». В качестве «контрольного» использовался широкополосный сейсмометр «CMG-40T» (30 с, 2000 В/м/с), установленный на том же сейсмологическом постаменте и подключенный к сейсмическому регистратору Centaur. На рисунке 4.2 показаны результаты тестирования алгоритма низкочастотной деконволюции в частотной области на примере записей регионального землетрясения (магнитуда Ml=3.5, эпицентральное расстояние 136 км) произошедшего 16.03.2018 г. в 04:28:38 (UTC): а – сопоставление записей, б – сопоставление амплитудных спектров; 1 – исходная запись 10-герцового геофона, 2 – результат ее деконволюции к частоте 1 Гц, 3 – сигнал «контрольного» сейсмометра, отфильтрованного с использованием ФНЧ Баттерворта к частоте 1 Гц.

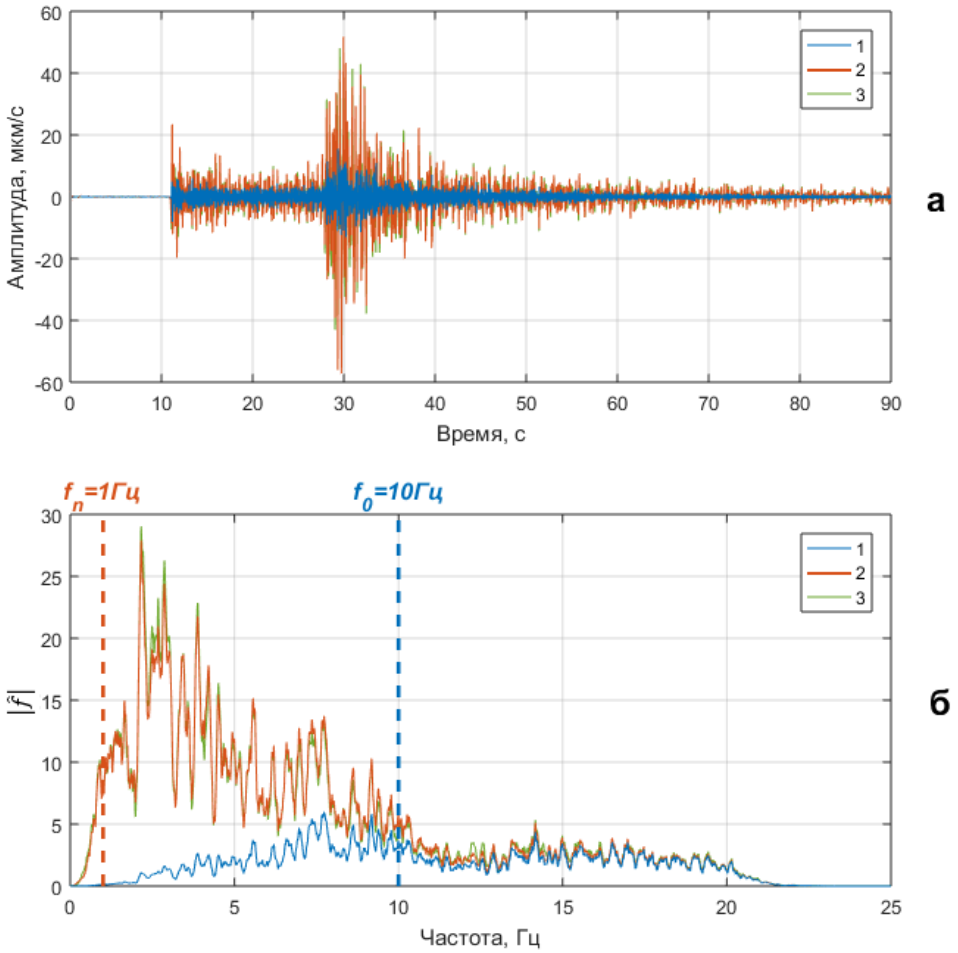

Рисунок 4.2. Сопоставление записей регионального землетрясения (а) и их амплитудных спектров (б). 1 – исходный сигнал геофона «GS-ONE» с собственной частотой 10 Гц (вертикальная Z-компонента); 2 – результат его деконволюции к частоте 1 Гц; 3 – сигнал «контрольного» сейсмометра «CMG-40T», отфильтрованного к собственной частоте «виртуального» сейсмометра (1 Гц).

Как видно из рисунка 4.2, запись геофона после обработки алгоритмом низкочастотной деконволюции в частотной области с высокой степенью точности идентична записи широкополосного сейсмометра [Дергач и др., 2018]. Сравнение амплитудного спектра сигнала до и после обработки алгоритмом низкочастотной деконволюции, наглядно демонстрирует восстановление его низкочастотной составляющей. Незначительное изменение амплитуды в полосе частот 10-15 Гц, связано с тем, что срез частотной характеристики геофона начинается не с точного значения собственной частоты f_0, а несколько выше, что хорошо проиллюстрировано на рисунках с амплитудно-частотными характеристиками.

Геофизический стационар «Ключи» (ИНГГ СО РАН)

В данном примере верификация результатов низкочастотной деконволюции производилась для записей, полученных на сейсмологическом пункте, расположенном на территории геофизического стационара «Ключи» (ИНГГ СО РАН) в Новосибирской области с использованием современного геофона «GS-ONE LF» (5 Гц, 100.4 В/м/с) и сейсмического регистратора «D-REG». В качестве «эталонных» использовались широкополосные сейсмометры «Guralp CMG-6T» (30 с, 2000 В/м/с) и «GL-CS60» (60 с, 2000 В/м/с), подключенные к регистраторам DATA-CUBE^3. Фотография регистрирующей аппаратуры, установленной на сейсмологическом постаменте приведена на рисунке 4.3.

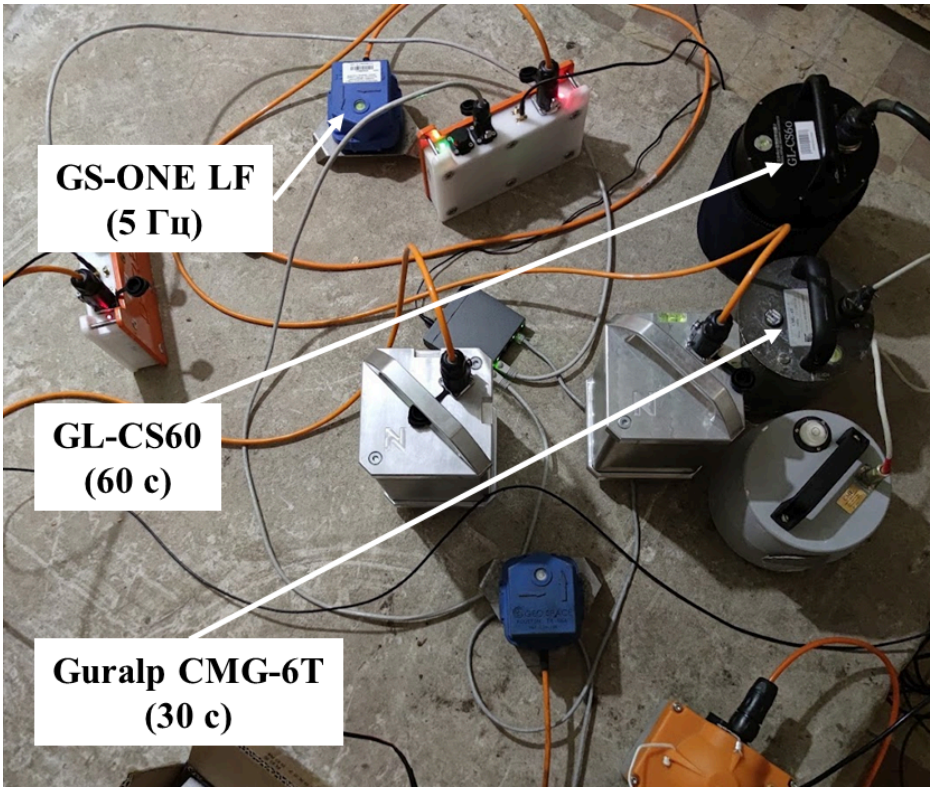

Рисунок 4.3. Фотография регистрирующей аппаратуры, установленной на сейсмологическом постаменте, расположенном на территории геофизического стационара «Ключи» (ИНГГ СО РАН) в Новосибирской области.

Для верификации была выбрана запись землетрясения с магнитудой 6.4, произошедшего 15.02.2025 на территории Республики Алтай [Дергач и др., 2025а]. Эпицентральное расстояние составило 600 км (информация Алтае-Саянского филиала ФИЦ ЕГС РАН).

На рисунке 4.4 представлено сопоставление результатов деконволюции записи геофона к значению 0.03 Гц (30 с) с записью широкополосного сейсмометра CMG-6T: 1 – сигнал, записанный геофоном GS-ONE LF, 2 – результат его обработки к значению 0.033 Гц; 3 – сигнал от 30-секундного «контрольного» сейсмометра Guralp CMG-6T.

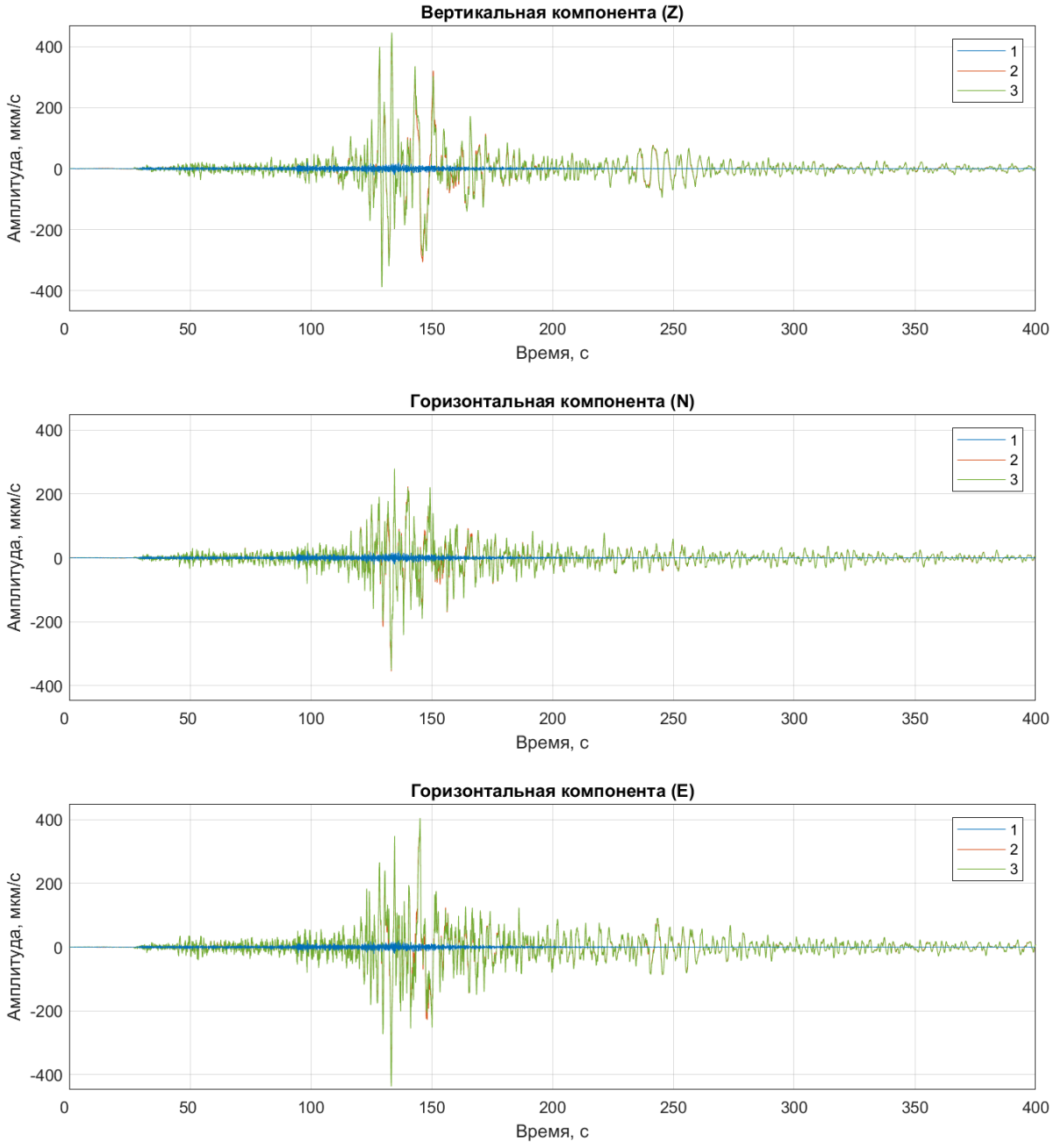

Рисунок 4.4. Сопоставление записей землетрясения с магнитудой 6.4 и эпицентральным расстоянием 600 км, произведенной 5-герцовым геофоном и широкополосным сейсмометром Guralp CMG-6T (30 с). 1 – сигнал, записанный 5-герцовым геофоном GS-ONE LF, 2 – результат его обработки к значению 0.033 Гц; 3 – сигнал от 30-секундного «контрольного» сейсмометра Guralp CMG-6T.

Как видно из рисунка 4.4, в рабочем диапазоне частот широкополосного сейсмометра «Guralp CMG-6T» от 0.033 (30 с) до 25 Гц сигналы геофона после программной частотной коррекции с высокой степенью точности идентичны с записями широкополосного сейсмометра. На рисунке 4.5 приведено соответствующие амплитудные спектры.

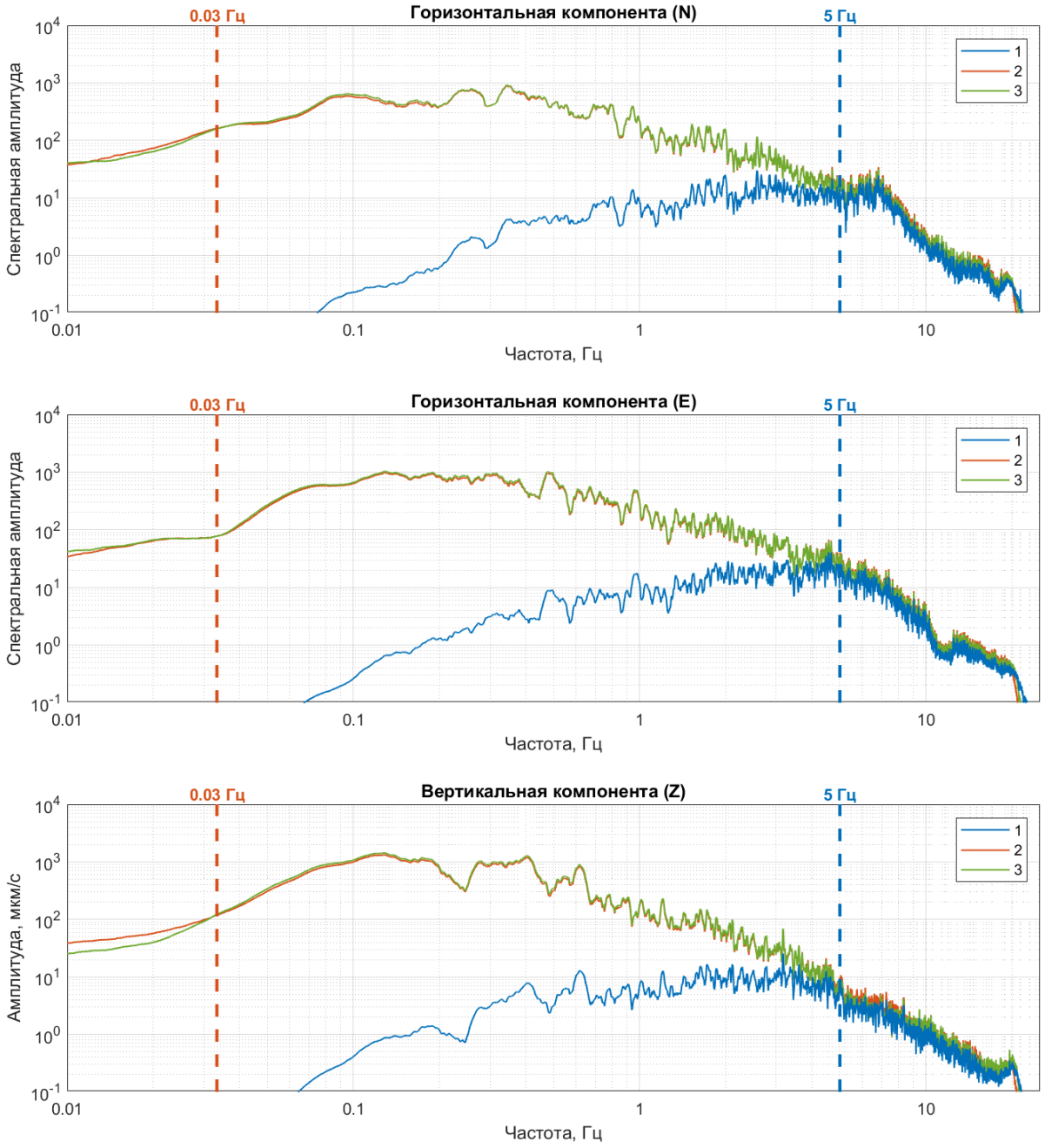

Рисунок 4.5. Сопоставление амплитудных спектров записи землетрясения с магнитудой 6.4 и эпицентральным расстоянием 600 км, произведенной 5-герцовым геофоном и широкополосным сейсмометром Guralp CMG-6T (30 с).
1 – 5-герцовый геофон GS-ONE LF, 2 – результат обработки к значению 0.033 Гц; 3 – 30-секундный «контрольный» сейсмометр Guralp CMG-6T.

При сопоставлении спектров записей геофона после обработки методом низкочастотной деконволюции со спектрами записи широкополосного сейсмометра на вертикальной компоненте наблюдаются отличия: на спектре записи геофона начинает проявляться аппаратурный шум регистратора.

4.2. Проверка качества результатов низкочастотной деконволюции с использованием специально разработанного низкочастотного стенда маятникового типа

В данном разделе продемонстрирован один из возможных способов корректной проверки качества низкочастотной деконволюции в случаях, если реального датчика, соответствующего виртуальному, необходимого для экспериментального сравнения, в распоряжении пользователя нет, а во многих случаях просто не существует. Эта часть задачи решается с помощью физического эксперимента на стенде, генерирующем аналитически известные низкочастотные колебания [Дергач и Юшин, 2016а]. Результат деконволюции сигнала тестируемого датчика, установленного на таком стенде, сравнивается с результатом численного моделирования реакции требуемого датчика на известный аналитический закон движения стенда.

Стенд представляет собой платформу-скамью, подвешенную к потолку в 4 точках на 8 стропах, образующих параллелограмм в одной из вертикальных плоскостей, и фигуру жесткой фермы – в другой (рисунок 4.6). Тем самым стенд можно рассматривать как близкий к математическому маятнику.

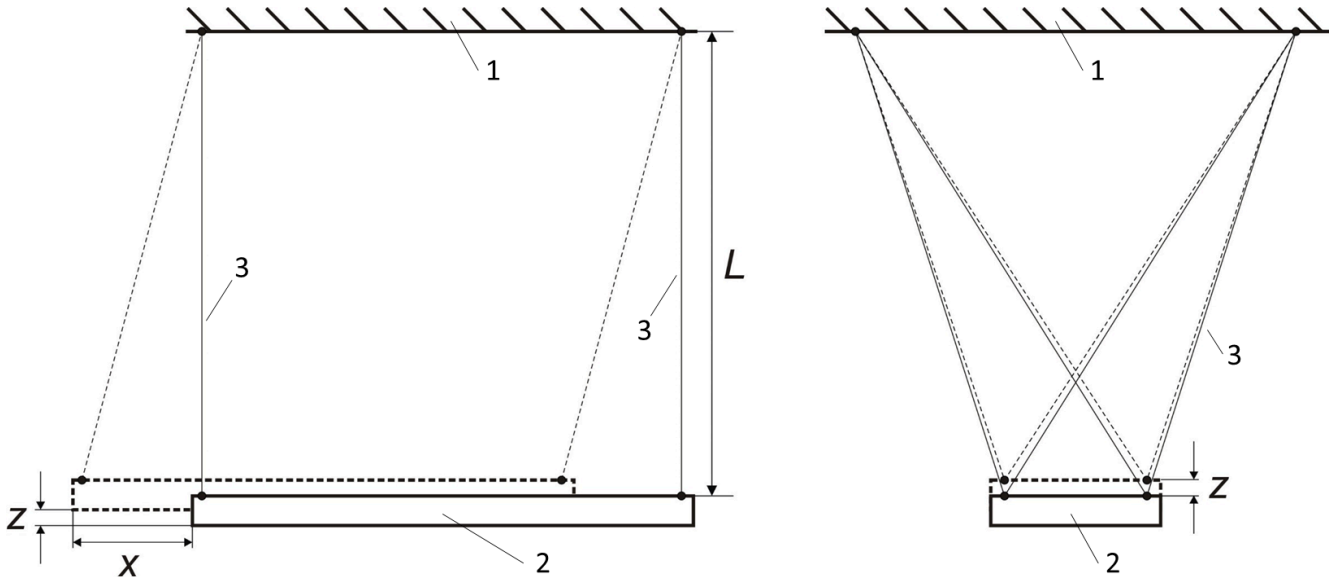

Рисунок 4.6. Маятниковый стенд для тестирования процедур низкочастотной деконволюции записей сейсмических датчиков [Дергач и Юшин, 2016а]: 1 – неподвижная опора (потолок), 2 – подвижная платформа-скамья для установки датчиков; 3 – стропы.

Такая схема подвеса допускает только одну степень свободы, а именно, возвратно-поступательное движение по дуге окружности фиксированного радиуса L, которое разлагается в прямоугольной системе координат на два линейно-поступательных перемещения координат: по горизонтали x и вертикали z. Стенд позволяет механически генерировать внезапное возникновение низкочастотного колебательного процесса с достаточно точно известным значением частоты. При свободном качании, начиная с малого фиксированного отклонения x_0, горизонтальное движение описываются формулой [Гамбурцев, 1959]:

$$x(t) = x_0 exp\left(-n_0 ht\right)\left[cos\left(\sqrt{1-h^2}\,n_0 t\right) + \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} sin\left(\sqrt{1-h^2}\,n_0 t\right)\right], t \geq 0 \quad (4.1)$$

где n_0 – собственная угловая частота качаний, равная:

$$n_0 = \sqrt{\frac{g}{L}} = \frac{2\pi}{T\sqrt{1-h^2}}, \quad (4.2)$$

где T – измеренный период свободных затухающих колебаний платформы (с), h – коэффициент затухания, g – ускорение силы тяжести (м/с^2), L – эффективная длина подвески платформы (м), как математического маятника.

Горизонтальное смещение x платформы–скамьи сопровождается ее вертикальным смещением z:

$$z(t) = L - \sqrt{L^2 - x^2(t)}, \tag{4.3}$$

которое в силу малого затухания ($h \ll 1$), характерного для такой колебательной системы, выражается приближенной формулой:

$$z(t) \approx \frac{x^2(t)}{2L} = \frac{x_0^2}{2L} exp\left(-\ 2n_0 ht\right) cos^2\left(\sqrt{1 - h^2}\, n_0 t\right) \tag{4.4}$$

При этом амплитуда переменной компоненты $\bar{z}$ выражается также приближенной, но практически весьма точной (не хуже 0.1%) формулой:

$$\bar{z}(t) = \frac{x_0^2}{4L} exp\left(-\ 2n_0 ht\right) cos\left(2\sqrt{1 - h^2}\, n_0 t\right) \tag{4.5}$$

Чтобы аналитически построить траекторию истинного движения платформы (4.1) в абсолютных единицах, достаточно измерить ее начальное горизонтальное статическое отклонение от положения покоя, а затем, отпустив платформу, измерить фактический период ее свободных качаний. Запись сигнала тестируемого датчика поможет уточнить частоту качаний n_0 и точнее определить ее коэффициент затухания h. Задав параметры желаемого датчика, а, значит, и его передаточную функцию, можно затем вычислить его реакцию на такой «маятниковый» тест, с тем, чтобы сравнить его с результатом деконволюции записи реального датчика к записи желаемого.

Рассмотрим один из экспериментов по тестированию деконволюции. Задача эксперимента состояла в проверке возможности и качества 100-кратного снижения собственной частоты электродинамического сейсмоприемника. Объектом эксперимента выбран геофон GS-ONE с собственной частотой 10 Гц, оптимальным затуханием и чувствительностью 78.7 В/м/с. Датчик был установлен

на платформе маятникового стенда, которая затем была зафиксирована в отклоненном от положения покоя состоянии на 38 мм, и после успокоения отпущена в свободные качания. Начало качаний вместе с предшествующим интервалом покоя было записано. Период свободных качаний T оказался равным 2.9 с, коэффициент затухания h, вычисленный по записи, оказался равным 0.01. Таким образом, тестовый сигнал имел преобладающую частоту около 0.3 Гц. Заметим, чтобы с помощью сейсмического датчика записать колебательный процесс достаточно близко к истинному движению, необходимо, чтобы датчик имел собственную частоту, ниже регистрируемой. Частота 0.1 Гц как раз отвечает этому требованию.

На рисунке 4.7 представлены 4 сигнала, позволяющие визуально оценить качество деконволюции: расчетная скорость механического тестового воздействия; отклик исходного 10-герцового сейсмоприемника на данное воздействие; результат деконволюции этого отклика, преобразовавшей исходную запись в запись датчика с пониженной в 100 раз собственной частотой, и модель выходного сигнала виртуального датчика-велосиметра с такой же низкой (0.1 Гц), собственной частотой.

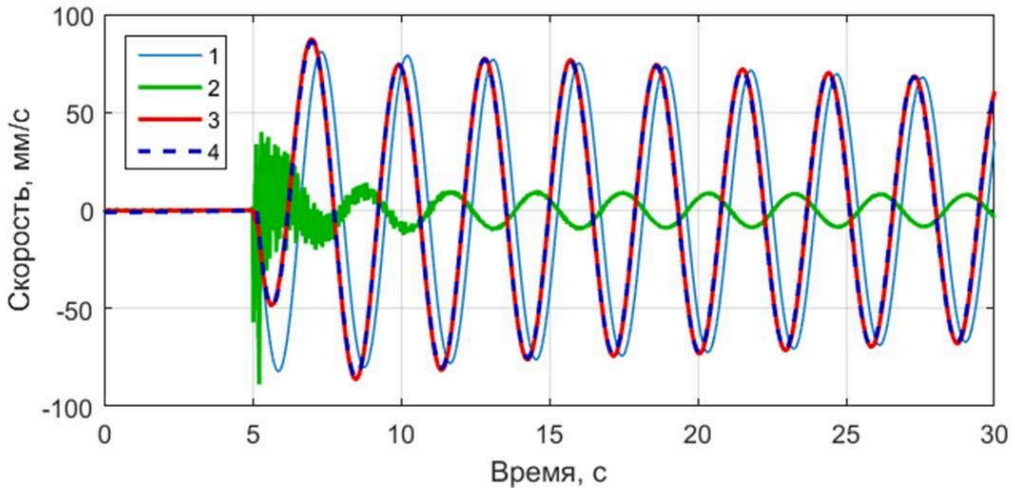

Рисунок 4.7. Результат деконволюции [Дергач и Юшин, 2016а]. 1 – расчетная скорость механического тестового воздействия; линия 2 – реакция 10-герцового сейсмоприемника на данное воздействие, увеличенная графически в 100 раз; линия 3 – результат деконволюции сигнала сейсмоприемника к сигналу виртуального датчика-велосиметра с собственной частотой 0.1 Гц; 4 – выходной сигнал модели велосиметра с собственной частотой 0.1 Гц. Все сигналы приведены в абсолютных единицах скорости.

Сопоставление сигналов реального и виртуального датчиков с учетом 100-кратного масштабирования первого (линии 2 и 4) наглядно показывает, насколько сильно отличался исходный сигнал от требуемого результата его деконволюции.

Близость сигналов истинной скорости платформы стенда (линия 1) и выходного сигнала виртуального эталонного датчика (линия 4) свидетельствует о том, что виртуальный датчик, служащий в данном случае эталоном оценки качества деконволюции, выбран рационально. И, наконец, главный результат состоит в том, что выходной сигнал деконволюции практически совпадает с расчетным сигналом эталонного виртуального датчика (линии 3 и 4 визуально сливаются).

Во многих случаях требуется измерять амплитуды смещений. Деконволюция позволяет не только расширить диапазон низких частот датчика скорости, но и обратить его практически в датчик смещений. На рисунке 4.8 представлена деконволюция исходной записи геофона этого же эксперимента к записи 10-секундного сейсмометра смещений. Для этого сигнал деконволюции к скорости был проинтегрирован.

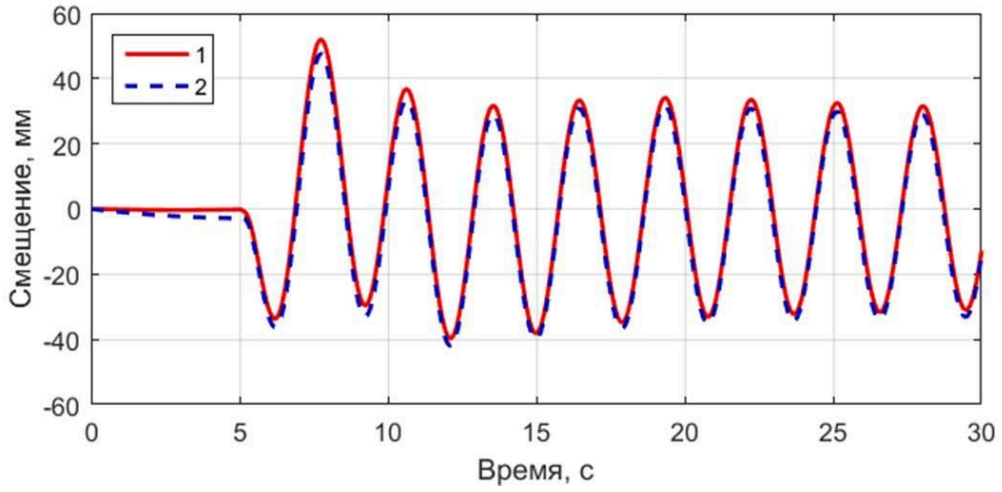

Рисунок 4.8. Деконволюция сигнала 10-герцового геофона в сигнал 10-секундного сейсмометра смещений [Дергач и Юшин, 2016а]: Линия 1 – деконволюция сигнала геофона к смещению (интеграл результата деконволюции сигнала геофона к скорости), линия 2 – модель отклика механического сейсмоприемника с собственной частотой 0.1 Гц.

Как можно видеть из рисунка 4.8, деконволюция сопровождается важным эффектом, который иногда может оказаться исключительно полезным: она существенно раздвигает допустимый диапазон амплитуд входных сигналов в области низких частот по сравнению с допустимым диапазоном исходного датчика. Это и продемонстрировано на приведенном примере, где амплитуда смещения тестового воздействия (38 мм) превышала максимально допустимую амплитуду в рабочей полосе частот для данного датчика (0.5 мм) почти в 80 раз [Дергач и Юшин, 2016а].

4.3. Сопоставление результатов программной и аппаратной коррекции

Комплект оборудования, состоящий из геофона GS-ONE (10 Гц, 85.6 В/м/с) и сейсмического регистратора «Байкал АСН86», был установлен на стационарный пункт наблюдений ООО «ГЕОФИЗТЕХ» вблизи с. Ныш, расположенного на о. Сахалин [Stepnov et al., 2019]. В качестве «эталонного» использовался сейсмометр «Sixaola3-v2», совмещенный с сейсмическим регистратором. Данный прибор сконструирован на основе 4.5-герцового геофона и схемы электронной частотной коррекции [Sixaola3 version 2: техническое описание].

На рисунке 4.9 приведено сопоставление результатов программной и аппаратной частотной коррекции: 1 – сигнал геофона «GS-ONE» (10 Гц); 2 – результат его деконволюции к 0.5 Гц; 3 – запись «Sixaola3-v2» (0.5 Гц). Для примера была выбрана запись землетрясения с магнитудой 2 (Ml), произошедшего 21.08.2017 г. в 49 км от пункта регистрации.

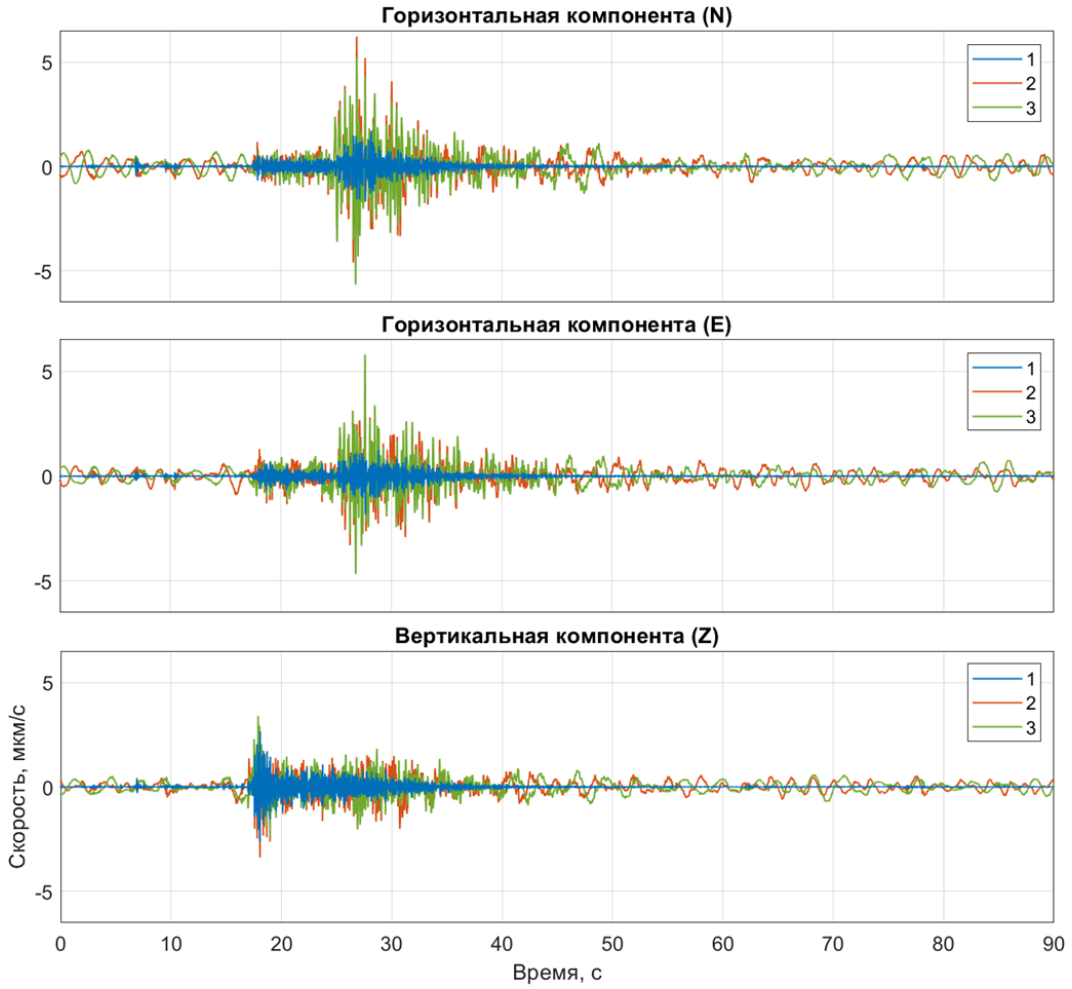

Рисунок 4.9. Сопоставление результатов программной и аппаратной частотной коррекции на примере записей землетрясения с магнитудой 2 (Ml), произошедшего 21.08.2017 г. на расстоянии 49 км от пункта регистрации. 1 – запись геофона «GS-ONE» (10 Гц); 2 – результат ее деконволюции к 0.5 Гц; 3 – запись «Sixaola3-v2» (0.5 Гц).

Как видно из рисунка 4.9, оба метода с высокой степенью идентичности восстанавливают целевой сигнал от землетрясения. Однако в областях до и после наблюдаются некогерентные низкочастотные сигналы, по своей природе являющиеся аппаратурным шумом, возросшим после частотной коррекции и для обоих случаев имеющий сопоставимые значения амплитуд. Особенно хорошо этот эффект прослеживается при сопоставлении амплитудных спектров сигналов после частотной коррекции (рисунок 4.10, слева), на которых явным образом прослеживается возрастание спектральной амплитуды ниже значения 1 Гц, характерное для аппаратурного шума. Наглядным инструментом для степени

идентичности сигналов на различных частотах является расчет квадратичного спектра когерентности [Любушин, 2007] (рисунок 4.10, справа).

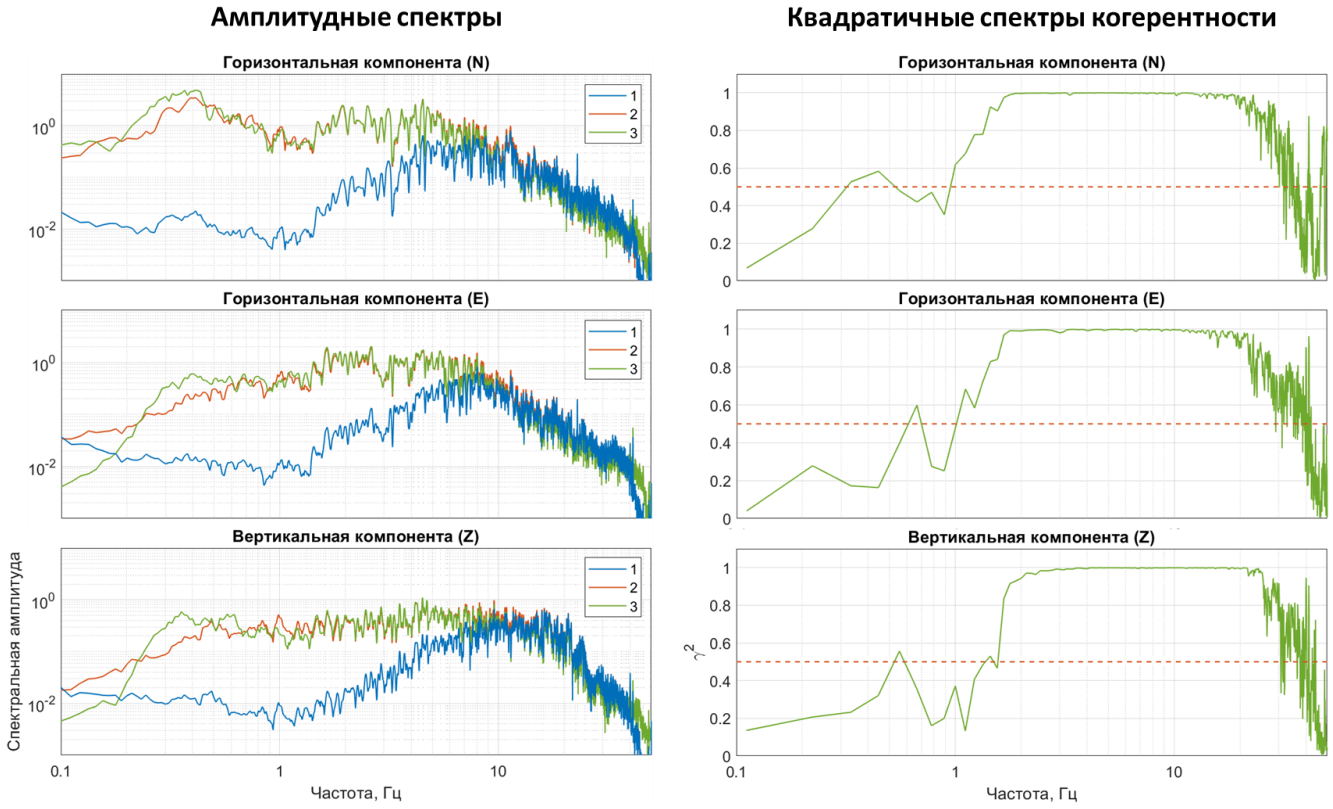

Рисунок 4.10. Сопоставление результатов программной и аппаратной частотной коррекции на примере записей землетрясения с магнитудой 2 (Ml), произошедшего 21.08.2017 г. на расстоянии 49 км от пункта регистрации. Слева – сопоставление амплитудных спектров для различных компонент записей, справа – функций взаимной когерентности спектров после аппаратной и программной частотной коррекции. 1 – запись геофона «GS-ONE» (10 Гц); 2 – результат ее деконволюции к 0.5 Гц; 3 – запись «Sixaola3-v2» (0.5 Гц).

Анализ и сопоставление спектров сигнала и функций когерентности позволяет явным образом оценить реальные пределы для восстановления низкочастотной составляющей с использованием программного и аппаратного способов частотной коррекции. В данном случае – они сопоставимы: для представленных амплитуд сейсмического шума и целевого сигнала предельное значение составляет приблизительно 1-2 Гц (рисунок 4.11).

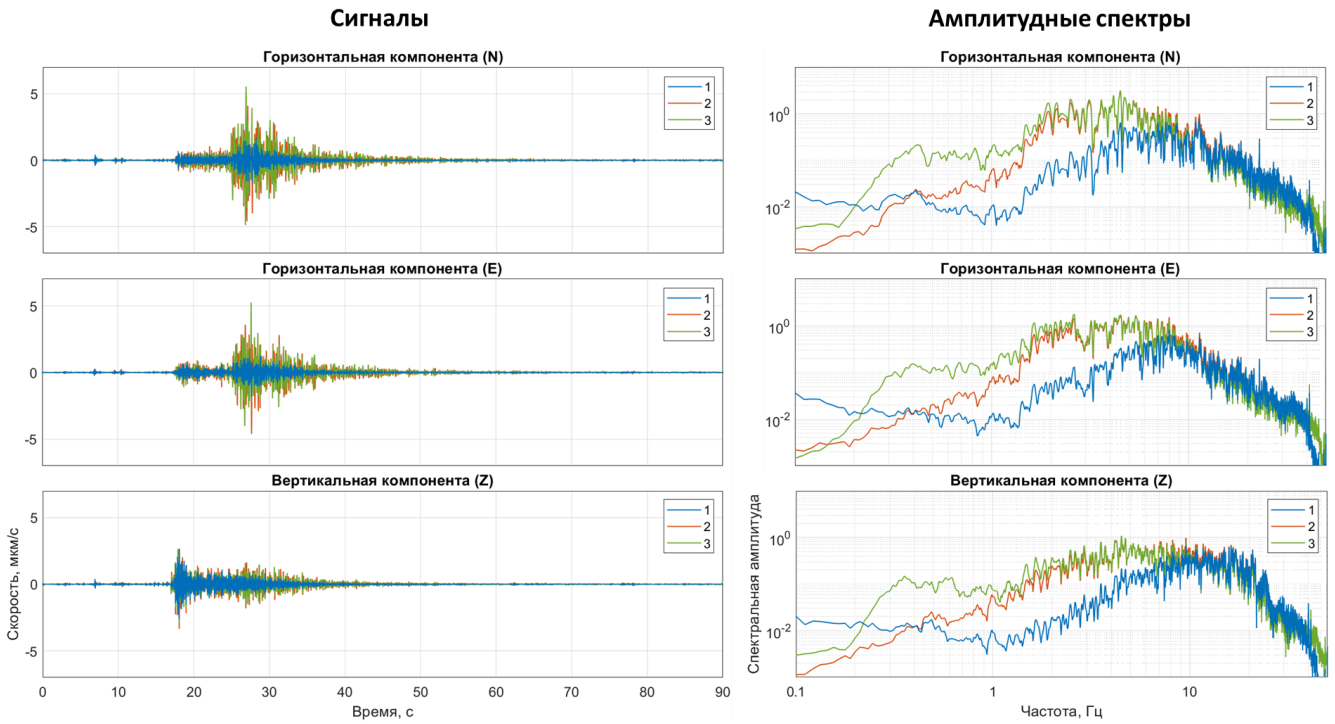

Рисунок 4.11. Сопоставление результатов программной и аппаратной частотной коррекции на примере записей землетрясения с магнитудой 2 (Ml), произошедшего 21.08.2017 г. на расстоянии 49 км от пункта регистрации. 1 – запись геофона «GS-ONE» (10 Гц); 2 – результат ее деконволюции к 1 Гц; 3 – запись «Sixaola3-v2», отфильтрованная с использованием ФНЧ к частоте 1 Гц.

Как видно из рисунка 4.11, для представленной аппаратуры предельное значение для частотной коррекции равное 1 Гц является более корректным: по сравнению со значением 0.5 Гц, амплитуда целевого сигнала не уменьшилась, а низкочастотные аппаратурные шумы на записи практически отсутствуют.

4.4. Апробация способа расчета предельного значения для расширения частотного диапазона методом низкочастотной деконволюции на примере Камчатского землетрясения 29.07.2025 (Mw 8.8, R=4800 км)

В данном примере апробация способа расчета предельного значения для расширения частотного диапазона методом низкочастотной деконволюции производилась на примере записи Камчатского землетрясения (29.07.2025, Mw 8.8, R=4800 км), зарегистрированного на сейсмологическом пункте, расположенном на территории геофизического стационара «Ключи» (ИНГГ СО РАН) в Новосибирской области с использованием современного геофона «GS-ONE LF» (5 Гц, 100.4 В/м/с) и сейсмического регистратора «D-REG». В результате сопоставления октавных спектров сигнала и аппаратурного шума по

мере итеративного расширения частотного диапазона записей, удалось рассчитать предельное значение равное 0.01 Гц (рисунок 4.12), что соответствует характеристикам 100-секундного широкополосного сейсмометра.

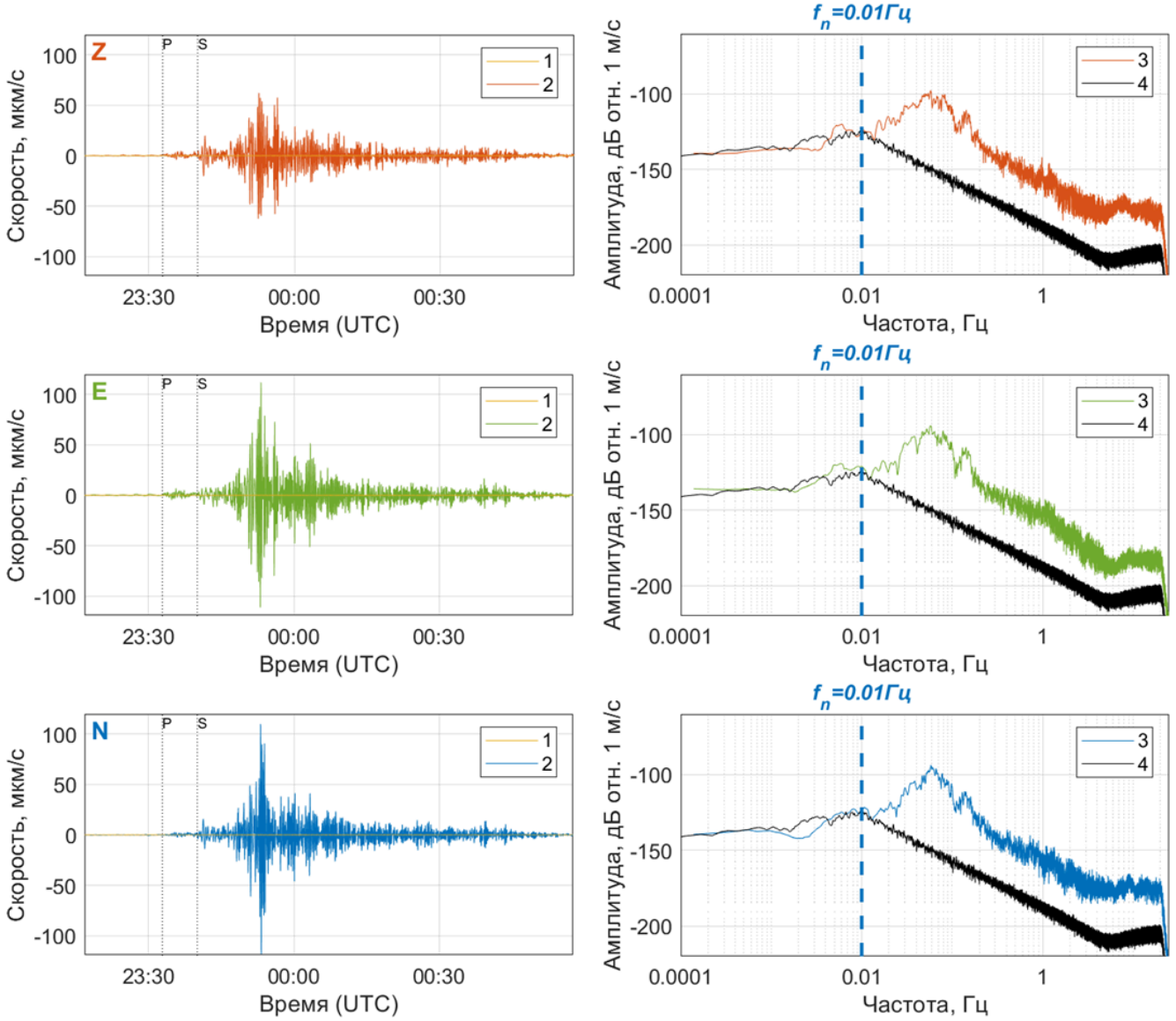

Рисунок 4.12. Результаты частотной коррекции записи Камчатского землетрясения (29.07.2025, Mw 8.8, R=4800 км), произведенной в Новосибирской области с использованием 5-герцового геофона. 1 – исходный сигнал 5-герцового геофона; 2 – результат расширения частотного диапазона записи геофона к 100 секундам; 3 – октавный спектр записи после деконволюции; 4 – октавный спектр аппаратурного шума после деконволюции.

Благодаря такому значительному расширению частотного диапазона записи 5-герцового геофона, амплитуда поверхностных волн выросла в интервале от 2000 до 5000 раз (в зависимости от компоненты). В связи с этим, эту запись наряду с записями других сейсмологических станций на территории РФ, удалось

использовать для сопоставления с данными установок осуществляющих радиофизический мониторинг ионосферы [Oinats et al., 2026].

4.5. Апробация методики обработки записей методом низкочастотной деконволюции на примере сейсмологической сети ИНГГ СО РАН в дельте р. Лена

Апробация разработанной методики производилась на примере временной локальной сейсмологической сети ИНГГ СО РАН, расположенной в районе НИС «Остров Самойловский» (дельта р. Лена) и состоящей в разные годы из 8-15 пунктов наблюдения. Регистрация землетрясений производилась с использованием комплектов оборудования, состоящих из автономных сейсмических регистраторов «БАР-3.1», входящих в состав бескабельной сейсмосистемы «SCOUT», укомплектованных 5-герцовыми геофонами «GS-ONE LF». Питание сейсмологических станций осуществлялось с использованием батарей «Бакен ВЦ1», последовательно соединенных по 6 штук и упакованных в кейс с воздуховодом. Такое соединение батарей обеспечивало суммарную ёмкость 350 А·ч при напряжении 15.6 В, чего с запасом хватало для ведения непрерывной записи длительностью более года [Дергач и др., 2022; Деев и др., 2025; Дергач и др., 2025б].

На рисунке 4.13 показано местоположение района исследований и схема расположения сейсмологических станций [Дергач и др., 2025б]. Дополнительно нанесена схема известных активных разломов. Сплошные красные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые по данным [Деев и др., 2025].

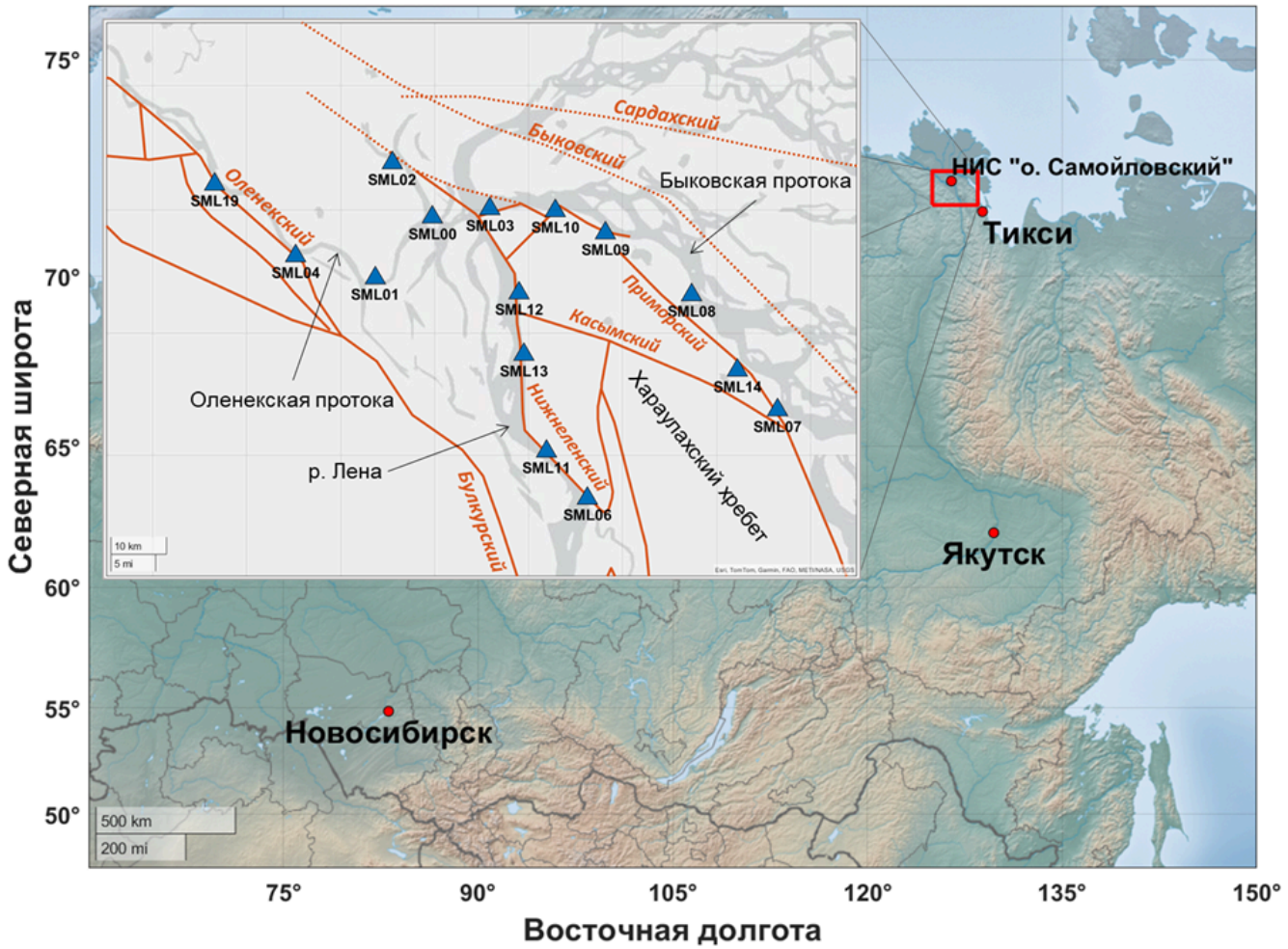

Рисунок 4.13. Местоположение района исследований и схема взаимного расположения активных разломов и сейсмологических станций в период с августа 2024 по август 2025 г [Дергач и др., 2025б]. Сплошные красные линии – достоверные активные разломы, пунктирные – предполагаемые по данным [Деев и др., 2025].

Результаты оценки применимости аппаратурного комплекта регистаратор-геофон, а также обоснование выбора базовой частоты коррекции для сети в дельте р. Лена детально изложены в работе [Дергач и др., 2026].

Описанная в Главе 3 методика была применена на этапе планирования сети, для оценки применимости данного комплекта оборудования для мониторинга локальной и региональной сейсмичности (раздел 3.4). Необходимо отметить, что для регистрации землетрясений использовались новые геофоны, откалиброванные производителем. Частотно-амплитудный диапазон для выбранного комплекта показан зеленой областью на рисунке 4.14. Несмотря на то, что используемый сейсмический регистратор изначально предназначен для сейсморазведочных задач

и по шумовым характеристикам в частотном диапазоне 1-100 Гц уступает сейсмологическому регистратору DATA-CUBE[3] (см. рисунок 3.4), его использование все еще обеспечивает качественную регистрацию локальных и региональных землетрясений в широком диапазоне магнитуд.

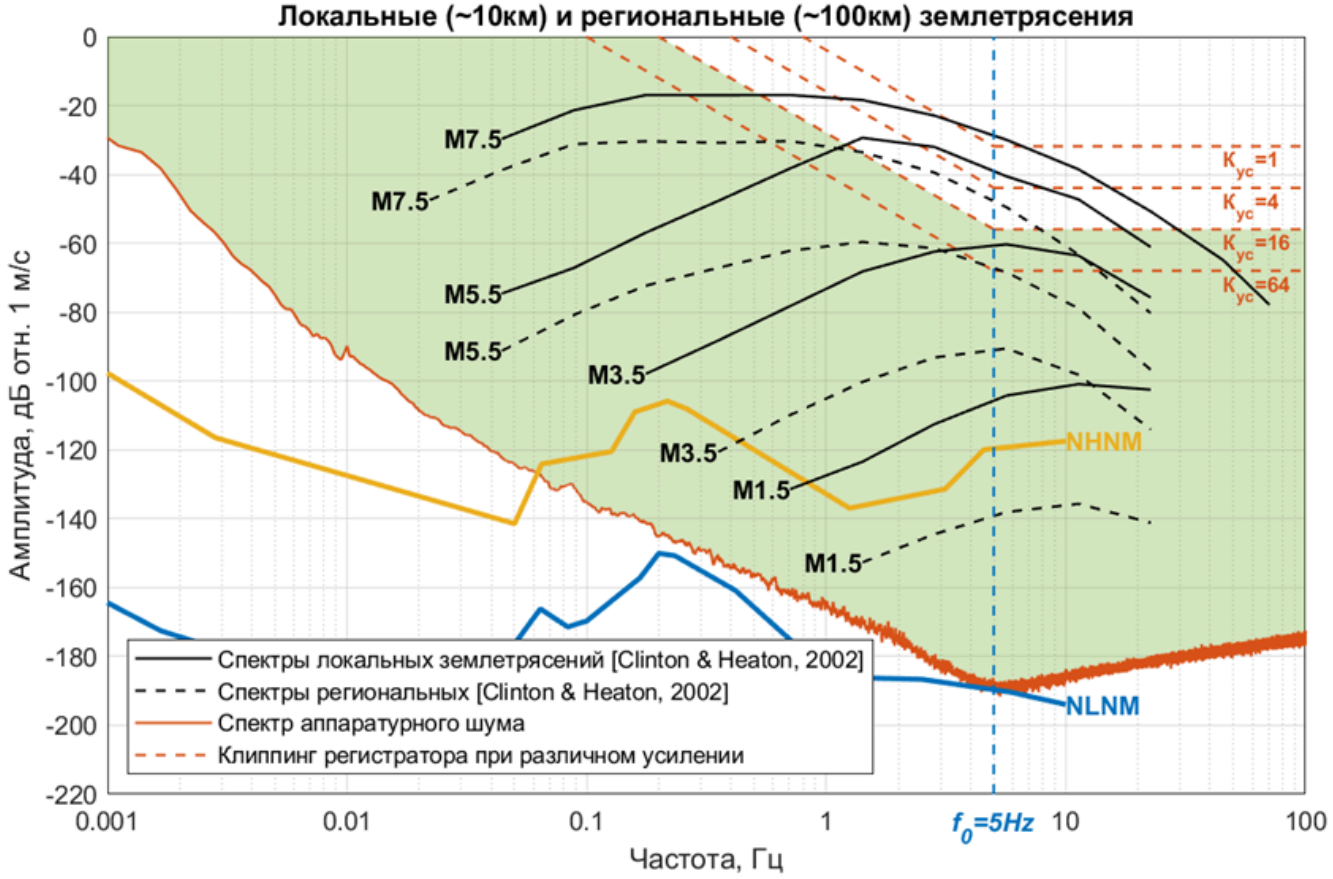

Рисунок 4.14. Амплитудно-частотный диапазон сейсмологического комплекта, состоящего из регистратора БАР3.1 (SCOUT) и 5-герцового геофона GS-ONE LF со скорректированной частотной характеристикой, а также его применимость для регистрации локальных и региональных землетрясений [Дергач и др., 2026].

Из рисунка 4.14 видно, что выбранный комплект аппаратуры с общей чувствительностью около 1600 В/м/с (Кус=16 раз), подходит для регистрации как самых слабых, так и более крупных локальных и региональных землетрясений с магнитудами до вплоть до М4.5 и М6.5 соответственно.

На рисунке 4.15 приведены пример фрагмента трехкомпонентной записи крупного для данной области локального землетрясения (М4.2) с отмеченными временами прихода P- и S-волн (рисунок 4.15 а), а также ее амплитудный спектр

(рисунок 4.15 б). Частотный диапазон записей был расширен до 0.1 Гц при помощи алгоритма низкочастотной деконволюции.

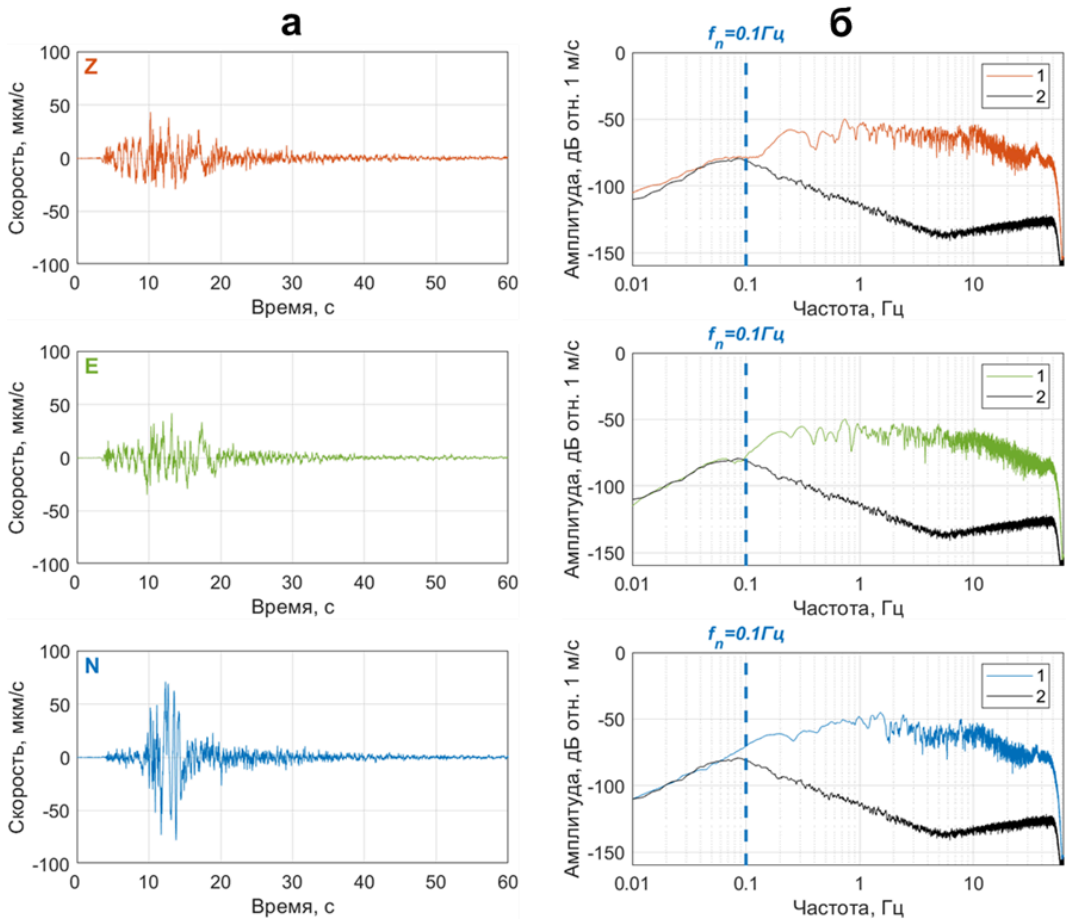

Рисунок 4.15. Результаты обработки трехкомпонентной записи локального землетрясения M4.2 (USGS) методом низкочастотной деконволюции до 0.1 Гц [Дергач и др., 2026]. а – записи после расширения частотного диапазона, б – сопоставление октавных спектров записей (1) и аппаратурного шума (2).

На октавных спектрах наглядно продемонстрировано, что целевые сигналы лежат в частотном диапазоне от 0.1 Гц. Это хорошо согласуется со значениями частотных диапазонов локальных землетрясений в диапазоне магнитуд 3.5-4.5, приведенных в работе [Clinton and Heaton, 2002], а также подтверждает корректность выбора комплектов регистрирующей аппаратуры.

На рис. 4.16 приведен пример определения времен прихода P- и S-волн по записям после частотной коррекции для всех станций сети, функционирующих на тот момент.

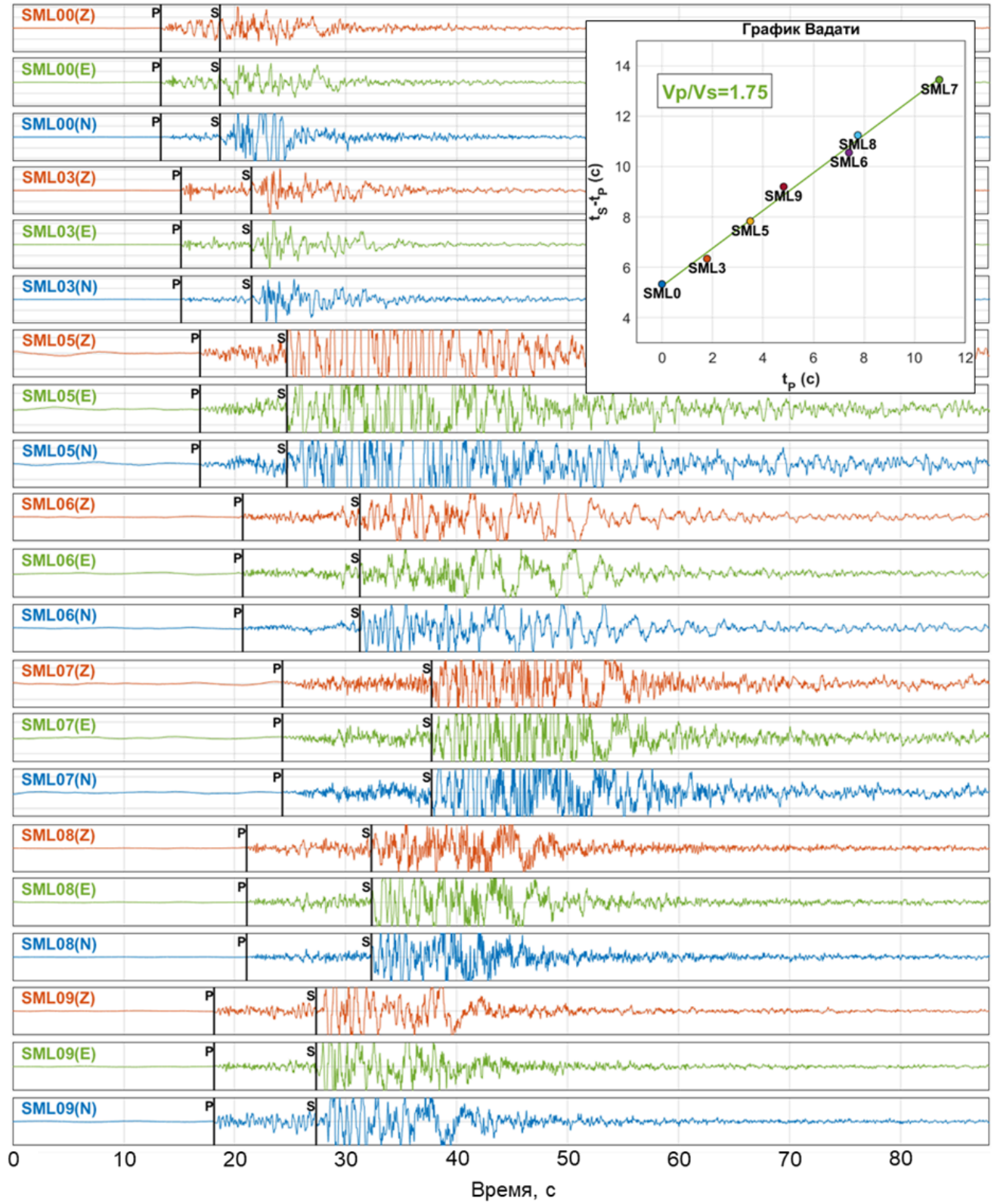

Рисунок 4.16. Трехкомпонентные записи локального землетрясения с магнитудой M4.2 (USGS), произошедшего 22.08.2021 [Дергач и др., 2026]. Записи произведены сейсмологической сетью ИНГГ СО РАН в районе дельты р. Лена и обработаны алгоритмом низкочастотной деконволюции к частоте 0.1 Гц. Также отмечены времена прихода P- и S-волн, а также приведен график Вадати [Havskov et al., 2012a].

Данный пример наглядно иллюстрирует, что использование низкочастотной деконволюции позволило упростить процесс и повысить точность определения времен прихода целевых волн, что, в свою очередь положительно влияет на точность определения параметров гипоцентров.

Так как в исследуемой области, по большей части, преобладает слабая и умеренная сейсмичность, в качестве базового значения для обработки всех записей методом низкочастотной деконволюции было выбрано значение 0.5 Гц, что позволяет корректно обрабатывать записи землетрясений с магнитудами до 1.5 (Ml). Записи землетрясений с более высокими магнитудами обрабатывались отдельно. Корректное определение амплитуд сигналов от сильных низкочастотных землетрясений и, следовательно, значений их магнитуд влияет на результаты анализа графиков повторяемости землетрясений. Продемонстрируем этот эффект на примере построения графиков повторяемости для областей повышенной сейсмичности, приведенных на рисунке 4.17.

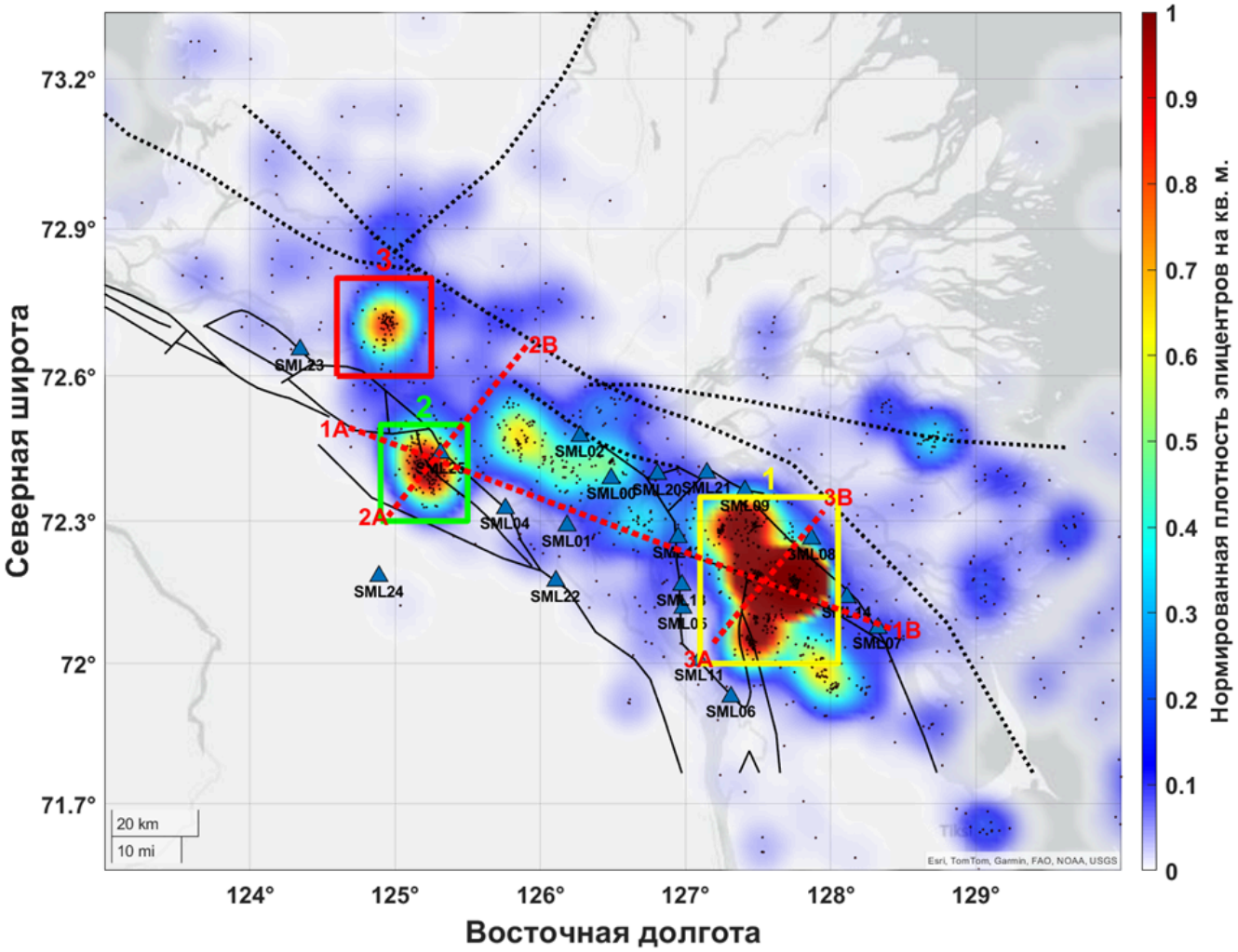

Рисунок 4.17. Плотность распределения эпицентров землетрясений за период с 2016 по 2025 г [Дергач и др., 2025б]. Желтым, зеленым и красным прямоугольниками выделены основные зоны сейсмической активизации. Красными пунктирными линиями обозначены профили, вдоль которых анализировались срезы по глубине. Сплошными и пунктирными чёрными линиями показаны подтверждённые и предполагаемые разломы по данным [Деев и др., 2025].

На рисунке 4.17 явным образом выделяются три области повышенной сейсмической активности. В самую интенсивную область, расположенную в северной части Хараулахского хребта (жёлтый прямоугольник на рисунке 4.17), попадает около 39% от общего числа зарегистрированных землетрясений (580 из 1489). Во вторую по интенсивности область (зелёный прямоугольник на рисунке 4.17) – уже всего 7% (105 из 1489). В третью – 4.5% (67 из 1489). Очевидно, на количество регистрируемых слабых землетрясений влияет количество близлежащих станций – во второй и третьей зонах активизации их значительно меньше. Более того, близлежащие станции SML23 и SML24 функционировали на

этом месте в рамках проекта SIOLA всего в течение одного сезона. Снижение чувствительности сети к слабым землетрясениям по мере удаления от станций наглядно иллюстрируют графики повторяемости для первой, второй и третьей зон сейсмической активизации (рисунок 4.18 б-г, соответственно) [Дергач и др., 2025б].

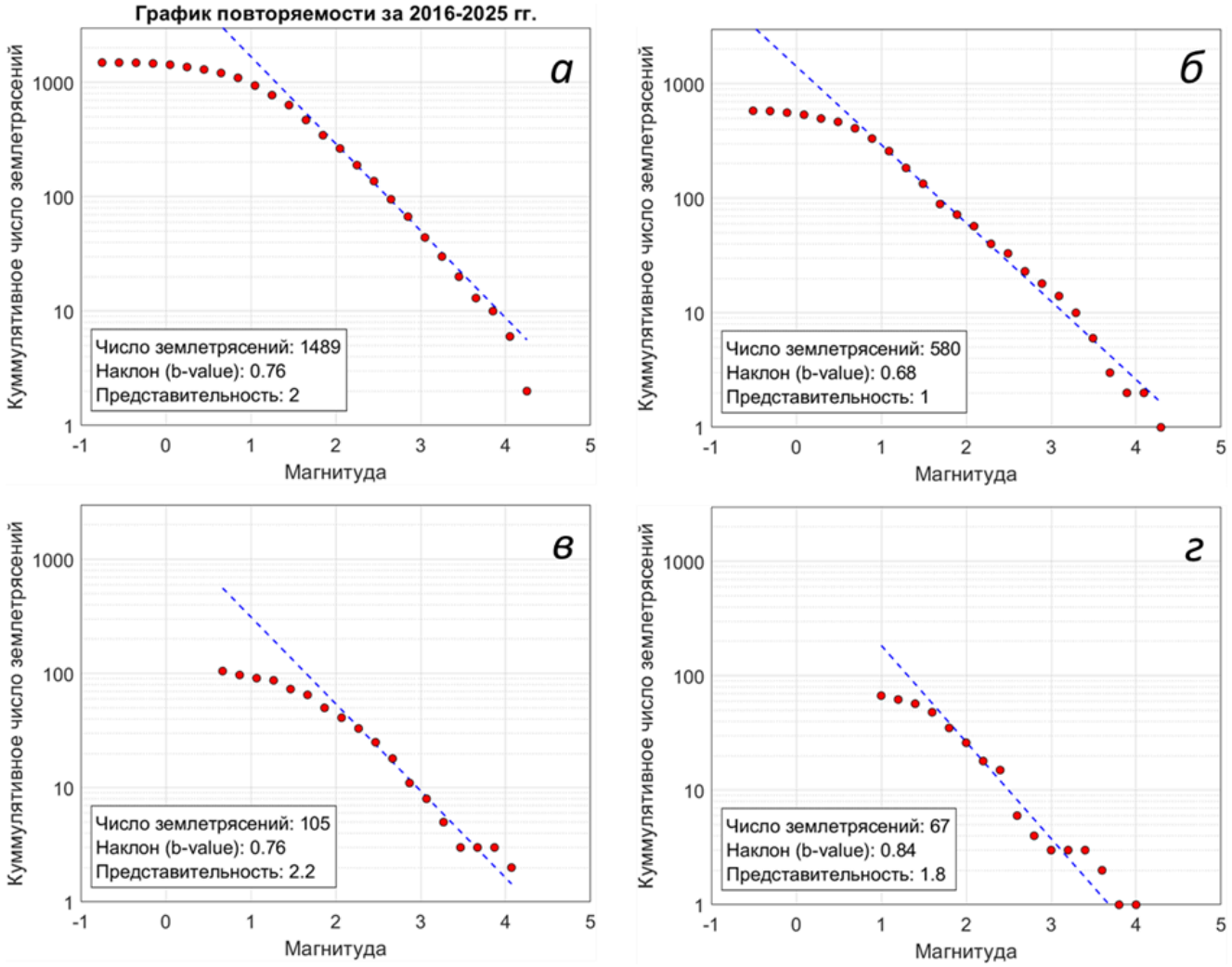

Рисунок 4.18. Графики повторяемости землетрясений для дельты р. Лены (а), а также для областей № 1, 2 и 3, выделенных на рис. 4.17 желтым, зеленым и красным прямоугольниками (б-г) [Дергач и др., 2025б].

Применение методики обработки записей, разработанной автором позволило:

1. Значительно снизить стоимость организации и обслуживания пунктов сейсмологической сети ИНГГ СО РАН за счет использования геофонов и отсутствия необходимости в их электропитании;

2. Упростить процесс и повысить точность определения времен прихода целевых волн, что, в свою очередь повышает точность определения параметров гипоцентров;
3. Корректно определить амплитуды сигналов от сильных низкочастотных землетрясений и, следовательно, значения их магнитуд [Richter, 1935; Bormann and Dewey, 2012];
4. Использование корректных значений магнитуд позволило построить графики повторяемости и оценить представительность каталога как для всей сети, так и для зон повышенной сейсмической активизации, приведенных на рисунке 4.17.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом исследования является методика обработки сейсмологических записей современных геофонов методом низкочастотной деконволюции, состоящая из четырех основных этапов:

1. Получение точных значений технических параметров геофона;
2. Получение экспериментальной записи аппаратурного шума сейсмического регистратора;
3. Оценка применимости выбранного комплекта геофон-регистратор для сейсмологических наблюдений различного уровня с использованием технических параметров датчика, экспериментальной записи аппаратурного шума сейсмического регистратора, а также октавных спектров землетрясений для различных магнитуд и эпицентральных расстояний;
4. Определение значения допустимой предельной частоты для низкочастотной деконволюции конкретной записи сигнала от землетрясения с использованием аппаратурного шума регистрационного тракта.

Решение о необходимости и целесообразности использования конкретных этапов принимается в зависимости от решаемой задачи.

Значимым результатом являются разработанные метод калибровки геофонов ступенью смещения и устройство для его практической реализации. Калибровка выполняется посредством однократного механического перемещения корпуса датчика на заданную величину, непосредственно измеряемую в единицах длины. Зарегистрированный отклик на такое воздействие позволяет определить полную частотную характеристику геофона. Тем самым процедура, которая при использовании вибростенда требует последовательного задания гармонических колебаний на разных частотах и проведения отдельных измерений, сводится к одному тестовому воздействию. Практические испытания подтвердили применимость метода прежде всего к электродинамическим сейсмометрам с собственными частотами от 0.5 до 30 Гц.

Важным инструментом для обоснования выбора аппаратуры при проведении сейсмологических наблюдений является разработанная методика оценки возможностей комплектов геофон-регистратор, записи которых обрабатываются методом низкочастотной деконволюции. Исходными данными служат экспериментальная запись аппаратурного шума регистратора и паспортные параметры геофона: чувствительность, собственная частота и коэффициент демпфирования. На их основе определяются границы рабочей области комплекта в амплитудно-частотном представлении. Сопоставление этой области со спектрами целевых сигналов позволяет оценить возможность восстановления их низкочастотной составляющей без искажений. Результаты исследования показывают, что требуемая чувствительность достигается при совместном использовании современных малошумящих регистраторов и низкочастотных геофонов. Рассмотренные комплекты обеспечивают регистрацию сигналов от наиболее слабых землетрясений вплоть до событий с магнитудами M3.5 для локальных наблюдений на эпицентральных расстояниях 0–20 км и M5.5 для региональных наблюдений на расстояниях 90–110 км. Применение устаревшей аппаратуры сопровождается потерей информации о низкочастотной составляющей сигналов, что ограничивает ее использование для решения сейсмологических задач.

Апробация методики выполнена на материалах наблюдений локальной сейсмологической сети ИНГГ СО РАН в дельте р. Лена. Для комплекта, включающего регистратор БАР3.1 (SCOUT) и геофон GS-ONE LF с собственной частотой 5 Гц, подтверждена возможность регистрации локальных землетрясений с магнитудами до M4.5 и региональных до M6.5. При коэффициенте усиления $К_{ус}$ = 16 раз общая чувствительность этого комплекта составляет около 1600 В/(м/с). Обработка записей землетрясения с магнитудой M4.2 показала, что их частотный диапазон может быть расширен до 0.1 Гц. Применение геофонов также позволило увеличить плотность временной сети: за несколько лет число пунктов регистрации возросло с 8 до 15, то есть почти вдвое.

Перспективное направление дальнейшего развития – автоматизация процесса потоковой обработки сейсмических данных с использованием низкочастотной деконволюции и методики, предложенной в данной работе. Современные алгоритмы автоматической обработки позволяют достаточно точно определять времена прихода целевых волн даже для сигналов от землетрясений, характеризующихся низким соотношением сигнал/шум. Итеративно снижая собственную частоту «виртуального» сейсмометра и рассчитывая соотношение сигнал/шум (SNR), можно автоматизировать процесс расчета предельного значения для частотной коррекции методом низкочастотной деконволюции. Область применения – системы сейсмологического мониторинга особо ответственных объектов, в которых необходима оперативная обработка непрерывных записей в реальном времени.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика

БПФ – быстрое преобразование Фурье

КЧХ – комплексная частотная характеристика

СПМ – спектральная плотность мощности

ФВЧ – фильтр высоких частот

ФНЧ – фильтр низких частот

ФЧХ – фазо-частотная характеристика

NLNM – спектральная модель минимального фонового сейсмического шума на Земле согласно работе [Peterson, 1993]

NHNM – спектральная модель максимального фонового сейсмического шума на Земле согласно работе [Peterson, 1993]

SNR – соотношение сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аранович З. И., Меламуд А. Я., Гомзякова Э. С., Трапезников Н. Л., Шилова Н. Е. Импульсная калибровка сложнопостроенных сейсмометрических каналов // Аппаратура, методы и результаты сейсмометрических наблюдений. Сейсмические приборы. Вып. 12. М. : Наука, 1979. С. 118–129.
2. Архангельский В. Т., Шварцбург Я. А. Об одном методе калибровки сейсмографов // Сейсмические приборы. Вып. 10. М. : Наука, 1977. С. 170–174.
3. Батраков В. И. Вибрационный стенд для исследования и калибровки вертикальных сейсмоприемников : авторское свидетельство № 568921 A1 СССР, МПК G01V 1/16 : № 2303237 ; заявл. 24.12.1975 ; опубл. 15.08.1977 / заявитель Нижне-Волжский научно-исследовательский институт геологии и геофизики.
4. Беседина А. Н. Научное обоснование методов коррекции волновых форм при проведении сейсмических наблюдений : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 25.00.10. М., 2014. 143 с.
5. Беседина А. Н., Волосов С. Г., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г. Исследование частотных характеристик при коррекции сейсмограмм на примере геофона GS20DX // Динамические процессы в геосферах. 2013. № 4. С. 157–162.
6. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В. Применение датчиков с расширенными частотными характеристиками для регистрации землетрясений и взрывов // Динамические процессы в геосферах. 2014. № 6. С. 86–95.
7. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В. Обоснование возможности применения короткопериодных датчиков с расширенными частотными характеристиками для регистрации сильных землетрясений // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 1. С. 28–38.
8. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Волосов С. Г. Метод оценки собственного шума измерительного канала на примере короткопериодного сейсмометра

СМ-3КВ // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57, № 3. С. 5–18. DOI: 10.21455/si2021.3-1.

9. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Волосов С. Г., Гоев А. Г., Константиновская Н. Л., Резниченко Р. А. Расширение рабочего диапазона частот короткопериодных сейсмометров на примере СМ-3КВ // Сейсмические приборы. 2024. Т. 60, № 3. С. 20–39. DOI: 10.21455/si2024.3-2.
10. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Коррекция частотных характеристик сейсмических датчиков и шумы соответствующих измерительных каналов // Сейсмические приборы. 2011а. Т. 47, № 2. С. 11–20.
11. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Кочарян Г. Г., Павлов Д. В. Численная коррекция сейсмограмм и шумы измерительного канала // Динамические процессы в геосферах. 2011б. № 2. С. 100–108.
12. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Волосов С. Г., Королев С. А. Инструментальная схема расширения частотных характеристик короткопериодных датчиков на примере сейсмометра СМ-3КВ // Сейсмические приборы. 2020. Т. 56, № 4. С. 29–42. DOI: 10.21455/si2020.4-2.
13. Беседина А. Н., Кабыченко Н. В., Павлов Д. В., Волосов С. Г. Инструментальные методы расширения амплитудно-частотной характеристики геофона // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55, № 3. С. 5–23. DOI: 10.21455/si2019.3-1.
14. Бесекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. М. : Наука, 1972. 767 с.
15. Богданов В. И., Грайзер В. М. Определение остаточного смещения «почвы» по сейсмограмме // ДАН СССР. 1976. Т. 229, № 1. С. 59–62.
16. Бромберг Э. М., Оруджев Ф. У. П., Шлимак В. И., Хубов П. А. Устройство для измерения амплитудно-частотной характеристики сейсмоприемников : авторское свидетельство № 1117564 A1 СССР, МПК G01V 13/00 : № 3571822 ; заявл. 01.04.1983 ; опубл. 07.10.1984 / заявитель

Научно-исследовательский и проектный институт по комплексной автоматизации нефтяной и химической промышленности.

17. Волченко А. Г., Корнеев Д. В. Исследование калибровочных возможностей переносных вибростендов // Законодательная и прикладная метрология. 2013. № 5. С. 5–8.
18. Воскресенский М. Н., Шулаков Д. Ю., Верхоланцев Ф. Г., Курданова А. А. Калибровка каналов сейсмического регистратора с помощью эталонного прибора // Геофизика. 2025. № 5. С. 103–112. DOI: 10.34926/geo.2025.27.36.001.
19. Гамбурцев Г. А. Основы сейсморазведки. М. : Гостоптехиздат, 1959. 378 с.
20. Гвишиани А. Д., Дзеранов Б. В., Скоркина А. А., Дзебоев Б. А. Мировые сейсмические сети и каталоги землетрясений // Russian Journal of Earth Sciences. 2024. Т. 24, № 1. С. ES1012. DOI: 10.2205/2024ES000901.
21. Гик Л. Д. Измерение вибраций. Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1972. 291 с.
22. Гик Л. Д., Карандеев К. Б. Электрическая коррекция виброизмерительной аппаратуры. Новосибирск : Изд. СО АН СССР, 1962. 130 с.
23. Гоев А. Г., Алешин И. М., Константиновская Н. Л., Резниченко Р. А., Юдочкин Н. А., Дробышев М. Н. Новые широкополосные сейсмические станции в центральной части Восточно-Европейской платформы // Физика Земли. 2025. № 3. С. 192–206. DOI: 10.7868/s3034645225030143.
24. ГОСТ ISO 16063-11-2013. Вибрация. Методы калибровки датчиков вибрации и удара. Часть 11. Первичная вибрационная калибровка методами лазерной интерферометрии. М. : Стандартинформ, 2019. 24 с.
25. ГОСТ Р 8.669-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Виброметры с пьезоэлектрическими, индукционными и вихретоковыми вибропреобразователями. Методика поверки. М. : Стандартинформ, 2010. 42 с.

26. ГОСТ Р 8.800-2012. Государственная поверочная схема для средств измерений виброперемещения, виброскорости и виброускорения в диапазоне частот от $1 \cdot 10^{-1}$ до $2 \cdot 10^{4}$ Гц. М. : Стандартинформ, 2014. 9 с.
27. Грайзер В. М. «Истинное» движение почвы в эпицентральной зоне. М. : Институт физики Земли АН СССР, 1984. 198 с.
28. Грайзер В. М. Определение истинного смещения почвы по записям сильных движений // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 12. С. 36–50.
29. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка : учебное пособие. М. : Недра, 1980. 551 с.
30. Деев Е. В., Дучков А. А., Епонешникова Л. Ю., Дергач П. А., Заплавнова А. А., Потапов В. В., Сафронов О. В., Понасенко С. Н., Туктаров Р. М., Шибаев С. В. Структура земной коры в районе дельты реки Лена : новые комплексные результаты геолого-геофизических исследований // Геология и геофизика. 2025. Т. 66, № 12. С. 1553–1576. DOI: 10.15372/GiG2025154.
31. Дергач П. А. Модуль низкочастотной деконволюции записей геофонов : свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020667269 Российская Федерация : № 2020666036 ; заявл. 09.12.2020 ; опубл. 22.12.2020 / заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ИНГГ СО РАН).
32. Дергач П. А., Дробчик А. Н., Абраменков С. С. Результаты тестирования широкополосного сейсмометра на основе современных геофонов и цифровой частотной коррекции // Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений : материалы докладов и программы IV Всероссийской научной конференции, Москва, 22–23 октября 2025 года. М. : Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук, 2025а. С. 62–63.

33. Дергач П. А., Дучков А. А., Яскевич С. В. Современные геофоны и цифровая частотная коррекция: оценка применимости в сейсмологии // Геология и геофизика. 2026. DOI: 10.15372/GiG2026195. EDN LBBREJ.
34. Дергач П. А., Епонешникова Л. Ю., Понасенко С. Н., Картозия А. А., Гайсслер В. Х., Дучков А. А., Шибаев С. В., Зобнин Г. Ю. Построение сейсмотомографической модели района научно-исследовательской станции «Остров Самойловский» по данным локального сейсмологического мониторинга за 2019–2021 гг. // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № S2. С. 29. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0627.
35. Дергач П. А., Епонешникова Л. Ю., Понасенко С. Н., Зобнин Г. Ю., Белоусов А. А., Степанова Е. В., Туктаров Р. М., Сибирякова А. А. Результаты сейсмологических исследований в дельте р. Лена в 2024–2025 гг. // Геофизические технологии. 2025б. № 3. С. 27–39. DOI: 10.18303/2619-1563-2025-3-27.
36. Дергач П. А., Тубанов Ц. А., Юшин В. И., Дучков А. А. Особенности программной реализации алгоритмов низкочастотной деконволюции // Сейсмические приборы. 2018. Т. 54, № 3. С. 22–34. DOI: 10.21455/si2018.3-2.
37. Дергач П. А., Юшин В. И. О «запредельных» возможностях электродинамических сейсмоприемников // Сейсмические приборы. 2016а. Т. 52, № 4. С. 33–42. DOI: 10.21455/si2016.4-3.
38. Дергач П. А., Юшин В. И. Теория и практика абсолютной калибровки сейсмических датчиков скачком смещения // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 2. С. 51–65.
39. Дергач П. А., Юшин В. И. Устройство для калибровки сейсмических датчиков : патент № 2599183 C1 Российская Федерация, МПК G01V 13/00, G01V 1/16. устройство для калибровки сейсмических датчиков : № 2015130414/28 : заявл. 22.07.2015 : опубл. 10.10.2016 / Заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук. 2016б. EDN OIJOJP.

40. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Павленко О. В., Фатеев А. В., Куприш О. В., Подкорытова В. Г. Колыванское землетрясение 09.01.2019 г. с ML = 4.3 и особенности наведенной сейсмичности в условиях Горловского угольного бассейна // Вопросы инженерной сейсмологии. 2019. Т. 46, № 4. С. 29–45. DOI: 10.21455/VIS2019.4-2.
41. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с ML = 6.1, I0 = 7 (Кузбасс) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2, № 1. С. 48–61. DOI: 10.35540/2686-7907.2020.1.05.
42. Еманов А. Ф., Еманов А. А., Фатеев А. В. Устойчивые структуры афтершоков Чуйского землетрясения 2003 г. // Геология и геофизика. 2022. Т. 63, № 1. С. 87–101. DOI: 10.15372/GiG2020176.
43. Кабыченко Н. В., Беседина А. Н., Волосов С. Г., Королев С. А., Кочарян Г. Г. Короткопериодные сейсмометры в сейсмологии // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 1. С. 44–65. DOI: 10.21455/si2017.1-4.
44. Кабыченко Н. В., Беседина А. Н., Павлов Д. В., Шарафиев З. З. Устройство для коррекции частотной характеристики датчика : патент на полезную модель № 200198 U1 Российская Федерация, МПК G01P 1/00 : № 2020100103 ; заявл. 09.01.2020 ; опубл. 12.10.2020 / заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени М. А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН).
45. Кабыченко Н. В., Беседина А. Н., Шарафиев З. З. Расширение возможности сейсмических датчиков с помощью универсальной передаточной функции фильтра // Динамические процессы в геосферах. 2024. Т. 16, № 1. С. 32–42. DOI: 10.26006/29490995_2024_16_1_32.
46. Кабыченко Н. В., Кишкина С. Б., Павлов Д. В. Восстановление длиннопериодных колебаний грунта из записей короткопериодных сейсмоприемников // Сейсмические приборы. 2007. Т. 43. С. 3–16.
47. Кабыченко Н. В., Павлов Д. В., Беседина А. Н. Устройство для коррекции частотной характеристики датчика : патент на полезную модель № 111689

U1 Российская Федерация, МПК G01V 1/00 : № 2011119205/28 ; заявл. 13.05.2011 ; опубл. 20.12.2011 / заявитель Учреждение Российской академии наук Институт динамики геосфер РАН (ИДГ РАН).

48. Калинюк И. В., Бойко В. А., Панков Ф. Н., Панков Н. Ф. Оперативная калибровка велосиметров с помощью эталона // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 3. С. 42–54. DOI: 10.21455/si2017.3-4.
49. Кобелева Е. А., Гилева Н. А., Хамидулина О. А., Тубанов Ц. А. Прибайкалье и Забайкалье // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск : Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2020. С. 44–50.
50. Костылев Д. В. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 1. С. 41–53. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.1.03.
51. Костылев Д. В., Богинская Н. В. Сейсмический мониторинг района угледобычи на о. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13, № 2S. 0634. DOI: 10.5800/GT-2022-13-2s-0634.
52. Любушин А. А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М. : Наука, 2007. 228 с.
53. Перепелица В. А. Определение истинного смещения «почвы» по сейсмограмме. М. : Наука, 1974. 76 с.
54. Плотницкий П. С., Яскевич С. В., Дучков А. А. Использование четырехкомпонентных сейсмоприемников — влияние на качество и надежность многокомпонентной сейсмической записи, анализ способов обработки // Сейсмические приборы. 2017. Т. 53, № 4. С. 26–36. DOI: 10.21455/si2017.4-2.
55. Погрецкий А. В., Стрекалов А. Я., Житкевич Ю. Б., Тарасов Н. В. Опытно-методические работы по тестированию бескабельной

сейсморегистрирующей системы «SCOUT» // Приборы и системы разведочной геофизики. 2017. Т. 59, № 1. С. 15–24.

56. Пономарев А. В., Сидорин А. Я. Основоположник современной сейсмологии Борис Борисович Голицын (1862–1916 гг.) : к 150-летию со дня рождения // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2012. Т. 4. С. 6001. DOI: 10.2205/2012NZ000114.
57. Резниченко Р. А., Гоев А. Г., Алешин И. М., Иванов А. Г., Константиновская Н. Л., Резниченко А. П., Холодков К. И., Данилова Т. В. Расширение сети широкополосных сейсмических станций в центральной части Восточно-Европейской платформы // Вопросы инженерной сейсмологии. 2026. Т. 53, № 1. С. 5–19. DOI: 10.21455/VIS2026.1-1.
58. Рыжов А. В. Электродинамические сейсмоприемники. Тверь : ГЕРС, 2009. 242 с.
59. Рыков А. В. Расширение частотной характеристики сейсмографа способом фильтрации // Сейсмические приборы. 1972. № 6. С. 32–34.
60. Саваренский Е. Ф., Кирнос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М. : Гостехиздат, 1955. 343 с.
61. Саваренский Е. Ф., Косарев Г. Л., Садиков Ф. С. О восстановлении истинного движения почвы из записи землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 1. С. 77–83.
62. Сенюков С. Л., Нуждина И. Н., Чебров Д. В. Вулканы Камчатки // Землетрясения России в 2022 году : ежегодник. Обнинск : Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук», 2024. С. 110–119.
63. Сердюков С. В., Азаров А. В., Дергач П. А., Дучков А. А. Аппаратные решения микросейсмического мониторинга геодинамических процессов при подземной разработке твердых полезных ископаемых // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2015. № 3. С. 192–200.

64. Требования к сейсмическим сетям и станциям, интегрируемым в Федеральную сеть сейсмологических наблюдений. Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН, 2017. 10 с.
65. Тубанов Ц. А., Предеин П. А., Цыдыпова Л. Р., Санжиева Д. П.-Д., Радзиминович Н. А., Базаров А. Д. Результаты и перспективы сейсмологических наблюдений в центральной части Байкальского рифта // Российский сейсмологический журнал. 2021а. Т. 3, № 4. С. 38–57. DOI: 10.35540/2686-7907.2021.4.03.
66. Тубанов Ц. А., Санжиева Д. П. Д., Кобелева Е. А., Предеин П. А., Цыдыпова Л. Р. Кударинское землетрясение 09.12.2020 г. (Mw = 5.5) на озере Байкал : результаты инструментальных и макросейсмических наблюдений // Вопросы инженерной сейсмологии. 2021б. Т. 48, № 4. С. 32–47. DOI: 10.21455/VIS2021.4-2.
67. Чебров В. Н., Дрознин Д. В., Кугаенко Ю. А., Левина В. И., Сенюков С. Л., Сергеев В. А., Шевченко Ю. В., Ящук В. В. Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18. DOI: 10.7868/S0203030613010021.
68. Чебров Д. В., Копылова Г. Н., Касимова В. А., Макаров Е. О. Комплексные геофизические наблюдения и информационные ресурсы Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН (полуостров Камчатка) // Российский сейсмологический журнал. 2024. Т. 6, № 2. С. 7–26. DOI: 10.35540/2686-7907.2024.2.01.
69. Чистяков В. А., Трифонов Н. В. Устройство для испытаний сейсмометров : авторское свидетельство № 1536332 A1 СССР, МПК G01V 1/16 : № 4407043 ; заявл. 08.04.1988 ; опубл. 15.01.1990 / заявитель Особое конструкторское бюро Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта.
70. Эльтеков А. Ю., Герасимчук О. А., Уткин П. М., Виноградов Ю. А. Исследования и измерения характеристик высокочувствительных сейсмоприёмников на экспериментальной базе «Обнинск» // Российский

сейсмологический журнал. 2024. Т. 6, № 2. С. 52–69. DOI: 10.35540/2686-7907.2024.2.04.

71. Юшин В. И. Длиннопериодная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Сейсмология в Сибири на рубеже тысячелетий : материалы междунар. геофиз. конф., 27–29 сентября 2000 г. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000а. С. 252–257.
72. Юшин В. И. Наглядные спектральные оценки сейсмических сигналов и аппаратурных шумов // Приборы и системы разведочной геофизики. 2003. Т. 6, № 4. С. 34–39.
73. Юшин В. И. Низкочастотная деконволюция цифровой записи короткопериодного сейсмометра // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 5. С. 852–863.
74. Юшин В. И. О передаточной функции и фазовой характеристике сейсмоприемника // Геофизика. 2000б. № 5. С. 13–15.
75. Юшин В. И. Теория и цифровая модель сейсмоприемника с точки зрения геофизика-инженера // Приборы и системы разведочной геофизики. 2002. Т. 2, № 4. С. 5–10.
76. Anthony R. E., Ringler A. T., Wilson D. C., Wolin E. Do low-cost seismographs perform well enough for your network? An overview of laboratory tests and field observations of the OSOP Raspberry Shake 4D // Seismological Research Letters. 2019. Vol. 90, No. 1. P. 219–228.
77. Asten M. W. Theory and practice of geophone calibration in situ using a modified step method // IEEE Transactions on Geoscience Electronics. 1977. Vol. 15, No. 4. P. 208–214.
78. Belovezhets N., Berezhnev Y., Abramenkov S., Abkadyrov I., Dergach P., Khmarin E., Chebrov D., Koulakov I. Crustal sources of geothermal and magmatic activity in the area of Mutnovsky-Gorely volcanic complex (Kamchatka) inferred from ambient noise tomography // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2026. Vol. 131, No. 1. P. e2025JB032025.

79. Bertram M. B., Margrave G. F. Recovery of low frequency data from 10Hz geophones // Recovery — 2011 CSPG CSEG CWLS Convention, Calgary. Expanded Abstracts. 2011. P. 1–4.

80. Birkelo B., Cieślik K., Witten B., Montgomery S., Artman B., Miller D., Norton M. High-quality surface microseismic data illuminates fracture treatments : A case study in the Montney // The Leading Edge. 2012. Vol. 31, No. 11. P. 1318–1325.

81. Bommer J. J., Oates S., Cepeda J. M., Lindholm C., Bird J., Torres R., Marroquín G., Rivas J. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project // Engineering geology. 2006. Vol. 83, No. 4. P. 287–306.

82. Bormann P., Dewey J. W. The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes. Information Sheet IS 3.3 // New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP). Vol. 1, Ch. 3 / Ed. P. Bormann. Potsdam : GeoForschungsZentrum, 2012. P. 16–49. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_3.3.

83. Bormann P., Wendt S., DiGiacomo D. Seismic sources and source parameters // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP2) / Ed. P. Bormann. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum, 2013. P. 1–259. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch3.

84. Brincker R., Lagö T. L., Andersen P., Ventura C. Improving the classical geophone sensor element by digital correction // Proceedings of IMAC-XXIII : A Conference & Exposition on Structural Dynamics, Orlando, FL, USA, 31 January–3 February 2005. 2005. P. 675–680.

85. Chiu S. K., Eick P. M., Howell J., Malloy J. The feasibility and value of low-frequency data collected using colocated 2-Hz and 10-Hz geophones // The Leading Edge. 2013. Vol. 32, No. 11. P. 1366–1372.

86. Clinton J. F., Heaton T. H. Potential advantages of a strong-motion velocity meter over a strong-motion accelerometer // Seismological Research Letters. 2002. Vol. 73, No. 3. P. 332–342.

87. CT-EW1: техническое описание [Электронный ресурс] / Lennartz electronic GmbH. URL: https://cdn.shopify.com/s/files/1/0902/6558/files/ct-ew1.pdf?648811749277650683 (дата обращения: 06.06.2026).
88. Dai K., Li X., Lu C., You Q., Huang Z., Wu H. F. A low-cost energy-efficient cableless geophone unit for passive surface wave surveys // Sensors. 2015. Vol. 15, No. 10. P. 24698–24715.
89. Ding D., Liu W., Li K., Sun X., Liu W. Low frequency vibration tests on a floating slab track in an underground laboratory // Journal of Zhejiang University-Science A. 2011. Vol. 12, No. 5. P. 345–359.
90. Eaton D. W., Igonin N., Poulin A., Weir R., Zhang H., Pellegrino S., Rodriguez G. Induced seismicity characterization during hydraulic-fracture monitoring with a shallow-wellbore geophone array and broadband sensors // Seismological Research Letters. 2018. Vol. 89, No. 5. P. 1641–1651.
91. Gilyazov L. R., Sibgatullin M. E., Achmerov R. F., Plotnikova I. N., Salakhov M. Kh. Development of a Broadband Seismic Receiver Based on GS-ONE LF Geophone // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2023. Vol. 59, No. 1. P. 58–64.
92. GS-20DX : техническое описание [Электронный ресурс] / Geospace Technologies. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2025/05/592-04900-01_E-Brochure-GS-20DX-Geophone-ES-2-pg-for-desktop-printing.pdf (дата обращения: 06.06.2026).
93. GS-ONE : техническое описание [Электронный ресурс] / Geospace Technologies. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2025/05/592-03270-01_G-GS-ONE-Geophone-Brochure-ES-4-pg-for-desktop-printing.pdf (дата обращения: 06.06.2026).
94. GS-ONE-LF-4.5-HZ : техническое описание [Электронный ресурс] / Geospace Technologies. URL:

https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2025/05/592-15720-01_C-Brochure-GS-ONE-LF-4.5-HZ-ES-4-pg-for-desktop-printing.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

95. GS-ONE-LF-5-HZ : техническое описание [Электронный ресурс] / Geospace Technologies. URL: https://www.geospace.com/wp-content/uploads/2025/05/592-13860-01_C-Brochure-GS-ONE-LF-5-HZ-ES-4-pg-for-desktop-printing.pdf (дата обращения: 06.06.2026).
96. Havskov J., Alguacil G. Instrumentation in earthquake seismology. Dordrecht : Springer, 2004. 358 p.
97. Havskov J., Bormann P., Schweitzer J. Seismic source location // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2) / Ed. P. Bormann. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012a. P. 1–28. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_IS_11.1.
98. Havskov J., Ottemöller L., Trnkoczy A., Bormann P. Seismic Networks // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2) / Ed. P. Bormann. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012b. P. 1–65. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch8.
99. Kendall J. M., Butcher A., Stork A. L., Verdon J., Luckett R., Baptie B. How big is a small earthquake? Challenges in determining microseismic magnitudes // First Break. 2019. Vol. 37, No. 2. P. 51–56.
100. Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N., Deev E., Droznina S., Gordeev E. I., Jakovlev A., El Khrepy S., Kulakov R. I., Kugaenko Y., Novgorodova A., Senyukov S., Shapiro N., Stupina T., West M. Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. Vol. 122, No. 5. P. 3852–3874.
101. Kuznetsov P. Y., Koulakov I., Jakovlev A., Abkadyrov I., Deev E., Gordeev E., Senyukov S., El Khrepy S., Al Arifi N. Structure of volatile conduits beneath

Gorely Volcano (Kamchatka) revealed by local earthquake tomography // Geosciences. 2017. Vol. 7, No. 4. P. 111.

102. Lee P. Low noise amplifier selection guide for optimal noise performance // Analog Devices Application Note, AN-940. 2009. 12 p.

103. Lennartz Electronic GmbH. LExD Seismometer Family. Document Number : 990-0073. 2016. 30 p.

104. Ma K., Wu J., Ma Y., Xu B., Qi S., Jiang X. An effective method for improving low-frequency response of geophone // Sensors. 2023. Vol. 23, No. 6. P. 3082.

105. MARK L-4C-3D : техническое описание [Электронный ресурс] / EPIC. URL: https://epic.earthscope.org/webfm_send/440 (дата обращения: 06.06.2026).

106. Maxwell P., Lansley M. What receivers will we use for low frequencies? // SEG International Exposition and Annual Meeting. SEG, 2011. P. SEG-2011-0072.

107. Medved I., Polat G. Seismic structure of African slab beneath Antalya bay southern Turkey // Tectonophysics. 2025. Vol. 905. P. 230720.

108. Mihaylov A., El Naggar H. A comparison of instrument response correction methods : Post-processing and real-time methods // Results in Geophysical Sciences. 2021. Vol. 8. P. 100033.

109. Oinats A., Cedrik M., Dyukov I., Podlesnyi A., Belinskaya A., Borovko A., Sorokin A., Dobrynin V., Dergach P. Ionospheric response to the seismic wave induced by the Kamchatka earthquake on July 29, 2025 // Russian Journal of Earth Sciences. 2026. Vol. 26, No. 2. P. ES2021. DOI: 10.2205/2026es001131. EDN CYKDQR.

110. OSOP Calibration Table: техническое описание [Электронный ресурс] / Raspberry Shake S.A. URL: https://manual.raspberryshake.org/osopcal/_downloads/SpecificationsforOSOPCalibrationTableV1.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

111. Paul S., Monfret T., Courboulex F., Chèze J., Calais E., Symithe S. J., Deschamps A., Peix F., Ambrois D., Martin X., St Fleur S., Boisson D. Monitoring of Local Earthquakes in Haiti Using Low-Cost, Citizen-Hosted Seismometers and Regional Broadband Stations // Seismological Research Letters. 2023. Vol. 94, No. 6. P. 2725–2739.

112. Peterson J. R. Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geological Survey Open-File Report 93-322. 1993. 94 p. DOI: 10.3133/ofr93322.

113. Richter C. F. An instrumental earthquake magnitude scale // Bulletin of the Seismological Society of America. 1935. Vol. 25, No. 1. P. 1–32. DOI: 10.1785/BSSA0250010001.

114. Scherbaum F. Inverse and simulation filtering of digital seismograms // Of Poles and Zeros : Fundamentals of Digital Seismology. Dordrecht : Springer Netherlands, 1996. P. 132–160.

115. Seneviratne M., Haberland C., Dreiling J. Sri Lanka temporary broadband network // GFZ Data Services, Dataset/Seismic Network. 2016. DOI: 10.14470/6N7561723039.

116. Senyukov S. L., Droznin D. V., Droznina S. Y., Shapiro N. M., Nuzhdina I. N. The KISS Network in 2015–2016 : Catalogs and comparison of processing results with operational estimates from permanent network // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2024. Vol. 60, No. 2. P. 300–313.

117. Sercel geophones : техническое описание [Электронный ресурс] / Sercel. URL: https://www.sercel.com/sites/default/files/2023-07/Geophones_NewCharte_Sercel.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

118. Sixaola3 version 2 : техническое описание [Электронный ресурс] / OSOP. URL: https://manual.raspberryshake.org/sixaola-sphinx-doc/_downloads/specifications-sixaola3-version2.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

119. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. 2nd ed. San Diego, CA : California Technical Publishing, 1999. 640 p.

120. Song K., Tong S., Ding Z., Dong L. An electromagnetic feedback method to improve low-frequency response performance of geophone // 2016 IEEE SENSORS. IEEE, 2016. P. 1–3.

121. Stepnov A., Konovalov A., Klachkov V., Dmitrienko R., Gavrilov A., Bogdanov E., Manaychev K. Sakhalin real-time shaking map tool for industrial and civil facilities safety // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, 2019. Vol. 265. P. 03002.

122. TIRA Vibration test systems : руководство по выбору [Электронный ресурс] / TIRA. URL: https://www.tira-gmbh.de/fileadmin/inhalte/download/schwingprueftechnik/prospekte/EN/TIRA_selection_guide_imperial_01_2024.pdf (дата обращения: 06.06.2026).

123. Van Kann F., Winterflood J. Simple method for absolute calibration of geophones, seismometers, and other inertial vibration sensors // Review of Scientific Instruments. 2005. Vol. 76, No. 3. 034501. DOI: 10.1063/1.1867432.

124. Vitale G., Greco L., D'Alessandro A., Scudero S. Bandwidth extension of a 4.5 Hz geophone for seismic monitoring purpose // 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE). IEEE, 2018. P. 1–5.

125. Wielandt E. Common seismic sensors // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2) / Ed. P. Bormann. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012a. P. 1–26. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_DS_5.1.

126. Wielandt E. Seismic sensors and their calibration // New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2) / ed. P. Bormann. Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 2012b. P. 1–51. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch5.

127. Zhang Z., Ding Y., Xue P., Zhao H., Zhang G., Cui W., Dong E. A Low-Frequency Extension Method for Geophone Based on Force Balance and Approximate Integrator // Chinese Journal of Electronics. 2025. Vol. 34, No. 6. P. 1678–1688. DOI: 10.23919/cje.2025.00.059.