

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ МОРСКОЙ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

Костылева Наталья Владимировна

**Технология эксплуатации
молекулярно-электронных датчиков для комплексных
геофизических исследований на территории Сахалинской области**

1.6.9. Геофизика (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор физико-математических наук
Быков Виктор Геннадьевич

Южно-Сахалинск - 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ – НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ.....	11
1.1 Краткое описание истории создания электрохимических преобразователей для датчиков движения нового поколения.....	11
1.2 Технология молекулярно-электронного переноса.....	12
1.3 Применение молекулярно-электронных сейсмических приборов в некоторых морских и наземных исследованиях.....	20
Выводы по главе 1.....	24
ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ УСТАНОВКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ.....	25
2.1 Установка аппаратной части эксперимента.....	25
2.1.1 Монтаж и запуск сейсмической аппаратуры.....	29
2.1.2 Пункты сейсмоакустических наблюдений.....	38
2.2 Настройка параметров работы оборудования.....	46
2.3 Организация сбора и обработки данных.....	52
2.4 Анализ функциональных показателей молекулярно-электронных приборов в различных пунктах наблюдений.....	59
2.4.1 Регистрационные возможности и спектральные характеристики молекулярно-электронных гидрофонов.....	60
2.4.2 Регистрационные возможности комплектов сейсмического оборудования, установленных на полигоне Петропавловское.....	64
2.5 Сейсмоакустические исследования на о. Кунашир.....	69
Выводы по главе 2.....	73
ГЛАВА 3 ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ.....	74
3.1 Влияние возбуждения импульсов напряжения в геосреде на уровень сейсмического шума молекулярно-электронных приборов.....	74
3.2 Воздействие экзогенных факторов на сейсмический шум, регистрируемый молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111.....	86

3.3 Влияние атмосферных факторов на уровень сигнала гидрофонов и сейсмометра.....	90
3.4 Влияние низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111.....	92
Выводы по главе 3.....	105
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Дальневосточный регион России находится в наиболее сейсмоактивной области Земли, поэтому проблема анализа современной сейсмичности актуальна не только для его жизнедеятельности, но и для фундаментальной науки в целом, т.к. наиболее активная часть Тихоокеанского сейсмического пояса прилегает именно к восточной окраине России.

Сейсмический мониторинг относится к технологиям уменьшения риска опасных природных явлений. Он базируется на организации сети непрерывных долговременных наблюдений исследуемой территории. Вследствие высокой сейсмичности о. Сахалин и Курильских островов, первоочередной целью развития сейсмометрических наблюдений является развитие сети цифровых сейсмических станций, решающих задачи как локального, так и регионального мониторинга и объединенных в единое информационное поле. Проведение сейсмического мониторинга в регионах с высокой сейсмичностью является неотъемлемой частью систем обеспечения безопасности населения и ответственных объектов и сооружений.

Учитывая сложившуюся в последние годы санкционную политику, разработка и испытания отечественных образцов сейсмического оборудования, способного конкурировать с широко применяемым в сейсмологии оборудованием зарубежных производителей, становится особенно актуальной задачей. Молекулярно-электронные датчики являются полностью отечественной разработкой и представляют собой конкурентоспособный продукт, готовый заменить дорогостоящие иностранные аналоги.

Степень разработанности

Инструментальная регистрация землетрясений проводится уже более века. Изменения качества регистрации землетрясений происходили дважды: в середине 1960 гг. – при выполнении программы обнаружения ядерных испытаний и создании глобальной сети сейсмических станций; в середине 1990 гг. – при замене аналоговой регистрации на цифровую регистрацию и автоматизацию сбора и обработки информации [Старовойт, 2005]. Переход от электромеханических и пьезоэлектрических датчиков к высокочувствительным широкополосным молекулярно-электронным датчикам на новых физических принципах измерения сейсмических волн с уверенностью можно считать третьим качественным изменением регистрации землетрясений.

Актуальность развития мировой и региональных сейсмических сетей диктует необходимость развития новых направлений, связанных с созданием компактных и недорогих сейсмометров, по своим характеристикам конкурирующих с лучшими моделями электромеханических сейсмометров. Таким направлением стало создание датчиков, использующих молекулярно-электронную ячейку [Разработка сейсмодатчиков...1999].

Измерители параметров движения на основе молекулярно-электронного переноса имеют весьма широкую сферу применения: мониторинг движения различных геологических объектов и сейсмологический мониторинг [Vassallo at al., 2008; Seismicity at the convergent...2009], решение задач сейсморазведки в вулканологии [Asymmetric caldera-related...2014], мониторинг исправности гидростанций [New seismic array...2017], оценка уровня сейсмического воздействия на населенные пункты, расположенные вблизи угольных карьеров и железных дорог [Мониторинг сейсмического...2019; Измерительные комплексы...2021].

Сейсмоприемники находят применение в сейсмологической аппаратуре ряда стран: США, России, Японии, Германии, Китая, Колумбии и др. Преимущества сейсмических датчиков нового поколения заключаются в высокой чувствительности и низком уровне собственных шумов в широком частотном и динамическом диапазоне, что дает возможность принимать слабые сигналы от глубоких горизонтов и уверенно выделять их на фоне помех. Кроме этого, датчики обладают значительно меньшим весом и на порядок меньшей стоимостью, практически не требуют времени для выхода на рабочий режим, отличаются очень низким энергопотреблением, долгим сроком службы и просты в эксплуатации [Frequency response...2018; Агафонов и др., 2013].

Молекулярно-электронные датчики для гидрофонов и сейсмометра, разработанные в Московском физико-техническом институте [Измерительные приборы...2018; Молекулярно-электронный гидрофон...2018], являются технологической основой созданной при выполнении диссертационной работы комплексной автоматизированной системы мониторинга для анализа современной сейсмичности о. Сахалин и Курильских островов.

Цель и задачи исследования

Основная цель исследований – разработка технологии эксплуатации широкополосных молекулярно-электронных датчиков для комплексных геофизических исследований на территории Сахалинской области.

Для достижения этой цели были определены **следующие задачи**:

1. Разработать методику установки и эксплуатации широкополосных молекулярно-электронных датчиков для исследования сейсмичности о. Сахалин и Курильских островов с надежным автоматизированным обеспечением регистрации, передачи и хранения данных.
2. Провести анализ полученных волновых форм для оценки работы установленного оборудования по основным метрологическим показателям.
3. Исследовать основные внешние воздействующие факторы и степень их влияния на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронных гидрофонов и сейсмометра.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые для условий о. Сахалин и Курильских островов разработана и реализована технология сбора, передачи, хранения и обработки данных на основе сочетания современных программно-аппаратных комплексов и использования широкополосных молекулярно-электронных датчиков.

Впервые на протяжении длительного временного периода (4 года) выполнено исследование влияния климатических и атмосферных воздействий, температуры и интенсивных искусственных электромагнитных помех (электромагнитных зондирований геосреды) на стабильность параметров молекулярно-электронных датчиков, установленных в различных природных условиях и в условиях обсерватории.

Практическая значимость

Высокая практическая значимость проведенных в диссертационной работе исследований и разработок может быть обоснована следующим образом.

Разработанная комплексная автоматизированная система сейсмического мониторинга включает широкополосные молекулярно-электронные датчики, обеспечивающие температурную и временную стабильность параметров, простоту и надежность в эксплуатации, и объединяет апробированные перспективные методы анализа данных для производства высокоточного аналитического результата с минимальным уровнем погрешности. Система производит высококачественный материал для научных и прикладных исследований сейсмичности и может служить основой для решения задач геодинамического мониторинга.

В результате выполненных в 2018-2022 гг. исследований показано, что основные характеристики широкополосных молекулярно-электронных датчиков (допустимые углы установки, диапазон рабочих температур, чувствительность и динамический диапазон) соответствуют уровню, необходимому для решения различных сейсмологических задач, в том числе, для обеспечения сейсмической безопасности Сахалинской области.

Результаты исследований влияния атмосферных факторов на работу гидрофонов позволят при создании серийного изделия выработать оптимальные инженерно-конструкторские решения по минимизации воздействия окружающей среды. При этом

совместный анализ сейсмоакустических и других геофизических данных может способствовать разработке методик краткосрочных заключений по развитию сейсмического режима на о. Сахалин и в районе Южных Курильских островов.

В настоящее время система мониторинга успешно апробирована и эксплуатируется в непрерывном режиме в Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН) и Сахалинском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН).

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач выбраны программно-аппаратурные решения для приведения поступающих сейсмологических данных к единому стандарту и извлечения полезной информации.

Обработка и интерпретация сейсмических событий в ходе исследования проводилась при использовании методики обработки сейсмических данных DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [Дрознин, Дрознина, 2010] и математических методов статистической обработки рядов наблюдений. Для анализа спектров сейсмических данных использовалась программа SpectrumSeism [Свидетельство о..., 2021].

Тестирование надежности и достоверности сейсмологических данных, полученных с применением испытуемого молекулярно-электронного широкополосного сейсмометра модели СМЕ-6111, осуществлялось путем их сопоставления с данными параллельной регистрации других серийных сейсмометров.

Фактическим материалом является большой объем разнородной сейсмологической и геофизической информации: полученные по результатам обработки волновых форм каталоги землетрясений - локальные, региональные, телесеismicкие, в том числе, слабomagнитудные и глубокофокусные; сигналы геоакустической эмиссии; данные сейсмoeлектрической разведки недр.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Созданная технология сбора, передачи, хранения и обработки данных на основе сочетания современных программно-аппаратных комплексов и использования широкополосных молекулярно-электронных датчиков, позволяет осуществлять непрерывный контроль текущей сейсмической обстановки с качеством, необходимым для решения задач сейсмического мониторинга

2. Наличие интенсивных искусственных электромагнитных помех не ухудшает качества регистрации сейсмических событий молекулярно-электронными сейсмометрами.
3. Широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-6111 обеспечивает стабильность параметров регистрации продолжительное время при соблюдении условий эксплуатации и может использоваться в качестве базового широкополосного сейсмометра для станций регионального и локального уровней наблюдений, а также в качестве временных и полевых станций, что позволяет решать необходимые задачи сейсмического мониторинга в Сахалинской области.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается представительной базой сейсмологических и геофизических данных, полученных с применением современной аппаратуры и программных средств. Архитектура комплексной автоматизированной системы разработана на основе требований отечественных и международных стандартов в области реализации информационных систем.

В качестве исходного фактического материала привлекались оперативные каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН и каталоги локальной сети станций юга о. Сахалин.

В основу реализованной системы обработки и интерпретации сейсмологических данных заложен программный комплекс DIMAS, разработанный в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН и предназначенный для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с различных систем сбора данных.

В ходе выполнения диссертационной работы применялись математические методы статистической обработки рядов наблюдений и метод корреляционного анализа для исследования шумовых характеристик молекулярно-электронных датчиков. Проводилось сопоставление сейсмологических данных, полученных с применением трехкомпонентного молекулярно-электронного широкополосного сейсмометра модели СМЕ-6111, с данными параллельной регистрации наиболее чувствительного серийного сейсмометра STS-2.

Работа выполнена в соответствии с научными темами и планами НИР ИМГиГ ДВО РАН по государственному заданию (ответственный исполнитель); проектом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) №18-07-00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков нового типа» (исполнитель).

Представленные в диссертации научные результаты докладывались на международных и всероссийских научных мероприятиях, в том числе: на 22-й международной конференции и

выставке «Нефть и газ Сахалина-2018» (25-27 сентября 2018 г., г. Южно-Сахалинск); на VII научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (29 сентября-5 октября 2019 г., г. Петропавловск-Камчатский); на III международной научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (27-31 мая 2019 г., г. Южно-Сахалинск); на XXIII ежегодной научной конференции, посвящённой Дню вулканолога (30-31 марта 2020 г., г. Петропавловск-Камчатский); на IV международной научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (6-10 сентября 2021 г., г. Южно-Сахалинск); на XIII международной научной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (25-29 сентября 2023 г., с. Паратунка, Камчатский край); IX международном симпозиуме «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (24-29 июня 2024 г., г. Бишкек, Кыргызстан); VII международной конференции «Триггерные эффекты в геосистемах» (2-5 июля 2024 г., г. Москва).

Личный вклад

Методика создания технологии сбора, передачи, хранения и обработки сейсмических данных, представленная в работе, построена на личном опыте использования и адаптации автором современных программно-аппаратных комплексов (статьи [Развитие метода...2018; Закупин и др., 2020; Закупин, Богинская, 2021 и Boginskaya, Kostylev, 2022]) и непосредственного участия автора в настройке и вводе в эксплуатацию традиционных и молекулярно-электронных датчиков, описанного в работах [Изучение сейсмического...2018; Геофизические исследования...2019; Kostylev et al., 2019; Костылев, Богинская, 2020 и Костылев, Богинская, 2022б] . Автором в работах [Изучение сейсмического...2018; Оценка сейсмической...2018; Развитие метода...2018; Закупин и др., 2020 и Закупин, Богинская, 2021] лично подготовлены каталоги и проведено исследование сейсмичности Сахалинской области, с использованием в групповой обработке волновых форм данных, полученных традиционными и молекулярно-электронными приборами. Параметры традиционных электронно-механических приборов, использованных в работе для сопоставления, представлены в работе на основе личного опыта их эксплуатации автором на острове Сахалин, описанного в работах [Boginskaya, Kostylev, 2022; Костылев, Богинская, 2022б]. В работах [Геофизические исследования...2019; Костылев, Богинская, 2020] вклад соискателя состоит в самостоятельном исследовании шумовых характеристик приборов и в оценках регистрационных возможностей молекулярно-электронных датчиков. Исследования влияния природных и антропогенных факторов, определившие основные положения работы, приведенные в работах [Костылев, Богинская, 2022а; Наблюдения обратного...2023]

полностью построены на выполненной автором обработке и анализе сейсмических записей, сделанных во время экспериментов.

Автор самостоятельно и вместе с соавторами участвовал в подготовке научно-технических отчётов и публикаций по теме диссертационной работы, в обобщении материалов, формулировке выводов, а также в подготовке общего текста публикаций к выходу в научных журналах.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 статьях в рецензируемых научных журналах, из них 5 в изданиях, рекомендованных для защиты в МГУ. По теме диссертации опубликовано 8 статей в сборниках материалов всероссийских и международных конференций.

Благодарности

Автор глубоко благодарен научному руководителю д.ф.-м.н. В. Г. Быкову за всестороннюю поддержку и помощь в процессе написания работы. Искренне благодарю директора СФ ФИЦ ЕГС РАН Д. В. Костылева - соавтора публикаций, в сотрудничестве с которым были получены интересные научные результаты. Автор выражает признательность за поддержку и консультации по отдельным вопросам директору ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, члену-корреспонденту РАН д.ф.-м.н. С.А. Тихоцкому. Автор также признателен коллегам из ООО «Р-Сенсорс» за плодотворное сотрудничество и оперативное реагирование на всех этапах проведения экспериментов. Отдельно благодарю председателя Камчатского научного центра ДВО РАН, научного руководителя ИВиС ДВО РАН, академика РАН д.ф.-м.н. Е. И. Гордеева, который оказал помощь ценными советами по улучшению диссертации.

ГЛАВА 1. ПРИМЕНЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ – НОВЫЙ ЭТАП В РАЗВИТИИ СЕЙСМОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

1.1. Краткое описание истории создания электрохимических преобразователей для датчиков движения нового поколения

История создания электрохимических преобразователей (ЭХП) берет свое начало в 40-х годах XX века. ЭХП начали разрабатываться в СССР и США для замены электронных ламп в малогабаритных приемно-усилительных и вычислительных устройствах. Однако после появления в 1950-х годах транзисторов эти работы были практически свернуты [Опыт регистрации...2009].

В 60-е годы США вновь были развернуты исследования по созданию элементов на основе электрохимических явлений. Параллельно с этим подобные исследования проводились в СССР в Институте электрохимии Академии наук, Московском физико-техническом институте и в Институте источников тока Министерства электронной промышленности. В 70-е годы ученые из США приняли решение о прекращении развития данного направления в связи с бесперспективностью исследований из-за невозможности создания электрохимических ячеек с устойчивыми во времени характеристиками. В СССР исследования продолжались и в начале 90-х годов, ученым удалось выявить отсутствие принципиальных запретов для создания молекулярно-электронного преобразователя [Бабанин и др., 1990; Козлов и др., 1991]. Институтом источников тока и Институтом физики Земли АН СССР предпринимались попытки совместного создания молекулярно-электронных сейсмических датчиков [Разработка сейсмодатчиков...1999].

В середине 1980-х годов по инициативе академика С.Л. Соловьева в Институте электрохимии АН СССР и СКТБ твердотельной электроники АН Молдавской ССР на базе электрохимических ячеек были разработаны широкополосные велосиметры. Эти сейсмоприемники были с успехом использованы в широкополосных автономных донных сейсмографах (ШАДС) Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР. В ряде экспедиций в 1988–2000 гг. на дне акваторий были получены уникальные записи сигналов микросейсм, местных и удаленных землетрясений, от подводных оползней и др. Параллельные

разработки различных типов датчиков движений на основе ЭХП производились в ряде других организаций СССР [Левченко, 2002, 2005].

Прототипами гидрофонов на основе электрохимических преобразователей выступили солионы, публикации о которых впервые появились в пятидесятые годы XX столетия [Lane, 1957; Fusca, 1957]. На тот момент их преимуществами были низкое энергопотребление, в 100-1000 раз меньше, чем у транзисторов, долгий срок службы, простота изготовления и эксплуатации. Вплоть до 1970-х годов США поддерживали разработку солионных устройств для чувствительных гидролокаторов и сейсмических приложений, и был зарегистрирован ряд патентов. Соответствующие работы велись в нескольких направлениях: создание малопотребляющих подводных сейсмометров для слежения за подводными и надводными кораблями, акселерометров для стабилизации и повышения точности стрельбы корабельных орудий, а также разработке сверхчувствительных микробарографов для регистрации подземных и подводных ядерных взрывов по атмосферному каналу.

1.2. Технология молекулярно-электронного переноса

Традиционный сейсмический датчик представляет собой катушку, закрепленную на упругом подвесе и помещенную в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, неподвижно закрепленным на корпусе устройства. Внешнее механическое воздействие создает силы инерции, приводящие к перемещению катушки в магнитном поле. В результате эффекта электромагнитной индукции на выводах катушки создается разность потенциалов – выходной сигнал. За десятилетия, прошедшие с момента создания первых подобных датчиков, технология их производства достигла высокой степени совершенства, приборы являются надежными и высокостабильными в использовании.

В основе технологии молекулярно-электронного переноса (МЭП) лежит процесс конвективной диффузии ионов в растворе электролита. Главным элементом диффузионного преобразователя является молекулярно-электронная ячейка (МЭЯ), которая состоит из двух электродов (анода и катода), помещенных в растворе электролита. При подаче на электроды постоянной разности потенциалов в системе устанавливается градиент концентрации ионов, способных принимать участие в обратимой окислительно-восстановительной реакции и способствующих протеканию диффузионного тока. Если жидкость приходит в движение под воздействием внешнего возмущения, тогда наряду со стационарной диффузией возникает конвективный перенос ионов, что меняет скорость доставки реагирующих веществ к

электродам, и, соответственно, величину тока, текущего в МЭЯ [Разработка сейсмодатчиков... 1999].

Чувствительный элемент молекулярно-электронного сейсмодатчика – это твердотельные электродные структуры, заполненные проводящей рабочей жидкостью. Обычно используется раствор с высокой концентрацией фонового, не участвующего в электродных реакциях, электролита с небольшой добавкой активного компонента, ответственного за перенос заряда через границу раздела жидкость – металл электрода. Известно, что, в этом случае протекающий в системе ток определяется диффузионным и конвективным переносом активного компонента. Роль фонового электролита сводится при этом к экранированию электрического поля в жидкости и, тем самым, к подавлению миграционного переноса зарядов [Агафонов и др., 2013].

При увеличении межэлектродной разности потенциалов интенсивность электрохимических реакций постепенно нарастает, пока не реализуется режим тока насыщения, при котором дальнейшее увеличение разности потенциалов не изменяет его величину. В общем случае характерной особенностью процесса является высокий коэффициент преобразования, что выражается в сильном электрическом отклике, значительно превышающем шумы сопутствующих электронных приборов (даже при низких уровнях входного механического воздействия). В конечном счете, обеспечивается высокое отношение сигнал/шум для всего измерительного тракта. Устройство типового МЭП показано на рисунке 1.1. Многочисленные экспериментальные и теоретические исследования выявили существенную зависимость выходных параметров устройства от геометрии преобразующей системы и широкие возможности оптимизации отклика преобразующей системы в зависимости от решаемых задач [Агафонов, Криштоп, 2004]. В использовании мелкомасштабных преобразующих структур содержится основное отличие современных молекулярно-электронных датчиков от более ранних хемотронных преобразователей [Larcam, 1965; Лидоренко, 1984].

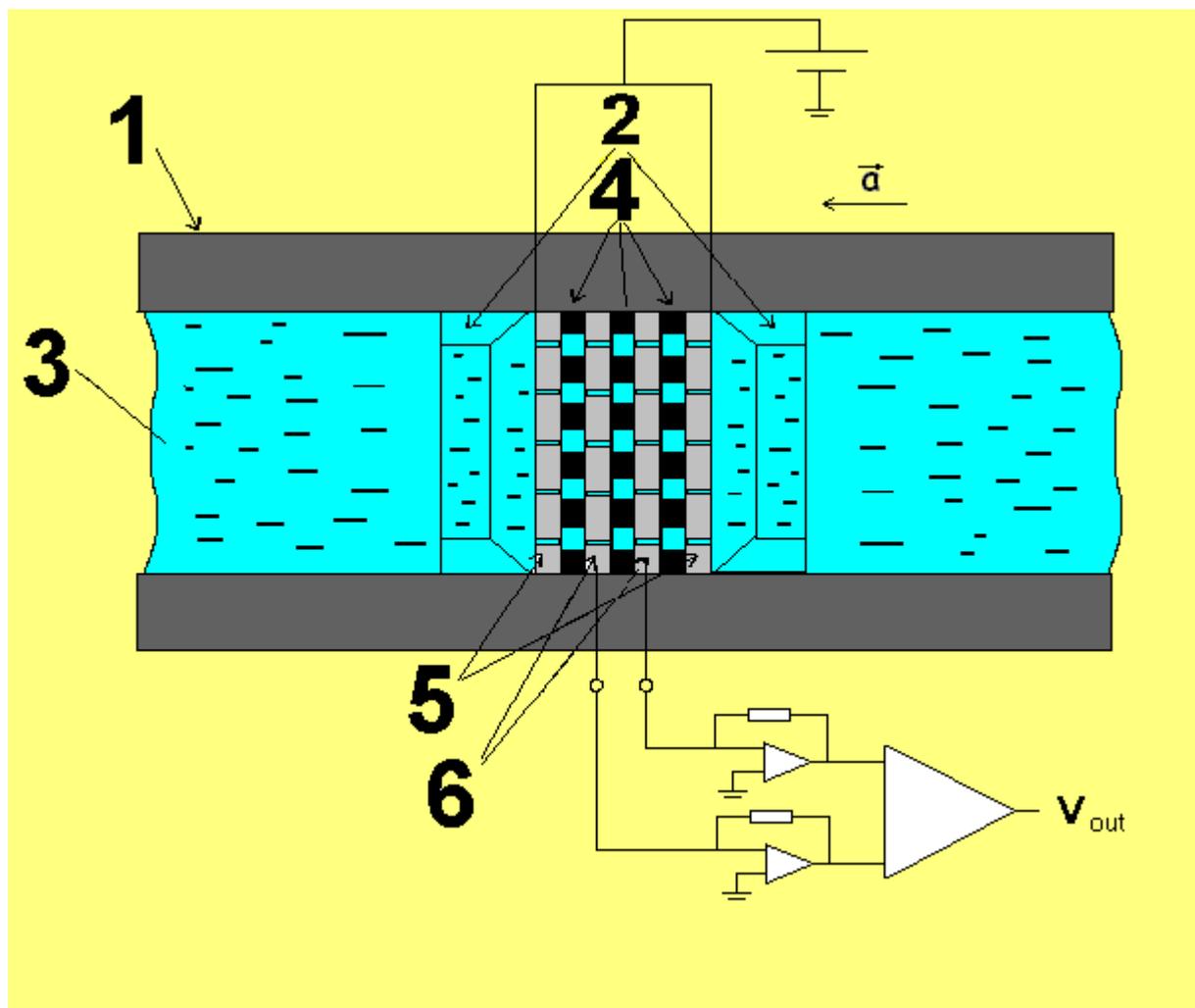


Рисунок 1.1. Молекулярно-электронный преобразователь: 1 – канал для протекания жидкости; 2 – держатель узла; 3 - электролит; 4 – диэлектрические перегородки; 5 - аноды; 6 – катоды; \vec{a} – внешнее механическое ускорение; $V_{\text{вых.}}$ - выходной сигнал [Егоров и др., 2023]

При изготовлении *сейсмического датчика* чувствительный электродный узел, содержащий микроканалы для перетока жидкости, помещается поперек диэлектрического канала, ограниченного с обеих сторон гибкими мембранами, и заполненного рабочей жидкостью. Такая конструкция датчика обеспечивает перетекание рабочей жидкости через преобразующий элемент и, соответственно, вариации выходного тока, под действием переменных сил инерции, вызванных внешним механическим сигналом, направленным вдоль оси канала. Поскольку окончательный выходной сигнал формируется с использованием контура обратной связи, параметры преобразователя оптимизируются с точки зрения достижения максимальной чувствительности и минимального уровня собственных шумов, при этом совершенно не обязательно иметь плоскую амплитудно-частотную характеристику до

включения датчика в контур обратной связи [Агафонов и др., 2013]. Схематическое изображение датчиков и внешний вид преобразующих электродов показаны на рисунке 1.2. В зависимости от электронной обработки можно получить выход, пропорциональный либо скорости (велосиметр), либо ускорению (акселерометр).

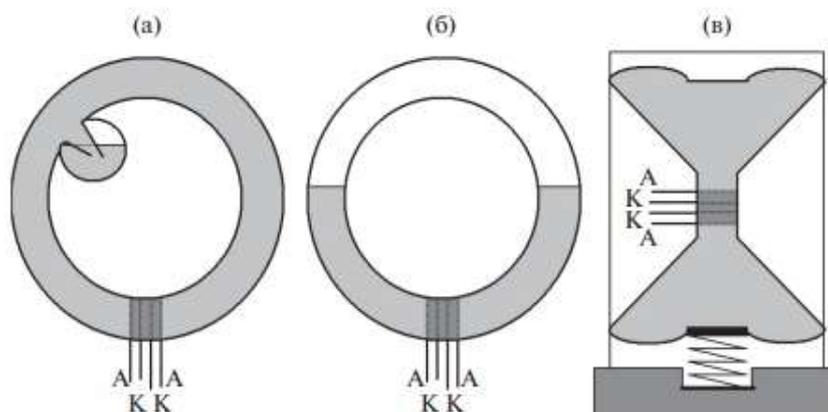


Рисунок 1.2. Типы датчиков на основе МЭП: а – датчик вращательных движений; б - горизонтальный; в - вертикальный; А – аноды, К – катоды [Измерительные приборы...2018]

На рисунке 1.3, в качестве примера, показан внешний вид двух сейсмометров, один из них высокочувствительный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111, другой - скважинный трехкомпонентный низкошумящий сейсмометр СМЕ-4211 ВН150, серийно выпускаемые компанией «Р-Сенсорс» (Россия) [<https://r-sensors.ru/ru/technology/about/>]. Оба сейсмометра характеризуются низкими собственными шумами, высокой линейностью и широким динамическим диапазоном. Наличие силовой обратной связи гарантирует высокую температурную и временную стабильность параметров [Агафонов и др., 2013; Huang et al., 2013].



Рисунок 1.3. Слева - внешний вид молекулярно-электронного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111; справа – трехкомпонентный сейсмометр СМЕ-4211 ВН150

Молекулярно-электронный гидрофон, как и все устройства на основе МЭП, работает по принципу возникновения сигнального тока при протекании жидкости через преобразующую электрохимическую ячейку. Конструкция гидрофона имеет существенные отличия от датчика линейных перемещений, которые позволяют использовать МЭЯ для измерений вариаций внешнего давления. В гидрофоне одна из мембран, ограничивающих канал ячейки, открыта во внешнюю среду. Вторая мембрана герметично накрывается твердым колпаком, запирающим небольшой объем воздуха под крышкой. Последнее позволяет измерять вариации давления, так как в сосуде с воздухом при деформации второй мембраны меняется давление [Молекулярно-электронный гидрофон...2018]. Конструкция и основные принципы работы молекулярно-электронного гидрофона с отрицательной обратной связью показаны на рисунке 1.4 [Frequency response...2018]. Электропакет, состоящий из набора сетчатых электродов, помещают в раствор электролита между упругими резиновыми мембранами внутри внешнего корпуса гидрофона. К одной из двух мембран прикреплен магнит, который может свободно перемещаться внутри катушки. Катушка жестко приклеена к верхней крышке. Технический результат достигается тем, что одна упругая мембрана имеет непосредственный контакт со средой, в которой распространяются акустические волны, а вторая ограничивает определенный замкнутый объем воздуха при заданном давлении.

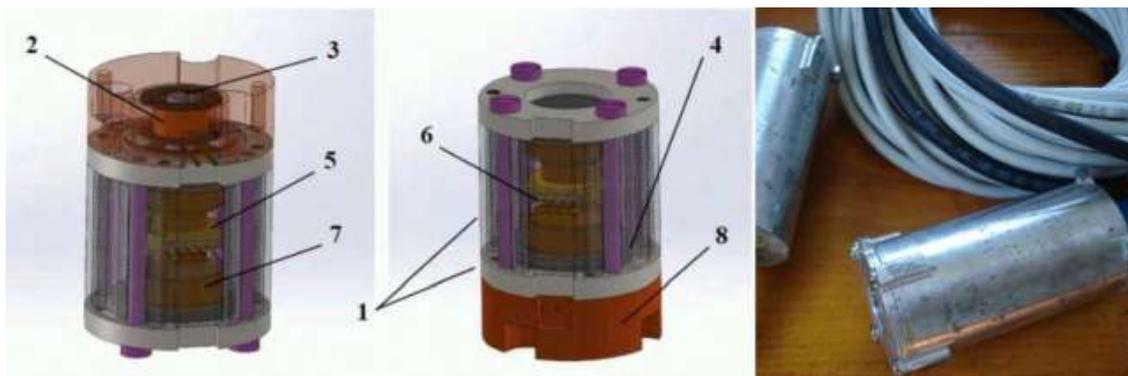


Рисунок 1.4. Конструкция и внешний вид молекулярно-электронного гидрофона [Frequency response...2018]. 1 – внешний корпус гидрофона, 2 – катушка, 3 – магнит, 4 – мембраны, 5 – электропакет, 6 – электрические клеммы анодов и катодов, 7 – раствор электролита, 8 – верхняя крышка

Разработчиком, в соответствии с результатами математического моделирования, показано, что основным параметром, влияющим на характеристики молекулярно-электронных гидрофонов, является размер площади преобразующей электродной ячейки. Кроме размеров ячейки на эксплуатационные свойства гидрофонов оказывают влияние жесткость мембраны и величина гидродинамического сопротивления [Low-frequency...2019].

Амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) молекулярно-электронных приборов. Жесткие требования, которые предъявляются к шумовым характеристикам сейсмических приборов, выявили необходимость тщательного согласования спектральной плотности шума преобразователя и электронной схемы. Один из основных механизмов шума в МЭП обусловлен гидродинамическими флуктуациями потока жидкости через преобразующую ячейку [Козлов, Сафонов, 2003]. Экспериментально [Козлов, Сахаров, 1994] установлено, что этот механизм шума является определяющим для МЭП на частотах ниже нескольких Гц, а спектр собственных шумов молекулярно-электронного преобразователя в широком частотном диапазоне аналогичен шуму Найквиста с той лишь разницей, что в МЭП роль электрического сопротивления играет гидродинамическое сопротивление преобразователя [Агафонов и др., 2013]. Установлено, что абсолютное значение шума, начиная с некоторого уровня внешнего сигнала, зависит от его амплитуды и, кроме того, спектральная плотность шума МЭП с пониженным значением гидродинамического сопротивления испытывает подъем в сторону низких частот [Сафонов, 2007].

Для оценки качества сейсмических станций и уровня собственного шума сейсмических приборов используются модели шума Петерсона: New Low Noise Model (NLNM) – новая модель низких шумов и New High Noise Model (NHNM) – новая модель высоких шумов. NLNM обобщает минимальный наблюдаемый уровень сейсмического шума в рабочей полосе частот. Эта модель важна, так как на ее основе проверяется чувствительность сейсмических станций на предмет обнаружения малых колебаний, а также на основе этой модели рассчитываются характеристики новых сейсмоприемников [Peterson, 1993; Wielandt, 2012]. Для построения моделей шума берется характеристика, которая описывает частотное распределение шумов для некоторого количества сейсмических станций, зафиксированное в относительно тихое для этих станций время. Затем, для полученной совокупности кривых, строятся огибающие сверху и снизу [Измерительные приборы...2018].

Приборы, у которых собственный шум выше модели NLNM, пригодны для большинства сейсмических станций (рисунок 1.5). Приборы с высокими шумами могут использоваться в сейсмических измерениях для регистрации сильных движений земной поверхности.

Приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей (МЭП) не содержат элементов точной механики и характеризуются высокой эффективностью преобразования механического сигнала в электрический на уровне происходящих в МЭП физических процессов, а не только с помощью корректирующей электроники. Это позволяет им по своим характеристикам на порядки превзойти параметры, достигнутые микроэлектромеханическими системами (МЭМС). Благодаря этим уникальным качествам приборы на основе МЭП успешно соперничают и с намного более дорогостоящими прецизионными электромеханическими и магнитомеханическими приборами. Кроме того, приборы МЭП нетребовательны к условиям транспортировки, практически не требуют времени для выхода на рабочий режим, отличаются рекордно низким энергопотреблением, долгим сроком службы и чрезвычайно просты в эксплуатации.

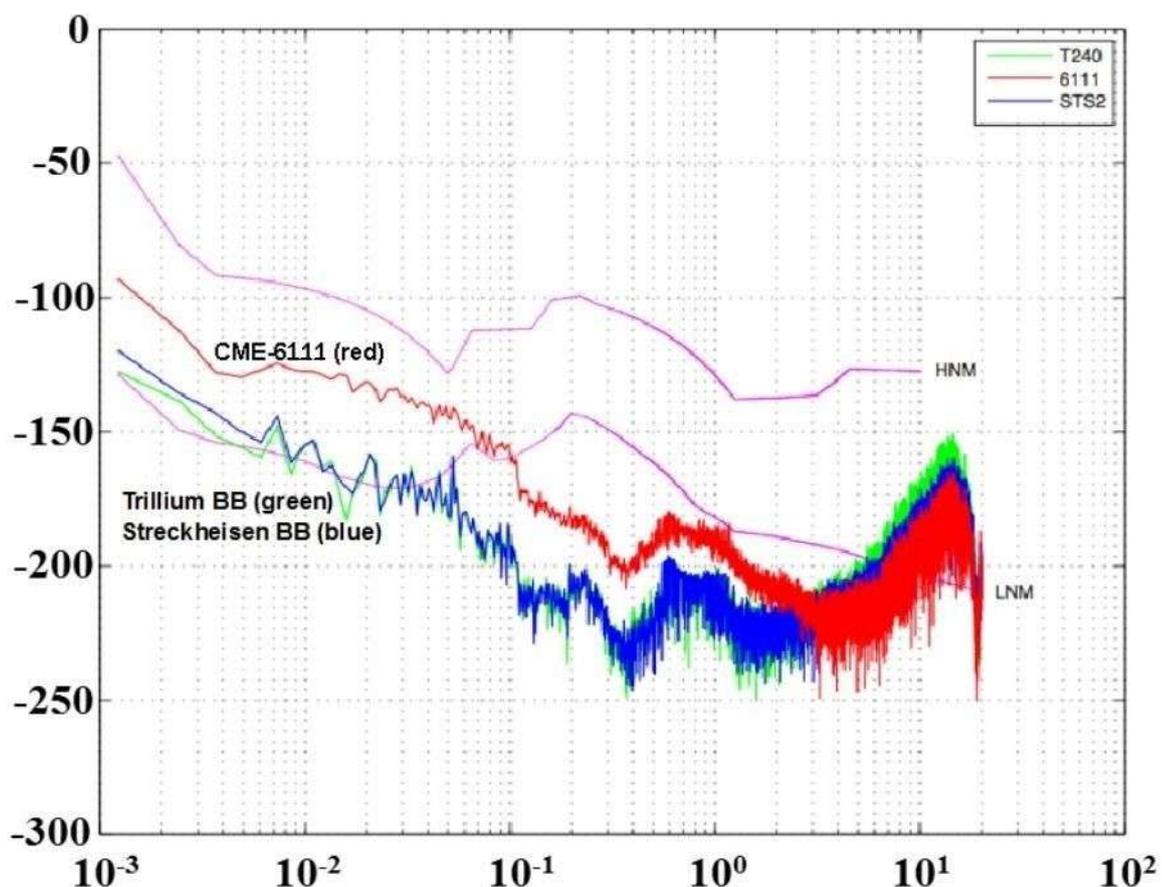


Рисунок 1.5. Спектральная плотность шума сейсмометра CME-6111 обозначена на рисунке красным цветом, синим цветом представлена спектральная плотность широкополосного сейсмометра производства Streckheisen [<https://streckheisen.swiss/en/products/sts-2/>], зеленым цветом - широкополосного сейсмометра производства Trillium [<https://vulcaninc.ru/index.php/equipment/nanometrics?#seismometers>]

Помимо представленных выше датчиков (широкополосного и скважинного сейсмометров и гидрофонов) на основе МЭП, серийно выпускаются и находят свое применение акселерометры, геофоны, акустические датчики, короткопериодные и подводные сейсмометры, а также угловые и многокомпонентные сейсмодатчики. Сейсмоприемники находят применение в сейсмологической аппаратуре ряда стран: США, России, Японии, Германии, Китая, Колумбии и др.

1.3. Применение молекулярно-электронных сейсмических приборов в некоторых морских и наземных исследованиях

Актуальность развития мировой и региональных сейсмических сетей диктует необходимость развития новых направлений, связанных с созданием компактных и недорогих сейсмометров, по своим характеристикам конкурирующих с лучшими моделями электромеханических сейсмометров. Таким направлением стало создание датчиков, использующих молекулярно-электронную ячейку.

Измерители параметров движения на основе молекулярно-электронного переноса имеют весьма широкую сферу применения: мониторинг движения различных геологических объектов и сейсмологический мониторинг [Vassallo et al., 2008; Seismicity at the convergent...2009], решение задач сейсморазведки в вулканологии [Asymmetric caldera-related...2014], мониторинг исправности гидростанций [New seismic array...2017], оценка уровня сейсмического воздействия на населенные пункты, расположенные вблизи угольных карьеров и железных дорог [Мониторинг сейсмического...2019; Измерительные комплексы...2021], непрерывный сейсмический мониторинг исторических построек [<https://r-sensors.ru/upload/medialibrary/d58/d582435658b3d248c32491606b2483ed.pdf>].

На факультете физической и квантовой электроники МФТИ в Центре молекулярной электроники на базе МЭП-технологии разработано несколько десятков оригинальных экспериментальных приборов и систем, предназначенных для решения самых разных задач, среди которых можно отметить, например, систему персональной инерциальной навигации пешехода [Патент №91275...2010], систему мониторинга колебаний высотных зданий [Seismic Behaviour...2013; Капустьян и др., 2013], измеритель вращательных колебаний земной поверхности для дистанционного контроля процесса бурения [Kozlov et al., 2005].

Наиболее полное описание применения молекулярно-электронных преобразователей в сейсмологических исследованиях до 2017 г. (модели сейсмометров СМЕ-4011, СМЕ-4211, СМЕ-4311 и их модификации) представлено в замечательном обзоре [Измерительные приборы...2018]. Здесь лишь кратко отмечены исследования российских институтов и организаций в 2018-2021 гг., результаты которых имеют непосредственное отношение к нашим изысканиям, показанным в последующих двух главах диссертации.

В ходе экспедиций 2018-2019 гг. и 2019-2020 гг., организованных Тихоокеанским океанологическим институтом им. В.И. Ильичёва и Институтом океанологии им. П.П. Ширшова РАН на шельфе и континентальном склоне моря Лаптевых были установлены

подводные широкополосные молекулярно-электронные сейсмографы СМЕ-4111 и СМЕ-4311 сроком на 1 год. Одним из основных результатов стало получение качественных сейсмических записей и установление в условиях арктического шельфа сильной зависимости качества записи от силы ветровых волн [Ocean-Bottom...2021].

Для решения проблем, связанных с мониторингом водной среды Арктики, а также с разведкой запасов углеводородов в морях Арктики, в рамках развития созданной учеными Института физики Земли РАН технологии глубинного мониторинга неоднородных слоистых геологических структур, разработан вмораживаемый автономный геоакустический буй, позволяющий вести измерения на льду, в водной среде и на морском дне [Вмораживаемый автономный...2018]. В состав данного устройства входит аналоговый однокомпонентный молекулярно-электронный измеритель СМЕ-4211V, регистратор сейсмических сигналов NDAS-8224 и измеритель тока. Подобные геоакустические приемники для регистрации низкочастотных сигналов, несущих информацию о неоднородных структурах слоистой геофизической среды, проводились в марте 2020 г. на льду озера Байкал. В качестве основного геофизического инструмента, использовалась вмораживаемая антенная система, состоящая из нескольких автономных геоакустических модулей, включающих в себя вертикальные велосиметры, созданные на основе молекулярно-электронных первичных преобразователей типа СМЕ-4211, обеспечивающих регистрацию сигнала с амплитудой до ± 5.0 мм/с в диапазоне частот 0.033–50 Гц. [Байкальский сейсмоакустический...2021]. Хорошо зарекомендовали себя низкочастотные сейсмометры СМЕ-4111 при исследовании движения ледника Норденшельда (архипелаг Шпицберген, Норвегия) в летние месяцы 2012-2013 гг. [Коростелев и др., 2014].

Работы по тестированию широкополосных сейсмометров на основе молекулярно-электронных преобразователей СМЕ-4211 в 2018-2019 гг. проводились в Байкальском филиале ФИЦ ЕГС РАН. В ходе наблюдений отмечено значительное понижение чувствительности аппаратуры при отрицательных температурах с октября и возврат значений АЧХ в исходное состояние при потеплении в апреле. При этом максимальная разница (в 3-4 раза) чувствительности аппаратуры отмечена между летними месяцами и морозным февралем 2019 г. [Кобелева, Гилева, 2019].

После Бачатского землетрясения ($M=6.1$, 2013 г.) сотрудниками Алтае-Саянского филиала (АСФ) ФИЦ ЕГС РАН для регистрации афтершокового процесса вблизи угольного карьера «Бачатский» была выставлена сеть из десяти автономных комплексов регистрации и одной станции с прямой передачей данных. Сейсмостанция с прямой передачей данных была оснащена широкополосным велосиметром СМЕ-6211 с регистратором «Байкал-8.1» [Еманов и др., 2020]. Согласно отчету [Стационарные сейсмические...2019] продолжительность работы

этой станции составила почти 1 год (24.06.2013 – 05.06.2014 гг.). 12 сентября 2020 года в составе сети сейсмических станций АСФ ФИЦ ЕГС РАН произошли изменения: на станции Новосибирск-2 (NVSII) добавлен новый стационарный комплекс регистрации – молекулярно-электронный велосиметр СМЕ-6111 с регистратором NDAS-RT [Алтай и Саяны...2022].

В настоящее время для регистрации сигналов акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот используются высокочастотные сейсмостанции с магнитоупругими [Беляков, Николаев, 1993] или пьезокерамическими [Рыкунов и др., 1978] сейсмоакустическими приемниками (геофонами). Верхняя граница рабочего диапазона таких приборов обычно не превышает 100 герц и только в некоторых образцах достигает 1 кГц. Результаты исследований эмиссии, проведенные в начале XXI века на о. Сахалин [Оценка параметров...2010] и Камчатке [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005], показали, что в звуковом диапазоне свыше 1 кГц регистрируются достаточно мощные геоакустические сигналы, в том числе связанные с подготовкой землетрясений. Результаты экспериментальных исследований распространения сигналов в закрытых внутренних водоемах [Купцов, 2005; Купцов и др., 2005; Борисов, Борисов, 2017] и на морском шельфе [Мониторинг акустического поля...2012; Наблюдения слабых...2012] показывают, что на небольших расстояниях искажение формы импульсов при распространении в волноводе, состоящем из водного слоя и приповерхностного слоя грунта, несущественно. Таким образом, изучение геоакустических сигналов гидрофонами, установленными у дна водоемов вполне возможно [Марапулец, 2015]. Однако опыта использования именно молекулярно-электронных гидрофонов для изучения сейсмоакустической эмиссии в России до сих пор не было.

В Сахалинской области до недавнего времени применение молекулярно-электронных сейсмометров ограничивалось созданием и реализацией сейсмической подсистемы в составе системы сейсмогидроакустической станции, разработанной совместно ИМГиГ ДВО РАН, Специальным конструкторским бюро средств автоматизации морских исследований (СКБ САМИ) ДВО РАН (Южно-Сахалинск), ИО РАН и ООО «ГеоПрибор» (Москва). Станция включала сейсмическую и гидроакустическую подсистемы, а также общую систему сбора данных. Сейсмическая подсистема была реализована на основе молекулярно-электронного трехкомпонентного сейсмометра СМЕ-4011. Станция разрабатывалась как передвижная полевая система, которую можно установить в местах ожидания сильных землетрясений с целью возможного оперативного прогноза [Землетрясение 17(18) августа...2007]. Авторами была предварительно составлена схема комбинированного прогноза землетрясений, основанная на долгосрочном прогнозе с определением области подготовки землетрясения. Далее, с целью получения оперативного прогноза, временная полевая станция была установлена в августе 2006

г. в замкнутом водоеме вблизи г. Холмск (р. Малка). Станция параллельно фиксировала сейсмические и гидроакустические сигналы в области ожидаемого землетрясения в 60 км от его будущего эпицентра. Прогноз реализовался 17(18) августа 2006 года землетрясением с $M_w=5.6$, впоследствии названным Горнозаводским.

Еще одним опытом использования молекулярно-электронных сейсмометров в Сахалинской области были исследования, проводимые в тестовом режиме сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН на о. Шикотан в период с 14.09.2008 по 26.09.2008 гг. Данные проведенного эксперимента нигде не опубликованы и сохранились лишь в архивах ИМГиГ ДВО РАН. В подвале производственного помещения гидрофизической обсерватории (ГФО) «Шикотан» на бетонном постаменте был установлен широкополосный сейсмометр СМЕ-4011 и короткопериодный сейсмометр СМЕ-3111, где зафиксирован температурный режим около $+16^{\circ}\text{C}$. Через несколько дней приборы были переставлены в сейсмометрическую штольню, описанную в [Первые результаты...2008], температура помещения которой составила $+9^{\circ}\text{C}$. За две недели тестирования приборами было зафиксировано 14 сейсмических событий, из них два землетрясения с $M=5.0$. Также приборами хорошо фиксировались атмосферные помехи (прохождение циклона), высокочастотные шумовые помехи на СМЕ-4011 из-за алюминиевого кабеля, а также шум проезжающих машин и работа экскаватора.

Отправной точкой по развертыванию представленных в диссертации геофизических наблюдений стал проект Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков нового типа». Этот проект был реализован ИМГиГ ДВО РАН совместно со специалистами СФ ФИЦ ЕГС РАН и МФТИ. В настоящей диссертационной работе показаны этапы развертывания сейсмической сети для непрерывного мониторинга и результаты исследований.

Выводы по главе 1

Представлены краткая история создания электрохимических преобразователей для датчиков движения нового поколения и обоснование возможности применения молекулярно-электронных приборов в современной сейсмологии.

Приведены основные сведения о технологии молекулярно-электронного переноса, физических принципах работы МЭП-датчиков и характеристиках уровня шумов приборов согласно модели Петерсона, преимуществах молекулярно-электронных устройств.

Дан аналитический обзор применения молекулярно-электронных сейсмических приборов в морских и наземных исследованиях в различных регионах России, из которого следует необходимость дальнейшего развития приборов этого типа и их широкого применения для решения различных фундаментальных и прикладных задач сейсмологии и геодинамики. Показаны примеры тестовых испытаний, проводившихся в Сахалинской области с использованием широкополосных и короткопериодных сейсмометров СМЕ-4011 и СМЕ-3111, разработанных в МФТИ на основе МЭП-датчиков, а также их применения для оперативного прогноза сильного землетрясения и реализации этого прогноза. Из обзора следует отсутствие в России практики использования молекулярно-электронных гидрофонов для изучения сейсмоакустической эмиссии. Хотя такие наблюдения имеют прямое отношение к оценке сейсмической опасности о. Сахалин, т.к. здесь в звуковом диапазоне свыше 1 кГц зарегистрированы достаточно мощные геоакустические сигналы, в том числе связанные с подготовкой землетрясений [Оценка параметров...2010].

Отсюда возникает необходимость дальнейшего развития «МЭП-направления» на о. Сахалин и Курильских островах и создания комплексной автоматизированной системы мониторинга с применением молекулярно-электронных сейсмометров и гидрофонов для анализа современной сейсмичности территории Сахалинской области.

Российские приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей успешно заменяют иностранные намного более дорогостоящие электромеханические и магнитомеханические приборы, отличаются рекордно низким энергопотреблением, долгим сроком службы, чрезвычайно просты в эксплуатации, сразу выходят на рабочий режим и не требуют специальных условий транспортировки.

ГЛАВА 2. СОЗДАНИЕ И АПРОБАЦИЯ МЕТОДИКИ УСТАНОВКИ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ¹

2.1. Установка аппаратной части эксперимента

¹ При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Закупин А.С., Дудченко И.П., **Богинская Н.В.**, Костылев Д.В., Каменев П.А. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г. // Вестник ДВО РАН. – 2018. – № 1. – С. 161-167. (ИФ РИНЦ: 0.347. 0.88 п.л., авторский вклад 30%).
2. Каменев П.А., Костылев Д.В., **Богинская Н.В.**, Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402. – DOI 10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402. (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.63 п.л., авторский вклад 30%).
3. Костылев Д.В., **Богинская Н.В.** Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир) // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 486-499. – DOI 10.30730/grtz.2020.4.4.486-499. (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.75 п.л., авторский вклад 50%).
4. Закупин А.С., Каменев П.А., Воронина Т.Е., **Богинская Н.В.** Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) // Геосистемы переходных зон. – 2018. Т. 2, № 1. – С. 52-56. DOI 10.30730/2541-8912.2018.2.1.052-056. (ИФ РИНЦ: 0.672. 0.63 п.л., авторский вклад 30%).
5. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., **Boginskaya N.V.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.. – 2019. – No. 324 (012009). – DOI 10.1088/1755-1315/324/1/012009. (0.88 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.199).
6. Закупин А.С., **Богинская Н.В.**, Костылев Д.В. Сейсмический процесс на п-ове Крильон (о-в Сахалин) после землетрясения 23 апреля 2017 г // Литосфера. – 2021. – Т. 21, № 5. – С. 734-742. – DOI 10.24930/1681-9004-2021-21-5-734-742. (1.13 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.174).
7. Закупин А.С., Богомолов Л.М., **Богинская Н.В.** Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 66-78. – DOI 10.21455/GPB2020.1-4. (1.63 п.л., вклад автора 50%, ИФ РИНЦ – 0.883). Zakupin A.S., Bogomolov L.M., **Boginskaya N.V.** Unload Response Ratio and Self-Developing Processes Methods of Analyzing Seismic Sequences to Predict Earthquakes in Sakhalin // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2020. – Vol. 56, No. 7. – P. 693-705. – DOI 10.1134/S0001433820070105. (1.63 п.л., вклад автора 50%, ИФ SJR – 0.247).
8. **Boginskaya N.V.**, Kostylev D.V. Change in the level of microseismic noise during the COVID-19 pandemic in the Russian Far East // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – No. 179. – P. 4207–4219. – DOI 10.1007/s00024-022-03019-7. (1.63 п.л., вклад автора 75%, импакт-фактор JCI – 0.570).
9. Закупин А.С., Левин Ю.Н., **Богинская Н.В.**, Жердева О.А. Развитие метода среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Mw = 5.8, 14 августа 2016 Г.) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 11. – С. 1904-1911. – DOI 10.15372/GiG20181112. (1 п.л., вклад автора 40%, ИФ РИНЦ – 1.553). Zakupin A.S., **Boginskaya N.V.**, Zherdeva O.A., Levin Y.N. Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor (Mw = 5.8) earthquake on Sakhalin // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – Vol. 59, No. 11. – P. 1526-1532. – DOI 10.1016/j.rgg.2018.10.012. (0.88 п.л., вклад автора 40%, ИФ SJR – 0.350).
10. 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, № S2. – С. 1-6. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2s-0634. (0.75 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.293).
11. Богомолов Л.М., Костылев Д.В., **Костылева Н.В.**, Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С. Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электророндированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 115-131. – DOI

Для проведения эксперимента по тестированию молекулярно-электронных устройств, как серийно выпускаемых, так и экспериментальных, в рамках проекта РФФИ № 18-07-00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа», выполняемого сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН, СФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с МФТИ и ООО «Р-сенсор», компанией ООО «Р-сенсор» было предоставлено следующее оборудование: молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 с регистраторами NDAS-8226 и три прототипа молекулярно-электронных гидрофонов с аналогичными регистраторами. Для о. Сахалин и Курильских островов это, фактически, первый продолжительный опыт использования подобного оборудования в различных условиях с подробным анализом результатов. Автором, совместно с участниками эксперимента, были разработаны и апробированы различные инженерные решения по установке оборудования, а также комбинированию данных от различных геофизических приборов.

Для проверки работы указанного оборудования в разных условиях были выбраны различные пункты в Сахалинской области. Выбор места размещения сейсмического оборудования — это всегда компромисс между наиболее благоприятными условиями для регистрации и реальными условиями для установки станции. Большая часть населения Сахалинской области проживает на юге острова и поэтому вопросы геофизического мониторинга (в том числе сейсмического) здесь выходят на первое место. К настоящему времени локальная сеть сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН на юге о. Сахалин включает в себя 10 автономных полевых пунктов и, в принципе, этого достаточно для мониторинга сейсмической обстановки в южной части острова [Оценка сейсмичности южного...2018]. Однако большая часть происходящих землетрясений располагается в центральной части юга острова, в области Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского) разлома. При этом южная часть данного разлома слабо оснащена пунктами сейсмического мониторинга.

С учетом данного обстоятельства, а также данных по среднесрочному прогнозу сейсмической опасности на территории южной части о. Сахалин [Оценка сейсмической...2018; Закупин и др., 2020], в начале 2018 года в селе Петропавловское начато развертывание исследовательского полигона для комплексных геофизических исследований (концентрация подпочвенного радона, сейсмический шум, гидроакустические измерения, естественное

электромагнитное поле и др.), который должен был включать оборудование нового типа - широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 и прототип молекулярно-электронного гидрофона.

Село Петропавловское расположено в южной части Анивского района Сахалинской области, который приурочен к юго-западной части Сусунайской низменности. Населенный пункт Петропавловское (рисунок 2.1) находится в бассейне нижнего течения реки Лютоги на ее левобережной стороне [Хоменко, 2003]. Размещение полигона в селе Петропавловское позволило выполнить все необходимые технические условия для оптимальной регистрации геофизических параметров и организации удаленного доступа к оборудованию через сеть Интернет.

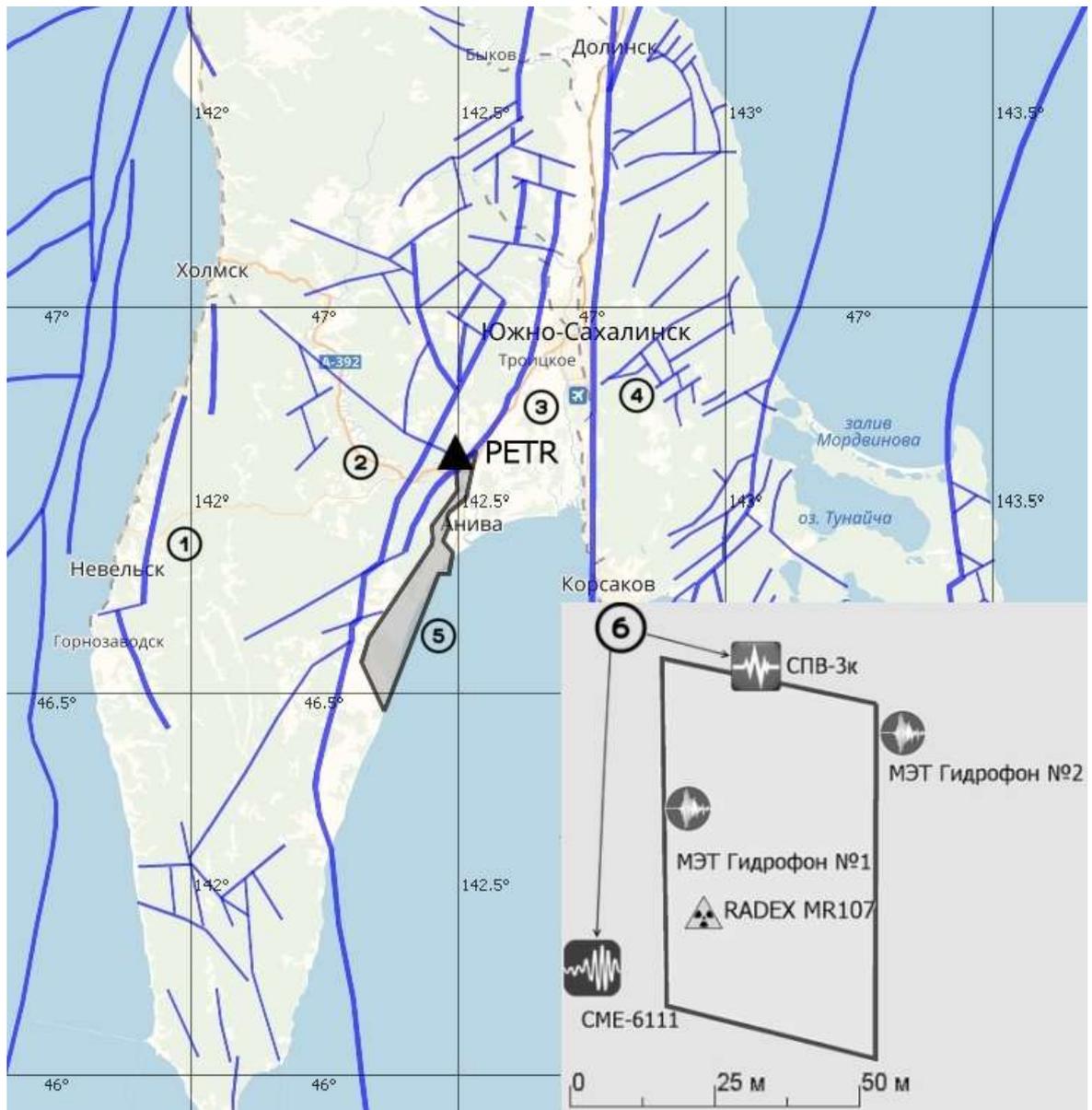


Рисунок 2.1. Расположение полигона Петропавловское относительно активных разломов Южного Сахалина: 1-4 - Активные разломы [Рождественский, Сапрыгин, 1999]: 1 - Западно-

Сахалинский, 2 - Центрально-Сахалинский, 3 - Апрельский, 4 — Сусунайский; 5 - Анивское газовое месторождение; 6 - Оборудование полигона, использованное в данном исследовании

Помимо геофизического полигона ИМГиГ ДВО РАН в селе Петропавловское [Kostylev et al., 2019] в качестве еще одного места установки гидрофона, был выбран пункт сейсмического мониторинга в составе локальной сети юга о. Сахалин СФ ФИЦ ЕГС РАН в урочище Загорское Долинского района [Оценка сейсмичности южного...2018; Оценка сейсмической...2018; Закупин и др., 2020]. Урочище Загорское является территорией ныне заброшенного (после закрытия шахты в 90-х годах) одноименного села. Место установки отличается крайне низким уровнем техногенных помех - в настоящее время здесь лишь три дачных участка на несколько километров, дорога является тупиковой, отсутствует электричество и какая-либо связь. Место установки молекулярно-электронного гидрофона находится в одном из самых сейсмически активных участков Центрально-Сахалинского разлома (рисунок 2.2).

Установка третьего, разработанного в рамках проекта, гидрофона была выполнена на одном из островов Южно-Курильской гряды – острове Кунашир.

В административном центре острова Кунашир, в поселке городского типа Южно-Курильск, расположена сейсмическая станция «Южно-Курильск» СФ ФИЦ ЕГС РАН, на территории которой, к тому моменту, помимо собственного сейсмического оборудования [Мишаткин и др., 2011], уже располагалось оборудование различных научных институтов. Это оборудование предназначено для ОНЧ (Очень низких частот) мониторинга [Meteorological effects...2014], GNSS наблюдений (Global Navigation Satellite System) [Единая сеть...2020], скважных наблюдений за уровнем грунтовых вод [О природе температурных...2012], радонового мониторинга [Бирюлин и др., 2019]. Установка сейсмоакустических датчиков расширила возможности полигона комплексных геофизических исследований. Наличие необходимой инфраструктуры: скважина, электропитание, каналы передачи данных, круглосуточная защищенность способствовало выбору именно этого пункта для размещения гидрофона (рисунок 2.2).

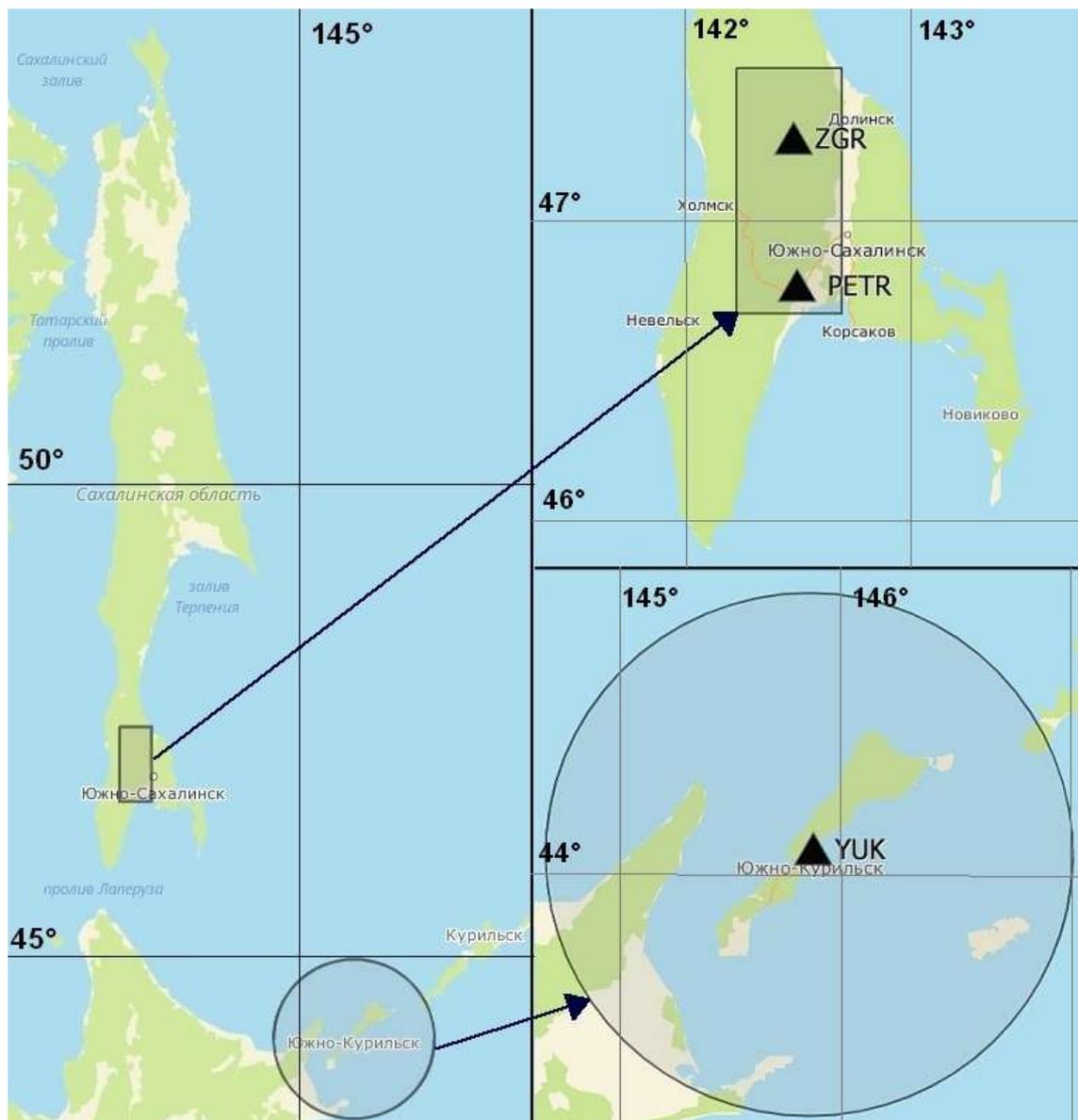


Рисунок 2.2. Районы сейсмоакустических исследований и места размещения пунктов в с. Петропавловское, в урочище Загорское и на о. Кунашир

2.1.1. Монтаж и запуск сейсмической аппаратуры

Учитывая, что на полигоне Петропавловское ранее не проводилось никаких сейсмических наблюдений, 26 апреля 2018 года для определения уровня шумов, а также корректного определения станционных поправок, было проведено тестирование площадки полигона для выбора мест установки сейсмических пунктов. Для этого, в разных местах (на фундаменте в подвале жилого дома и на открытой площадке) полигона, производились

двухчасовые записи сейсмического шума с целью определения уровня различных естественных и антропогенных помех (акселерометр CMG-5TDE со встроенным регистратором фирмы Guralp (Великобритания). Датчик работает по принципу электромеханической обратной связи и имеет встроенный 24-разрядный цифровой преобразователь с низким энергопотреблением. Встроенный процессор цифровой обработки сигналов, обеспечивает параллельное формирование нескольких потоков данных с задаваемой частотой опроса каналов, предусмотрено формирование до 6 потоков для каждой компоненты с частотой от 1 до 1000 отсчетов в секунду. Акселерометр не требует регулировки установки по уровню. Для начала регистрации, достаточно только подать напряжение питания 10-36 В постоянного тока. Акселерометр CMG-5TDE внесен в реестр средств измерений [Мишаткин и др., 2011; Костылев, Богинская, 2022б]).

Для расчета спектральной плотности сейсмических шумов использовался программный комплекс DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [Дрознин, Дрознина, 2010]. Оценка уровня шумов проведена относительно моделей Петерсона (модели низкого и высокого уровня шума), являющихся эталонами для оценки уровня сейсмического шума в окрестностях функционирования сейсмической станции [Peterson, 1993].

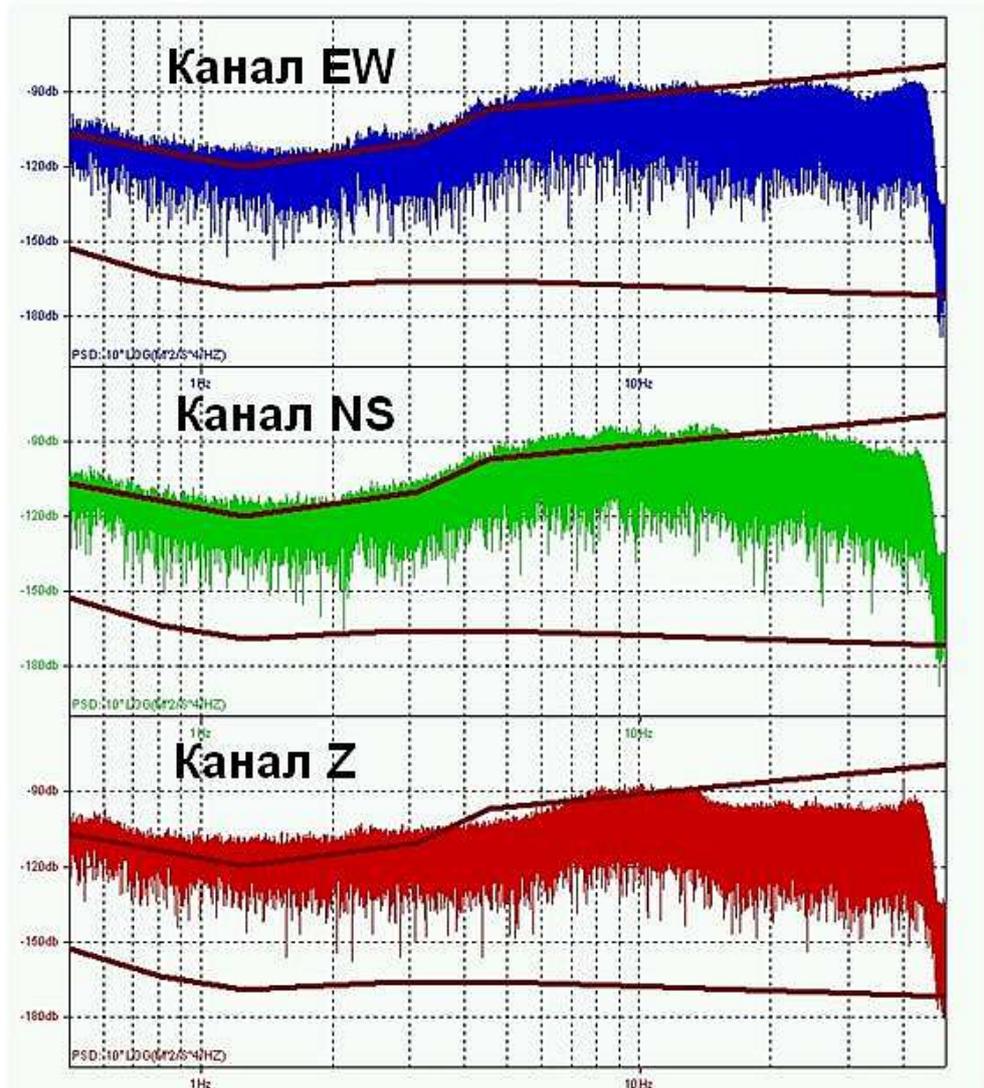


Рисунок 2.3. Оценка спектральной плотности мощности сигнала CMG-5TDE: спектры E, N и Z компонент с NLNM и NHNM моделями уровня шума

Как видно из рисунка 2.3, в диапазоне частот, в котором регистрируется преобладающее большинство землетрясений с $M \geq 3.5$ (1 - 10 Гц), все кривые практически идентичны и лишь незначительно превышают верхнюю границу модели Петерсона, что объясняется неидеальными («полевыми») условиями установки при тестировании (прежде всего ветровые помехи для горизонтальных каналов). Кроме того, тестирование проводилось в дневное время, когда на частотах более 2 Гц техногенные помехи в сейсмическом шуме выше, чем в ночное время. В целом, тестирование показало, что уровень шумов, даже в «полевом» варианте установки, находится практически в пределах допустимых значений и что размещение сейсмических станций на выбранных площадках полигона вполне приемлемо [Комплексный сейсмический...2020].

Для изучения строения верхней части литологического разреза и детального уточнения состава и свойств почв полигона в местах размещения оборудования были проведены совместно с КФ ФИЦ ЕГС РАН сейсморазведочные работы и эманиционная съемка. Полевые сейсморазведочные работы методом преломленных волн (МПВ) были выполнены 10.07.2018 г. по двум профилям. При проведении сейсморазведочных работ была использована цифровая инженерная сейсмостанция «Лакколит X-3М» в комплекте с сейсмической косой СМ–20 и сейсмоприемниками GS – 20 DX [Первые результаты мониторинга...2018]. Полученные сейсмические материалы для расчетов по методу сейсмических жесткостей были обработаны с помощью программы ZondST2D, которая предназначена для двумерной обработки и интерпретации данных сейсмической томографии на преломленных волнах [Каминский и др., 2016]. Эта система позволяет осуществить весь процесс обработки данных: чтение и визуализацию сейсмограмм, фильтрацию и различного рода усиление трасс, пикировку первых вступлений, построение и редактирование годографов, определение скоростей упругих волн и построение преломляющих границ. В ходе исследований предполагалось, что разрез полностью глинистый, но на профиле 1 коэффициент Пуассона меньше 0.4, что, возможно, соответствует наличию суглинков (рисунок 2.4). Результаты детализации геологии верхнего слоя необходимы для адекватных оценок стационарных поправок (в дополнении к анализу записей P , S и кода волн), а также геохимических исследований, которые также предусмотрены на полигоне.

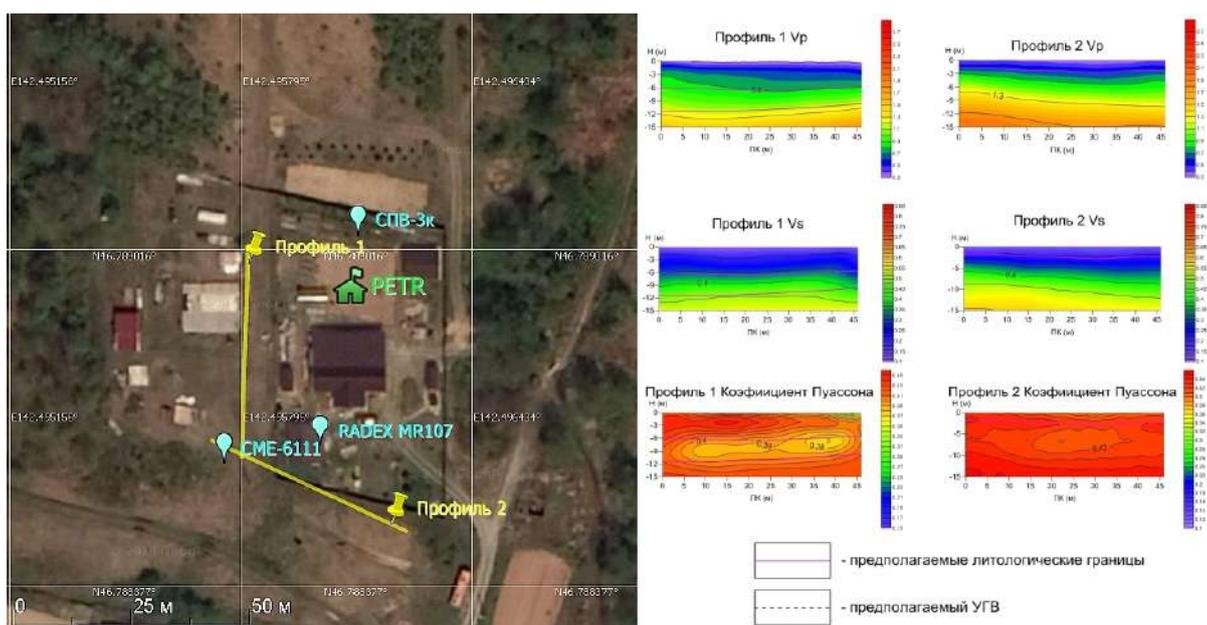


Рисунок 2.4. Расположение профилей (слева) и результаты сейсморазведочных работ на профилях в местах установки сейсмических станций (справа)

Для того, чтобы в одном пункте наблюдений была возможность регистрации мелкофокусных (локальных) и более сильных землетрясений, а также возможность проведения анализа сейсмичности, летом 2018 года была установлена сеть станций сейсмического мониторинга на экспериментальном полигоне Петропавловское. 10 июня 2018 года началась регистрация данных после установки молекулярно-электронного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 с регистратором NDAS-8226, а 2 июля того же года была установлена дополнительная станция на базе короткопериодного сейсмоприемника СПВ-3к и регистратора Дельта 03. По результатам оценки шумов и сейсморазведки были выбраны места для установки молекулярно-электронных сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона, сейсмометра СПВ-3к, для возможности параллельной регистрации сейсмических событий ранее проверенным и известным оборудованием (рисунок 2.5). Также полигон был оборудован многоэлектродной системой геоэлектрических измерений [Lyubushin et.al, 2016] и регистратором уровня почвенного радона [Первые результаты мониторинга...2018; Отклик в поле...2020].



Рисунок 2.5. Установка СМЕ-6111 в сейсмокамере (сверху) и СПВ-3к на бетонном постаменте (снизу)

Согласно методу, разработанному в СФ ФИЦ ЕГС РАН [Костылев, 2021], сейсмометр СМЕ-6111 устанавливался в сейсмокамере, которая представляет собой заглублённый в грунт герметизированный модуль с бетонным основанием и защитой от температурных перепадов. Для сейсмометра СПВ-3к был выбран так называемый «поверхностный» метод установки с размещением сейсмометра на бетонном постаменте над поверхностью грунта. Схема установки приборов показана на рисунке 2.6.

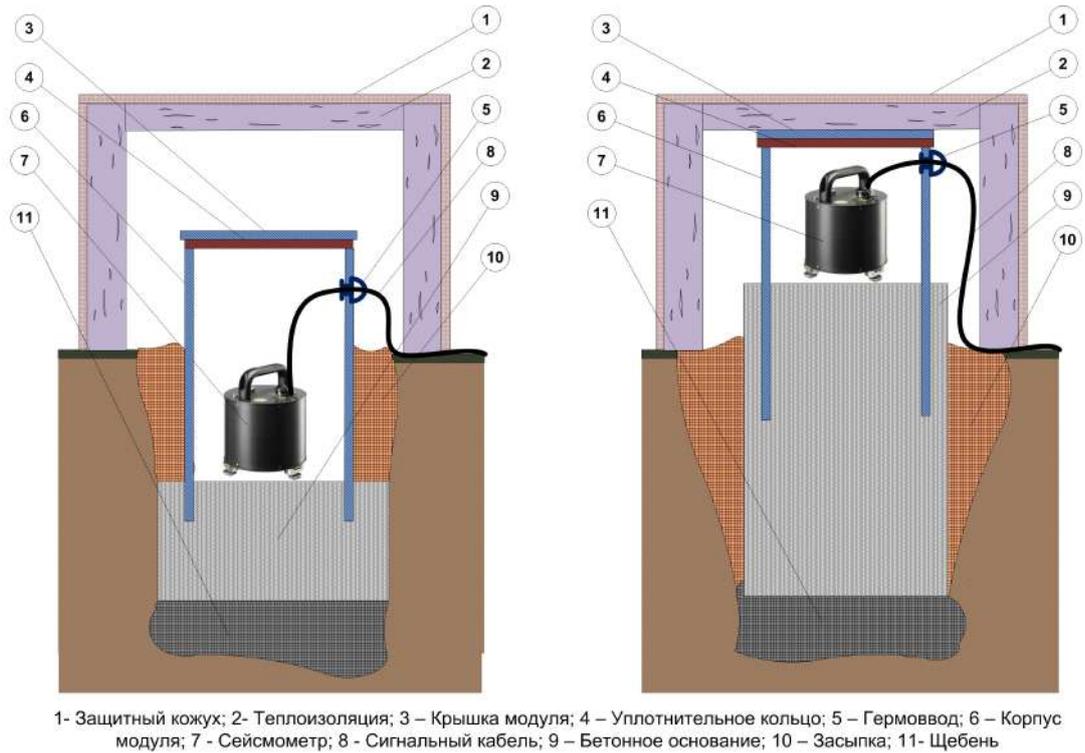


Рисунок 2.6. Схемы установки молекулярного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 (слева) и короткопериодного сейсмометра СПВ-3к (справа) на полигоне Петропавловское [Костылев, 2021]

Трехкомпонентный молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр модели СМЕ-6111 предназначен для регистрации колебаний земной поверхности в трех ортогональных направлениях. Прибор в основном применяется на стационарных сейсмических станциях, но может быть использован и для полевых измерений. Чувствительные элементы молекулярно-электронного сейсмометра чрезвычайно прочны и поэтому не снабжены арретирами и другими специальными устройствами для переноски, упаковки, распаковки и транспортировки. Сейсмометр СМЕ-6111 не нуждается в центрировании массы, поэтому не имеет выхода сенсора положения массы и входного сигнала центрирования массы. Сейсмометр не требует тщательного выравнивания положения при установке и полностью функционален при углах наклона до 15° . Внутри сейсмометра находятся три идентичных высокочувствительных молекулярно-электронных датчика-преобразователя, расположенных симметрично под углом 120° в горизонтальной области и наклоненных под углом 45° относительно вертикали. Каждый преобразователь охвачен глубокой силовой отрицательной обратной связью, которая может служить в качестве калибровочной катушки. Выходные сигналы, пропорциональные скоростям движения земной поверхности в трех направлениях:

Вертикальном (V), на Север (N) и на Восток (E), формируются путем электронного суммирования сигналов с преобразователей с соответствующими коэффициентами.

При внешнем механическом воздействии вследствие сейсмических колебаний земной поверхности рабочая жидкость внутри преобразователей (концентрированный раствор электролита) перемещается между электродами преобразователя, подводя к ним или удаляя от них ионы растворенного вещества. Конвективный поток заряженных ионов вызывает электрический отклик на электродах, который усиливается и преобразуется электронным блоком в электрический сигнал (напряжение) на выходе, пропорциональный скорости внешнего воздействия (движения земной поверхности). СМЕ-6111 – высокоточный широкополосный сейсмометр, характеризующийся низким собственным шумом, высокой линейностью и широким динамическим диапазоном. [Агафонов и др., 2009; 2013].

В качестве регистратора сигналов использовался NDAS-8226 – это 24-разрядная сейсмическая система сбора данных, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических данных в полевых условиях. В основе модели NDAS-8226 – 6-канальный 24-битный АЦП (аналогово-цифровой преобразователь). Данный преобразователь обеспечивает низкие шумы и малое энергопотребление. Для передачи данных и конфигурирования системы используются USB и Wi-Fi соединения. Объем внутренней памяти размером 32 Гб позволяет вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/GLONASS. Это позволяет обеспечить точность синхронизации выше, чем стандартная погрешность по времени в 1 мкс.

Аппаратурная часть сети представлена также наземной цифровой сейсмической станцией, которая укомплектована 3-х компонентным короткопериодным сейсмоприемником СПВ-3к. Принцип действия сейсмоприемника основан на преобразовании скорости смещения подвижного чувствительного элемента (массы) механического маятника с одной степенью свободы, возникающего под действием сил инерции при ускоренном движении самого основания, в пропорциональный электрический сигнал. При этом дополнительно на движение массы через электродинамический преобразователь воздействует сигнал компенсирующей обратной связи [Малогобаритный сейсмоприемник...2013]. Сейсмоприемник СПВ-3к хорошо зарекомендовал себя для размещения в полевых условиях, возможности которого детально изучены и описаны в работах автора [Изучение сейсмического режима...2018; Костылев, Богинская, 2022б]

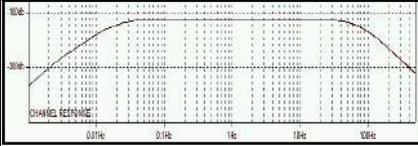
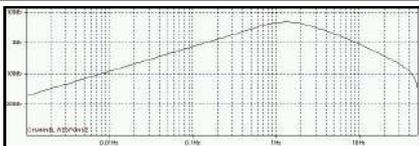
Сейсмоприемник состоит из 3-х электронно-механических измерительных преобразователей и соответствующих им электронных цепей, выполненных в виде печатного

узла и формирующих обратные связи для обеспечения частотной характеристики, калибровочные сигналы для контроля работоспособности прибора, а так же стабилизирующие напряжения питания всей схемы относительно внешнего источника постоянного тока. Все компоненты заключены в герметичный металлический корпус. Корпус обеспечен регулируемыми упорами для правильной установки в местах эксплуатации и оснащен герметическим вводом кабельной линии длиной до 5 м [Аппаратурно-методический...2013; Малогабаритный сейсмоприемник...2013]. В качестве цифрового регистратора к СПВ-3к использовалась сейсмическая станция Дельта 03 (ООО «Логические Системы», Россия).

Как показано в работе автора [Костылев, Богинская, 2022б], сочетание широкополосного оборудования и станций сильных движений позволяет исследовать геофизические процессы в широком частотном диапазоне, а дополнение сети короткопериодными сейсмическими станциями значительно повышает регистрационные возможности комплекса оборудования.

Таблица 2.1.

Характеристики и основные параметры станций

	Широкополосная сейсмическая станция	Короткопериодная сейсмическая станция
Дата установки	10.06.2018 г.	02.07.2018 г.
Координаты	46.78861N 142.49572E	46.78907N 142.49609E
Сейсмометр	СМЕ-6111 s/n 001302	СПВ-3К s/n 156
Регистратор	NDAS-8226 s/n 00403	Дельта-03 s/n 3024
Диапазон рабочих частот, Гц	0.033 - 40	0.5 - 65
График АЧХ		
Чувствительность сейсмометра, В / м/с	2000	500
Количество каналов	6	3
Частота дискретизации, Гц	100	100
Тип накопителя, объем	Micro SD Flash 32Гб	PCMCIA Flash-диск 16Гб
Интерфейс	Wi-Fi, USB	Ethernet, RS232
Динамический диапазон	128 Дб	120 Дб

сейсмометра на 1 Гц		
Диапазон рабочих температур сейсмометра	-12... +55 °С	-30... +50 °С
Электропитание	Аккумуляторная батарея (12V; 5 Ah) + Зарядное устройство	Аккумуляторная батарея (12V; 65 Ah) + Зарядное устройство
Потребляемая мощность, Вт	2.4	3

Обе станции работали в режиме непрерывной регистрации (шаг дискретизации 100 отсчетов в секунду). Синхронизация времени происходила при помощи встроенных GPS приемников [Аппаратурно-методический...2013; Малогабаритный сейсмоприемник...2013]. Характеристики и основные параметры станций приведены в Таблице 2.1.

2.1.2. Пункты сейсмоакустических наблюдений

Для проведения сейсмоакустических наблюдений компанией ООО «Р-сенсорс» в рамках выполнения совместного проекта было изготовлено три экспериментальных образца молекулярно-электронных гидрофонов [Устройство и принцип...2018; Frequency response... 2018].

Для монтажа гидрофона на полигоне Петропавловское была построена специальная скважина глубиной 3.5 метра. Скважина обсажена перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Поскольку уровень грунтовых вод на полигоне достаточно высокий, пробуренная скважина постоянно обводняется, что создает необходимые условия для работы гидрофона (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7. Скважина для установки гидрофона на полигоне Петропавловское

При монтаже гидрофона работоспособность оборудования была проверена с помощью генерации искусственных колебаний почвы вблизи скважины. Записанный при этом сигнал гидрофона представлен на рисунке 2.8.

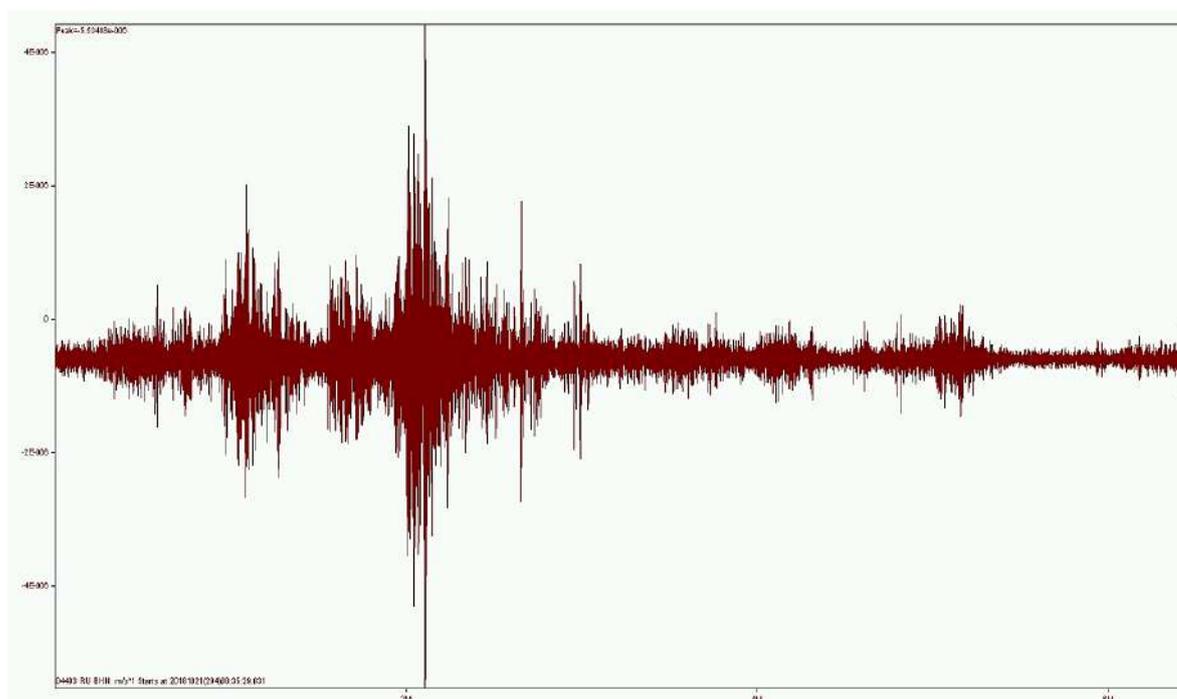


Рисунок 2.8. Тестовый сигнал молекулярно-электронного гидрофона

Необходимо отметить, что непрерывная запись гидроакустического сигнала гидрофоном подобного типа производится на о. Сахалин впервые. Ранее, сотрудниками ИМГиГ ДВО РАН исследования проводились только с использованием молекулярно-электронного сейсмометра и лишь в сеансовом режиме [Землетрясение 17(18) августа...2007].

В пункте, расположенном в урочище Загорское, установка гидрофона производилась в открытом водоеме (пруд размером 3×9 м) на глубине 0.5 м (рисунок 2.9).



Рисунок 2.9. Место установки молекулярно-электронного гидрофона в урочище Загорское

Регистратор NDAS-8226 был размещен в отдельной постройке (рисунок 2.9). Электропитание осуществлялось герметизированным свинцово-кислотным аккумулятором Delta DT 1265 напряжением 12В и емкостью 65Ач. Регистратор и аккумулятор были размещены в закрытом металлическом ящике. Обслуживание оборудования (замена

аккумулятора и снятие данных) производилось один раз в три недели. Работа комплекта продолжалась в летне-осенний период (до ноября 2020 года).

На о. Кунашир местом установки гидрофона, как было указано выше, служил геодинамический полигон на базе сейсмической станции «Южно-Курильск» СФ ФИЦ ЕГС РАН. На территории полигона расположена наблюдательная скважина гидрогеодеформационного мониторинга № 2722 обособленного структурного подразделения «СахГРЭ» АО «Дальневосточное ПГО» глубиной 303.3 м, обсаженная на всю глубину [Козлов, 2019; Комплексные геотермические...2009; О природе температурных...2012]. Гидрофон размещен в этой скважине на глубине 25 м в обсадной колонне диаметром 245 мм.



Рисунок 2.10. Место установки молекулярно-электронного гидрофона на о. Кунашир

Полный перечень характеристик пунктов наблюдений приведен в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Характеристики пунктов сейсмоакустических наблюдений

	«Петропавловское» (PETR)	«Южно-Курильск» (YUK)	«Загорское» (ZGR)
Номер гидрофона	№769	№770	№891
Координаты места установки	46.789° N; 142.496° E	44.035° N; 145.861° E	47.305° N; 142.489° E
Глубина установки, м	3.5	25	0.5
Дата установки	24.10.2018 г.	27.04.2019 г.	11.06.2020 г.
Регистратор сейсмических	NDAS-8226 (s/n 4403)	NDAS-8226 (s/n 4404)	NDAS-8226 (s/n 4410)

сигналов			
Система электропитания	Аккумулятор В.В.Battery BP 5-12 (12V; 5 Ah). Зарядное устройство Сонар У3205.01	Аккумулятор CSB GP 1272 (12V, 7Ah). Зарядное устройство Сонар У3205.01	Аккумулятор Delta DT 1265 (12V; 65 Ah)

Предоставленные для проведения сейсмоакустических наблюдений три экспериментальных образца молекулярно-электронных гидрофонов различаются размерами ячейки: 6×6 мм, 3×3 мм и 2×2 мм, а также жесткостью мембран (таблица 2.3). Для сбора данных на всех пунктах наблюдений использован регистратор сейсмических сигналов NDAS-8226.

Таблица 2.3.

Сводная таблица с характеристиками экспериментальных образцов*

Характеристика	Номер образца		
	769	770	891
Площадь преобразующей электродной ячейки, мм	6 × 6	3 × 3	2 × 2
Жесткость мембраны, Па/м ³	34.6 × 10 ¹⁰	13.1 × 10 ¹⁰	-
Полоса пропускания, Гц	1–200	1–300	1–300
Чувствительность, В/Па	0.0020	0.0020	0.0028
Собственный шум, на 1 Гц (по отношению к 1 мкПа/√Гц)	65 дБ	65 дБ	50 дБ
Глубина погружения	до 10 м	до 10 м	до 30 м

*Согласно технической документации производителя.

Примечание. Габариты всех гидрофонов: диаметр 33 мм, высота 47 мм; диапазон рабочих температур: –40...+65 °С.

В гидрофонах №№ 769 и 770 изменение чувствительности происходит главным образом благодаря увеличению жесткости системы из-за постепенного сжатия воздушного пузыря, заключенного при атмосферном давлении в корпусе прибора во время его изготовления.

Гидрофон № 891 имеет принципиально другую конструкцию – расширительный объем заполнен силиконовой жидкостью, которая сжимается при возникновении давления, что позволяет сохранять статическое давление и обеспечивать работоспособность до 30 м. При этом жесткость мембраны не оказывает влияния на параметры гидрофона, поскольку значение объемного модуля упругости используемой силиконовой жидкости (полиметилсилоксана) выше значения жесткости мембраны.

Для изготовленных образцов разработчик провел экспериментальную лабораторную проверку амплитудно-частотных характеристик и предоставил калибровочные данные по каждому образцу (рисунок 2.11). Из представленных данных видно, что в согласии с теоретическими моделями образец молекулярно-электронного гидрофона с узлом размером 2×2 мм в области высоких и низких частот имеет наименьший спад амплитудно-частотной характеристики.

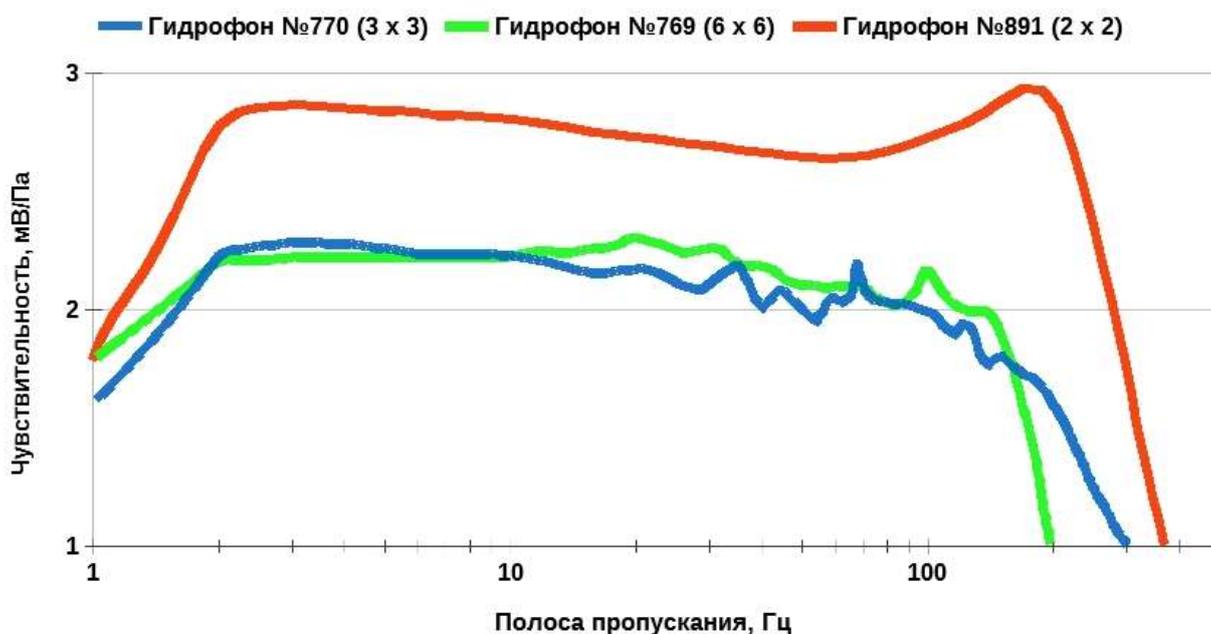


Рисунок 2.11. Амплитудно-частотные характеристики образцов молекулярно-электронных гидрофонов с различным размером ячейки

Итоговые схемы оснащения полигонов Петропавловское и Южно-Курильск, а также пункта Загорское с выделением в их составе оборудования (в красных рамках), установленного в результате проведенных работ, представлены на рисунках 2.12-2.14. Из рисунков следует, что техническое оснащение и потенциальные «измерительные» характеристики пунктов наблюдения и полигона значительно улучшены.

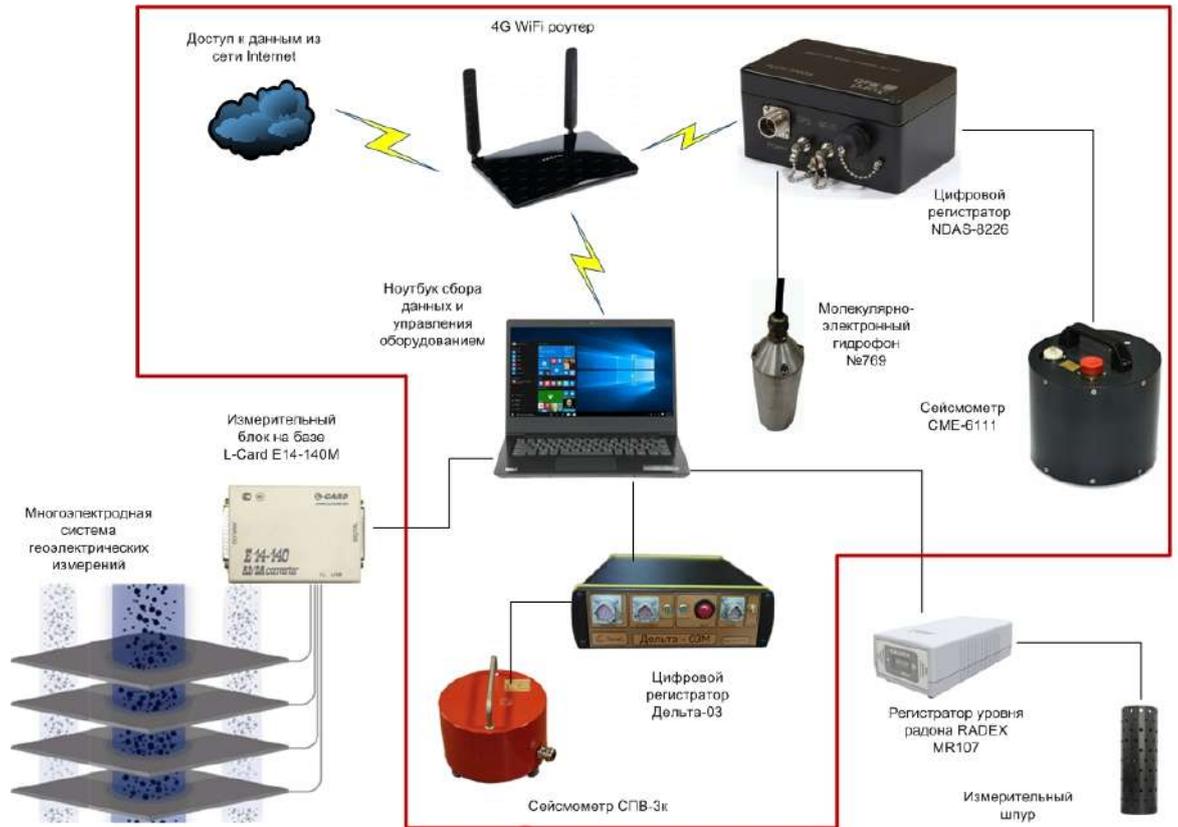


Рисунок 2.12. Оснащение комплексного геофизического полигона Петропавловское

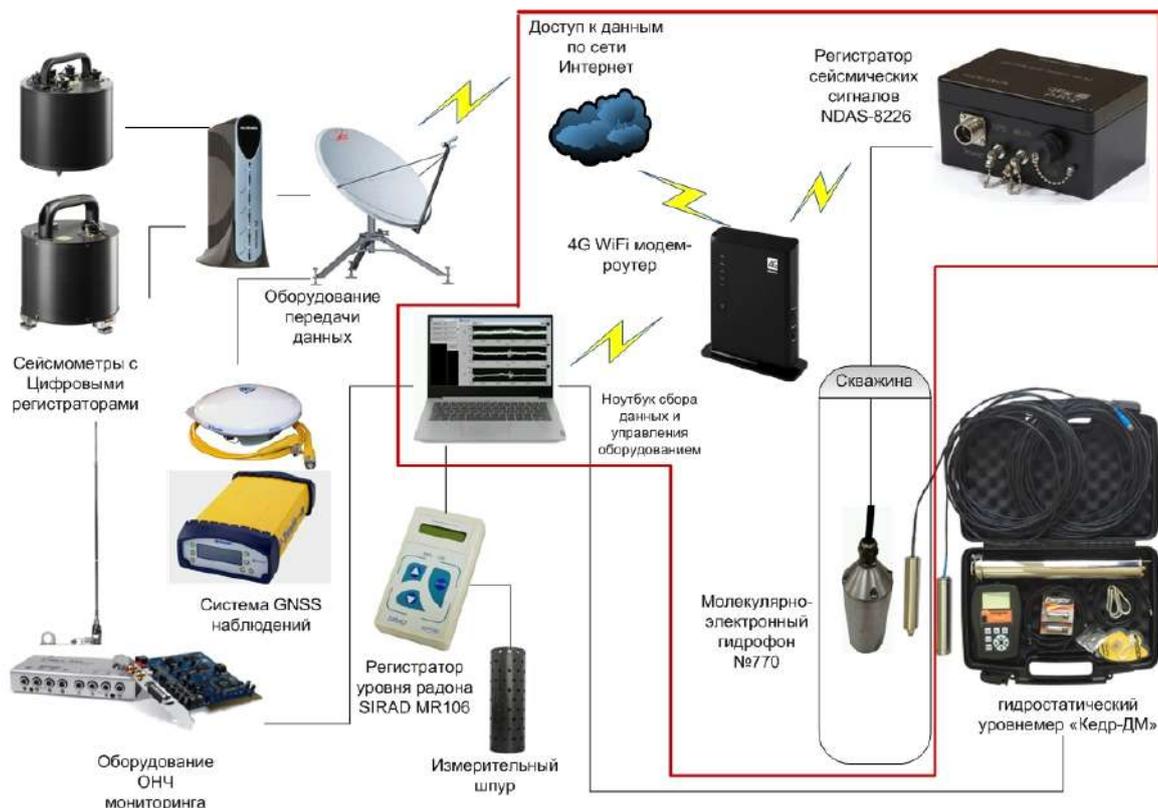


Рисунок 2.13. Оснащение комплексного геофизического полигона Южно-Курильск

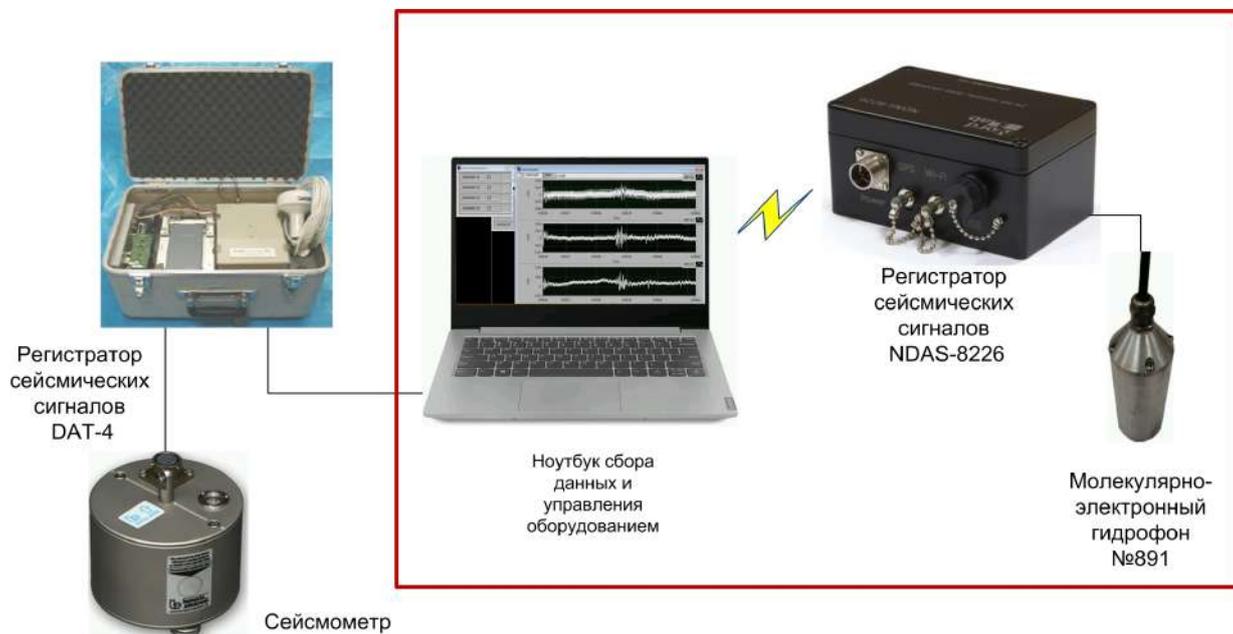


Рисунок 2.14. Оснащение комплексного геофизического пункта Загорское

В целом, преобразованные пункты наблюдений в совокупности приобрели черты современной комплексной автоматизированной системы мониторинга сейсмичности о. Сахалин и Курильских островов с применением широкополосных молекулярно-электронных

датчиков, оборудованной с учётом локальных географических и геологических особенностей региона.

2.2. Настройка параметров работы оборудования

Настройка параметров работы оборудования производилась с использованием приложения NDAS, предназначенного для управления регистраторами серии NDAS-8226 [<https://r-sensors.ru/upload/iblock/6d2/6d2acdce109f17c862ffa79e928418c6.pdf>]. Регистратор сейсмических сигналов NDAS-8226 предназначен для записи в цифровой форме сейсмических сигналов естественного фона Земли при проведении исследований с использованием сейсмоприемников с аналоговым выходом. Регистратор может также применяться для записи сейсмических сигналов при проведении сейсморазведки, сейсмического микрорайонирования, а также контроля состояния конструкций, дамб, плотин и высотных сооружений с использованием аналоговых датчиков ускорения (акселерометров) или скорости (велосиметров-геофонов). Регистратор содержит цепи для питания сейсмоприемников и выдачи тестовых сигналов для проверки их работоспособности. Управление регистрацией сигналов может производиться оператором в ручном режиме либо по заранее заданному расписанию. Для работы по расписанию используются встроенные часы точного времени на основе спутниковых систем GPS или GLONASS. Регистрация производится на встроенный энергонезависимый носитель (SD-карта). Параллельно с регистрацией возможен просмотр сейсмограмм посредством проводного или беспроводного соединения. Сохраненные данные снабжаются метками точного времени и координат для дальнейшей синхронизации при обработке.

Приложение позволяет производить начальное конфигурирование устройства до начала работы, контроль состояния системы, запись сейсмических сигналов на встроенный носитель – SD-карту, просмотр записываемой информации в реальном времени. Перед началом работы молекулярно-электронных устройств в режиме регистрации была проведена настройка регистраторов NDAS-8226.

Настройку регистраторов возможно производить в двух режимах — с использованием приложения для Windows NDAS или веб-интерфейса NDAS Web [<https://r-sensors.ru/upload/iblock/841/8413ff309962f92f587c41656ddf048c.pdf>].

Приложение NDAS позволяет производить:

- начальное конфигурирование устройства до начала работы
- выбор режима работы

- задание параметров
- контроль состояния системы
- запись сейсмических сигналов на встроенный носитель – SD-карту
- просмотр записываемой информации в реальном времени
- выдачу тестовых сигналов на подключенные устройства.

Веб-интерфейс NDAS Basic Web UI предназначен для конфигурирования регистратора NDAS на смартфонах и планшетах. Доступ к веб-интерфейсу может быть осуществлен через браузер любого устройства, подключенного к той же сети, к которой подключено само устройство. Веб-интерфейс устройства позволяет производить те же операции, что и программа NDAS. Практический опыт показал, что использование для конфигурирования веб-интерфейса предпочтительнее. Ниже приведены примеры настройки регистратора для полигона Петропавловское, где регистратор управляет работой сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона (рисунок 2.15). Страница статуса регистратора отображает основные показатели устройства. Страница автоматически обновляется один раз в две секунды.

Device ND004403 status	Шапка интерфейса
ADC running	
GPS state: fix ok, time synced	(1) Состояние синхронизации времени и GPS
Schedule mode: start after time sync	(2) Текущий режим планировщика
Free memory: 65 %	(3) Объем свободной памяти
Wi-Fi strength: -	(4) Уровень сигнала Wi-Fi
Calibration signal: disabled	(5) Режим калибровки
Card reader mode: disabled	(6) Режим чтения данных (кард-ридера)
Battery voltage: 13.796 V	(7) Напряжение питания
Power to sensors: enabled	(8) Питание сенсоров (если поддерживается)
Temperature: 22.2°C	(9) Показания температурного датчика
<u>GPS details:</u>	
number of satellites in view: 17	Количество спутников GPS в поле зрения
receiver time: 2018-10-24T00:22:54	Время GPS приемнике (UTC)
height: 36 m	Высота над уровнем моря
coordinates: 46.788608, 142.495744	Координаты
System up time: 0 days 00:13:35	Время работы системы с момента последней перезагрузки

Рисунок 2.15. Страница статуса регистратора NDAS станции Петропавловское

Приведенный рисунок иллюстрирует, в том числе, качество приема GPS данных для синхронизации времени и показывает, что выбран оптимальный для автономной работы режим «start after time sync», когда регистрация начинается автоматически после выполнения синхронизации времени.

На странице просмотра сигнала отображаются поканальные графики сигналов, для визуального контроля работы сейсмометра (рисунок 2.16).

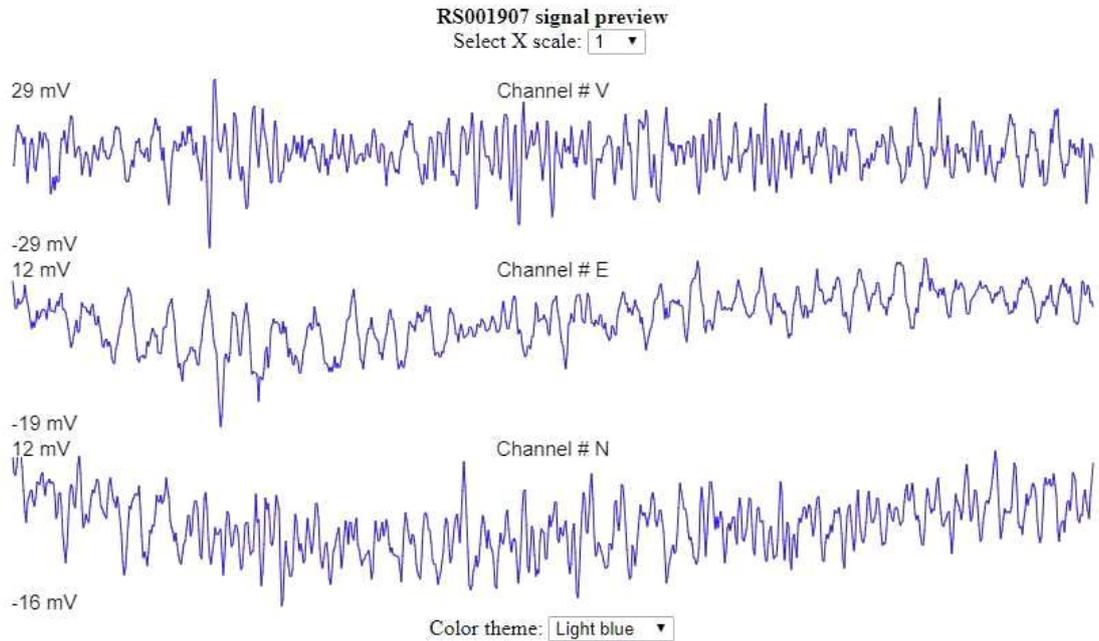


Рисунок 2.16. Страница просмотра сигнала для сейсмометра СМЕ-6111 станции Петропавловское

Вторым способом оперативного контроля работы сейсмических датчиков является приложение NDAS, позволявшее осуществлять просмотр получаемых сигналов, как говорится, «на лету» (рисунок 2.17).

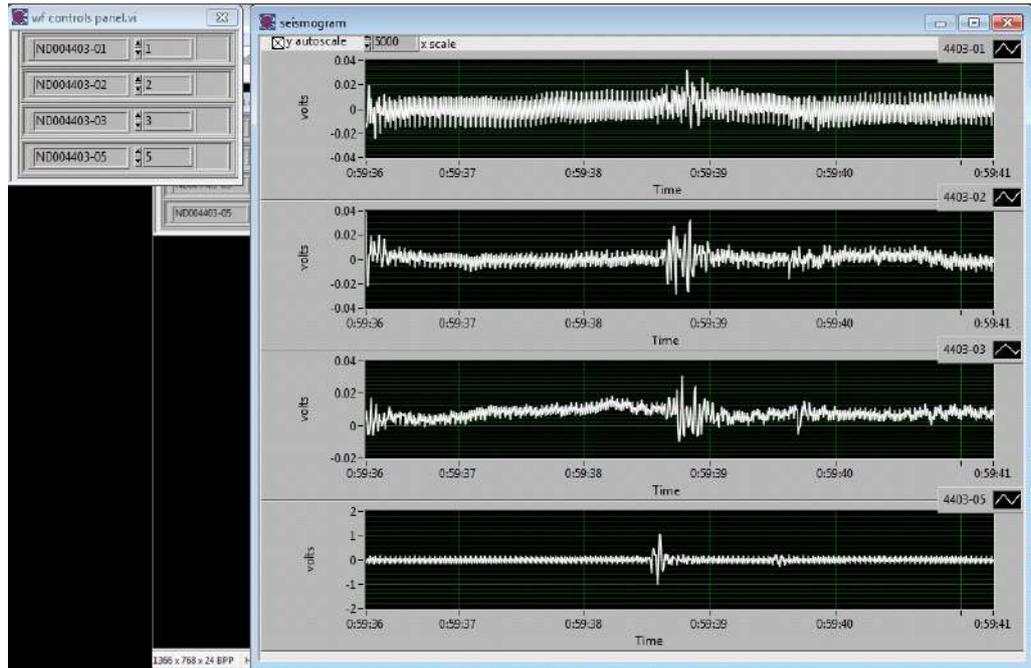


Рисунок 2.17. Окно просмотра сигналов станции Петропавловское. На изображении три канала сейсмометра СМЕ-6111 (вверху) и канал гидрофона (внизу) при тестовом воздействии

Конфигурация параметров работы АЦП регистратора проводится на соответствующей странице веб-интерфейса (рисунок 2.18).

<p style="text-align: center;">ND004403 ADC config ADC running</p> <p>ADC Sample rate: <input type="text" value="250 SPS"/></p> <p><input type="checkbox"/> Enable additional 1Hz output</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> Enable sensor power output</p> <p>C1 <input checked="" type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p>C2 <input checked="" type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p>C3 <input checked="" type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p>C4 <input type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p>C5 <input checked="" type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p>C6 <input type="checkbox"/> Gain: <input type="text" value="1"/> Range: <input type="text" value="12 V"/></p> <p style="text-align: center;"><input type="button" value="Apply new params!"/></p>	<p>Шапка интерфейса</p> <p>(1) Частота опроса АЦП</p> <p>(2) Включение записи сигнала 1Гц</p> <p>(3) Подача питания на сенсоры</p> <p>(4) Индивидуальные настройки каналов:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Включение/отключение; • Коэффициент предусиления; • Входной диапазон; <p>(5) Кнопка применения параметров</p>
---	---

Рисунок 2.18. Страница конфигуратора АЦП

В первоначальной настройке для каналов сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона была применена дискретизация сигнала 250 Гц (рисунок 2.18) В дальнейшем она была изменена на 100 Гц, что достаточно для проведения мониторинга сейсмических сигналов.

Важным этапом для использования оборудования является настройка сетевых параметров. Регистратор NDAS-8226 может работать, как в режиме точки доступа (Access Point), так и клиента (Station). При настройках оборудования были использованы различные режимы: режим «станции» - подключение к устройству через Wi-Fi роутер (для станции Южно-Курильск (для обеспечения удаленного доступа через сеть Интернет) и режим «точка доступа» - подключение к устройству напрямую (для станций Петропавловское и Загорское) (рисунок 2.19).

<p>ND004403 network mode ADC running</p> <p>Wi-Fi role: Access point</p> <p>SSID: NDAS</p> <p>Security type: WPA/WPA2</p> <p>Passwd:</p> <p><u>IP params:</u></p> <p>NDAS App port: 1001</p> <p><input checked="" type="checkbox"/> DHCP enabled</p> <p><input type="checkbox"/> HTTP protected mode</p> <p><input type="checkbox"/> FTP protected mode</p> <p>Apply parameters!</p>	<p>Шапка интерфейса</p> <p>(1) Режим беспроводного соединения</p> <p>(2) Параметры сети: имя сети, пароль, тип шифрования</p> <p>(3) Номер порта для протокола NDAS</p> <p>(4) Включение DHCP сервера</p> <p>(5) Статический IP, маска, Gateway</p> <p>(6) Защищенный режим HTTP</p> <p>(7) Защищенный режим FTP</p> <p>(8) Кнопка применения параметров</p>	<p>ND004404 network mode ADC running</p> <p>Wi-Fi role: Station</p> <p>SSID: Mega</p> <p>Security type: WPA/WPA2</p> <p>Passwd:</p> <p><u>IP params:</u></p> <p>NDAS App port: 1001</p> <p><input type="checkbox"/> DHCP enabled</p> <p>IP address: 192.168.1.10</p> <p>Gateway: 192.168.1.1</p> <p>Subnet mask: 255.255.255.0</p> <p><input type="checkbox"/> HTTP protected mode</p> <p><input type="checkbox"/> FTP protected mode</p> <p>Apply parameters!</p>
---	--	---

Рисунок 2.19. Сетевые настройки станций Южно-Курильск (справа) и Петропавловское и Загорское (слева)

Для определения уровня шумов, а также изменения их сезонных и суточных значений, проанализированы шестичасовые записи сейсмического шума, регистрируемого сейсмометром СМЕ-6111 в зимний и летний периоды в разное время суток. Для расчета спектральной плотности сейсмических шумов использовался программный комплекс DIMAS. Оценка уровня шумов проведена относительно моделей Петерсона, являющихся эталонами для оценки уровня сейсмического шума в окрестностях функционирования сейсмической станции. Результаты представлены на рисунке 2.20. Как видно на рисунке, в диапазоне частот, в котором регистрируется подавляющее большинство землетрясений с $M \geq 3.5$ (1-10 Гц), все кривые практически идентичны и не превышают верхнюю границу модели Петерсона.

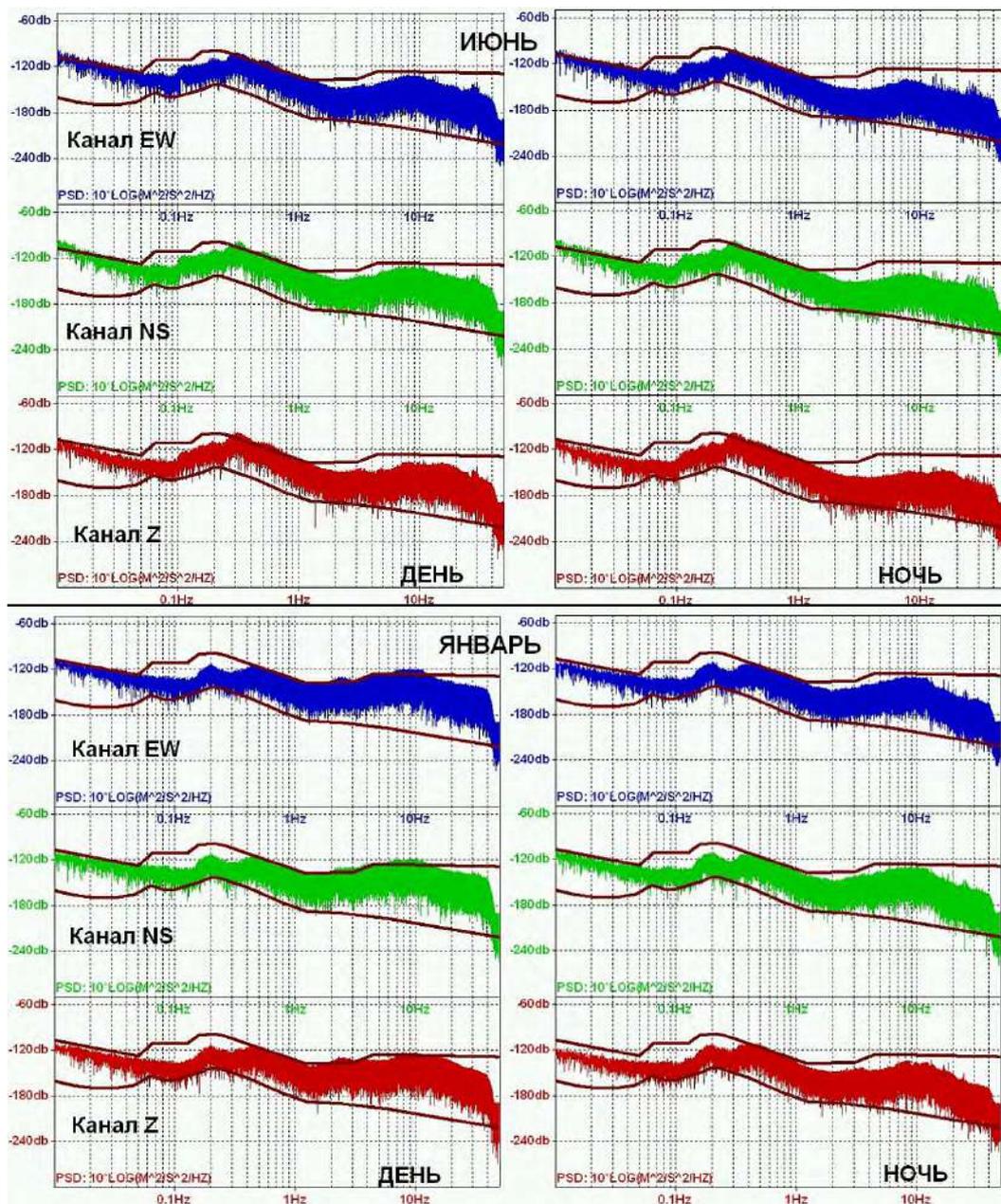


Рисунок 2.20. Оценка уровня сейсмических шумов для пункта наблюдения в Петропавловское в летний и зимний периоды в разное время суток

Таким образом, начато наполнение информационной базы данных и сравнение полученных сигналов гидрофона с сигналами гидрофона, расположенного в скважине полигона Петропавловское и в водоеме урочища Загорское. Сопоставление результатов работы молекулярно-электронных гидрофонов, расположенных в открытом водоеме и скважинах, представляет существенный интерес и будет проведено впервые в Сахалинской области.

2.3. Организация сбора и обработки данных

Для *доступа к данным* на карте памяти регистратора NDAS наиболее удобным способом является использование FTP-сервера, поддерживаемого программным обеспечением регистратора. Доступ с устройства пользователя осуществляется через специализированную программу, например, FileZilla. В нашем случае было реализовано два типа подключения (рисунок 2.21). В первом случае (доступ к FTP-серверу Южно-Курильск) соединение устанавливается через запрос с использованием сети Интернет к внешнему («белому») IP адресу модема-роутера, расположенному в сети Южно-Курильской станции. На роутере, который одновременно является точкой доступа Wi-Fi, реализована переадресация запроса по сети Wi-Fi к FTP-серверу регистратора. Во втором случае (Петропавловское, Загорское) доступ к FTP-серверу осуществляется непосредственно к внутреннему IP адресу регистратора по сети Wi-Fi, точкой доступа в которой выступает регистратор NDAS, а компьютер пользователя является клиентом этой сети.

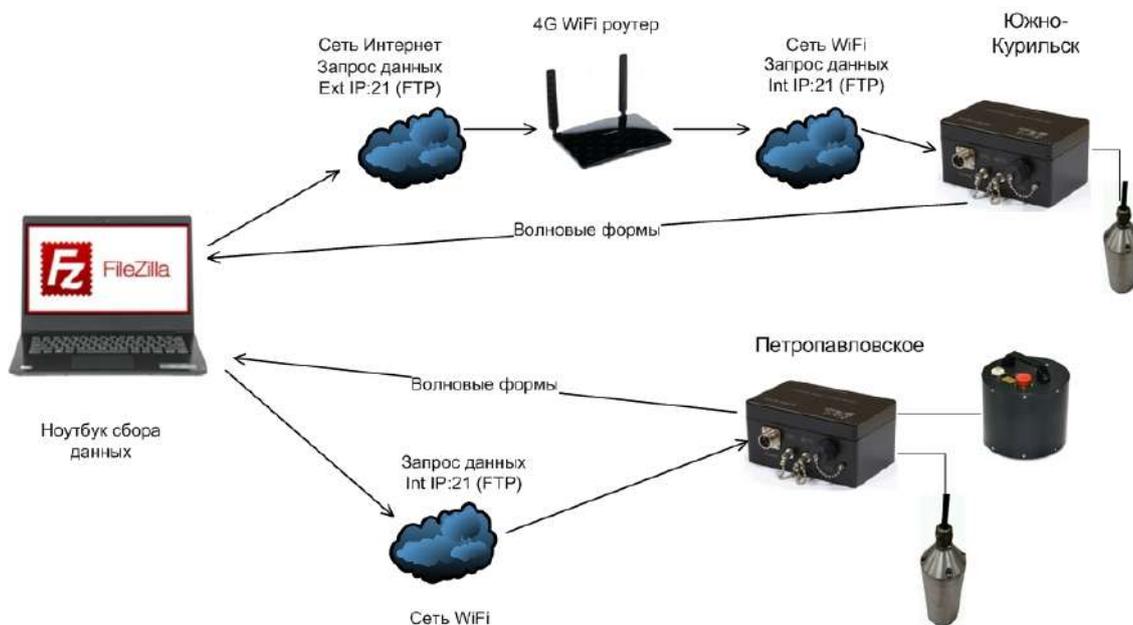


Рисунок 2.21. Схема организации доступа к данным станций с молекулярно-электронными датчиками

Полученные данные сохраняются во внутреннем формате регистратора NDAS (SIV) на внешнем носителе (накопитель HDD). Для перевода данных в другие форматы используется

конвертер данных, прилагаемый к устройству. Данное приложение предназначено для преобразования файлов формата SIV в наиболее распространенные сейсмические форматы, такие как SEG Y, MiniSEED, SAC. Дальнейший анализ и обработка собранных данных проводилась в программном комплексе DIMAS. Оптимальным форматом для использования в данном комплексе, а также в большинстве других современных программах обработки сейсмических данных является формат MiniSEED, в который и проводилась конвертация.

Для корректного использования полученных данных в программе DIMAS (включая определение энергетических характеристик сейсмических событий, анализ спектрального состава и т.д.) необходимо дополнение программы информацией с характеристиками используемого оборудования. Данная информация была подготовлена в виде Response файлов (АЧХ) для комплекта оборудования сейсмометр СМЕ-6111 + регистратор NDAS-8226 в формате Response файлов программы DIMAS.

Для создания файла были использованы данные с характеристиками оборудования (чувствительность сейсмометра), а также данные о частотной характеристике сейсмометра СМЕ-6111 в представлении полюсов и нулей, доступные на сайте Объединения научно-исследовательских институтов по сейсмологии (Incorporated Research Institutions for Seismology, IRIS) [<http://ds.iris.edu/NRL/sensors/rsensors/RESP.XX.NS645..BHZ.CME6111.60.2000>]. Итоговый подготовленный файл в формате DIMAS имеет следующий вид (пример для вертикального канала сейсмометра):

```
=04403, BHZ,20180610,2000, counts*s/m,1,1.299760E+16,12,6
-1.300000E-02,      0.000000E+00
-1.300000E-02,      0.000000E+00
-6.300000E-02,      6.300000E-02
-6.300000E-02,      -6.300000E-02
-1.400000E-01,      1.400000E-01
-1.400000E-01,      -1.400000E-01
-2.500000E+02,      2.500000E+02
-2.500000E+02,      -2.500000E+02
-3.800000E+02,      3.800000E+02
-3.800000E+02,      -3.800000E+02
-6.000000E+02,      0.000000E+00
-6.000000E+02,      0.000000E+00
0.000000E+00,      0.000000E+00
0.000000E+00,      0.000000E+00
```

0.000000E+00,	0.000000E+00

за символом « \Leftrightarrow » идут соответственно: имя станции (в данном случае по серийному номеру регистратора); имя канала (в примере ВНЗ); дата начала этой калибровки (10.06.2018 г.); коэффициент увеличения (чувствительность сейсмометра); его размерность; период нормализации, для которого рассчитаны коэффициенты; нормирующий коэффициент; число полюсов; число нулей. Ниже, в двух колонках, идут значения полюсов и нулей (реальная и мнимая часть).

В основе реализованной системы обработки сейсмологических данных лежит программа DIMAS, разработанная в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Программа предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с различных систем сбора [Дрознин, Дрознина, 2010; Развитие сейсмологических...2012]. Для анализа сигнала во временной области существует возможность удаления постоянной составляющей сигнала, дифференцирования и интегрирования сигнала разными способами. Программа позволяет производить рекурсивную и нерекурсивную фильтрацию, проектировать БИХ-фильтры (бесконечная импульсная характеристика) Бесселя, Баттерворда и КИХ-фильтры (конечная импульсная характеристика): низких и высоких частот, строить огибающую сигнала и сглаживать сигнал во временной области скользящим временным окном.

Обработка данных в частотной области ведется с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье и включает в себя следующие операции над исходным сигналом: дифференцирование и интегрирование сигнала в частотной области, вычисление огибающей, оценка спектра мощности сигнала [Embree, Kimble, 1991]. Для визуального анализа спектра мощности в программе производится построение графика в логарифмическом масштабе частот, где по вертикальной оси откладывается величина спектра мощности в децибелах. При наличии информации о характеристиках регистрирующей аппаратуры, по желанию пользователя, спектр мощности можно исправить за характеристику прибора. Наличие информации о характеристиках прибора необходимо для восстановления истинных движений грунта (смещения, скорости, ускорения). Также в программе имеется возможность эмуляции стандартных сейсмометров.

Анализ сигнала в частотно временной области сводится к изучению изменения его частоты во времени. Сигнал пропускается через набор полосовых фильтров [Stearns, Ruth, 1993], затем вычисляется огибающая сигнала в каждой полосе частот. В результате имеется

уровень изменения амплитуды сигнала во времени на разных частотах, по которому и ведется построение цветных изолиний - спектрограммы. Для выделения сигнала, имеющего слабое отношение сигнал/шум, путем анализа спектральных составляющих шума можно подобрать оптимальный фильтр для лучшего выделения сигнала на уровне шума. В программе имеется возможность производить арифметические операции между каналами и оценивать инструментальную сейсмическую интенсивность.

При обработке землетрясений необходимо знать, что вид записи сейсмического события существенно зависит от формы частотной характеристики сейсмографа, который, по существу, работает как фильтр, усиливающий волны только в определенном диапазоне частот [Инструкция о порядке...1982]. На записях региональных событий волны типа *P* и *S* отчетливо выражены и на короткопериодных, и на длиннопериодных сейсмометрических каналах, что наглядно показано на рисунке 2.22.

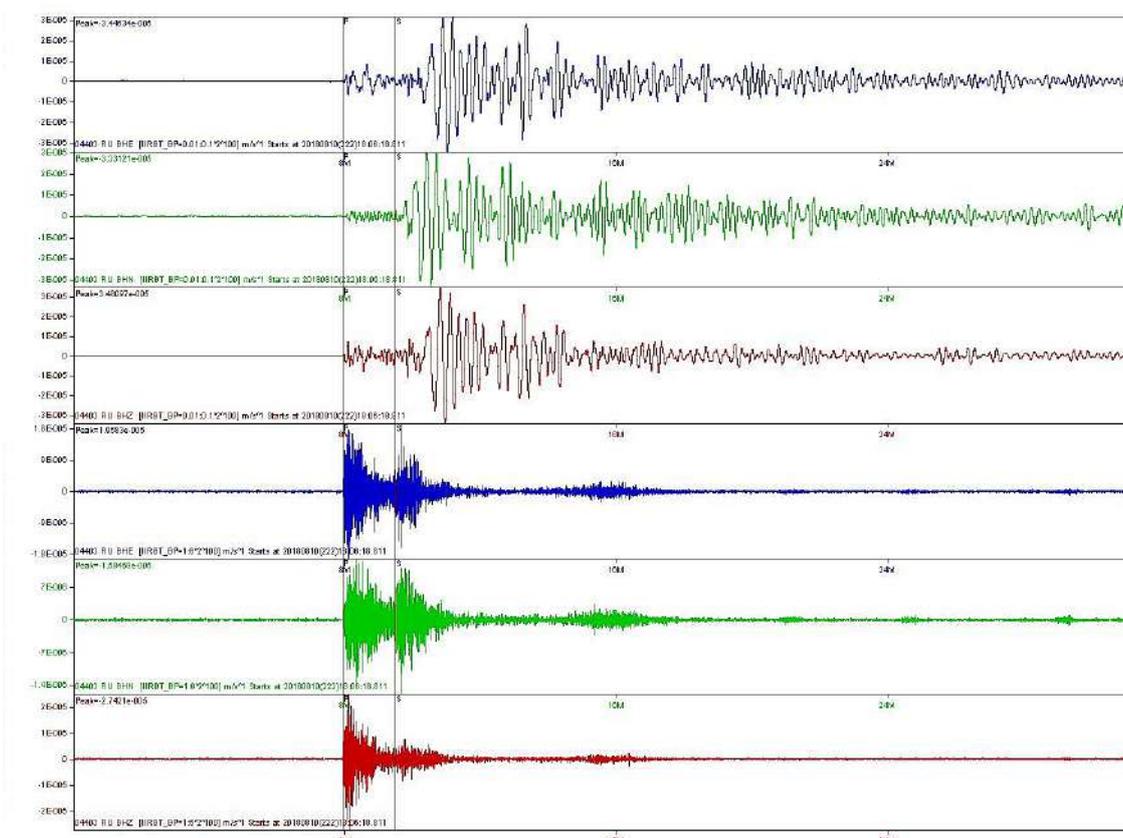


Рисунок 2.22. Пример записи регионального землетрясения сейсмометром SME-6111, произошедшего 10.08.2018 года (O=18-12-04.1 UTC; LAT 48.07N; LON 155.48E; H=40 км; Ms=6.2)

Удаленные землетрясения характеризуются сложной волновой картиной и имеют продолжительную запись и более длинные периоды сейсмических волн. Поэтому интерпретация записи проводилась с использованием длиннопериодного сейсмометрического канала и фильтром 2 порядка с полосой пропускания 0.01-0.1 Гц. На рисунке 2.23 представлена запись телесеизмического события, произошедшего 12.06.2018 года ($O=23-08-28.9$ UTC; LAT 2.18S; LON 98.58E; H=14 км; $M_w=6.6$), на которой, помимо волн типа P и S , можно выделить продольные и поперечные типы волн (PP и SS), идущие от источника вниз и потерпевшие одно отражение от свободной поверхности, а также волны глубоководных землетрясений, выходящих из очага вверх и отраженные от земной поверхности (pP и sS). На записи хорошо выделяются волны Релея, которые в регионах могут отличаться из-за различий строения среды.

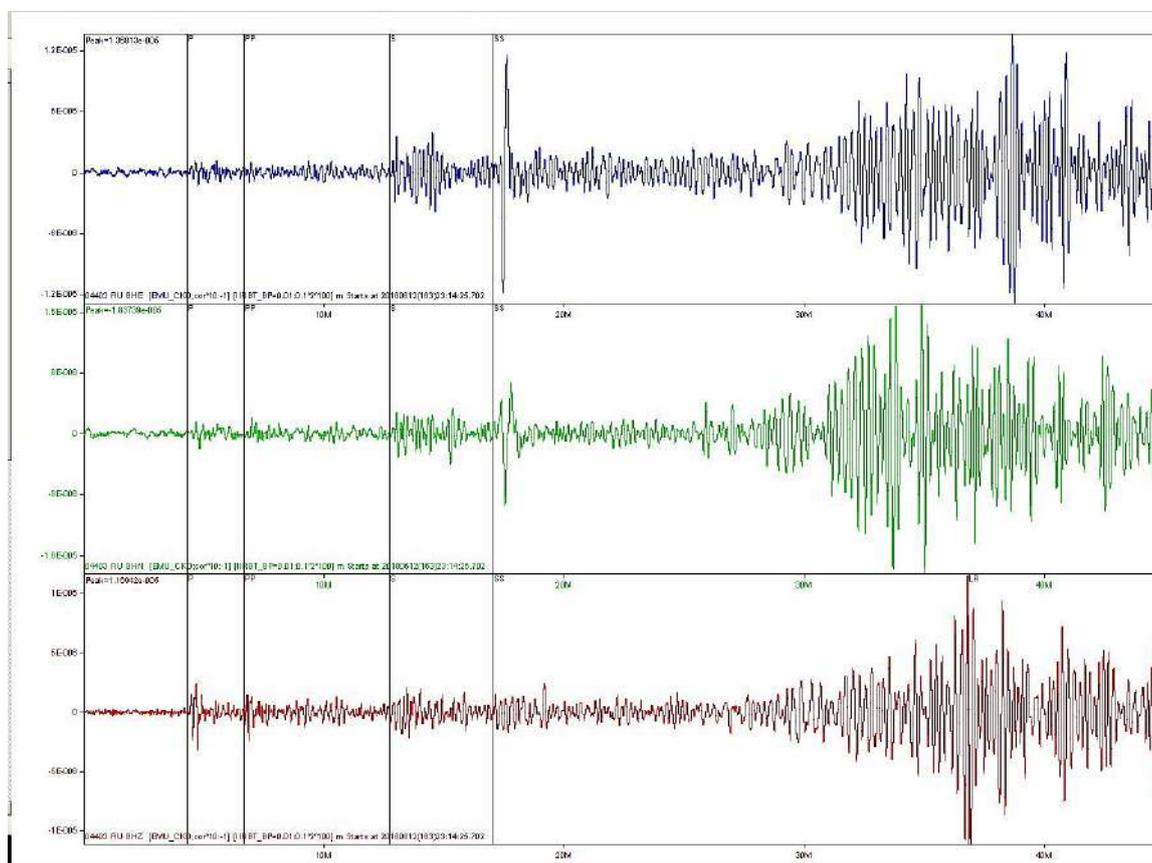


Рисунок 2.23. Пример записи удаленного землетрясения 12.06.2018 года сейсмометром СМЕ-6111

Местные землетрясения характеризуются малой общей длительностью записи и высокочастотным составом. Поэтому при обработке рассматриваются записи короткопериодных каналов. Для местных (локальных) землетрясений характерно наличие двух основных волн Pg и Sg . В случае слабых землетрясений очень важно отличать эти вступления

от помех. Волны P_g обычно имеют четкое вступление с постепенным плавным спадом интенсивности, группа S -волн является более низкочастотной и выделить их не является проблемой (рисунок 2.24).

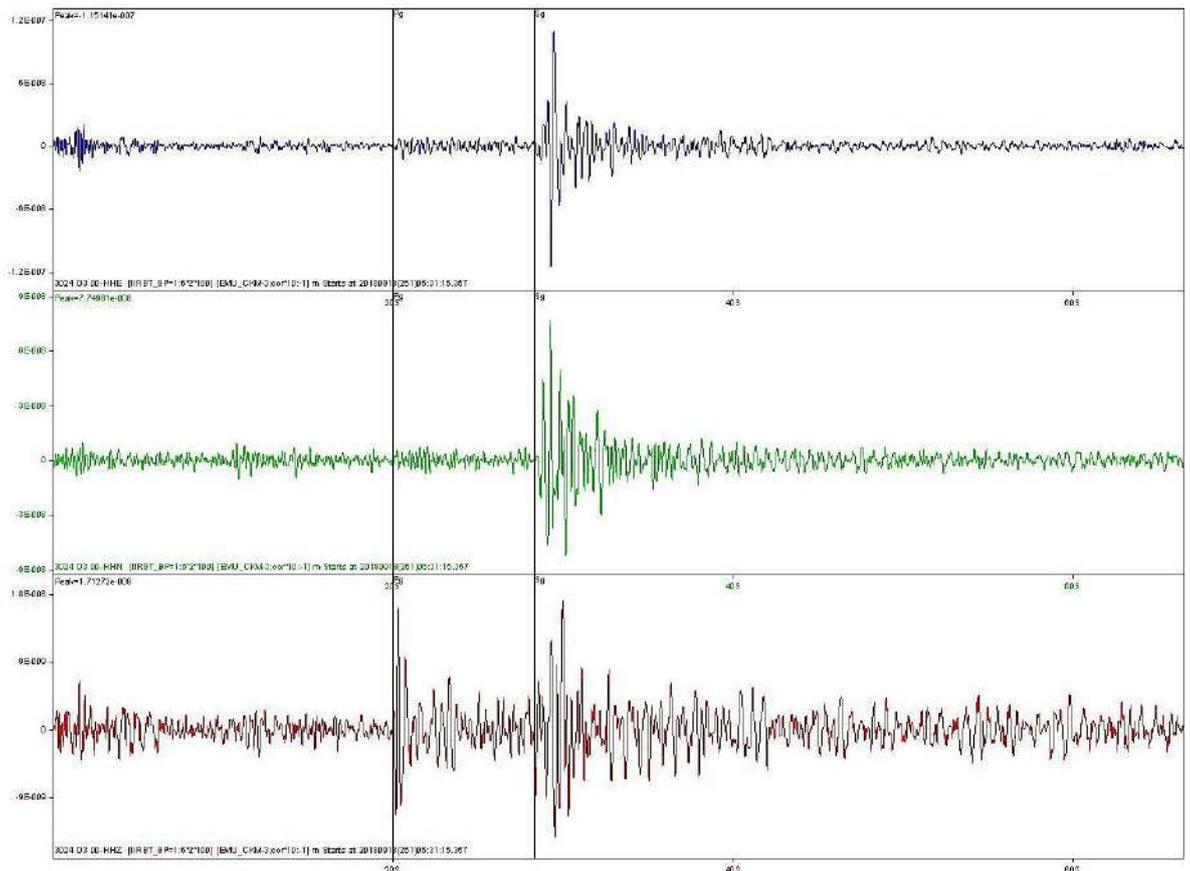


Рисунок 2.24. Пример записи локального землетрясения 18.09.2018 года (O=06-31-24.5 UTC; LAT 47.04N; LON 141.89E; H=7 км; $M_L=2.8$) сейсмометром СМЕ-6111

После введения комплектов регистрирующей аппаратуры в эксплуатацию для каждого пункта было проведено исследование шумовых характеристик гидрофонов методом корреляционного анализа с последующим расчетом плотности мощностей шумовых сигналов в условиях, максимально приближенных к эталонным [Дрознин, Дрознина, 2010]. Для проведения расчетов были выбраны отрезки времени с низким уровнем сейсмического фона. Полученные результаты (рисунок 2.25) подтверждают выводы разработчиков оборудования о том, что существенный вклад в шумы вносит жесткость системы, а размер узла приводит к снижению шума при увеличении гидродинамического сопротивления. Таким образом, подтверждена целесообразность снижения размеров пакета для снижения шумов и расширения частотной полосы в области высоких и низких частот [Костылев, Богинская, 2020].

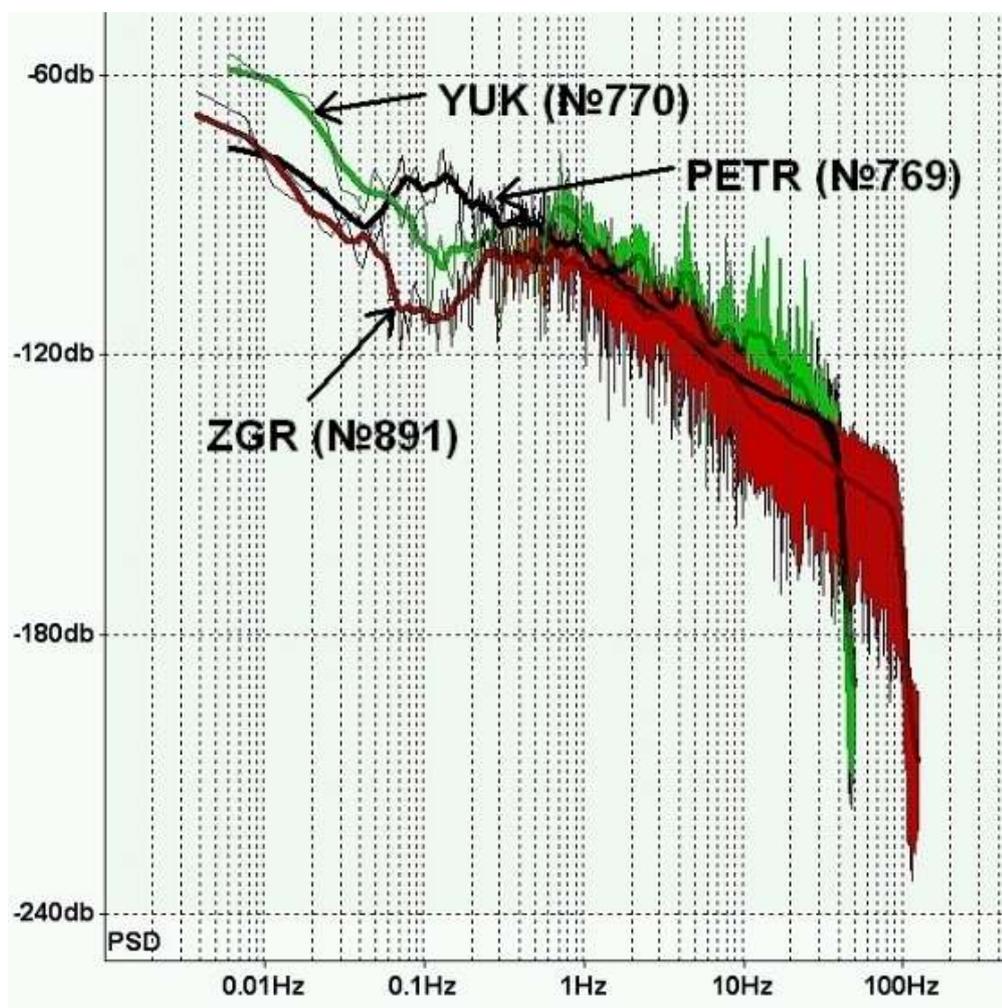


Рисунок 2.25. Спектральная плотность мощности шумового сигнала (децибелы по отношению к $\text{мкПа}^2/\text{Гц}$) гидрофонов в пунктах инструментальных наблюдений

Сейсмические события уверенно регистрируются как сейсмоприемником СМЕ-6111, так и гидрофоном. Это отражено в спектрограмме на рисунке 2.26. Основной спектр сейсмического сигнала гидрофона находится в диапазоне 10-40 Гц, сейсмоприемника – 5-30 Гц [Геофизические исследования...2019].

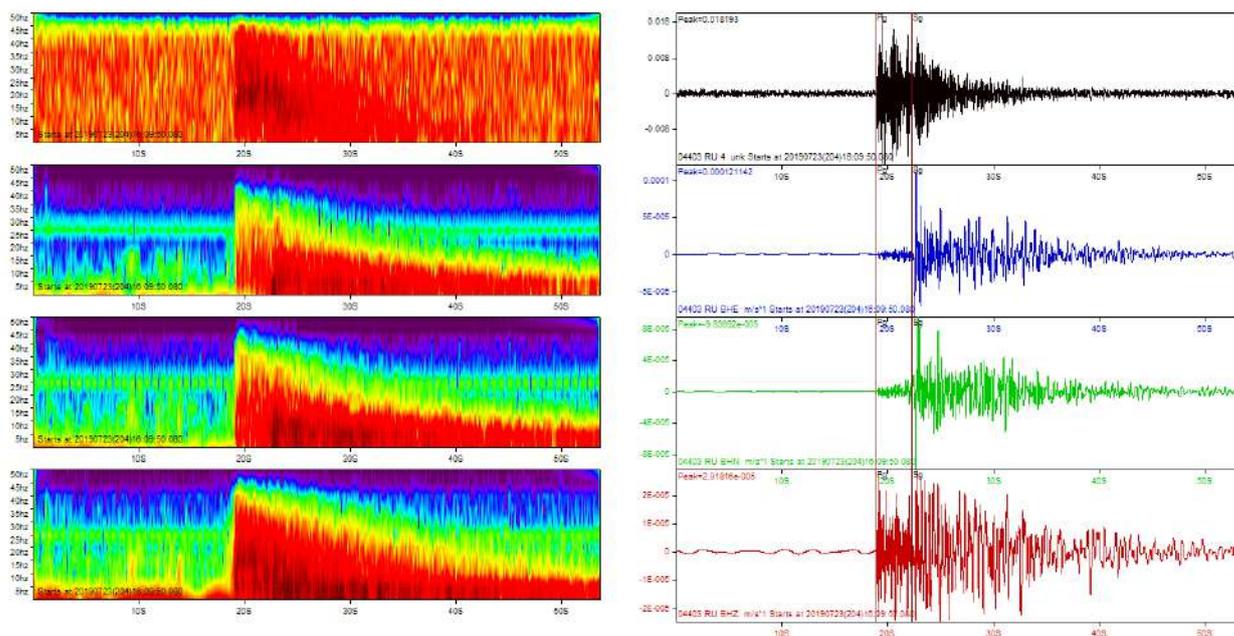


Рисунок 2.26. Волновые формы (справа) и спектрограммы (слева) сейсмического события с $M=3.3$ произошедшего 23 июля 2019 г., полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника СМЕ-6111 (цветные волновые формы) и прототипа молекулярно-электронного гидрофона (черная волновая форма)

Таким образом, в течение относительно небольшого промежутка времени развернута и протестирована система комплексных геофизических наблюдений в южной части Центрально-Сахалинского разлома (о. Сахалин) и в южной части Курильской островной дуги (о. Кунашир), предназначенная для регистрации, передачи и хранения сейсмологических данных, с удаленным доступом к регистрируемым данным.

2.4. Анализ функциональных показателей молекулярно-электронных приборов в различных пунктах наблюдений

Как было описано выше, установка комплекса сейсмического оборудования на геофизическом полигоне Петропавловское, удовлетворяла всем необходимым условиям для размещения оборудования, таким как электроснабжение, сотовая связь, возможность обслуживания, круглогодичная легкодоступность автомобильным транспортом. Помимо молекулярно-электронных приборов (молекулярного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 с регистратором NDAS-8226 и гидрофона), на полигоне установлена станция на базе

короткопериодного сейсмоприемника СПВ-3к и регистратора Дельта 03. Полигон был также оборудован многоэлектродной системой геоэлектрических измерений [Lyubushin et.al, 2016] и регистратором уровня подпочвенного радона [Первые результаты мониторинга...2018; Отклик в поле...2020] (рисунок 2.12). Это позволило в одном пункте наблюдений регистрировать локальные, региональные, телесеismicкие (включая слабомagnitudeные и глубокофокусные) события, а также проводить анализ полученных сейсмологических и геофизических данных.

Также в данном разделе исследованы спектральные и регистрационные возможности трех типов гидрофонов в зависимости от особенностей их конструкции. Сейсмические наблюдения прототипом молекулярно-электронного гидрофона на полигоне Петропавловское проводятся в непрерывном режиме с 2018 года. С наступлением весенне-летнего сезона 2019 года произведен монтаж и запуск оборудования в скважинном (о. Кунашир) и естественных (о. Сахалин, урочище Загорское) водоемах. Результаты наблюдений сохраняются в виде архива волновых форм, который используется для дальнейшего анализа. Первые расчеты оценки регистрационных возможностей гидрофонов в комплекте с регистратором NDAS-8226, установленных на полигоне, были проведены через четыре месяца после начала регистрации. В качестве исходного материала были взяты оперативные каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН, а также каталоги локальной сети станций юга о. Сахалин.

2.4.1. Регистрационные возможности и спектральные характеристики молекулярно-электронных гидрофонов

Для оценки регистрации локальной сейсмичности комплектом оборудования гидрофон №769 – NDAS-8226 использован каталог землетрясений за период 6 месяцев (с 24.10.2018 по 25.04.2019 гг.) по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН, расположенной в квадрате с координатами 46.7–47.5° с.ш. и 142.2–142.7° в.д. Каталог включал 66 сейсмических событий с магнитудой от 1.8 до 3.8 [Михайлов, Семёнова, 2020; Михайлов, Семёнова, 2021; Развитие метода...2018; 2018- ER_App13_Southern-Sakhalin_2018, 2022; 2019- ER_App13_Southern-Sakhalin_2019, 2022]. В результате установлено, что из 66 землетрясений четкая запись вступлений имеется у 18 событий, зарегистрированных гидрофоном. Результаты анализа регистрационных возможностей комплекта гидрофон – NDAS-8226 (Петропавловское) приведены на рисунке 2.27, показывающем пространственное распределение событий, зафиксированных комплексом оборудования [Геофизические исследования...2019; Костылев, Богинская, 2019].

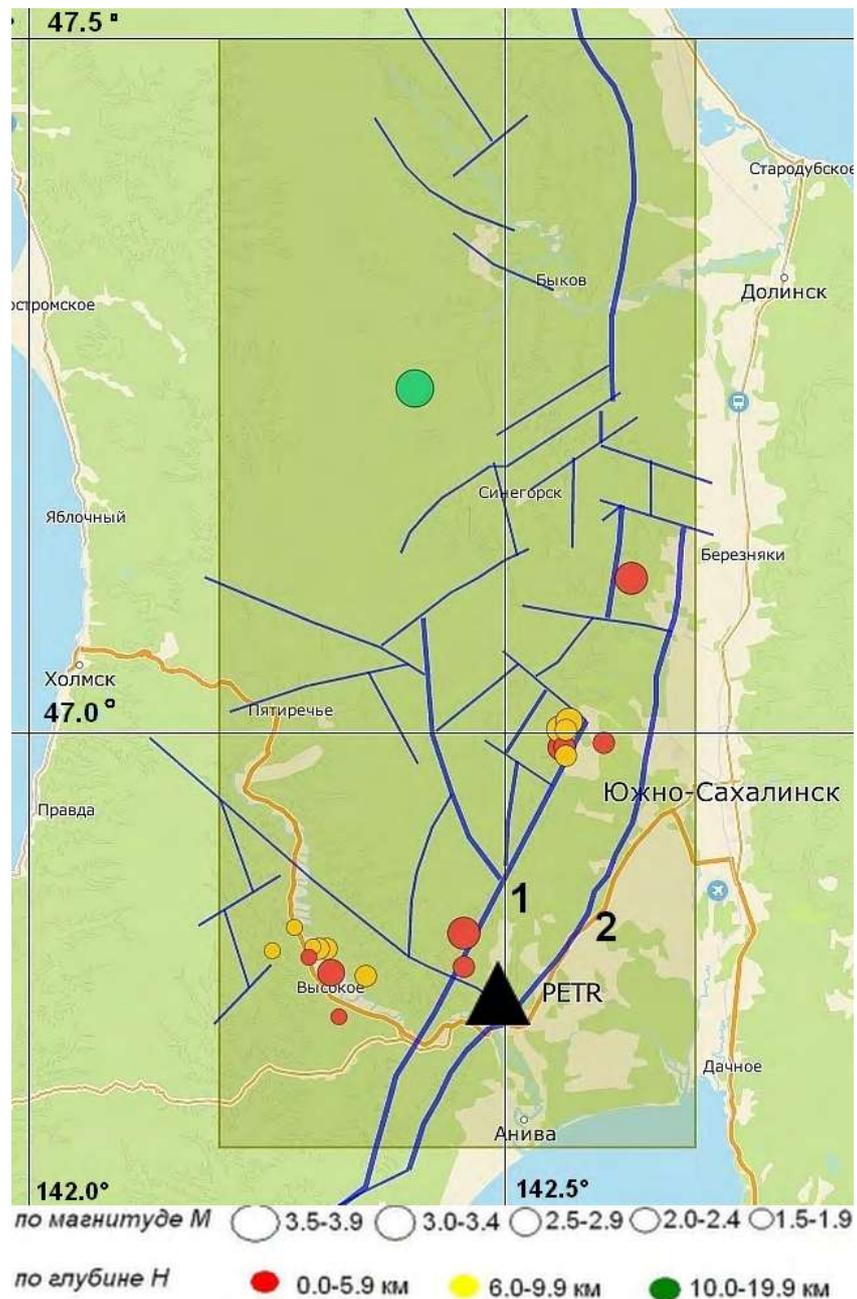


Рисунок 2.27. Регистрационные возможности комплекта оборудования гидрофон – NDAS-8226 пункта наблюдения Петропавловское. Залитыми кружочками показаны уверенно зарегистрированные сейсмические события. Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Апрельский [Рождественский, Сапрыгин, 1999]

В 2020 г. аналогичные исследования проведены с применением гидрофона новой модификации, размещенного в пункте Загорское. Для анализа регистрационных возможностей нового гидрофона, их сравнения с гидрофоном полигона Петропавловское, а также для выявления особенностей их работы в качестве источника информации о сейсмических

событиях в районе исследования был использован каталог землетрясений по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН за период с 11 июня по 30 сентября 2020 г. в квадрате, ограниченном координатами 46.7–47.5°N и 142.2–142.7°E. Каталог включал 31 сейсмическое событие с $M=1.8-3.4$. Для временного интервала каждого сейсмического события из архива волновых форм регистратора сейсмических сигналов NDAS-8226 были выделены соответствующие записи, обработка которых проведена в программном комплексе DIMAS. Для удобства обработки сейсмологических материалов использованы различные виды фильтров. По результатам обработки установлено, что из 31 землетрясения четкая запись вступлений имеется у 14 событий по записям волновых форм полигона Петропавловское и для 22 событий по записям пункта Загорское. Результаты анализа регистрационных возможностей гидрофонов показаны на рисунке 2.28, иллюстрирующем пространственное распределение зарегистрированных комплексов событий в зависимости от их магнитуд и расположения эпицентров. Сейсмические события, уверенно зарегистрированные гидрофонами, показаны цветными маркерами, а неидентифицированные на записях гидрофонов – полупрозрачными маркерами.

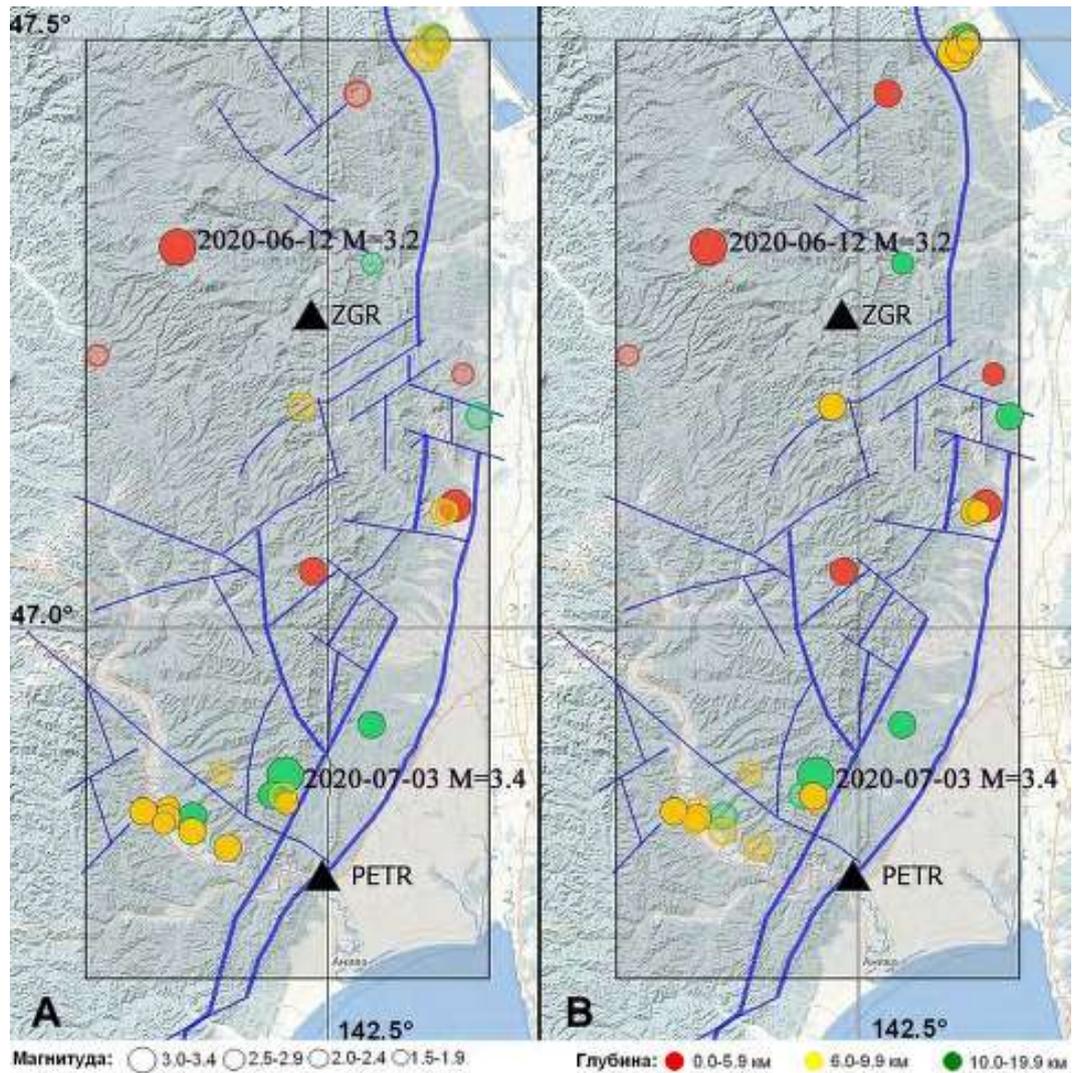


Рисунок 2.28. Сравнительные регистрационные возможности гидрофонов полигона Петропавловское (А) и пункта Загорское (В)

Из представленного рисунка видно, что при совместном использовании гидрофонов полигона Петропавловское и пункта Загорское регистрируются 93.5 % сейсмических событий с $M \geq 1.8$ в районе исследований. При этом гидрофон полигона Петропавловское уверенно регистрирует сейсмические события с $M \geq 2.5$ в радиусе до 30 км от места установки, а гидрофон пункта Загорское – на расстоянии более 50 км, что объясняется гораздо более низким уровнем техногенных помех в месте установки оборудования пункта Загорское, а также усовершенствованной конструкцией используемого гидрофона. Различия в конструкции гидрофонов, очевидно, вносят специфику и в формы записей и характеристики регистрируемых событий. На рисунке 2.29 отображены типичные варианты регистрации на примере наиболее сильных сейсмических событий, произошедших за исследуемый период на примерно одинаковом удалении (10–15 км) от пунктов наблюдений [Костылев, Богинская, 2020].

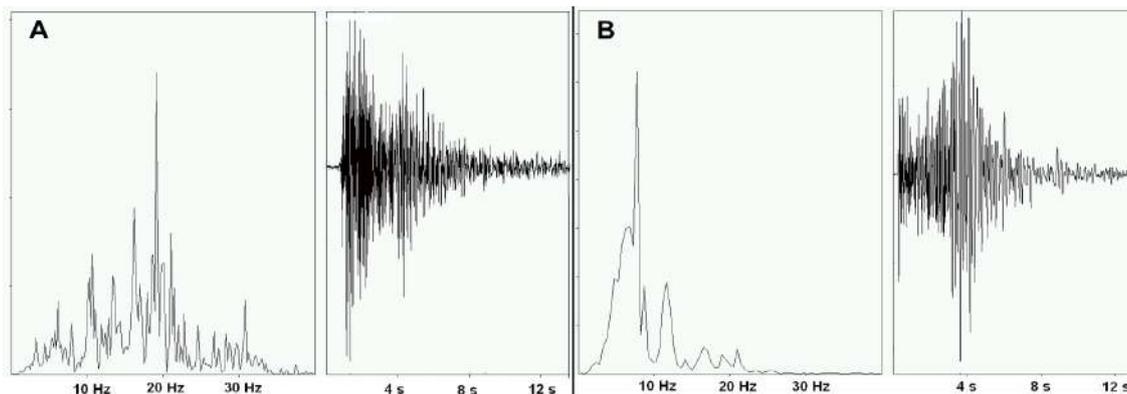


Рисунок 2.29. Форма и спектральная составляющая частоты (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) регистрируемых сейсмических событий для полигона Петропавловское (А) и пункта Загорское (В)

Для полигона Петропавловское это сейсмическое событие 03.07.2020 г. ($M=3.4$), а для пункта Загорское – событие 12.06.2020 г. ($M=3.2$). Указанные сейсмические события выделены на рисунке 2.29. Видно, что для гидрофона, расположенного в обводненной скважине (Петропавловское), регистрация сейсмического события характеризуется спектром с более высокими частотами колебаний (20 Гц), а регистрации сейсмических событий гидрофоном в открытом водоеме при практически полном отсутствии техногенных помех происходит на частотах до 10 Гц [Костылев, Богинская, 2020].

2.4.2. Регистрационные возможности комплектов сейсмического оборудования, установленных на полигоне Петропавловское

Для оценки работы сейсмологического комплекса Дельта 03 + СПВ-3к был взят каталог СФ ФИЦ ЕГС РАН за три месяца с момента установки станции 2 июля 2018 по 30 сентября 2018 гг. Каталог включал 234 землетрясения. В программе DIMAS были просмотрены все события каталога, из них 134 события идентифицированы полностью, у 35 можно было выделить только S волну, а 65 землетрясений из предоставленного каталога выделить не удалось. На карте эпицентров видно, что СПВ-3к уверенно и без пропусков регистрирует все землетрясения с $M \geq 1.5$, произошедшие на различных расстояниях от места установки станции. Остальные события не были идентифицированы потому, что магнитуда этих событий не превышала значения 1.4 (рисунок 2.30). Технология оценки регистрационных возможностей с привлечением каталогов СФ ФИЦ ЕГС РАН была впервые использована автором в работе

[Развитие метода...2018; Изучение сейсмического режима...2018; Оценка сейсмической...2018], далее использовалась в работах [Kostylev et al.,2019; Костылев, Богинская 2020; Закупин и др., 2020; Boginskaya, Kostylev, 2022; Костылев, Богинская 2022а; Наблюдения обратного...2023].

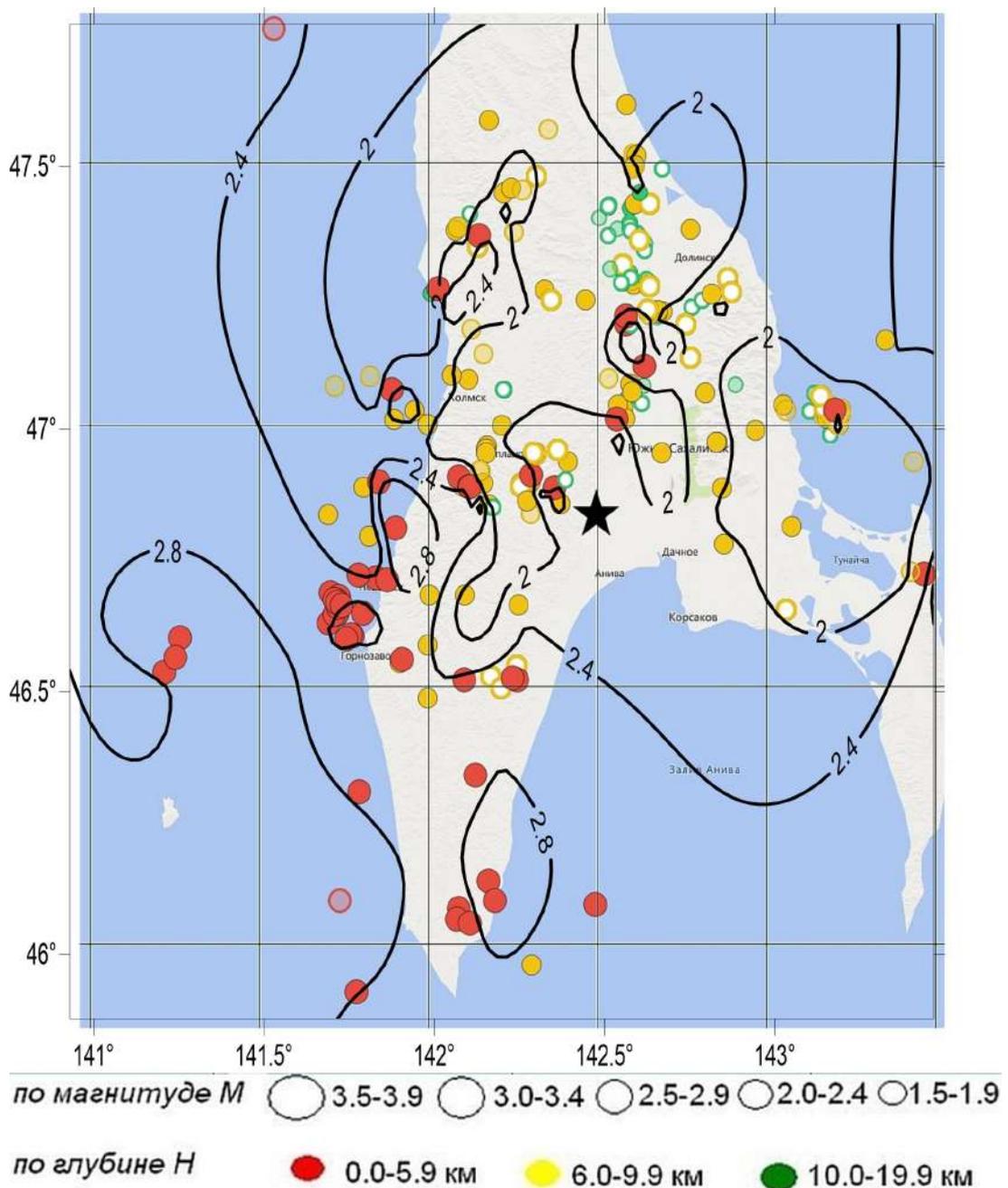


Рисунок 2.30. Карта регистрационных возможностей комплекта оборудования Дельта 03 + СПВ-3к, установленного на полигоне Петропавловское. Полностью закрашенные круги – землетрясения идентифицированы полностью, полупрозрачные круги – частично определены, прозрачные круги – не идентифицированы совсем

Для оценки работы сейсмометра СМЕ-6111 и регистратора сейсмических сигналов NDAS-8226 был взят каталог землетрясений о. Сахалин с $M \geq 4.0$ за четыре месяца с момента установки станции 10 июня 2018 года по 30 сентября 2018 года [Землетрясения России..., 2020]. Каталог включал 110 землетрясений в радиусе 500 км от полигона. По результатам обработки установлено, что из 110 землетрясений в радиусе 500 км от полигона Петропавловское четкая запись вступлений имеется у 56 событий, 21 событие можно определить как нечеткие вступления, а 33 землетрясения не были идентифицированы. Таким образом, 70 % сейсмических событий с $M \geq 4.0$ в радиусе 500 км от полигона уверенно зарегистрированы, что позволило сделать вывод о достаточно хороших возможностях комплекта оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226. Результаты анализа регистрационных возможностей комплектов оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226 показаны на рисунке 2.31, иллюстрирующем пространственное распределение зарегистрированных комплексами событий в зависимости от расположения их эпицентров и магнитуд [Геофизические исследования... 2019].

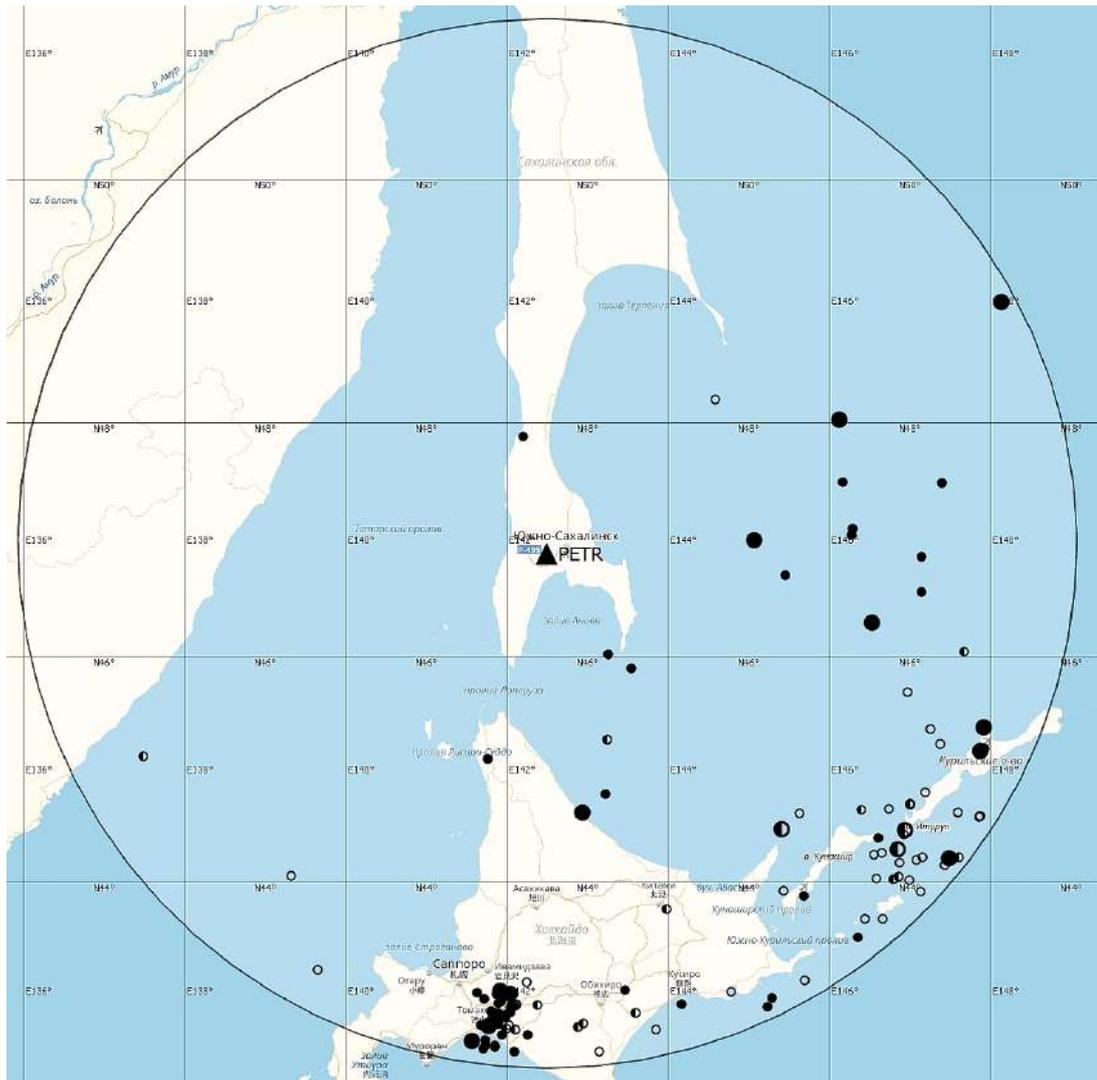


Рисунок 2.31. Регистрационные возможности комплекта оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226, установленного на полигоне Петропавловское

Для дальнейших исследований также использовался каталог сейсмических событий с $M \geq 6.0$, произошедших в разных точках мира за тот же период времени (10 июня 2018 г. - 30 сентября 2018 г.) [EMSC– Европейский сейсмологический центр <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/world/M4/>]. Этот каталог состоял из 88 событий, зарегистрированных сейсмической станцией Южно-Сахалинск. Анализ записей показал, что все удаленные сейсмические события с $M \geq 6.0$ уверенно и четко записались длиннопериодным каналом, а первые вступления в семидесяти случаях видно и на записи короткопериодного сейсмоприемника. Остальные землетрясения не были выделены из-за сильной удаленности (более чем на десять тысяч км от полигона) [Геофизические исследования...2019].

Для оценки регистрации локальной сейсмичности комплектом оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226 использован каталог землетрясений по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС

РАН за период 6 месяцев (с 24.10.2018 по 25.04.2019 гг.) в квадрате, ограниченном координатами $46.7\text{--}47.5^\circ$ с.ш. и $142.2\text{--}142.7^\circ$ в.д. Каталог включал в себя 66 сейсмических событий с магнитудой от 1.8 до 3.8 [Михайлов, Семёнова, 2020; Развитие метода...2018; Михайлов, Семёнова, 2021; 2018- ER_App13_Southern-Sakhalin_2018, 2022; 2019- ER_App13_Southern-Sakhalin_2019, 2022]. В результате установлено, что из 66 землетрясений четкая запись вступлений имеется у 39 событий для волновых форм сейсмометра СМЕ-6111. Результаты анализа регистрационных возможностей комплекта оборудования СМЕ-6111 – NDAS-8226 приведены на рисунке 2.32, показывающем пространственное распределение событий, зафиксированных комплексом оборудования [Геофизические исследования...2019; Костылев, Богинская, 2019].

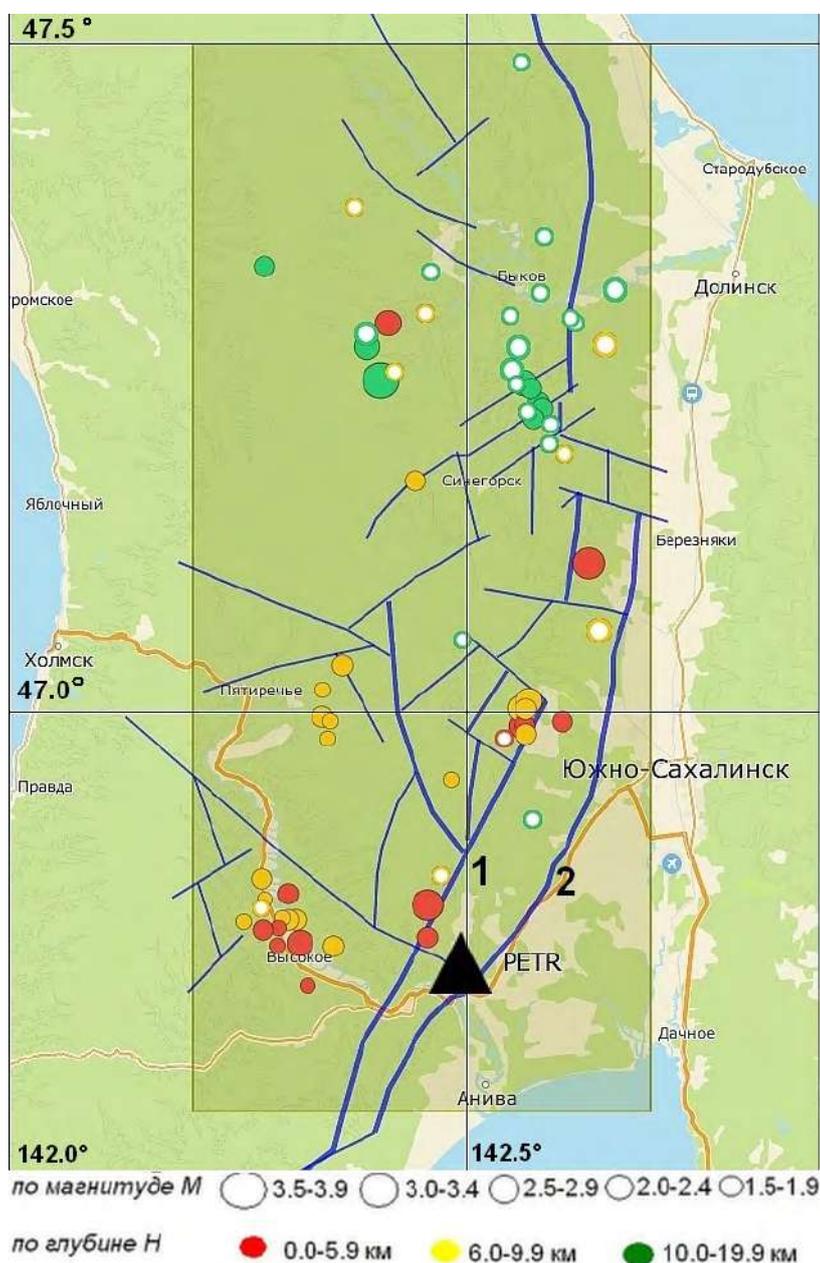


Рисунок 2.32. Регистрационные возможности комплекта оборудования пункта наблюдения Петропавловское. Залитыми кружочками показаны события, уверенно зарегистрированные комплектом СМЕ-6111 – NDAS-8226. Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Априловский [Рождественский, Сапрыгин, 1999]

Помимо оценки регистрационных возможностей, на основе данных, полученных при использовании новейших комплектов оборудования, установленных на полигоне Петропавловское, были проведены работы по исследованию сейсмичности в южном сегменте Центрально-Сахалинского разлома на полуострове Крильон за период 2018-2021 гг. Для исследования использовались детальные каталоги южной части о. Сахалин, в частности выборка слабых событий с $M \geq 2.0$, предваряющих землетрясения с $M=4.6-6.2$ в зоне с $R=166$ км от полигона, покрывающая всю сейсмоактивную зону юга острова [Развитие метода...2018; Закупин и др., 2020; Закупин и др., 2021]. Надо отметить, что на юге о. Сахалин сейсмическая активность с учётом возможностей регистрирующей сети очень высокая (представительные каталоги) и именно поэтому этот район не раз становился объектом для апробации различных методик моделирования сейсмических потоков до и после сильных землетрясений.

2.5. Сейсмоакустические исследования на о. Кунашир

Сейсмоакустические наблюдения на полигоне Южно-Курильск (о. Кунашир) проводятся с 2019 г. Практически сразу в потоке сейсмоакустической эмиссии удалось выделить вариации, связанные с суточным, приливным, атмосферным и ионосферным факторами [Костылев, Богинская, 2019]. Не менее интересным представляется направление поиска геофизических сигналов, которые могли бы использоваться в качестве краткосрочных предвестников перед сейсмическими событиями на Дальнем Востоке. Гидроакустические волны сейсмического происхождения могут наблюдаться не только во время землетрясений, но и в предваряющий и последующий периоды времени и занимают довольно широкий диапазон частот: от долей – единиц герца до единиц килогерца. Применение широкополосных гидрофонных станций позволяет регистрировать подводные акустические сигналы в этом диапазоне частот [Левин, Сасорова, 1994]. Характерные признаки подготовки землетрясения различаются в каждом сейсмоактивном регионе, так как характер сейсмичности отдельно взятого региона зависит от

структуры земной коры, характеристик слагающих пород и многих других факторов [Левин, Сасорова, 1999].

В работе [Наблюдения слабых...2012] были выполнены гидроакустические наблюдения и изучены связи регистрируемых сигналов со слабой сейсмичностью в районе Южных Курильских островов. Заметной корреляции между геоакустической эмиссией и слабыми землетрясениями выявлено не было. Предположение о существовании предшествующего землетрясениям низкочастотного сигнала – сейсмоакустического отклика на подвижку геологического массива перед сейсмическим разрывом, нашло подтверждение лишь в некоторых случаях.

Для проведения исследований этого эффекта была выбрана прямоугольная область с координатами от 43.0° до 45.0°N и от 145.0° до 147.0°E [Костылев, Богинская, 2020]. Выборка событий в этой области, согласно бюллетеню сейсмической станции «Южно-Курильск», составила 18 землетрясений с $M \geq 4.0$ за период с 1 мая 2019 г. по 29 февраля 2020 г. Также исследовалась область в $R=40$ км от места установки гидрофона, количество событий с $M \geq 2.0$ в которой составило 17 за этот же промежуток времени. Глубины гипоцентров варьировали от 16 до 147 км. Из 35 зарегистрированных землетрясений в 7 случаях был выявлен предшествующий землетрясению низкочастотный сигнал. Все 7 событий имели глубину гипоцентра более 80 км и располагались преимущественно в Южно-Курильском проливе. На рисунке 2.33 показано расположение эпицентров землетрясений, пять из которых имеют четко выраженный акустический сигнал частотой 5 Гц и продолжительностью от 3 до 13 с. От двух землетрясений сигнал не столь выражен, но его частота совпадает с частотой идентифицированных нами предшествующих землетрясениям низкочастотных сигналов [Костылев, Богинская, 2020]. Низкочастотные колебания с периодами до 200 с наблюдались ранее перед главным толчком нескольких землетрясений [Левин, Сасорова, 1994].

Стоит отметить, что слабые землетрясения уверенно регистрируются гидрофоном, а применение соответствующей обработки сигналов дает возможность выделять моменты вступления сейсмических волн и измерения их параметров.

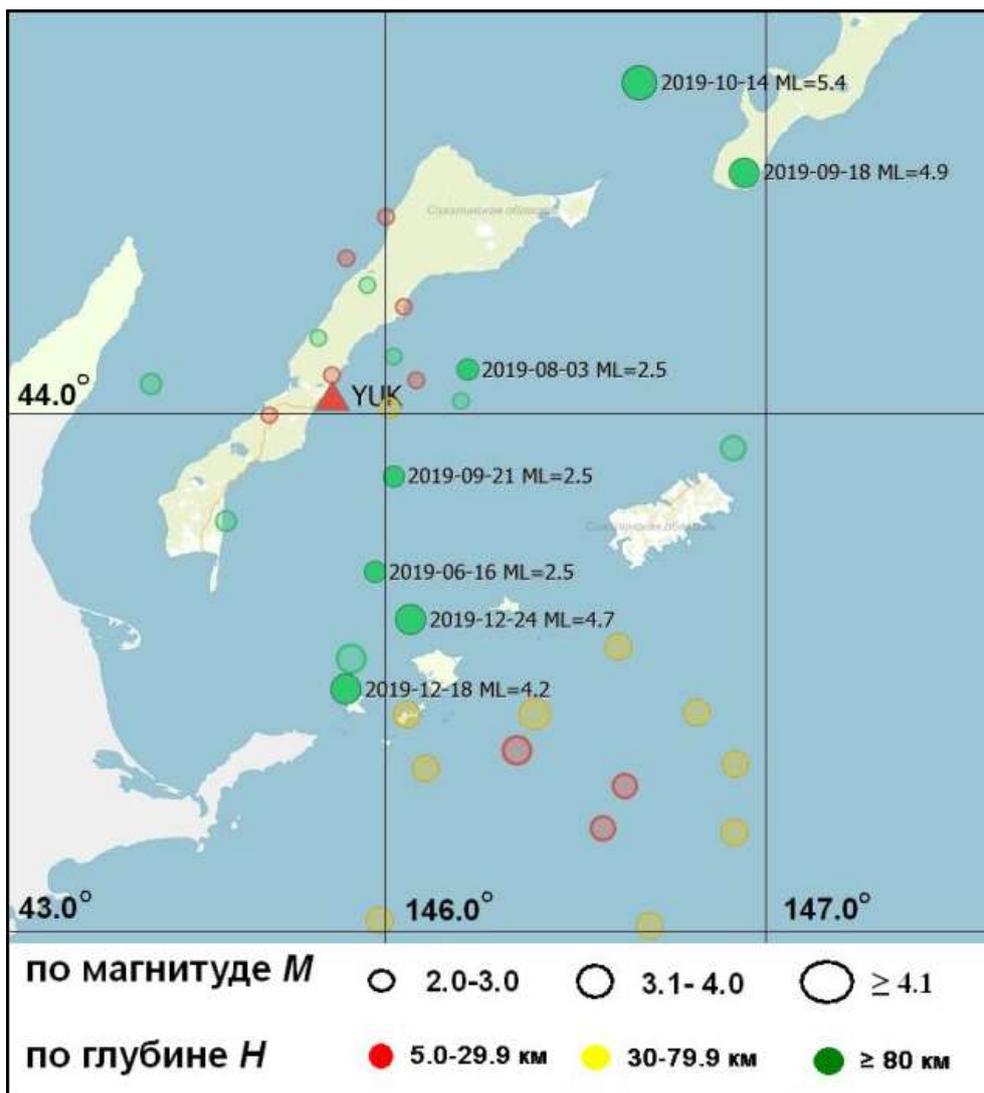


Рисунок 2.33. Положение эпицентров сейсмических событий за исследуемый период. Закрашенными маркерами выделены события с идентифицированным предшествующим низкочастотным сигналом

На рисунке 2.34 представлена в виде примера запись волновых форм землетрясений, произошедших 14.10.2019 и 18.12.2019 гг., а также частотные характеристики самих сигналов и сейсмических событий. Систематизируем полученные нами на о. Кунашир результаты. Низкочастотный предшествующий сигнал выявлен в 20% случаев от общего количества сейсмических событий и для половины числа глубокофокусных землетрясений (с глубиной более 80 км). Данный сигнал имел место практически для каждого второго такого события. Несмотря на то, что его связывают в основном с коровыми землетрясениями, происходящими на дне океана в зонах субдукции, подобные сигналы в некоторых случаях отмечены и перед глубокофокусными событиями [Сасорова, 2005].

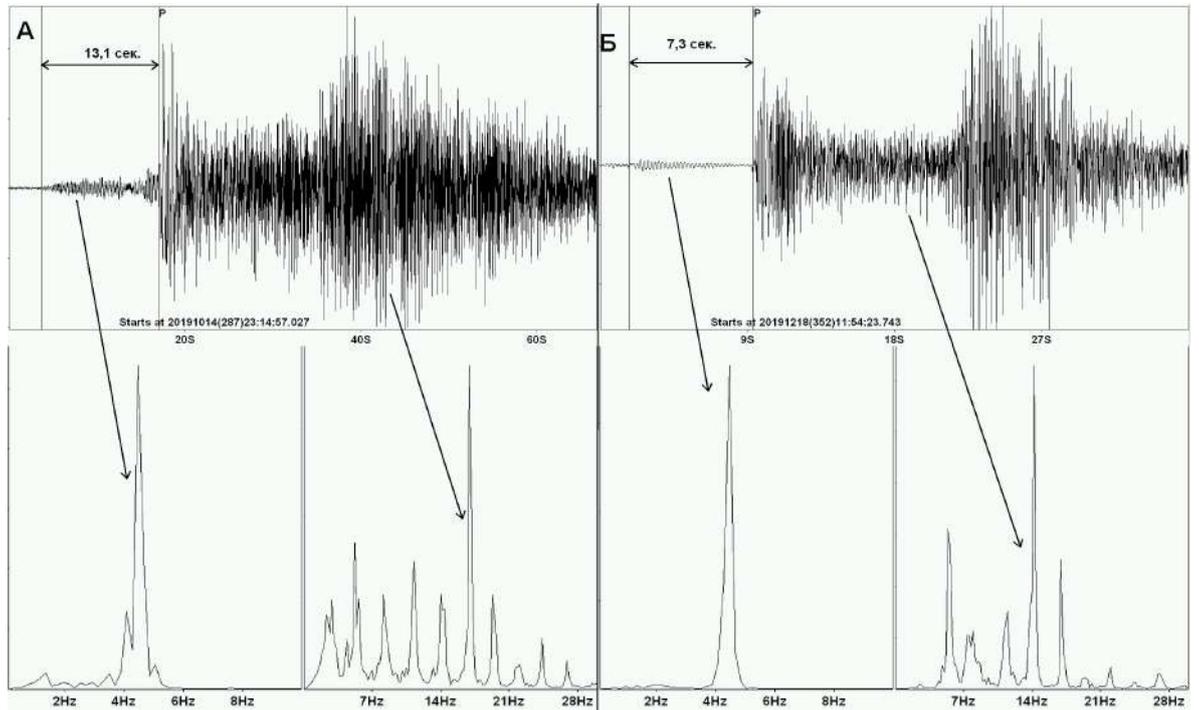


Рисунок 2.34. Примеры записи сейсмических событий с предшествующим сигналом и спектральный анализ (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) предшествующего сигнала и сейсмического события по записям, построенный как функция автокорреляции сигнала в программном комплексе DIMAS. А – 14.10.2019 г., Б – 18.12.2019 г.

Параметры выделенных низкочастотных колебаний (период, амплитуда, частота сигнала, время появления и структура самого сигнала) варьируют незначительно. Период колебаний составил 0.2 с, колебания появляются за 3–13 с до прихода Р-волны, их можно наблюдать на сейсмических записях без предварительного фильтра. Незначительное отличие параметров предшествующих сигналов из очаговых зон в пределах одного региона согласуется с ранее полученными результатами [Сасорова, 2005]. В лабораторных экспериментах по неустойчивому скольжению (stick-slip) «отчетливо проявился эффект смещения соответствующих спектральных пиков в область низких частот по мере приближения контакта к моменту динамического срыва» [Кочарян и др., 2018].

Выводы по главе 2

Обоснован выбор места размещения сейсмического оборудования, описано расположение и оснащение пунктов наблюдений с целью сбора и анализа геофизических данных. Целесообразность выбора местоположения современного инновационного оборудования молекулярно-электронного типа определяется, главным образом, расположением полигона Петропавловское и пункта Загорское в зоне активного Центрально-Сахалинского разлома, где проживает большая часть населения Сахалинской области. Южные Курильские острова (о. Кунашир) находятся в регионе с высокой сейсмической активностью – в зоне Западно-Тихоокеанской субдукции.

Установлен широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-6111, начата непрерывная регистрация сейсмоакустических сигналов специально сконструированными молекулярно-электронными гидрофонами, размещенными в скважинах и открытом водоеме, запущены две короткопериодные сейсмостанции. Организован удаленный доступ к регистрируемым данным, а также контроль и управление работой установленного оборудования.

Таким образом, на основе стандартного сейсмологического оборудования геофизических полигонов и пункта наблюдений СФ ФИЦ ЕГС РАН, дополненного в рамках выполнения ИМГиГ ДВО РАН проекта РФФИ новым оборудованием молекулярно-электронного типа последнего поколения, создана и апробирована методика установки молекулярно-электронных датчиков для проведения геофизических исследований на островах Сахалин и Кунашир.

ГЛАВА 3. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ЭКСПЛУАТАЦИЮ МОЛЕКУЛЯРНО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ²

3.1. Влияние возбуждения импульсов напряжения в геосреде на уровень сейсмического шума молекулярно-электронных приборов

Взаимодействие между сейсмическими волнами и электрическими полями уже долгое время представляет практический интерес, поскольку может стать основой новых методов изучения глубинных процессов. Сейсмическое и электрическое поля – одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике и которые можно эффективно создавать и измерять. Вместе с тем, сложность геомеханических и физических процессов в неоднородных средах и их восприимчивость к внешним воздействиям физических полей служат сильной мотивацией для дальнейшего исследования преобразований этих полей.

² При подготовке данного раздела диссертации использованы следующие публикации, выполненные автором лично или в соавторстве, в которых, согласно Положению о присуждении ученых степеней в МГУ, отражены основные результаты, положения и выводы исследования:

1. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., **Boginskaya N.V.** About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.. – 2019. – No. 324 (012009). – DOI 10.1088/1755-1315/324/1/012009. (0.88 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.199).
2. 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, № S2. – С. 1-6. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2s-0634. (0.75 п.л., вклад автора 40%, ИФ SJR – 0.293).
3. Костылев Д.В., **Богинская Н.В.** Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир) // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 486-499. – DOI 10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499. (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.75 п.л., авторский вклад 50%).
4. **Boginskaya N.V.**, Kostylev D.V. Change in the level of microseismic noise during the COVID-19 pandemic in the Russian Far East // Pure and Applied Geophysics. – 2022. – No. 179. – P. 4207–4219. – DOI 10.1007/s00024-022-03019-7. (1.63 п.л., вклад автора 75%, импакт-фактор JCI – 0.570).
5. Костылев Д.В., **Богинская Н.В.** Опыт и особенности эксплуатации молекулярно-электронного сейсмометра на о. Сахалин // Российский сейсмологический журнал. – 2022. – Т. 4, № 3. – С. 81-93. – DOI 10.35540/2686-7907.2022.3.07. (ИФ РИНЦ: 1.2830. 1.63 п.л., авторский вклад 50%).
6. Богомолов Л.М., Костылев Д.В., **Костылева Н.В.**, Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С. Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электроразведках в районе Центрально-Сахалинского разлома // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 115-131. – DOI 10.30730/gtrz.2023.7.2.115-131. (ИФ РИНЦ: 0.672. 2.13 п.л., авторский вклад 30%).

Испытания по оценке воздействия генератора импульсных напряжений для сейсмoeлектрической разведки недр впервые проводились в ИМГиГ ДВО РАН в октябре 2020 года и описаны в работе [Геофизический генератор...2021]. Пригодность разработанной конструкции генератора и правильность выбора параметров его элементов подтвердились в ходе испытаний в полевых условиях, где был проведен детальный анализ воздействия геофизического генератора на параметры геосреды.

Оценка реакции среды на электрoзондирование определялась по записям молекулярно-электронных приборов (производитель ООО «Р-Сенсорс», Россия): широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона [Kostylev et al., 2019; Костылев, Богинская, 2020], установленных на этом полигоне на расстоянии около 50 м от одного из полюсов возбуждающего электрического диполя. Использование перечисленного оборудования позволяет выявлять реакцию среды на электрoзондирования по сигналам в широком частотном диапазоне. При этом гидрофон может регистрировать высокочастотные сигналы, источники которых находятся на расстоянии не более нескольких сотен метров (из-за сферической расходимости и затухания волн). Сейсмометр СМЕ-6111 предназначен для регистрации сейсмических волн на частотах 1–50 Гц, источники которых на глубинах как минимум несколько километров. В ближней зоне около места размещения приборов источники сейсмических сигналов отсутствуют. Таким образом, сочетание сейсмометра и гидрофона позволяет сравнивать реакцию среды на электрoзондирования на разных расстояниях возбуждающего диполя. Общая схема расположения комплексного полигона Петропавловское, сейсмических станций и разломных структур южного Сахалина [Рождественский, Сапрыгин, 1999] приведена на рисунке 3.1. На этом же рисунке (врезка А) показано положение возбуждающего электрического диполя АВ, образованного двумя заземленными электродами. Для привязки к местности также указаны координаты реперной точки. Нужно отметить, что на заключительном этапе эксперимента в ноябре 2022 г. сейсмометр СМЕ-6111 был вынужденно перемещен из сейсмокамеры на бетонный постамент. Из-за этого снизилась степень защиты прибора от воздействия внешних помех, несмотря на оснащение прибора защитным кожухом.

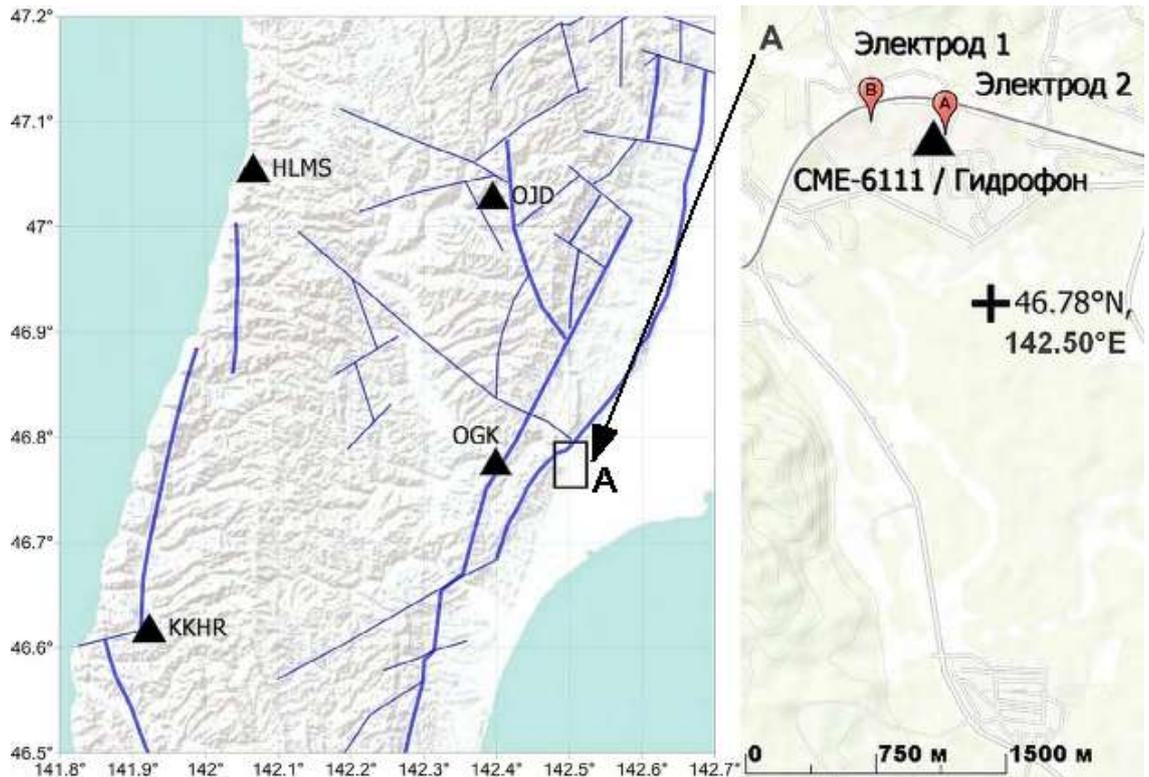


Рисунок 3.1. Карта расположения сейсмических станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН (черные треугольники) и разломов южного Сахалина (синие линии). Врезка А: расположение электродов и сейсмических приборов полигона комплексных геофизических наблюдений

Эксперимент проводился в 4 этапа в течение 2020–2022 гг. Информация о времени зондирований и параметрах импульсов тока на каждом этапе приведена в таблице 3.1. Методика зондирований описана в статье [Геофизический генератор...2021], посвященной первому этапу эксперимента. На всех этапах для возбуждения в земле импульсов тока использовался один и тот же диполь АВ длиной 408 м. Сопротивление нагрузки, получающееся в результате растекания тока в среде, составило 38 Ом. Величина сопротивления контролировалась перед началом каждого этапа эксперимента. Было установлено, что длительное пребывание в увлажненном грунте электродов, изготовленных из нержавеющей стальных труб, практически не повлияло на так называемое «кажущееся сопротивление», складывающееся из сопротивления на контактах электродов с землей и собственно сопротивления распределенной нагрузки.

Таблица 3.1.

Параметры зондирований на комплексном геофизическом полигоне с. Петропавловское, о. Сахалин

№ этапа	Дата зондирований	Время начала (UTC)	Количество импульсов, источник	Среднее напряжение, В	Средняя амплитуда тока, А
1	29.10.2020 29.10.2020	00:15 01:45	Источник модульного напряжения	360	4.9
2	15.11.2021 16.11.2021 17.11.2021 18.11.2021	00:50 02:45 09:29 00:33	Генератор 230 В АС	300	5.1
3	25.04.2022 26.04.2022 27.04.2022 28.04.2022	02:20 00:30 07:36 23:39	Генератор 230 В АС	200-400	5.9
4	07.11.2022 08.11.2022 09.11.2022 10.11.2022	01:39 07:18 01:47 01:05	Источник модульного напряжения	560	13

Примечание. На каждом этапе время зондирования и параметры импульсов тока одинаковы: серия в 200 импульсов 20 секунд длительности, с паузами 20 секунд

Воздействие импульсов генератора на геофизические параметры оценивалось, прежде всего, по записям сейсмического шума молекулярно-электронных приборов, а также по результатам анализа измерений многоэлектродной системы. Испытания показали, что уровень сейсмического шума уменьшался в ночные периоды и увеличивался во время дневной активности [Геофизический генератор...2021].

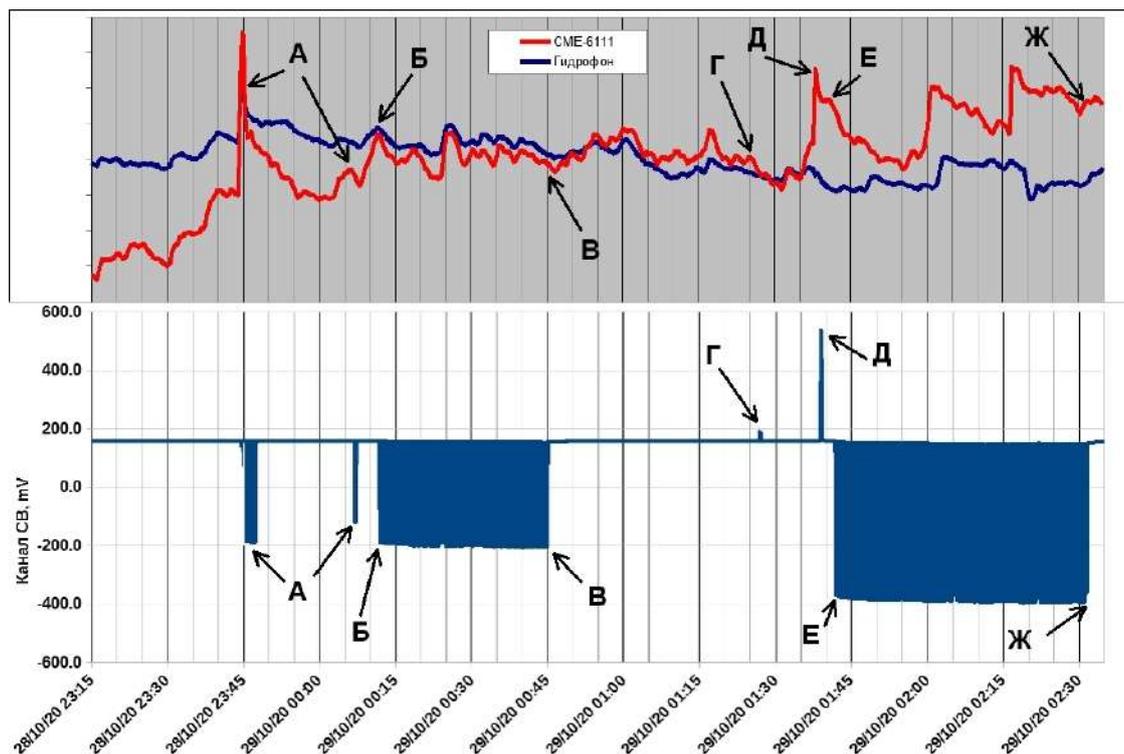


Рисунок 3.2. Огибающая сигналов сейсмического шума молекулярно-электронных приборов (вверху) и изменение разности потенциалов на каналах измерений между электродами северо-восточного (СВ) шурфа системы геоэлектрических измерений (внизу) в период проведения эксперимента (время UTC). Этапы проведения эксперимента: (А) – проверка оборудования; (Б) – первая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 5 с, пауза 15 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – 5.2 А в начале серии, 4.95 А – в конце; (В) – окончание первой серии импульсов; (Г) – планируемое начало второй серии импульсов (первый тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 1 с (выход из строя входного предохранителя); (Д) – планируемое начало второй серии импульсов (второй тест). Полярность: электрод 1 (+), электрод 2 (–). Импульс не более 5 с (перегрузка генератора 2 кВт); (Е) – вторая серия импульсов. Полярность: электрод 1 (–), электрод 2 (+). Импульс 10 с, пауза 20 с. Количество импульсов – 100. Значение тока – от 5.2 до 5.4 А; (Ж) – окончание второй серии импульсов [Геофизический генератор...2021]

Результаты, представленные на рисунке 3.2, показывают, что фактически каждому этапу эксперимента в записях молекулярно-электронных приборов соответствует отклик в уровне регистрируемого сейсмического шума на воздействие импульсов напряжения и возбуждения тока во внешнем слое земной коры. Кроме того, был проведен анализ четырех периодов продолжительностью по 24 часа – двое суток до начала эксперимента, сутки в день проведения

эксперимента и сутки в день, следующий за днем проведения эксперимента. Результаты анализа представлены на рисунке 3.3.

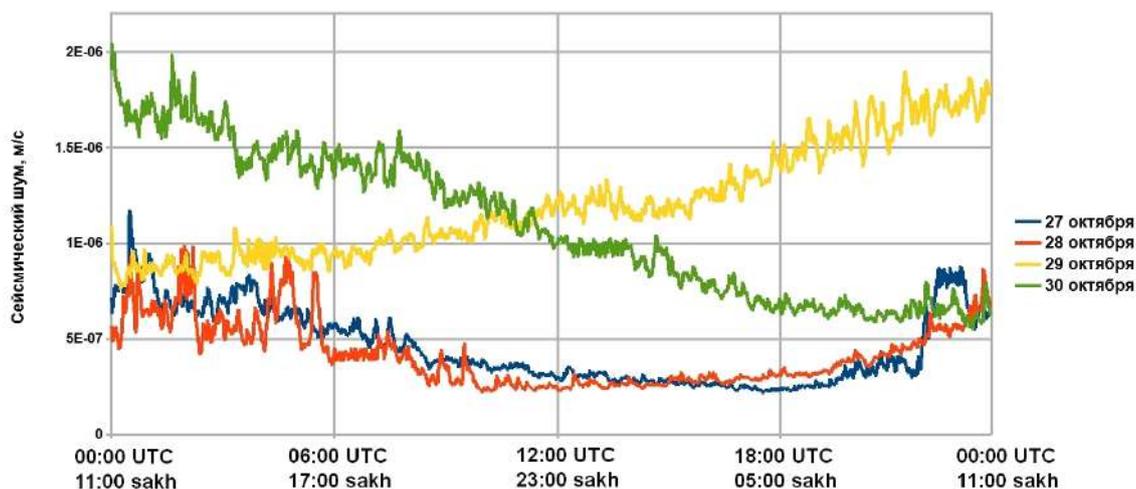


Рисунок 3.3. Сейсмический шум, зарегистрированный молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 до и после проведения эксперимента

В процессе анализа записей сейсмического шума сейсмометром СМЕ-6111 были построены огибающие сигнала сейсмического шума, очищенные от откликов записей прибора на сейсмические воздействия. Рисунок наглядно показывает для дней, предшествующих эксперименту (27–28 октября), явно выраженный суточный характер изменения уровня сейсмического шума – значительное уменьшение его уровня в ночные периоды (по сахалинскому времени) и увеличение во время дневной активности. Совершенно иной характер отмечается 29 октября (время начала записи шума 29 октября на рисунке соответствует времени начала эксперимента). Традиционного ночного затишья в уровне шума 29 октября не наблюдается, наоборот, отмечается сигнал акселерационного типа (плавное нарастание колебаний). Указанная тенденция сохраняется в течение 22–23 часов после окончания эксперимента. Следующие сутки после проведения эксперимента (30 октября) характеризуются сигналом релаксационного типа, и уровень сейсмического шума возвращается к обычным значениям приблизительно через 42 часов после окончания эксперимента. Подобные результаты не противоречат данным, полученным в работе [Сейсмоакустические проявления... 2014], где отмечалось, что амплитуда сигналов после электромагнитного воздействия на геосреду превышала среднеквадратичный уровень шума более чем в 3 раза [Геофизический генератор...2021].

Методика зондирований к новым экспериментам 2021-2022 гг. претерпела некоторые изменения. При подготовке к экспериментам 2021–2022 гг. для устранения недостатков, выявленных на первом этапе в 2020 г., было усовершенствовано генераторное устройство для электроразондирований. Работоспособность устройства была проверена в серии испытаний на площадке в ИМГиГ ДВО РАН с применением макетной нагрузки с сопротивлением 38 Ом, как и у диполя на полигоне Петропавловское [Исследование влияния..., 2024].

Всего в 2021–2022 гг. было проведено 12 сеансов электроразондирования. Для каждого сеанса анализировались сейсмические записи, полученные молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111, продолжительностью 4 часа каждая. Период записи охватывает время самого сеанса (2.2 часа), а также интервалы около 1 часа до и после электроразондирования. Для анализа сейсмических записей использовалась программа SpectrumSeism. Для всех 12 случаев электроразондирования записи практически идентичны, небольшие различия заключаются в наличии или отсутствии прочих шумов, не связанных с возбуждением в среде импульсов тока. На рисунке 3.4 показана спектрограмма сейсмических сигналов во время одного из сеансов на втором этапе эксперимента. На рисунке можно четко видеть, что во время сеанса сейсмометр СМЕ-6111 регистрирует увеличение амплитуды сигнала на частотах около 25 Гц, причем на двух близких гармониках [Оценка возможного воздействия..., 2024].

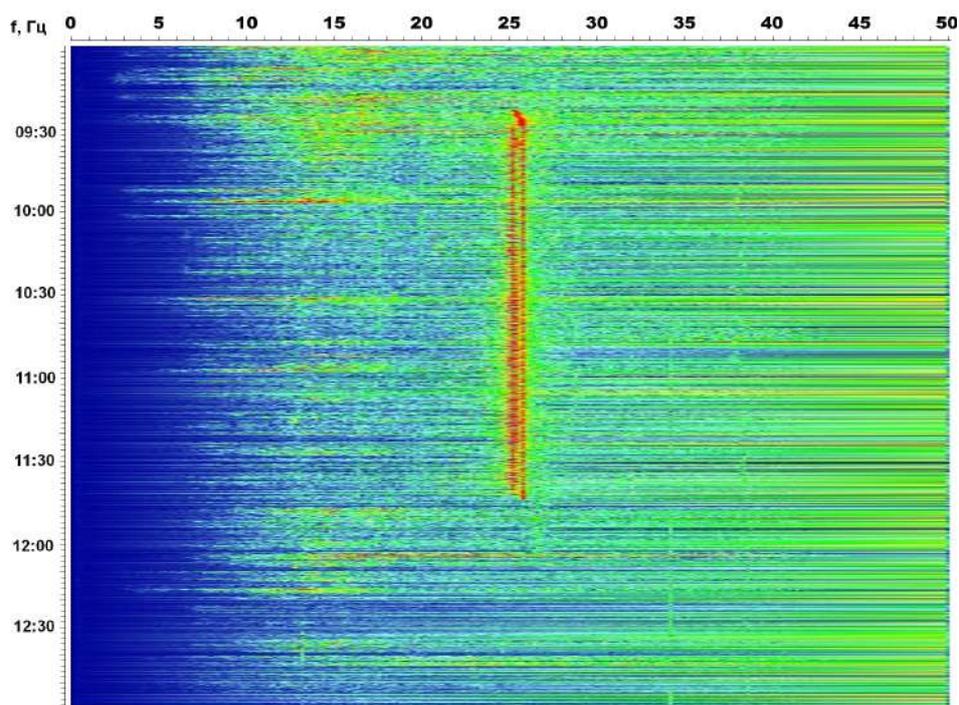


Рисунок 3.4. Спектрограмма записи сейсмического сигнала, зарегистрированного 17.11.2021 г. по вертикальному каналу сейсмометра СМЕ-6111

Для уточнения значений этих частот с помощью этой же программы для всех 12 случаев построены графики спектральной плотности сейсмических сигналов в произвольное время после начала сеансов электровоздействия. На рисунке 3.5 представлены примеры таких графиков.

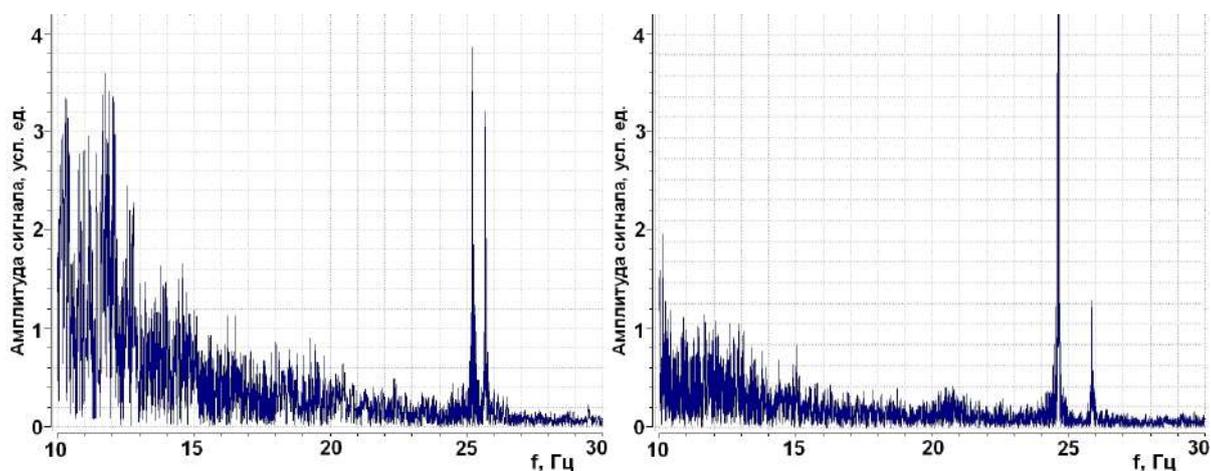


Рисунок 3.5. Спектральная плотность сигнала в периоды проведения электроразрядов 18.11.2021 г. (слева) и 09.11.2022 г. (справа)

На рисунке 3.5 и на всех остальных полученных графиках также хорошо прослеживаются две гармоники, причем амплитуда первой превышает амплитуду второй. Для частоты, на которой зафиксирована максимальная амплитуда сигнала, построены графики изменения амплитуды этой гармоники со временем в течение 4 часов (также для всех 12 случаев). Два примера таких графиков показаны на рисунке 3.6.

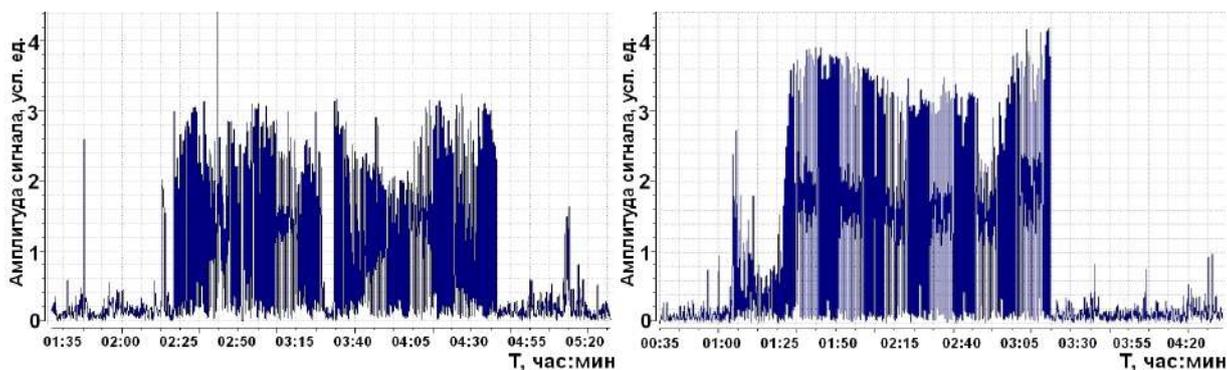


Рисунок 3.6. Изменения амплитуды спектра сейсмического сигнала в период проведения электроразведки на частоте 25.06 Гц 25.04.2022 г. (слева) и на частоте 24.51 Гц 10.11.2022 г. (справа)

На графиках, показанных на рисунке 3.6, и на аналогичных графиках для других сеансов электроразведки четко видно время начала и конца этих сеансов (совпадающее с записями из дневников экспериментов), а также все случаи, когда в ходе сеансов происходили перерывы или сбои (как, например, 7-минутный перерыв на рисунке 3.6, кадр слева). Влияние электровоздействия отмечено в диапазоне сейсмических частот до 25 Гц, при этом оно проявляется наиболее контрастно для отдельных гармоник. Параметры импульсов тока на разных этапах эксперимента и в разные дни зондирования на каждом этапе несколько отличались друг от друга по амплитуде тока, полярности, а также времени начала сеансов электроразведки, для того чтобы был выполнен принцип рандомизации эксперимента. Согласно этому принципу, новые физические эффекты могут считаться полностью достоверными, если они устойчивы к некоторым изменениям параметров постановки эксперимента [Красовский, Филаретов, 1982; Чердынцев, 2022]. Элемент случайности вводят в планирование эксперимента в тех случаях, пока еще неизвестна или недостаточно разработана математическая модель. К таким случаям можно отнести описанное выше исследование обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода в разломной зоне. Обобщая вышеизложенные результаты, можно заключить, что импульсы тока в приповерхностном слое коры при электроразведках в зоне Центрально-Сахалинского разлома оказывают влияние на источники сейсмических и сейсмоакустических волн, из-за чего возрастает амплитуда шумов [Наблюдение обратного...2023; Оценка электроимпульсных воздействий..., 2024].

Параллельно был проведен анализ электровоздействия (ЭВ) на основании записей сейсмического шума по данным молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения ЭВ с использованием программы SpectrumSeism, предназначенной для анализа спектров сейсмических данных [Свидетельство о..., 2021]. Построенные с помощью этой программы записи волновых форм сейсмоакустических сигналов в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г. показаны на рисунке 3.7. Молекулярно-электронный гидрофон устойчиво регистрировал все сеансы с подачей в диполь импульсов тока. По записям волновых форм можно было проследить продолжительность сеансов зондирования и число импульсов в сеансе.

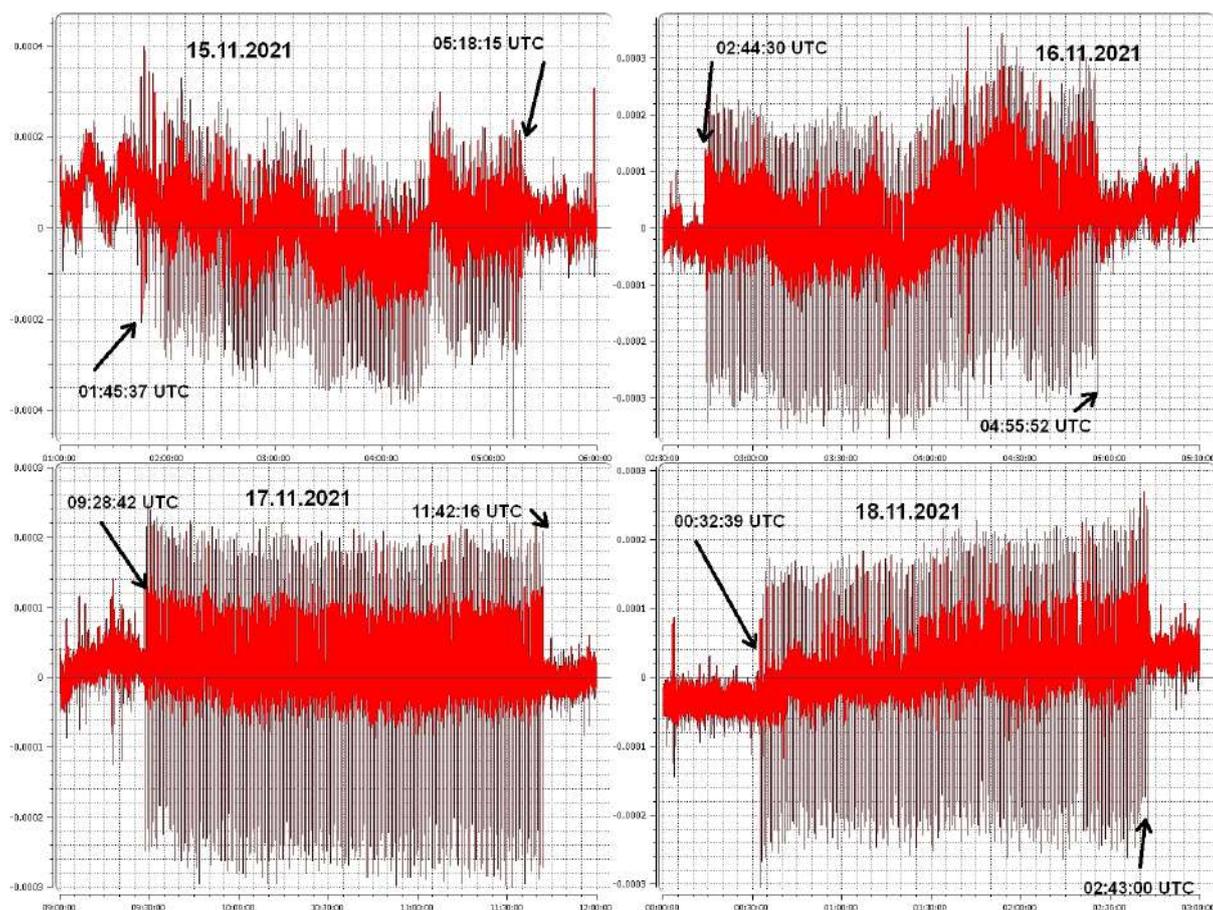


Рисунок 3.7. Волновые формы по записям молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г.

Для выявления региональных особенностей реакции среды на импульсы тока при зондированиях в зоне Центрально-Сахалинского разлома был построен спектр сейсмоакустических сигналов с молекулярно-электронного гидрофона. Использовалась запись сейсмоакустического шума в течение 3.25 суток в период с 00:00:00 15.11.2021 г. по 06:00:00 18.11.2021 г. (UTC). При спектрально-временном анализе во время сеансов зондирования были выделены отдельные гармоники с частотами 4.27 и 12.5 Гц (рисунок 3.8, верхняя панель). Для этих гармоник анализировалась зависимость спектральной плотности от времени (рисунок 3.8, нижняя панель). Выбор гармоник определялся тем, что в ранее проведенном эксперименте на Бишкекском геодинамическом полигоне [Telluric Currents...2023] именно на этих частотах были обнаружены сейсмоакустические отклики на электровоздействие по записям скважинного геофона.

На спектре на рисунке 3.8 (вверху) заметна реакция сигналов гидрофона на электроразведку в частотном диапазоне 3–25 Гц. На более высоких частотах анализ затруднен из-за наличия различных постоянных помех, очевидно, техногенного характера.

Важно отметить, что описанный ранее в [Сейсмоакустические проявления...2014] характерный отклик на внешнее воздействие на частоте 4.27 Гц проявляется и в нашем эксперименте, а вот амплитуда отклика на частоте 12.5 Гц на порядок меньше, хотя он все же имеет место. Построение спектра записей сейсмического шума позволило выявить некоторые особенности, которые могут иметь отношение к проявлениям реакции среды во время электровоздействий.

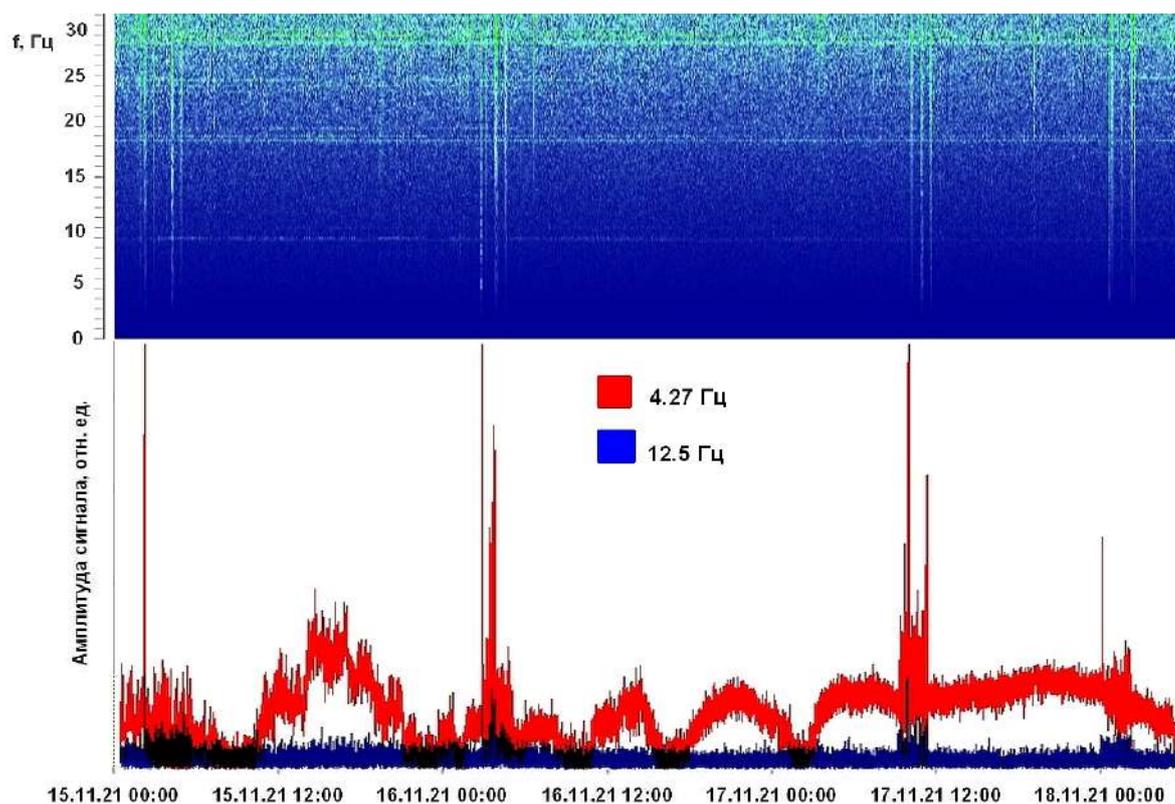


Рисунок 3.8. Спектрограмма сейсмоакустического шума по записям молекулярно-электронного гидрофона (вверху) и спектральная плотность на частотах 4.27 и 12.5 Гц (внизу) на втором этапе эксперимента

Для определения частот, на которых происходит максимальное воздействие упругих колебаний на пространство вокруг трубы и жидкость внутри обсадной трубы, где установлен молекулярно-электронный гидрофон, были построены зависимости амплитуды сигнала, зарегистрированного гидрофоном в моменты начала экспериментов 15 ноября 2021 г., от частоты. Результаты представлены на рисунке 3.9.

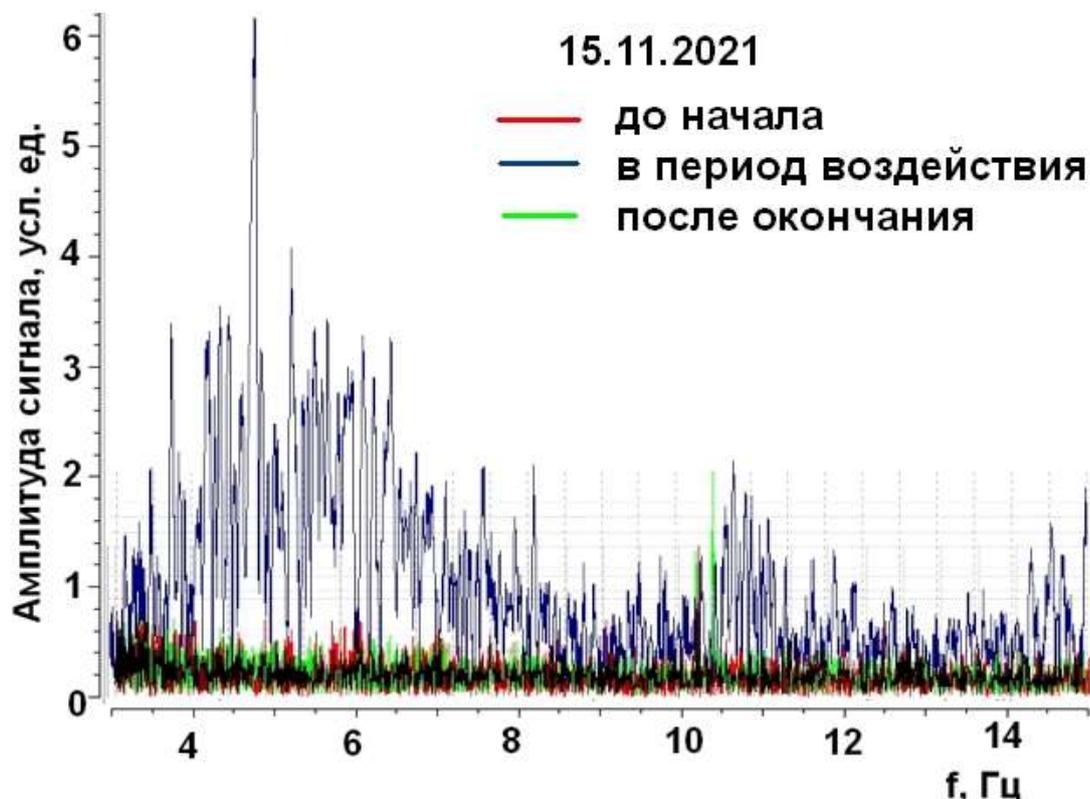


Рисунок 3.9. Спектральный состав сигнала в моменты проведения электроразондирований по записям молекулярно-электронного гидрофона

На рисунке 3.9 видно, что максимальная плотность спектра приходится на частоты 4.7–4.9 Гц, что может считаться подтверждением чувствительности сейсмоакустических сигналов, регистрируемых гидрофоном, к началу сеанса с серией импульсов тока. Источник сигналов с такой частотой мог находиться на расстояниях не более десятков или нескольких сотен метров от гидрофона, иначе сигналы не могли быть зарегистрированы из-за расходимости и поглощения упругих волн. При электроразондированиях в 2022 г. (третий и четвертый этапы эксперимента) не было выявлено существенных различий в записях сейсмоакустического шума по сравнению с предыдущими результатами.

Таким образом, результаты анализа записей молекулярно-электронного гидрофона в экспериментах 2021-2022 годов не выявили существенных различий в регистрации электровоздействий [Наблюдение обратного...2023; Сейсмоакустические проявления...2023].

3.2. Воздействие экзогенных факторов на сейсмический шум, регистрируемый молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111

В ходе проведенных исследований, подробно описанных в п. 3.1., на записях волновых форм станций СФ ФИЦ ЕГС РАН «Ожидаево» и «Холмск», сейсмометра СМЕ-6111, а также короткопериодных сейсмометров Zetlab 7152-N и СПВ-3к, установленных на время экспериментов, зарегистрированы изменения уровня сейсмического шума. Данные изменения оказались связанными с такими атмосферными явлениями как циклоны, наличие которых отмечено на всех этапах проведения сеансов электровоздействий.

Здесь приведено только описание самих явлений с картой прохождения циклона и показаны графики средних значений огибающей сигнала шума на записи прибора (рисунок 3.10). В подтверждение уровня атмосферных воздействий можно использовать синоптический обзор [Мезенцева, Каптюг, 2021, 2022], содержащий информацию о положении циклонов в периоды проведения экспериментов по данным бюллетеней Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института (ДВНИГМИ). Карта прохождения циклонов ноября 2021 года, апреля и ноября 2022 года показана на рисунке 3.10 с указанием значений давлений в центре циклона в указанные даты.

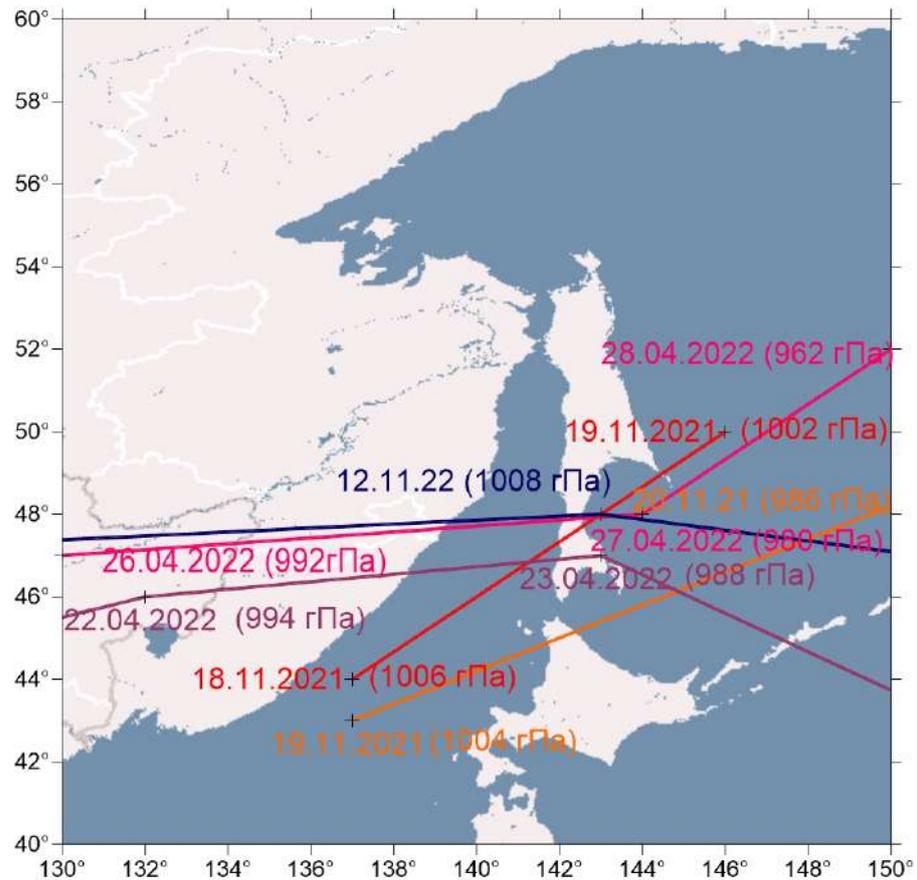


Рисунок 3.10. Карта прохождения циклонов в ноябре 2021, в апреле и ноябре 2022 гг.

В связи с выявленной возможностью влияния циклонов на уровень сейсмического шума для записей волновых форм всех установленных на время экспериментов станций в программе DIMAS были построены графики средних значений огибающей сигнала (временное окно 600 секунд) сейсмического шума с предварительно уменьшенной до 10 Гц частотой дискретизации. Продолжительность выбранного для анализа интервала записей – 6-9 суток, включающего как сам период эксперимента, так и сутки до него и несколько суток после. Огибающие от каждого из трёх экспериментов представлены на рисунке 3.10, дополненном информацией о силе ветра по данным ближайших метеорологических станций в районе исследования [Архив погоды в Холмске..., 2023; Архив погоды в Огоньках..., 2023]. На рисунке 3.11 видно, что для экспериментов ноября 2021 г. и апреля 2022 г. не наблюдается не только возможных результатов электроразондирования на уровень шумов, но и традиционного изменения суточного уровня шума, связанного с техногенной активностью в дневное время, особенно характерного для середины рабочей недели [Сейсмоакустические проявления...2023].

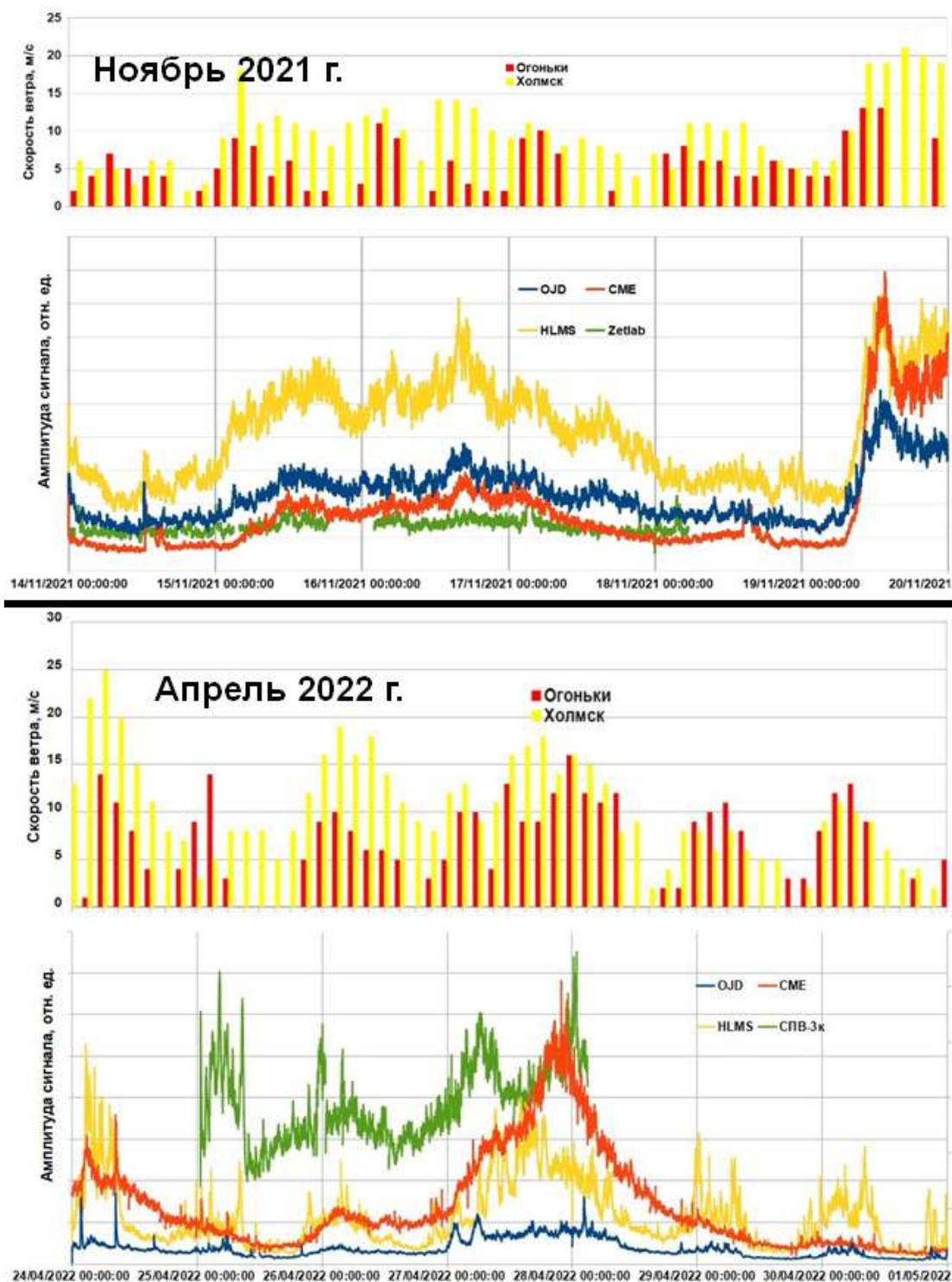


Рисунок 3.11. Изменение уровня сейсмического шума на станциях южного Сахалина и соответствующие этому периоду природные воздействия (сила ветра) для эксперимента в ноябре 2021 г. (вверху) и в апреле 2022 г. (внизу). Записи СМЕ-6111 показаны на рисунке красным цветом

Как известно [Адушкин и др., 2008], влияние барических вариаций, вызываемых циклонами, на характеристики сейсмического шума (особенно в низком диапазоне частот) приводят к увеличению амплитуды микросейсмического фона в десятки раз. Анализ полученных результатов показывает, что основное влияние на уровень сейсмического шума для всех исследуемых записей оказывает совокупность климатических и атмосферных воздействий. Фактически, по всем станциям прослеживается хорошо выраженная корреляция уровня шума и силы ветра, даже несмотря на различные частотные характеристики приборов этих станций [Наблюдение обратного...2023].

Чтобы оценить степень воздействия атмосферных явлений на записи сейсмического шума широкополосного молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, было проведено сравнение с записями широкополосного сейсмометра STS-2, установленного на сейсмической станции «Южно-Сахалинск».

Исследования для сейсмометров, установленных на станции «Южно-Сахалинск» и, в частности, для STS-2, проводились в 2020 году и описаны в работе [Boginskaya, Kostylev, 2022]. На построенных огибающих сигнала шума были выявлены некоторые импульсные аномалии, причиной одной из них оказалось атмосферное явление в виде циклона. Циклон № 28, траекторию прохождения которого можно увидеть на рисунке 3.12А, в течение суток оказывал влияние на юг Дальнего Востока РФ [Мезенцева, Каптюг, 2020]. В конце марта — начале апреля на территорию исследования значительное влияние оказывали циклоны и антициклоны. В начале первой декады апреля Японское море находилось под влиянием циклона № 28, который развивался южнее Японии и значительно углубляясь переместился на северо-восток. Скорость ветра на акватории моря составляла 8-13 м/с, волнение моря – 1-2 м. 4 апреля вблизи южного побережья Приморья под высотным центром циклон углубился, а далее медленно продвигался в восточном направлении. 6 апреля он вышел в Охотское море, вызвав в Японском море ветер до 13-18 м/с, волнение моря 3-4 м и сильные осадки. Буквально на следующий день свое влияние оказал циклон № 33. На рисунке 3.12В представлены графики мощности спектральной плотности шума на сейсмостанции «Южно-Сахалинск» для шестичасового отрезка записи сейсмического шума, сделанной в день прохождения циклона 5 апреля 2020 года и, для сравнения, равных по продолжительности отрезков в незатронутые циклонами дни, например, 24 марта 2020 года и 11 апреля 2020 года.

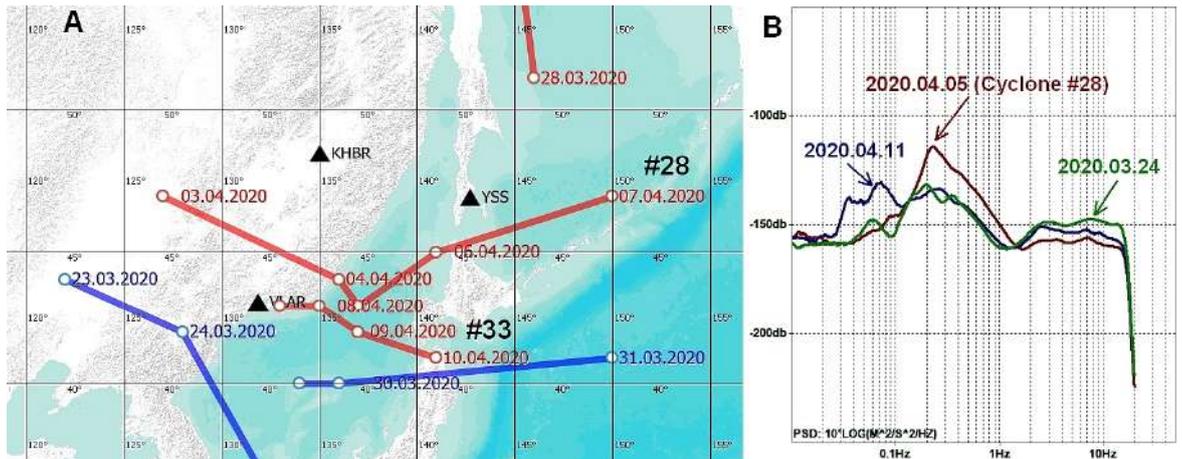


Рисунок 3.12. Карта прохождения циклонов (красные линии) и антициклонов (синие линии) в районе исследования (А). Мощность спектральной плотности шума в день прохождения циклона, а также в другие периоды для сейсмостанции «Южно-Сахалинск» (В)

Из рисунка 3.12В видно, что влияние атмосферных факторов на записях сейсмометра STS-2 значительно превышает воздействие техногенного сейсмического шума.

3.3. Влияние атмосферных факторов на уровень сигнала гидрофонов

На практике, в условиях автономных пунктов наблюдений, на работу гидрофонов оказывают воздействие атмосферные явления, степень влияния которых определяется, в том числе, и способом установки гидрофона. Для гидрофона, установленного в глубокой скважине (о. Кунашир, полигон Южно-Курильск), была проведена оценка влияния атмосферных параметров (таких как уровень атмосферного давления и значения уровня воды в скважине) на работу гидрофона по следующей методике: для записей волновых форм продолжительностью 7 суток построена усредненная огибающая сигнала, которая была дополнена информацией об уровнях давления и уровне воды в скважине в месте установки гидрофона. Из рисунка 3.13 следует, что изменения давления и уровня воды не оказывают существенного влияния на работу прибора [Костылев, Богинская, 2020].

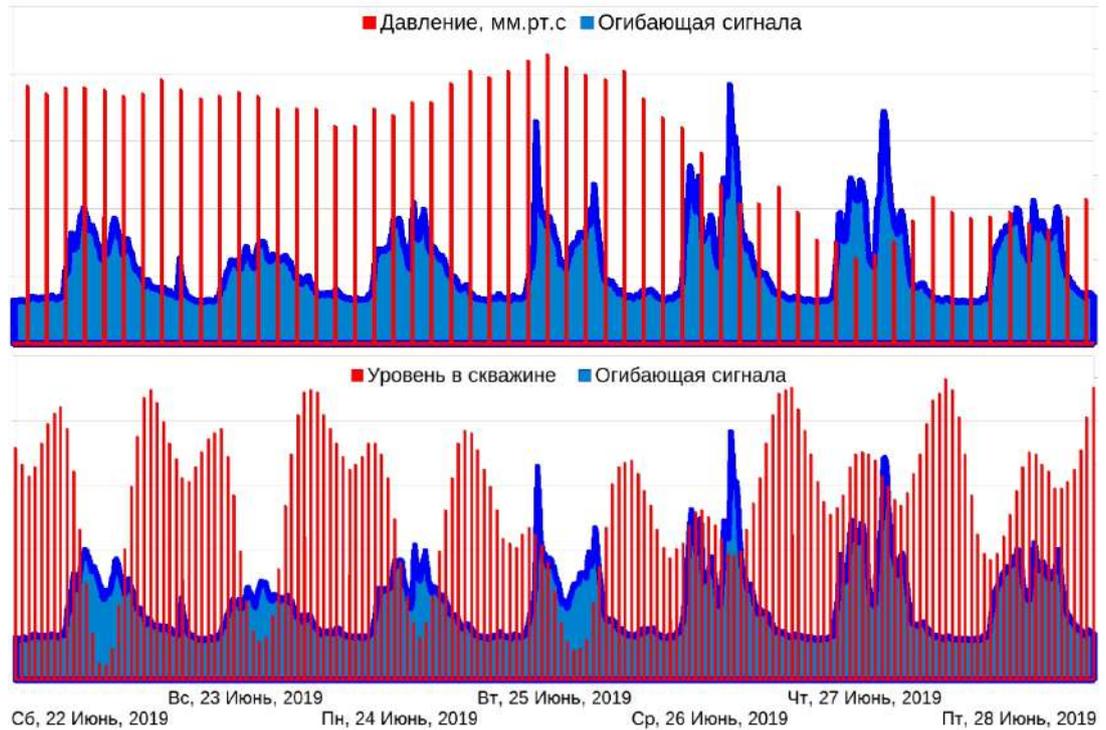


Рисунок 3.13. Соотношения уровня атмосферного давления по данным метеостанции «Южно-Курильск» (вверху) и уровня воды в скважине с установленным гидрофоном (по данным уровнемера гидростатического «Кедр-ДМ» ОСП «СахГРЭ», http://www.geomonitoring.ru/download/IB/2018_dfo.pdf) и огибающей сигнала гидрофона

На рисунке выделяются только суточные изменения уровня сигнала гидрофона, связанные с техногенной активностью в дневное время, особенно характерные для середины рабочей недели. Для гидрофонов, работающих в более «жестких» условиях (мелководном водоеме и неглубокой открытой скважине), влияние природных факторов более значительно.

В 2020 г. проведена оценка воздействия уровня осадков и ветровой нагрузки на работу гидрофонов в открытом водоеме (пункт Загорское) и неглубокой скважине (полигон Петропавловское) в период прохождения тайфуна «Хагупит» 7 августа [Долинская правда, № 33, 14 авг. 2020 г.; Евдокимова, 2020]. Тайфун оказал сильное влияние на районы установки пунктов сейсмоакустических исследований. Так, по данным ближайших к пунктам наблюдений метеостанций, в Долинском районе (пункт Загорское) за 12 ч выпало 73 мм осадков, а порывы ветра достигали 15 м/с, а в Анивском районе (полигон Петропавловское) – 51 мм осадков, порывы ветра до 10 м/с. Результат расчета мощности спектральной плотности сигналов в момент прохождения тайфуна и через двое суток после его окончания представлен на рисунке 3.14.

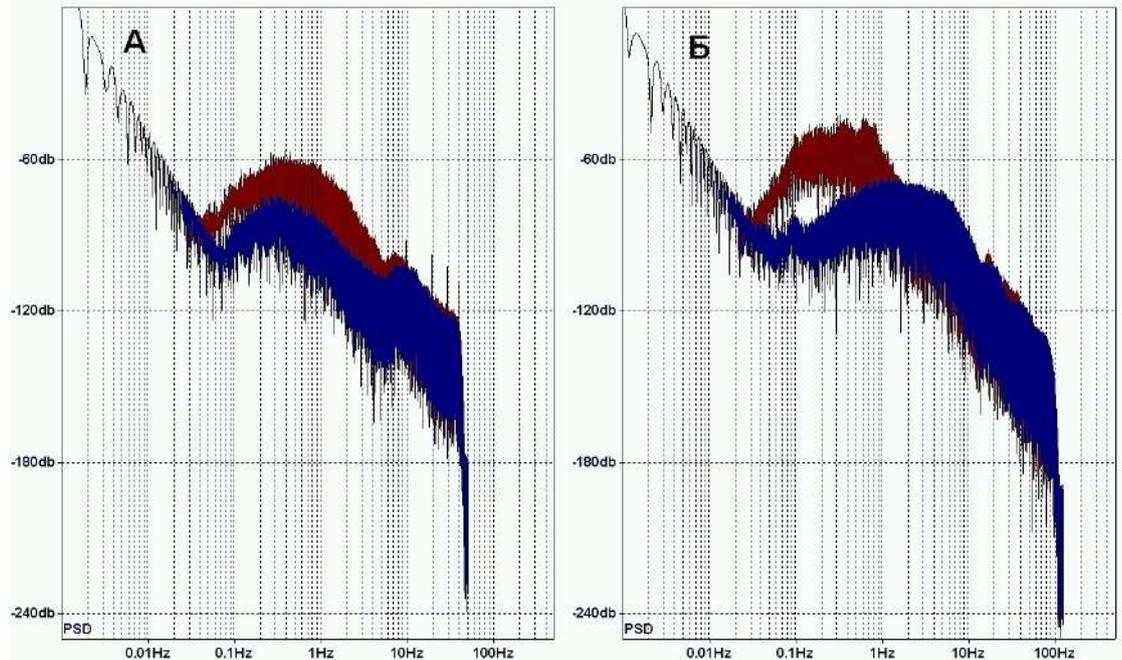


Рисунок 3.14. Спектральная плотность сейсмического шума на полигоне Петропавловское (А) и в пункте Загорское (Б) в период прохождения тайфуна (красный цвет) — 7 августа 2020 года и после окончания выпадения осадков — 9 августа 2020 года (синий цвет)

Очевидно значительное влияние воздействия тайфуна на гидрофон в открытом водоеме (Б) на частотах до 1 Гц. При этом влияние тайфуна на гидрофон в скважине (А) проявляется в меньшей степени, но в большем частотном диапазоне 0.1–10 Гц.

3.4. Влияние низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111

За время наблюдений с 2018 по 2022 гг. накоплен значительный архив записей волновых форм. На основании собранных результатов проведена оценка регистрационных возможностей комплекта, используя записи локальных, региональных и телесеismicких событий. Полученные результаты показали высокую эффективность молекулярно-электронного широкополосного сейсмометра для идентификации записей seismicких событий различной удаленности. Однако, в процессе обработки данных и сравнении полученных результатов с

данными Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» были выявлены некоторые особенности, очевидно, связанные с условиями эксплуатации оборудования, что ранее отмечалось и в других случаях эксплуатации молекулярно-электронных сейсмометров в регионах с пониженными температурами [Кобелева, Гилева, 2019].

Для анализа стабильности характеристик молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111 была проделана работа по оценке зависимости результатов определения энергетических параметров сейсмических событий от влияния окружающей температуры. За период декабрь 2018 - август 2019 гг. отобраны 28 наиболее значительных сейсмических события в районе южной части острова Сахалин [Михайлов, Семёнова, 2020; Михайлов, Семёнова, 2021; 2018-ER_App13_Southern-Sakhalin_2018, 2022; 2019-ER_App13_Southern-Sakhalin_2019, 2022]. Для этих событий сохранены соответствующие записи сейсмометра СМЕ-6111 (с регистратором NDAS-8226) геофизического полигона Петропавловское (PETR) и записи сейсмометра STS-2 (регистратор Quanterra Q330HR) РИОЦ «Южно-Сахалинск» (YSS). Запись каждого сейсмического события обработана в программном комплексе DIMAS с целью определения энергетических характеристик события. Обработка проводилась отдельно по каждому прибору и отдельно по каждой компоненте прибора (Z, NS, EW). Класс сейсмического события был определён по каждой компоненте. Результаты обработки (и каталог событий) сведены в таблицу 3.2, в которой для каждого события указаны значения полученных в результате обработки энергетических классов землетрясений [Костылев и др., 2019; Kostylev, Boginskaya, 2021; Костылев, Богинская, 2022a].

Таблица 3.2.

Результаты обработки сейсмических событий в районе южной части острова Сахалин за период декабрь 2018 - август 2019 гг. по записям молекулярно-электронного сейсмометра и записям РИОЦ «Южно-Сахалинск»

№ в каталоге	Мес. Год	Энергетические классы по STS-2 (YSS)			Энергетические классы по СМЕ(PETR)		
		P (Z канал)	Se (канал EW)	Sn (канал NS)	P (Z канал)	Se (канал EW)	Sn (канал NS)
SKHS180730	12.18		7.4	7.3		11.1	10.6
SKHS180752	12.18		9	8.5		9.5	8.5
SKHS180757	12.18	8.4	6.8	7.4	8.5	8.3	7.7
SKHS180765	12.18	6	7.3	7.6	7.6	8.1	8.5
SKHS180772	12.18	5.1	6.9	6.8	7.4	7.7	7
SKHS190015	1.19	7.4	7.8	8	9.8	8.7	9.4
SKHS190036	1.19		6.8	6.6		7.5	7

SKHS190039	1.19	5.9	7.4	7.3	7.6	8.9	9
SKHS190114	1.19		4.6	5.1		7	7.3
SKHS190171	2.19	6	5.5	5.6	6.7	7.5	7.6
SKHS190185	3.19		5.6	5.9		6.5	7
SKHS190190	3.19		5.9	6.4	6	8.3	8
SKHS190192	3.19	6.2	6.4	6.3	7.2	7.8	7.8
SKHS190196	3.19		5.8	6	5.2	6.3	6.1
SKHS190309	3.19		4.6	5.5		8.2	7.2
SKHS190381	4.19		5.8	6		6.8	6.4
SKHS190383	4.19	6.3	7.3	7.5	6.6	7.3	7.3
SKHS190415	4.19		6.1	6		8.8	8.6
SKHS190472	5.19		7	7.6	5.9	6.8	7
SKHS190484	6.19	5.4	7.1	7.4	5.7	7.2	7.4
SKHS190518	6.19	5.4	7.1	6.8	7.1	7.8	6.8
SKHS190519	6.19	5.7	6	6.6	5.9	6.8	6.8
SKHS190484	6.19	6.5	8	8.2	8.5	9.5	9.1
SKHS190575	6.19	4.4	6	6.3	6.9	7.9	7.7
SKHS190617	7.19		6.4	6.8		6.2	6
SKHS190643	8.19	10.5	11.1	11.5	10.6	11.9	11.7
SKHS190657	8.19		7.8	7.7		7.5	6.8
SKHS190662	8.19	6.1	7.5	7.8	6.4	7	6.9

Из таблицы 3.2 видно, что для зимних месяцев наблюдается значительное превышение (в 1.2–1.3 раза) энергетических показателей, рассчитанных на основании записей сейсмометра СМЕ-6111, относительно данных, полученных по записям сейсмометра STS-2, установленного в сейсмопавильоне РИОЦ «Южно-Сахалинск» на расстоянии 27 км от пункта наблюдений Петропавловское

Исходя из предположения о влиянии низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, был проведен детальный анализ зависимости характеристик сейсмометра от изменения температуры в период с 26 декабря 2019 г. по 22 января 2020 г. Предположение основано на том, что в пункте наблюдений Петропавловское для установки сейсмометра использован способ размещения его в сейсмокамере, находящейся в открытом грунте на незначительной глубине и, следовательно, подверженной влиянию изменения температур в месте регистрации. К сожалению, при установке сейсмометра в сейсмокамере изначально не было предусмотрено измерение температуры окружающей среды, но будем полагать, что температурный режим в сейсмокамере примерно соответствует температуре почвы на глубине 20–40 см, полученной по многолетним наблюдениям на метеорологических станциях Южного Сахалина. В частности, использовался специализированный массив данных «Температура почвы по территории

России», подготовленный Всероссийским научно-исследовательским институтом гидрометеорологической информации (ВНИИГМИ-МЦД) [Специализированные ..., 2022]. На основании этих данных установлено, что самая низкая среднемесячная температура под естественным покровом в слое примерно до глубины 0.4 м приходится на февраль-март и составляет немногим более 0°C . Также, следует учесть, что наиболее низкие температуры на глубинах отмечаются при низкой температуре воздуха и сравнительно небольшой высоте снежного покрова.

В период начала исследований 2018–2019 гг., в декабре 2018 г., средняя высота снежного покрова по данным метеостанции «Южно-Сахалинск» составляла всего 20 см, что отразилось на температуре в слое мощностью 0.2–0.4 м. На основании этих данных был построен совмещённый график зависимостей изменения соотношения рассчитанных энергетических классов сейсмических событий по данным СМЕ-6111 и STS-2 от времени года и температуры почвы в слое мощностью 20 см (рисунок 3.15). Из рисунка следует, что при достижении температур почвы $4\text{--}8^{\circ}\text{C}$ рассчитанные энергетические классы по СМЕ-6111 и STS-2, расположенном в термостабильных условиях павильона сейсмической станции «Южно-Сахалинск», становятся практически идентичными. Это свидетельствует о явной зависимости качества регистрации сейсмических событий молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 от температуры окружающей среды.

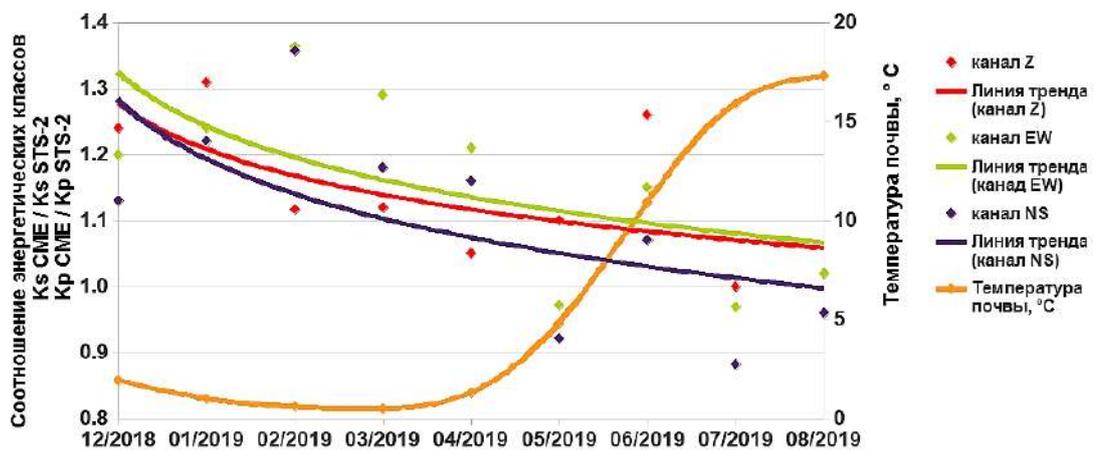


Рисунок 3.15. Зависимость соотношения энергетических классов, определенных по данным СМЕ-6111 и STS-2 в различные месяцы, и годовой ход температуры грунта на юге о. Сахалин в период 2018–2019 гг.

Очевидно, что отмеченные выше различия при определении энергетических классов землетрясений в зимний период связаны с изменениями в амплитудно-частотных

характеристиках (АЧХ) молекулярно-электронного сейсмометра при воздействии низких температур. В связи с отсутствием возможности провести эталонную калибровку сейсмометра, для оценки изменения в АЧХ проведены вычисления изменения чувствительности сейсмометра по следующей методике. На основании имеющихся записей волновых форм «зимних» землетрясений, для которых имеется различие в определённых в программном комплексе DIMAS энергетических классах на типичную для зимы величину (порядка единицы, что в среднем составляет 25 %), был вычислен коэффициент преобразования (чувствительность сейсмометра). Применение этого коэффициента обеспечивает совпадение значений энергетических классов, определённых по записям СМЕ-6111 и STS-2 для одного и того же сейсмического события. В нашем случае было выявлено уменьшение чувствительности сейсмометра СМЕ-6111 при работе в зимний период в 4.5 раза. На основании вычисленной величины в программе DIMAS построены АЧХ одного из каналов прибора для эталонного значения чувствительности и вычисленного значения чувствительности для зимнего периода (рисунок 3.16).

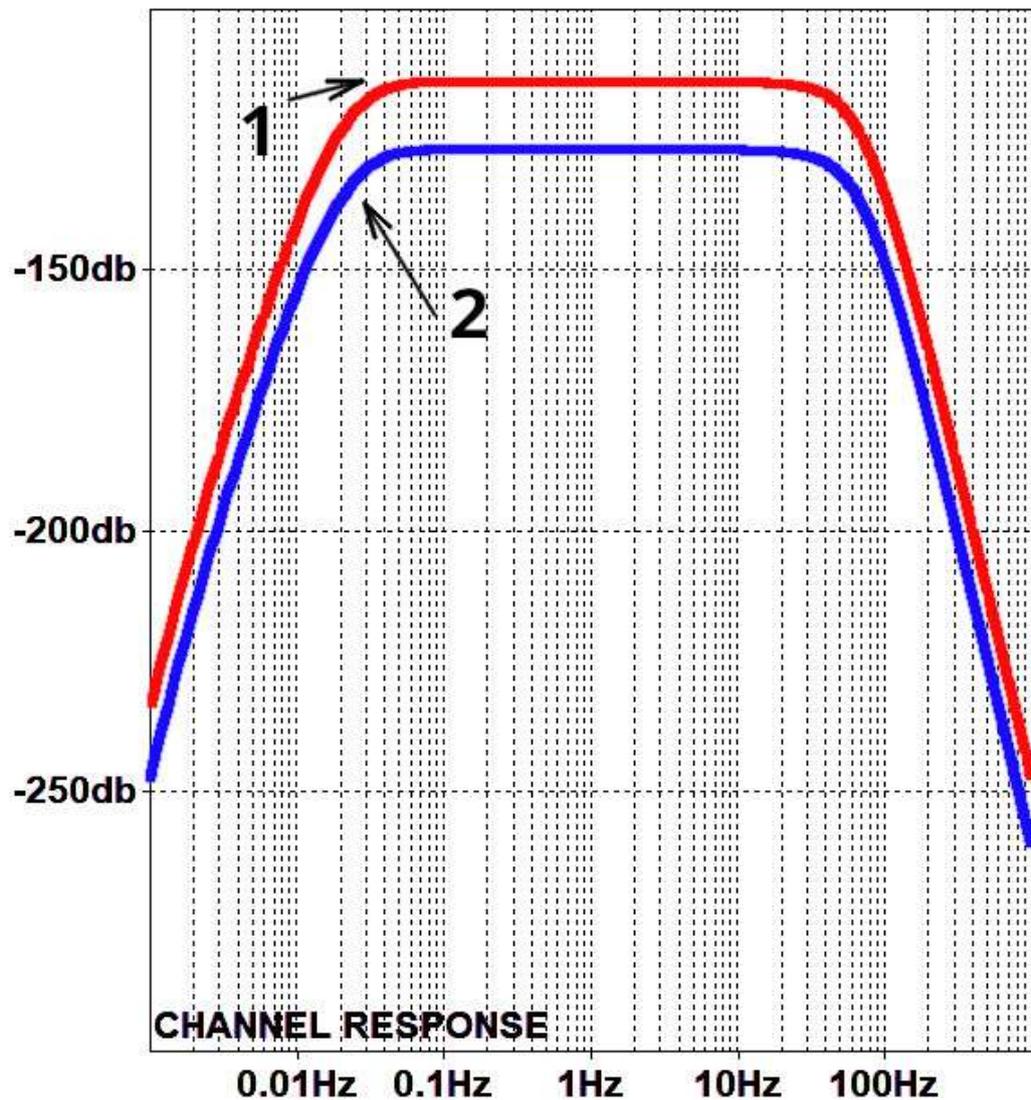


Рисунок 3.16. Амплитудно-частотные характеристики NS-канала сейсмометра СМЕ-6111, построенные для эталонного значения коэффициента преобразования (1) и для вычисленного коэффициента преобразования при работе сейсмометра в зимний период (2)

Для детального анализа зависимости характеристик молекулярно-электронного сейсмометра от изменения температур в период с 26 декабря 2019 г. по 22 января 2020 г. сейсмометр СМЕ-6111 был установлен в сейсмопавильоне станции «Южно-Сахалинск» на общем постаменте с сейсмометром STS-2 (рисунок 3.17).



Рисунок 3.17. Внешний вид сеймопавильона сейсмической станции «Южно-Сахалинск» и размещённых в нём сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2

Сеймопавильон сейсмической станции «Южно-Сахалинск» был построен в 1958 году. Имеет глубину основания подземной части – 3.75 м. Температура окружающей среды в павильоне в период проведения эксперимента составляла $+4^{\circ}$ С. Для проведения совместного анализа были использованы бюллетени сейсмической станции «Южно-Сахалинск» № 36 за 2019 г. и №№ 1–3 за 2020 г. из фондов СФ ФИЦ ЕГС РАН. Из бюллетеней были выбраны сейсмические события (телесейсмические, региональные и локальные), имеющие качественные записи по обоим приборам, и была проведена их обработка в программе DIMAS для определения энергетических показателей по каждому из приборов. Результаты обработки представлены в таблицах 3.3 и 3.4.

**Результаты обработки телесеismicких и региональных событий
по записям сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2**

№ в бюллетене с/ст. «Южно- Сахалинск»	Параметры землетрясений: дата, время в очаге (UTC), глубина Н (км)	Координаты землетрясений	Расстояние от с/ст. «Южно- Сахалинск» (км)	Сравниваемые параметры					
				STS-2			СМЕ		
				Ms	ML	MPV(A)	Ms	ML	MPV(A)
3801/19	26.12.2019 17-13-53.9 H=20	58.7N 158.9E	1668	5.1			5.1		
17/20	02.01.2020 18-23-54.2 H=27	35.8N 141.3E	1196	5.4			5.4		
19/20	03.01.2020 01-19-07.3 H=209	40.2N 139.7E	808			6.5			6.4
20/20	03.01.2020 20-46-40.6 H=6	48.9N 141.9E	222		3.6			3.5	
37/20	05.01.2020 08-08-10.2 H=46	47.8N 155.5E	1020	4.2			4.2		
51/20	07.01.2020 01-16-56.3 H=170	40.6N 140.0E	714			4.7			4.7
54/20	07.01.2020 06-05-17.4 H=14	2.3N 96.3E	6626	6.2			6.2		
55/20	07.01.2020 08-24-28.8 H=13	17.9N 66.8W	12210	6.5			6.5		
71/20	09.01.2020 08-38-06.1 H=10	62.4N 171.1E	2471	6.7			6.7		
79/20	09.01.2020 16-37-13.3 H=5	50.1N 142.9E	352		3.7			3.7	
95/20	10.01.2020 15-10-43.7 H=316	45.5N 142.6E	150			4.6			4.6
114/20	11.01.2020 15-55-42.9 H=38	43.4N 146.5E	480		4.2	4.7		4.2	4.8
118/20	12.01.2020 09-25-32.8 H=280	45.2N 141.5E	242			3.8			3.9
132/20	13.01.2020 19-53-48.6 H=61	36.1N 139.9E	1198	4.0			4.1		
135/20	14.01.2020 04-25-48.6 H=51	36.4N 140.8E	1190	3.4			3.5		
137/20	14.01.2020 06-26-27.8 H=90	46.2N 152.4E	750			4.6			4.6
146/20	15.01.2020 11-31-34.3 H=97	42.8N 145.2E	500	4.1		5.2	4.1		5.2
157/20	16.01.2020 16-31-11.4 H=58	52.1N 159.9E	1348	5.1			5.1		
160/20	16.01.2020 21-51-00.8 H=47	52.1N 159.8E	1360	4.2			4.3		
180/20	18.01.2020 04-32-02.1 H=86	43.1N 144.2E	450			3.7			3.8
197/20	19.01.2020 21-30-01.2 H=462	47.4N 146.9E	320			3.4			3.4
203/20	20.01.2020 18-59-59.2 H=98	44.1N 147.4E	480			4.5			4.5
209/20	22.01.2020 02-39-55.9 H=100	46.3N 152.1E	730			4.9			5.0

Таблица 3.4.

**Результаты обработки локальных сейсмических событий
по записям сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2**

№ в бюллетене с/ст. «Южно- Сахалинск»	Параметры землетрясений: дата, время в очаге (UTC), глубина Н (км)	Координаты землетрясений	Расстояние от с/ст. «Южно- Сахалинск» (км)	Сравниваемые параметры			
				STS-2		СМЕ	
				ML	Ks	ML	Ks
31/20	05.01.2020 03-25-26.0 Н=5	47.0N 143.7E	72	1.5	6.1	1.9	6.5
43/20	05.01.2020 23-16-22.8 Н=6	47.5N 142.5E	74	2.6	8	2	7.8
70/20	09.01.2020 05-37-22.1 Н=5	46.9N 142.2E	60	0.2	5.2	0.2	5.3
73/20	09.01.2020 10-08-51.3 Н=2	47.1N 142.6E	22	0.3	4.9	0.4	6
76/20	09.01.2020 11-00-58.7 Н=9	46.7N 142.7E	36	1.1	5.7	1.3	5.6
83/20	09.01.2020 19-30-44.1 Н=14	46.9N 142.4E	30	1.2	5.1	1	4.7
84/20	09.01.2020 20-18-20.8 Н=17	46.9N 142.4E	30	1.5	6.6	1.3	6.3
85/20	09.01.2020 21-19-52.5 Н=11	46.9N 142.4E	26	1.7	6.1	2	7.1
192/20	19.01.2020 11-57-52.9 Н=10	46.4N 142.5E	60	1.1	4.3	0.8	4.6

Как видно из представленных в таблице результатов, приборы показали практически полную идентичность сравниваемых параметров (магнитуд и/или энергетических классов). Таким образом, можно сделать вывод, что работа молекулярно-электронного сейсмометра при температурах порядка +4°C и выше не приводит к искажению регистрируемых параметров и приемлема для эксплуатации такого типа сейсмических приборов. Также можно предположить, что реальная температура в зимний период в сейсмокамере пункта наблюдений Петропавловское, возможно, ниже температуры почвы и больше соответствует температурам на поверхности или температурам под оголённой поверхностью (то есть отрицательная).

Для подтверждения отмеченных результатов были проведены исследования записей сейсмометра СМЕ-6111 в зимний период 2021–2022 гг. (таблица 3.5) по методике анализа записей зимы 2018–2019 гг.

Таблица 3.5.

**Результаты обработки сейсмических событий в районе южной части острова
Сахалин за период с декабря 2021 г. по март 2022 г. по записям молекулярно-электронного
сейсмометра и РИОЦ «Южно-Сахалинск»**

№ в каталоге	Мес. Год	Энергетические классы по STS-2 (YSS)			Энергетические классы по СМЕ(PETR)		
		P (Z канал)	Se (канал EW)	Sn (канал NS)	P (Z канал)	Se (канал EW)	Sn (канал NS)
SKHS211061	12.21	7.2	7.1	7.2	8	8.1	8.1
SKHS211076	12.21	5.3	5.6	5.2	5.5	5.5	4.9
SKHS211080	12.21	5.9	6.8	6.6	7.6	7.4	6.6
SKHS211081	12.21	4.9	5.5	5.8	5	6.5	6.4
SKHS211083	12.21	7.4	7.7	7.7	8.1	8.4	8.1
SKHS220002	01.22	3	4	4	3	4.1	3.9
SKHS220009	01.22	6.7	7.8	7.6	6.5	7.8	7.6
SKHS220019	01.22	6.9	7.1	7.3	7.1	7.4	7.2
SKHS220028	01.22	9.2	9.8	9.6	9	10.2	9.8
SKHS220048	01.22	6.6	7.9	8.2	6.6	7.7	7.6
SKHS220087	01.22	6.6	7.2	7.3	7.2	8	8
SKHS220122	01.22	6.5	7.7	7.5	6.5	7.7	7.9
SKHS220128	01.22	5.5	6.7	6.3	5.8	6.8	6.5
SKHS220153	02.22	4.1	4.2	3.7	5.1	4.7	5
SKHS220160	02.22	6.5	8.4	8.5	7	8.8	8.3
SKHS220162	02.22	5.2	6.9	6.6	6.3	8.3	7.4
SKHS220163	02.22	5.7	7.1	6.9	4.6	8.5	7.4
SKHS220171	02.22	11.4	11.3	11.7	11.4	12.2	11.8
SKHS220172	02.22	9.7	9.5	10.2	10.1	10.6	9.9
SKHS220179	02.22	7.4	10	9.5	7.5	10.3	9.1
SKHS220207	02.22	5.1	5.4	5.8	6.1	5.9	6.1
SKHS220211	02.22		3.8	3.9		3.1	2.7
SKHS220221	02.22		3.3	3.2		5.1	4.7
SKHS220222	02.22	7.0	7.0	7.1	7.1	8.0	7.7
SKHS220228	03.22	7.4	8.2	7.8	8.8	7.8	8.2
SKHS220249	03.22	7.7	6.2	6.2	6.5	6.6	6.5
SKHS220270	03.22		5.0	5.0		4.8	4.6
SKHS220284	03.22		3.5	3.5		3.5	3.5
SKHS220289	03.22		3.5	3.7		3.4	3.4
SKHS220292	03.22		4.6	4.7		5.0	4.8
SKHS220293	03.22		4.5	4.6		4.7	4.7
SKHS220299	03.22	6.7	6.7	6.9	6.6	7.5	7.4
SKHS220313	03.22	6.5	6.4	6.3	6.6	6.7	6.5

Из таблицы 3.5 видно, что за исследуемый период зимы различия в определении энергетических классов по записям сейсмометра СМЕ-6111 и сейсмометра STS-2 практически отсутствуют. Учитывая, что основным отличием в условиях эксплуатации сейсмометра СМЕ-6111 на полигоне Петропавловское зимой 2018–2019 гг. и 2021–2022 гг. были различные климатические условия (в том числе высота снежного покрова), можно предположить, что именно этот фактор сыграл главную роль в стабилизации температуры подпочвенного грунта и, соответственно, стабилизации параметров сейсмометра. Зима 2021–2022 гг., в отличие от малоснежной зимы 2018–2019 гг., характеризовалось значительным превышением уровня снежного покрова на юге о. Сахалин относительно средних значений (таблица 3.6).

Таблица 3.6.

Подекадные значения высоты снежного покрова на юге о. Сахалин в исследуемые периоды по данным метеостанции «Южно-Сахалинск» [Архив..., 2022] и соответствующие им средние значения в районе наблюдений [Климат..., 1982]

	Величина снежного покрова, см		
	Зима 2018-19 гг.	Зима 2021-22 гг.	среднее значение
Декабрь 1я декада	6	4	14
Декабрь 2я декада	11	9	21
Декабрь 3я декада	17	18	27
Январь, 1я декада	19	24	31
Январь, 2я декада	24	70	34
Январь, 3я декада	25	68	39
Февраль 1я декада	29	62	44
Февраль 2я декада	32	62	45
Февраль 3я декада	31	85	47
Март, 1я декада	27	81	47
Март, 2я декада	18	73	46
Март, 3я декада	18	52	42

Столь значительная разница в высоте снежного покрова, очевидно, повлияла на температуру почвы на интересующей нас глубине (порядка 40 см). При использовании известных значений температуры почвы под оголённым грунтом и под среднестатистическим покровом [Климат ..., 1982], были получены оценки значения температуры на глубине 40 см в условиях различной высоты снежного покрова. Расчётные значения температуры и соответствующие им усреднённые соотношения классов землетрясений, определённые в

таблице 3.2 (зима 2018–2019 гг.) и в таблице 3.5 (зима 2021–2022 гг.), представлены на рисунке 3.18.

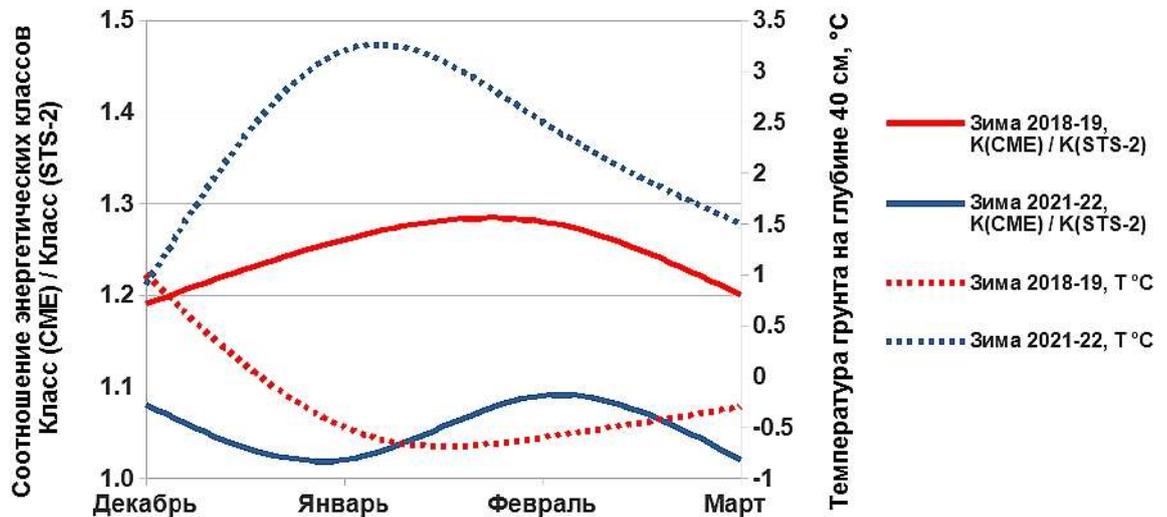


Рисунок 3.18. Корреляция погрешности в определении энергетических классов и изменения температуры грунта под снежным покровом на юге о. Сахалин зимой 2018–2019 и 2021–2022 гг.

Таким образом, ещё раз было получено подтверждение влияния температуры на работу молекулярно-электронного сейсмометра и уточнены значения температуры, при которых начинается нарушение стабильности характеристик прибора. Согласно рисунку 3.18, влияние температуры становится заметным при значениях ниже $+1^{\circ}\text{C}$. В рамках исследования дополнительно был проведён анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума по алгоритму [McNamara, Boaz, 2005; A study of seismic...2020; Расширение сети...2022] отдельно для зимы 2018–2019 гг. и 2021–2022 гг., чтобы оценить возможные влияния внешних источников помех на полученные результаты. Для анализа были использованы записи сейсмического шума в ночной период для промежутков времени без зарегистрированных сейсмических событий и атмосферных явлений (порывы ветра, циклоны). Результаты, полученные с использованием IRIS DMC Noise Toolkit [Noise..., 2014], представлены на рисунке 3.19. Как видно из рисунка, для зимы 2018–2019 гг. наблюдается превышение эталонной модели высокого уровня шума (NHNМ) на низких частотах для горизонтальных каналов, что, возможно, обусловлено особенностями установки и (или) влиянием источников помех. Для зимы 2021–2022 гг. таких нарушений нет. Это, по-видимому, стоит связать со значительной высотой снежного покрова, компенсирующей влияние помех, что также

положительно сказывается на стабильности характеристик самого прибора и в итоге на повышении качества сейсмических данных.

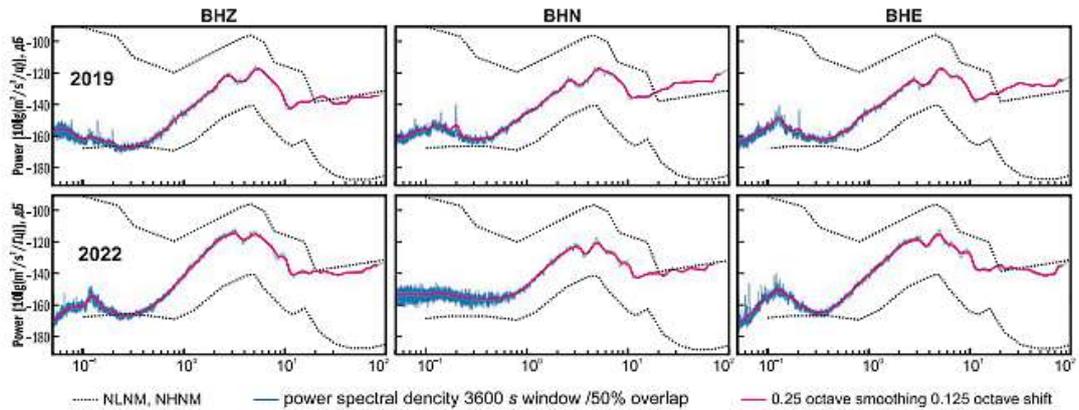


Рисунок 3.19. Спектральная плотность мощности сейсмического шума станции PETR для зимы 2018–2019 гг. (сверху) и зимы 2021–2022 гг. (снизу) для различных каналов

Размещение молекулярно-электронных сейсмометров (типа СМЕ-6111) в полевых условиях требует в зимний период дополнительного подогрева сейсмокамеры или применения иных решений для поддержания положительных температур. Эксплуатация же молекулярно-электронных сейсмометров в специально оборудованных сейсмических павильонах допустима в течение всего года при условии обеспечения в павильоне температур от $+1$ до $+4^{\circ}\text{C}$ и выше. При этом получаемые результаты практически неотличимы от данных наиболее чувствительного электромеханического серийного сейсмометра STS-2. Практические результаты, представленные в работе, не противоречат ранее опубликованным экспериментальным исследованиям [Krishtop, 2014; The temperature dependence...2019], показывающим дрейф параметров молекулярно-электронного преобразователя с ходом температуры, что обусловлено тепловыми изменениями вязкости жидкости и коэффициента диффузии. Эти эффекты вызывают падение коэффициента преобразования при понижении температуры, которое в исследуемом диапазоне (от -5 до $+20^{\circ}\text{C}$) может составлять более одного порядка, что приводит к искажениям значений энергетических характеристик сейсмических событий при их обработке, либо требует корректировки АЧХ в используемых программах. В настоящее время производителем разработаны и реализуются различные методики, позволяющие обеспечить стабилизацию параметров молекулярно-электронных преобразователей в широком температурном диапазоне [Zaitsev et al., 2022; Fokina et al., 2020], что позволит использовать подобные сейсмометры в полевых условиях без ограничений температурной обстановки [Костылев, Богинская, 2022а].

Выводы по главе 3

В процессе работы апробировано инновационное оборудование – прототипы молекулярно-электронных гидрофонов и молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-6111. Оборудование зарекомендовало себя как перспективное и удобное в использовании. Установлена очень высокая степень надежности используемых комплектов оборудования в достаточно жестких условиях эксплуатации: при температуре от -5 до -10°C в зимний период и при 100%-ой влажности в летний период для Южно-Курильска (о. Кунашир). Простои оборудования при регистрации составили не более 0.01% от времени работы комплекса.

Размещение молекулярно-электронных сейсмометров (типа СМЕ-6111) в полевых условиях требует в зимний период дополнительного подогрева сейсмокамеры или применения иных решений для поддержания положительных температур. Эксплуатация молекулярно-электронных сейсмометров в специально оборудованных сейсмических павильонах допустима в течение всего года при условии обеспечения в павильоне температуры от $+1$ до $+4^{\circ}\text{C}$ и выше. При этом получаемые результаты практически неотличимы от данных серийного сейсмометра STS-2.

Из обобщения приведенных результатов следует, что по записям сейсмического шума, регистрируемого молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111, можно оценить воздействие импульсов генератора на геофизические параметры геологической среды в зоне Центрально-Сахалинского разлома и установить эффект возрастания уровня сейсмоакустических шумов в приповерхностных слоях земной коры вблизи источника тока – возбуждающего электрического диполя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы проведенных исследований по теме диссертации заключаются в следующем:

Разработана технология эксплуатации широкополосных молекулярно-электронных датчиков для комплексных геофизических исследований и на этой основе реализована комплексная система мониторинга современной сейсмичности о. Сахалин и Курильских островов с полной автоматизацией процедур сбора, передачи, хранения и рутинной обработки данных.

Исследовано влияние природных и антропогенных факторов на эксплуатацию и амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронных гидрофонов и сейсмометра. Показано, что основные характеристики широкополосных молекулярно-электронных датчиков соответствуют уровню, необходимому для решения различных сейсмологических задач, в том числе, связанных с обеспечением сейсмической безопасности Сахалинской области.

Рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы:

Исследовано влияние природных и антропогенных факторов на эксплуатацию и амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронных гидрофонов и сейсмометра. Установлено, что для размещения и эксплуатации молекулярно-электронных сейсмометров типа СМЕ-6111 в полевых условиях в зимний период необходимо наличие специально оборудованных сейсмических павильонов. Обеспечение в павильоне в течение всего года температуры от +1 до +4° С и выше гарантирует получение результатов практически неотличимых от данных наиболее чувствительного электромеханического серийного сейсмометра STS-2.

Непрерывные сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов в зоне Центрально-Сахалинского разлома и на о. Кунашир показали возможность достоверной регистрации сейсмических событий независимо от условий размещения приборов. Дальнейшее изучение влияния атмосферных факторов на работу гидрофонов будет способствовать принятию оптимальных инженерно-конструкторских решений для минимизации воздействия окружающей среды.

По итогам проведенных испытаний гидрофонов и широкополосного сейсмометра СМЕ-6111, изготовленных на основе МЭП, сделан вывод об их надежности, эффективности и высокой перспективе импортозамещения дорогостоящих иностранных аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов, В.М. Исследование АЧХ молекулярно-электронного преобразователя с новой геометрией / В.М. Агафонов, В.Г. Криштоп // Микросистемная техника. – 2004. – № 9. – С. 40-45.
2. Агафонов, В.М. Нелинейные эффекты в молекулярно-электронной ячейке с планарной геометрией / В.М. Агафонов, А.С. Бугаев, А.А. Орел // Нано и микросистемная техника. – 2009. – № 5. – С. 32-38.
3. Агафонов, В.М. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью / В.М. Агафонов, И.В. Егоров, А.С. Шабалина // Сейсмические приборы. – 2013. – Т. 49, № 1. – С. 5-18.
4. Адушкин, В.В. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре / В.В. Адушкин, Д.Н. Локтев, А.А. Спивак // Физика Земли. – 2008. – № 6. – С. 77-85.
5. Алтай и Саяны. Землетрясения России в 2020 году: Ежегодник / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев, Е.В. Шевкунова, В.Г. Подкорытова, А.А. Дураченко, Д.Г. Корабельщиков, Е.А. Гладышев // Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук». – 2022. – С. 38-44. – EDN KZENHO.
6. Аппаратурно-методический комплекс для измерения природных и техногенных вибрационных полей / В.В. Капустин, Н.П. Семейкин, В.В. Монахов, В.Н. Трушков // Технологии сейсморазведки. – 2013. – № 1. – С. 96-10.
7. Архив погоды в Южно-Сахалинске // Расписание погоды [сайт]. – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Южно-Сахалинске (дата обращения 31.07.2022)
8. Архив погоды в Холмске // Расписание погоды [сайт]. – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Холмске (дата обращения: 16.02.2023)
9. Архив погоды в Огоньках // Расписание погоды [сайт]. – URL: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Огоньках (дата обращения: 16.02.2023)
10. Бабанин, А.В. Нестационарная диффузия в электрохимической системе с периодичной структурой электродов / А.В. Бабанин, В.А. Козлов, Н.В. Петькин // Электрохимия. – 1990. – Т. 26, № 5. – С. 601-606.
11. Байкальский сейсмоакустический эксперимент / А.Л. Собисевич, Д.А. Преснов, Ц.А. Тубанов, А.В. Черемных, Д.Л. Загорский, А.Н. Котов, А.С. Нумалов // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 496, № 1. – С. 82-86.
12. Беляков, А.С. Сейсмоакустические приёмники с магнитоупругим преобразователем / А.С. Беляков, А.В. Николаев // Физика земли. – 1993. – № 7. – С. 74-80.

13. Бирюлин, С.В. Исследование информативности объемной активности почвенного радона при подготовке и реализации тектонических землетрясений на примере Южно-Курильского региона / С.В. Бирюлин, И.А. Козлова, А.К. Юрков // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2019. – Т. 44, № 4. – С. 73-83.
14. Борисов, А.С. Оценка параметров гидроакустических сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в районе Центрально-Сахалинского разлома / А.С. Борисов, С.А. Борисов // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 3. – С. 64-70. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070
15. Вмораживаемый автономный геогидроакустический буй нового поколения / А.Л. Собисевич, Д.А. Преснов, В.М. Агафонов, Л.Е. Собисевич // Наука и технологические разработки. – 2018. – Т. 97, № 1. – С.25-34.
16. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмoeлектрической разведки недр / И.П. Дудченко, Д.В. Костылев, С.А. Гуляков, Н.С. Стовбун // Геосистемы переходных зон. – 2021. Т. 5, №1. – С. 46-54. Doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054
17. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования / П.А. Каменев, Д.В. Костылев, **Н.В. Богинская**, А.С. Закупин // Геосистемы переходных зон. – 2019. – Т. 3, № 4. – С. 390-402. Doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402 (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.63 п.л., авторский вклад 30%).
18. Долинская правда. Общественно-политическая газета МО ГО «Долинский». № 33. – 14 августа 2020 г.: 12614-12616.
19. Дрознин, Д.В. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS / Д.В. Дрознин, С.Я. Дрознина // Сейсмические приборы. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 22-34.
20. Евдокимова, Л.И. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Владивосток: ДВНИГМИ / Л.И. Евдокимова // 2020. http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2020/8/2020.08_ch5_typhoon.pdf
21. Егоров, И.В. Среднепериодный электрохимический сейсмометр / И.В. Егоров, А.С. Бугаев, В.М. Агафонов // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XVII Международной сейсмологической школы, 11-15 сентября 2023 г., республика Узбекистан. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. – С.36.
22. Единая сеть геодинамических наблюдений ДВО РАН: становление, десять лет развития, основные достижения / В.Г. Быков, Н.В. Шестаков, М.Д. Герасименко, А.А. Сорокин, А.В. Коновалов, А.С. Прытков, Н.Ф. Василенко, Д.А. Сафонов, А.Г. Коломиец, М.А. Серов, В.В. Пупатенко, С.П. Королев, А.Л. Верхотуров, В.С. Жижерин, К.С. Рябинкин // Вестник ДВО РАН. – 2020. – Т.211, №3. – С. 5-24. DOI: 10.37102/08697698.2020.211.3.001

23. Еманов, А.Ф. Бачатское техногенное землетрясение 18 июня 2013 г. с $M_L=6.1$, $I_0=7$ (Кузбасс) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, А.В. Фатеев // Российский сейсмологический журнал. – 2020. – Т. 2, № 1. – С. 48-61. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.1.05>
24. Закупин, А.С. Сейсмический процесс на п-ове Крильон (о-в Сахалин) после землетрясения 23 апреля 2017 г / А.С. Закупин, **Н.В. Богинская**, Д.В. Костылев // Литосфера. – 2021. – Т. 21, № 5. – С. 734-742. – DOI 10.24930/1681-9004-2021-21-5-734-742. (1.13 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.174).
25. Закупин, А. С. Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине / А.С. Закупин, Л.М. Богомолов, **Н.В. Богинская** // Геофизические процессы и биосфера. – 2020. – Т. 19, № 1. – С. 66-78. – DOI 10.21455/GPB2020.1-4 (1.63 п.л., вклад автора 50%, ИФ РИНЦ – 0.883). Zakupin A.S., Bogomolov L.M., **Boginskaya N.V.** Unload Response Ratio and Self-Developing Processes Methods of Analyzing Seismic Sequences to Predict Earthquakes in Sakhalin // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2020. – Vol. 56, No. 7. – P. 693-705. – DOI 10.1134/S0001433820070105 (1.63 п.л., вклад автора 50%, ИФ SJR – 0.247).
26. Землетрясение 17(18) августа 2006 г. на Сахалине и первая реализация комплексного подхода / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова, Ч.У. Ким, М.Е. Коровин, А.Е. Малашенко, П.В. Савочкин, И.Н. Тихонов // Доклады академии наук. – 2007. – Т. 412, № 3. – С. 396-400.
27. Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук». – 2020. – 212 с.
28. Измерительные комплексы для мониторинга железных объектов в сейсмически опасных регионах / Е.Ю. Титов, В.М. Агафонов, А.В. Неешпапа, А.М. Антонов, А.П. Переходов, А.А. Конарев // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 2. – С. 27-31.
29. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей / А.С. Бугаев, А.Н. Антонов, В.М. Агафонов, К.С. Белотелов, С.С. Вергелес, П.В. Дудкин, Е.В. Егоров, И.В. Егоров, Д.А. Жевненко, С.Н. Жабин, Д.Л. Зайцев, Т.В. Криштоп, А.В. Неешпапа, В.Г. Попов, В.В. Усков, А.С. Шабалина, В.Г. Криштоп // Радиотехника и электроника. – 2018. – Т.63, № 12. – С. 1249-1262.
30. Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г / А.С. Закупин, И.П. Дудченко, **Н.В. Богинская**, Д.В. Костылев, П.А. Каменев // Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук. – 2018. – Т.197, № 1. – С. 161-167. (ИФ РИНЦ: 0.347. 0.88 п.л., авторский вклад 30%).
31. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях единой системы сейсмических наблюдений СССР / Н.В. Кондорская, З.И. Аранович, О.Н.

- Соловьева, Н.В. Шебалин. – М.: Наука, 1982. 272 с.
32. Исследование влияния экспериментальных зондирований на изменение сейсмического шума при помощи электроимпульсного геофизического генератора в районе Центрально-Сахалинского разлома / С.А. Гуляков, И.П. Дудченко, Л.М. Богомолов, Д.В. Костылев, **Н.В. Костылева**, Н.С. Стовбун // Триггерные эффекты в геосистемах: сб. трудов VII Международной конференции, Долгопрудный, 02–05 июля 2024 года. – Москва: ФГБУН ИДГ им. ак. М.А. Садовского РАН, 2024. – С. 35.
33. Каминский, А.Е. Тотальная инверсия данных малоглубинных геофизических исследований / А.Е. Каминский, С.А. Ерохин, А.В. Полицина // Инженерные изыскания. – 2016. – № 9. – С. 44-51.
34. Капустян, Н.К. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании / Н.К. Капустян, А.Н. Климов, Г.Н. Антоновская // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С.6.
35. Климат Южно-Сахалинска / Под ред. Ц.А. Швер, Д.Ф. Лазаревой. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 256 с.
36. Кобелева, Е.А. Влияние температурного режима на АЧХ широкополосных сейсмометров СМЕ-4211 / Е.А. Кобелева, Н.А. Гилева // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: сб. трудов XIV Международной сейсмологической школы, 09-13 сентября 2019 г., республика Молдова. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2019. – С.55.
37. Козлов, С.А. (ред.) Информационный бюллетень о состоянии недр на территории Дальневосточного федерального округа за 2018 год «Дальневосточный региональный центр государственного мониторинга состояния недр» / С.А. Козлов // – Хабаровск, 2019 – 368 стр.
38. Козлов, В.А. Теория диффузионных преобразователей сверхмалых расходов электролита / В.А. Козлов, П.А. Тугаев, Н.В. Петькин // Электрохимия. – 1991. – Т. 27, № 4. – С.20-24.
39. Козлов, В.А. Физические основы жидкостных и твердотельных измерительных систем и устройств обработки информации / В.А. Козлов, К.А. Сахаров. – М.: МФТИ, 1994. – С. 37.
40. Козлов, В.А. Собственные шумы молекулярно-электронных преобразователей / В.А. Козлов, М.В. Сафонов // Журнал технической физики. – 2003. – Т.73, вып.12. – С.81-84.
41. Комплексные геотермические исследования в скважине kun-1 (о. Кунашир). Ч. I: Вертикальное распределение температур, тепловой поток, влияние рельефа, гидрогеологии, распространение суточных волн / Д.Ю. Демежко, Д.Г. Рывкин, А.К. Юрков, В.В. Дергачев, В.Г. Корсунцев // Уральский геофизический вестник. – 2009. – Т.1, № 14. – С. 18-29.
42. Комплексный сейсмический мониторинг в районе Анивского газового месторождения / Д.В. Костылев, Л.М. Богомолов, П.А. Каменев, А.С. Закупин, **Н.В. Богинская** // Нефтега-

- зовый комплекс: проблемы и решения: сб. трудов Первой национальной научно-практической конференции в рамках 22-й международной конференции и выставки «Нефть и газ Сахалина-2018», 25-27 сентября 2018 г., г. Южно-Сахалинск. – Южно-Сахалинск: Сахалинский государственный университет. 2020. – С. 9-10.
43. Коростелев, В.Г. Наблюдения за динамикой ледника Норденшельда сейсмометрическим методом / В.Г. Коростелев, Л.М. Саватюгин, В.Н. Смирнов // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2014. – Т. 101, № 3. – С. 69-80.
 44. Костылев, Д.В. Об опыте использования молекулярно-электронных сейсмических датчиков на Сахалине и Южных Курилах / Д.В. Костылев, **Н.В. Богинская** // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: сб. трудов Седьмой научно-технической конференции, 29 сентября – 05 октября 2019 года, Петропавловск-Камчатский. - Петропавловск-Камчатский: Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук». 2019. – С. 455-458.
 45. Костылев, Д.В. О сейсмических наблюдениях на Сахалине с использованием молекулярно-электронных сейсмических датчиков нового типа / Д. В. Костылев, Л.М. Богомолов, **Н.В. Богинская** // Геодинамические процессы и природные катастрофы: сб. трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием, 27–31 мая 2019 года, Южно-Сахалинск. - Южно-Сахалинск: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук. 2019. – С. 35.
 46. Костылев, Д.В. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир) / Д.В. Костылев, **Н.В. Богинская** // Геосистемы переходных зон. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 486-499. Doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.486-499. (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.75 п.л., авторский вклад 50%).
 47. Костылев, Д.В. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН / Д.В. Костылев // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 1. – С. 41-53. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.03>
 48. Костылев, Д.В. Опыт и особенности эксплуатации молекулярно-электронного сейсмометра на о. Сахалин / Д.В. Костылев, **Н.В. Богинская** // Российский сейсмологический журнал. – 2022а. – Т. 4, № 3. – С. 81-93. DOI: 10.35540/2686-7907.2022.3.07. (ИФ РИНЦ: 1.2830. 1.63 п.л., авторский вклад 50%).
 49. Костылев, Д.В. Сейсмический мониторинг района угледобычи на О. Сахалин с использованием временных сетей ФИЦ ЕГС РАН / Д.В. Костылев, **Н.В. Богинская** // Геодинамика и тектонофизика. – 2022б. – Т. 13, № S2. – С. 1-6. – DOI 10.5800/GT-2022-13-2s-0634. (0.75 п.л.,

- вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.293).
50. Красовский, Г.И. Планирование эксперимента / Г.И. Красовский, Г.Ф. Филаретов // Минск: Изд-во БГУ, 1982. - 302 с.
 51. Купцов, А.В. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений / А.В. Купцов, И.А. Ларионов, Б.М. Шевцов // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 45-58.
 52. Купцов, А.В. Изменение характера геоакустической эмиссии в связи с землетрясением на Камчатке / А.В. Купцов // Физика Земли. – 2005. – № 10. – С. 59-65.
 53. Левин, Б.В. Сейсмоволновый низкочастотный предвестник подготовки землетрясения / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова // Вулканология и сейсмология. – 1994. – № 3–4. – С. 128-133.
 54. Левин, Б.В. Низкочастотные сейсмические сигналы как региональные признаки подготовки землетрясения / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова // Вулканология и сейсмология. – 1999. – № 4-5. – С. 126–133.
 55. Левченко, Д.Г. Результаты регистрации широкополосных (0.003–10 Гц) сейсмических сигналов на морском дне / Д.Г. Левченко // Океанология. – 2002. – Т. 42, № 4. – С. 620-631.
 56. Левченко, Д.Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне / Д.Г. Левченко // М.: Научный мир, 2005. – 240 с.
 57. Лидоренко, Н.С. (ред.) Введение в молекулярную электронику / Н.С. Лидоренко // М.: Энергоатомиздат, 1984. – 320 с
 58. Малогабаритный сейсмоприемник СПВ-3К / А.Ю. Марченков, А.В. Мишин, В.В. Пастухов, Н.П. Семейкин, В.Н. Трушков // Приборы и системы разведочной геофизики. – 2013. – Т. 43. № 1. – С. 35-38.
 59. Марапулец, Ю.В. Высокочастотный акустоэмиссионный эффект при деформировании приповерхностных осадочных пород в сейсмоактивном регионе / Ю.В. Марапулец // дис. ... доктора ф.-м. наук: 25.00.10 / Марапулец Юрий Валентинович. с. Паратунка, Елизовский район, Камчатский край, 2015. – 210 с.
 60. Мезенцева, Л.И. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Владивосток: ДВНИГМИ / Л.И. Мезенцева, В.А. Каптюг // 2020. http://ferhri.org/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2020/4/2020.04_ch1_meteo.pdf
 61. Мезенцева, Л.И. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ / Л.И. Мезенцева, В.А. Каптюг // Владивосток: ДВНИГМИ, 2022. – № 04. – 20 с.
Адрес доступа: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bu1_2022/4/2022.04_ch1_meteo.pdf (дата обращения: 16.02.2023)

62. Мезенцева, Л.И. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ / Л.И. Мезенцева, В.А. Каптюг // Владивосток: ДВНИГМИ, 2021. – № 11. – 21 с. Адрес доступа: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2021/11/2021.11_ch1_meteo.pdf (дата обращения: 16.02.2023)
63. Михайлов, В.И. Результаты детального сейсмического мониторинга. Юг о. Сахалин / В.И. Михайлов, Е.П. Семёнова // Землетрясения России в 2018 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. – С. 106-110.
64. Михайлов, В.И. Результаты детального сейсмического мониторинга. Юг о. Сахалин / В.И. Михайлов, Е.П. Семёнова // Землетрясения России в 2019 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. – С. 106-110.
65. Мишаткин, В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами / В.Н. Мишаткин, Н.З. Захарченко, В.Н. Чебров // Сейсмические приборы. – 2011. – Т. 47. № 1. – С. 26-51.
66. Молекулярно-электронный гидрофон для решения задач низкочастотного исследования шумов Мирового океана / Д.Л. Зайцев, С.Ю. Авдюхина, В.М. Агафонов, А.С. Бугаев, Е.В. Егоров // Доклады Академии наук. – 2018. – Т. 483, № 6. – С. 667-670.
67. Мониторинг акустического поля сейсморазведочных импульсов в прибрежной зоне / А.Н. Рутенко, Д.И. Боровой, В.А. Гриценко, П.С. Петров, В.Г. Ущиповский, М. Воекхольт // Акустический журнал. – 2012. – Т. 58, № 3. – С. 356-369.
68. Мониторинг сейсмического воздействия взрывов на карьере «Шахтау» / А.В. Верхоланцев, Р.А. Дягилев, Д.Ю. Шулаков, А.В. Шкурко // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 59-69. DOI 10.15372/FTPPI20190207. – EDN PQDRTI.
69. Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электроразведываниях в районе Центрально-Сахалинского разлома / Л.М. Богомолов, Д.В. Костылев, **Н.В. Костылева**, С.А. Гуляков, И.П. Дудченко, П.А. Каменев, Н.С. Стовбун // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 115-131. Doi.org/10.30730/gtrz.2023.7.2.115-131. (ИФРИНЦ: 0.672. 2.13 п.л., авторский вклад 30%).
70. Наблюдения слабых землетрясений гидрофонной станцией на мелководье южных Курильских островов / А.С. Борисов, С.А. Борисов, Б.В. Левин, Е.В. Сасорова // Геодинамика и тектонофизика. – 2012. – Т. 3, № 2. – С. 103-113. <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-2-0065>
71. О перспективе обнаружения процесса подготовки землетрясения в спектре сейсмического шум. Лабораторный эксперимент / Г.Г. Кочарян, А.А. Остапчук, Д.В. Павлов, А.М. Будков // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 117-128.
72. О природе температурных вариаций в скважине KUN-1 (о. Кунашир) / Д.Ю. Демежко, А.К.

- Юрков, В.И. Уткин, А.В. Климшин // Геология и геофизика. – 2012. – Т.53, №3. – С. 406-414.
73. Опыт регистрации сейсмических сигналов с использованием широкополосных электрохимических сейсмоприемников / Д.Г. Левченко, И.П. Кузин, М.В. Сафонов, В.Н. Сычиков, И.В. Уломов, Б.В. Холопов // Сейсмические приборы. – 2009. – Т. 45, № 4. – С. 5-25.
74. Отклик в поле подпочвенного радона на землетрясение 23.01.2020 г. с $M_L=4.2$ в заливе Анива вблизи острова Сахалин / Е.О. Макаров, Д. В. Костылев, П.П. Фирстов, П.А. Каменев, **Н.В. Богинская** // Вулканизм и связанные с ним процессы: сб. трудов XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30 марта – 01 2020 года, Петропавловск-Камчатский. – Петропавловск-Камчатский: Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 2020. – С. 114-117.
75. Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов / Б.В. Левин, Е.В. Сасорова, С.А. Борисов и др. // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 3. – С. 60-70.
76. Оценка сейсмической опасности на юге Сахалина на 2018 год (по данным оперативного каталога) / А.С. Закупин, П.А. Каменев, Т.Е. Воронина, **Н.В. Богинская** // Геосистемы переходных зон. – 2018. Т. 2, № 1. – С. 52-56. DOI 10.30730/2541-8912.2018.2.1.052-056. (ИФРИНЦ: 0.672. 0.63 п.л., авторский вклад 30%).
77. Оценка сейсмичности южного Сахалина по методике СОУС'09 / Е.П. Семенова, Д.В. Костылев, В.И. Михайлов, И.А. Паршина, В.Н. Ферчева // Геосистемы переходных зон. – 2018. – Т. 2, № 3. – С. 191-195.
78. Оценка электроимпульсных воздействий экспериментальной геофизической установкой в районе Центрально-Сахалинского разлома / С.А. Гуляков, Л.М. Богомолов, Д.В. Костылев, **Н.В. Костылева**, И.П. Дудченко, Н.С. Стовбун // Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов: сб. трудов IX Международного симпозиума, Бишкек, 24–29 июня 2024 года. – Бишкек: ФГБУН Научная станция РАН в г. Бишкеке, 2024. – С. 279.
79. Патент № 91275 U1 Российская Федерация, МПК А61В 5/00. Инерциальная система определения параметров движения тела и конечностей человека на основе молекулярно-электронных датчиков: № 2009130793/22: заявл. 13.08.2009: опубл. 10.02.2010 / В.М. Агафонов, И.В. Егоров, Д.Л. Зайцев. Заявитель: Федеральное агентство по науке и инновациям, Общество с ограниченной ответственностью «Р-сенсор».
80. Первые результаты исследования сейсмических шумов на о. Шикотан по данным долговременных наблюдений / Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, В.И. Синицин, А.А. Шишкин // Тихоокеанская геология. – 2008. – Т. 27, № 3. – С. 33-43.

81. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин / Е.О. Макаров, П.П. Фирстов, Д.В. Костылев, Е.С. Рылов, И.П. Дудченко // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2018. – Т. 25, № 5. – С. 99-114. – DOI 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114.
82. Развитие метода среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 Г.) / А.С. Закупин, Ю.Н. Левин, **Н.В. Богинская**, О.А. Жердева // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 11. – С. 1904-1911. – DOI 10.15372/GiG20181112. (1 п.л., вклад автора 40%, ИФ РИНЦ – 1.553). Development of medium-term prediction methods: A case study of the August 14, 2016 Onor ($M_w = 5.8$) earthquake on Sakhalin / A.S. Zakupin, Y.N. Levin, **N.V. Boginskaya**, O.A. Zherdeva // Russian Geology and Geophysics. – 2018. – Vol. 59, No. 11. – P. 1526-1532. – DOI 10.1016/j.rgg.2018.10.012. (0.88 п.л., вклад автора 40%, ИФ SJR – 0.350).
83. Развитие сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России для службы предупреждения о цунами / В.Н. Чебров, А.А. Гусев, Д.В. Дроздин и др. // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. – Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. – С. 80-101.
84. Разработка сейсмодатчиков на новых технологических принципах (молекулярная электроника) / И.А. Абрамович, В.М. Агафонов, С.К. Дараган, В.А. Козлов, А.В. Харламов // Сейсмические приборы. – 1999. – Вып. 31. – С. 56-71.
85. Расширение сети сейсмических наблюдений на Кольском полуострове / И.С. Фёдоров, С.В. Асминг, А.Г. Гоев, С.Г. Волосов // Российский сейсмологический журнал. 2022. — Т. 4, № 1. – С. 63-72. doi:10.35540/2686-7907.2022.1.05
86. Рождественский, В.С. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине / В.С. Рождественский, С.М. Сапрыгин // Тихоокеанская геология. – 1999. Т. 18, № 6. – С. 59-70.
87. Рыкунов, Л.Н. Аппаратура и методы исследования слабых сейсмических эффектов / Л.Н. Рыкунов, О.Б. Хаврошин, В.В. Цыплаков // Деп. В ВИНТИ, 1978. – № 2919-78.
88. Сасорова, Е.В. Особенности разномасштабных пространственно-временных проявлений сейсмического процесса в Тихоокеанском регионе: наблюдения, статистика, моделирование / Е.В. Сасорова // дис. ... доктора ф.-м. наук. 25.00.10 / Сасорова Елена Васильевна. Москва, 2005. – 342 с.
89. Сафонов, М.В. Конвективная диффузия и шумы в молекулярно-электронных структурах / М.В. Сафонов // дис. ... кандидата ф.-м. наук. 01.04.04 / Сафонов Максим Владимирович. Москва, 2007. – 127 с.
90. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666241 Россий-

- ская Федерация. SpectrumSeism: № 2021665611: заявл. 11.10.2021: опубл. 11.10.2021 / В.С. Селезнев, А.В. Лисейкин, Д.Б. Севостьянов, А.А. Брыксин; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук».
91. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне / А.С. Закупин, Л.М. Богомолов, В.А. Мубассарова, П.В. Ильичев // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 105. DOI 10.7868/S000233371404019X
 92. Сейсмоакустические проявления обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электрорезонированиях / Л.М. Богомолов, Д.В. Костылев, **Н.В. Костылева**, И.П. Дудченко, С.А. Гуляков, М.А. Мищенко, Н.С. Стовбун // В сборнике: XIII международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», с. Паратунка, Камчатский край, 25 – 29 сентября 2023 г. Паратунка: ИКИР ДВО РАН, 2023. – С. 95-96.
 93. Специализированные массивы для климатических исследований // Метеорологический архив ВНИИГМИ-МЦД [сайт]. – URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (дата обращения 31.07.2022).
 94. Старовойт, О.Е. Инструментальные сейсмические наблюдения в России / О.Е. Старовойт // Вестник Владикавказского НЦ РАН. – 2005. –Т. 5, № 1. – С.8-12.
 95. Стационарные сейсмические станции Алтае-Саянского региона в 2013 г. (код сети ASRS) / А.Ф. Еманов, А.А. Еманов, С.А. Чурашев, С.Н. Манушин, Д.Г. Корабельщиков, А.В. Фатеев // Землетрясения Северной Евразии. – Вып. 22 (2013 г.). – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. – 2019. – Приложение на CD_ROM.
 96. Устройство и принцип действия молекулярно-электронного гидрофона / С.Ю. Авдюхина, В.М. Агафонов, Е.В. Егоров и др. // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: сб. трудов XIV Всероссийской конференции, 23–25 мая 2018 г., Санкт-Петербург. – Санкт-Петербург: 2018. – С. 621-624.
 97. Хоменко, З.Н. Справочник по физической географии Сахалинской области / З.Н. Хоменко // Южно-Сахалинск: Сахалинское книжное издательство, 2003. – 110 с.
 98. A Study of Seismic Noise Level at the KNET Stations / N.A. Sycheva, A.N. Mansurov, S.I. Kuzikov, I.V. Sychev // Journal of Volcanology and Seismology. – 2020. – V. 14, N 4. – P. 229-245. doi: 10.1134/S0742046320040065.
 99. Asymmetric caldera-related structures in the area of the Avacha group of volcanoes in Kamchatka as revealed by ambient noise tomography and deep seismic sounding / I. Koulakov, I. Jaxybulatov, N.M. Shapiro, I. Abkadyrov, E. Deev, A. Jakovlev, P. Kuznetsov, E. Gordeev, V. Chebrov //

- Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2014. – Vol. 285. – P.36-46.
100. **Boginskaya, N.V.** Change in the level of microseismic noise during the COVID-19 pandemic in the Russian Far East / N.V. Boginskaya, D.V. Kostylev // Pure And Applied Geophysics, 2022 DOI: 10.1007/s00024-022-03019-7. (1.63 п.л., вклад автора 75%, импакт-фактор JCI – 0.570).
 101. Embree, P. Language Algorithms for Digital Signal Processing / P. Embree, B. Kimble New Jersey: Prentice Hall PTR. 1991. – 456 с.
 102. Fokina, A. Simple and cheap method of MET geophones and seismic accelerometers temperature sensitivity stabilization in a wide temperature band / A. Fokina, D. Zaitsev, E. Egorov // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. – Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology, 2020. – P. 411-418. doi: 10.5593/sgem2020/1.2/s05.053.
 103. Frequency response and self-noise of the met hydrophone / D.L. Zaitsev, S.Y. Avdyukhina, M.A. Ryzhkov, I. Evseev, E.V. Egorov, V.M. Agafonov // J. of Sensors and Sensor Systems. – 2018. – Vol. 2, No. 7. – P. 443-452. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018>
 104. Fusca, I. NAVY wants industry to share burden of solion development / I. Fusca // Aviation week. – 1957. – Vol. 66, No. 26. – P. 37.
 105. Huang, H. Molecular electric transducers as motion sensors: a review / H. Huang, V. Agafonov, H. Yu // Sensors. – 2013. – Vol. 4, No 13. – P. 4581–4597. <https://doi.org/10.3390/s130404581>
 106. Kostylev, D.V. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type / D.V. Kostylev, L.M. Bogomolov, **N.V. Boginskaya** // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – 324(012009). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009>. (0.88 п.л., вклад автора 40%, импакт-фактор SJR – 0.199).
 107. Kostylev, D. V. The first results of the seismic monitoring system of the Solntsevsky open pit coal mine area (on Sakhalin Island) / D.V. Kostylev, **N.V. Boginskaya** // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: 4, Yuzhno-Sakhalinsk, 06–10 сентября 2021 года. – Yuzhno-Sakhalinsk, 2021. – P. 012002. – DOI 10.1088/1755-1315/946/1/012002.
 108. Kozlov, V.A., Agafonov V.M., Dudkin P.V. // Abstr. Int. Scientific and Technical Conf. System Problem of Reliability, Quality, Information and Electronic Technologies, October 3–14, 2005. M.: Radio and Communication, 2005. – P. 142.
 109. Krishtop, V.G. Experimental modeling of the temperature dependence of the transfer function of rotational motion sensors based on electrochemical transducers / V.G. Krishtop // Russian Journal of Electrochemistry. – 2014. – Vol. 50. – P. 350-354. doi: 10.1134/S1023193514040053
 110. Lane, R. Principals of very low power electrochemical control devices / R. Lane // J. Electro-

- chemical soc. 1957. – Vol. 104, No. 12. – P. 767.
111. Larkam, C.W. J. Acoust. Soc. Amer. 1965. – Vol. 37, No 4. – P. 664.
112. Low-frequency, low-noise molecularelectronic hydrophone for offshore and transit zone seismic exploration. / D. Zaitsev, E. Egorov, M. Ryzhkov, G. Velichko, V. Gulenko // In: 19-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 28 June – 7 July 2019, Albena, Bulgaria: Conf. proceedings. – 2019. – Vol. 1. P. 961-968
113. Lyubushin, A.A. Experience of complexation of global geophysical observations / A.A. Lyubushin, V.S. Bobrovskiy, S.A. Shopin // Geodynamics & Tectonophysics. – 2016. – Vol.1, No. 7. – P.1-21.
114. McNamara, D.E. Seismic noise analysis system, power spectral density probability density function: stand-alone software package // D.E. McNamara, R.I. Boaz // U.S. Geological Survey Open File Report. – 2005. – Vol. 1438. – 30 p.
115. Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations / A. Rozhnoi, M. Solovieva, B. Levin, M. Hayakawa, V. Fedun // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. - 2014. – No. 14. – P. 2671-2679. doi:10.5194/nhess-14-2671-2014
116. New seismic array solution for earthquake observations and hydropower plant health monitoring / G.N. Antonovskaya, N.K. Kapustian, A.I. Moshkunov, A.V. Danilov, K.A. Moshkunov // Journal of Seismology. – 2017. – No. 21. – P. 1039-1053. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9650-8>
117. Noise Toolkit PDF-PSD. Noise Toolkit PDF/PSD bundle // IRIS. Data Services Products [Site]. – URL: <http://ds.iris.edu/ds/products/noise-toolkit-pdf-psd/> (дата обращения 31.07.2022) JSEN.2019.2927859
118. Ocean-Bottom Seismographs Based on Broadband MET Sensors: Architecture and Deployment Case Study in the Arctic / A.A. Krylov, I.V. Egorov, S.A. Kovachev, D.A. Ilinskiy, O.Y. Ganzha, G.K. Timashkevich, K.A. Roginskiy, M.E. Kulikov, M.A. Novikov, V.N. Ivanov, E.A. Radiuk, D.D. Rukavishnikova, A.V. Neeshpapa, G.O. Velichko, L.I. Lobkovsky, I.P. Medvedev, I.P. Semiletov // Sensors 2021. – 21, 3979. <https://doi.org/10.3390/s21123979>
119. Peterson, J. Observation and Modeling of Seismic Background Noise / J. Peterson // Open file report 93-322. Albuquerque: US Dept. of Interior Geological Survey, 1993. – 95 p.
120. Seismic Behaviour and Design of Irregular and Complex Civil Structures / N. Kapustian, G. Antonovskaya, V. Agafonov et al. // Eds. by O. Lavan, M. De Stefano. Dordrecht: Springer, 2013. – P. 353.
121. Seismicity at the convergent plate boundary offshore Crete, Greece, observed by an amphibian network / D. Becker, T. Meier, M. Bohnhoff, H.-P. Harjes // Journal of Seismology, Springer Ver-

- lag. – 2009. – Vol. 2, No. 14. – P. 369-392. <10.1007/s10950-009-9170-2>. <hal-00535497>
122. Stearns, S.D. Signal Processing Algorithms Using Fortran and C. New Jersey / S.D. Stearns, D.A. Ruth // Prentice Hall PTR. – 1993. – 331 c.
123. The temperature dependence of amplitude- frequency response of the MET sensor of linear motion in a broad frequency range / D.A. Chikishev, D.L. Zaitsev, K.S. Belotelov, I.V. Egorov // IEEE Sensors Journal. – 2019. – V. 19. – P. 9653-9661. doi: 10.1109/
124. Telluric Currents Generated by Solar Flare Radiation: Physical Model and Numerical Estimations / V. Sorokin, A. Yaschenko, G. Mushkarev, V. Novikov // Atmosphere. – 2023. – No. 14. – P. 458-477. DOI 10.3390/atmos14030458]
125. Vassallo, M.A. Comparison of Sea-Floor and On-Land Seismic Ambient Noise in the Campi Flegrei Caldera, Southern Italy / M.A. Vassallo, A. Bobbio, G. Iannaccone // Bulletin of the Seismological Society of America. – 2008. Vol. 98, No. 6. – P. 2962-2974. December 2008, doi: 10.1785/0120070152
126. Wielandt, E. The New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)/Ed. by Bormann P. Potsdam:Deutsches GeoForschung Centrum GZF, 2012. Ch5. http://gfzpublic.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:56076:4/component/escidoc:61055/Chapter_5_rev1.pdf
127. Zaitsev, D. comparative study of aqueous and non-aqueous solvents to be used in low-temperature serial molecular–electronic sensors / D. Zaitsev, I. Egorov, V.M. Agafonov // Chemosensors. – 2022. – V. 10, N 3. – P. 111. doi:10.3390/chemosensors10030111