

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена в лаборатории сейсмологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный

руководитель - ***Быков Виктор Геннадьевич**, доктор физико-математических наук*

**Официальные
оппоненты**

- ***Кулаков Иван Юрьевич**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, член-корреспондент Российской академии наук, Автономная некоммерческая образовательная организация высшего образования «Сколковский институт науки и технологий», профессор Центра науки и технологий добычи углеводородов*

- ***Башилов Игорь Порфирьевич**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории фундаментальных проблем экологической геофизики и вулканологии №703*

- ***Гоев Андрей Георгиевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук, заведующий лабораторией сейсмологических методов исследования литосферы, ведущий научный сотрудник*

Защита диссертации состоится 26 февраля 2025 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.6 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, геологический факультет, ауд. 308.

E-mail: dsmsu0403@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3288>

Автореферат разослан «___» января 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

К.М. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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.

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 специалистами Московского физико-технического института (МФТИ), датчиков, использующих молекулярно-электронную ячейку¹.

Измерители параметров движения на основе молекулярно-электронного переноса имеют весьма широкую сферу применения: мониторинг движения различных геологических объектов и сейсмологический мониторинг², решение задач сейсморазведки в вулканологии³ и в других областях геофизических работ.

Молекулярные сейсмоприемники находят применение в ряде 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.

Датчики являются полностью отечественной разработкой и представляют собой конкурентоспособный продукт, готовый заменить дорого стоящие иностранные аналоги.

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 Разработка сейсмодатчиков на новых технологических принципах (молекулярная электро-ника) / И.А. Абрамович, В.М. Агафонов, С.К. Дараган, В.А. Козлов, А.В. Харламов // Сейсмические приборы. – 1999. – Вып. 31. – С. 56-71.

² 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 Verlag. – 2009. – Vol. 2, No. 14. – P. 369-392.

³ 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. Koulikov, 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.

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

Разработанная 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 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.

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) и математических методов статистической обработки рядов наблюдений. Для анализа спектров сейсмических данных использовалась программа SpectrumSeism.

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, слабомагнитудные 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 каталоги СФ ФИЦ ЕГС РАН.

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: 22-й международная конференция «Нефть и газ Сахалина-2018» (2018); VII научно-техническая конференция «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России» (2019); III и IV международная научная конференция «Геодинамические процессы и природные катастрофы» (2019, 2021); XXIII научная конференция Дня вулканолога (2020); XIII международная научная конференция «Солнечно-земные связи и

физика предвестников землетрясений» (2023), IX Международный симпозиум «Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов» (2024); VII Международная конференция «Триггерные эффекты в геосистемах» (2024).

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 [1, 2, 4 и 5]) и непосредственного участия автора в настройке и вводе в эксплуатацию традиционных и молекулярно-электронных датчиков, описанного в работах [3, 6, 7, 9 и 12]. Автором в работах [1, 4, 5, 9 и 11] 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 [2-3]. В работах [6-7] 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 [8, 10] 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 отчетов 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.

Объем и структура работы

Диссертация содержит введение, 3 главы, заключение, список литературы из 127 наименований, состоит из 119 страниц текста, 58 иллюстраций, 9 таблиц.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цели и основные задачи работы, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе изложена краткая история создания электрохимических преобразователей для датчиков движения нового поколения и дано обоснование возможности применения молекулярно-электронных приборов в современной сейсмологии. Приведен 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. Отмечено, что молекулярно-электронные датчики являются полностью отечественной разработкой и представляют собой конкурентоспособный продукт, готовый заменить дорогостоящие иностранные аналоги, используемые в сейсмологии и

сейсморазведке.

Во второй главе, посвященной установке оборудования и подготовке программно-аппаратурного обеспечения, в п. 2.1 обоснован выбор места размещения сейсмического и сейсмоакустического оборудования. Для проведения эксперимента по тестированию молекулярно-электронных устройств компанией ООО «Р-сенсорс» в рамках проекта РФФИ № 18-07- 00966 «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности о. Сахалин с применением сейсмических датчиков ново- го типа», выполняемого ИМГиГ ДВО РАН, СФ ФИЦ ЕГС РАН совместно с МФТИ и ООО «Р-сенсорс», были предоставлены молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 с регистраторами NDAS-8226 и три прототипа молекулярно-электронных гидрофонов.

На основе этого оборудования в 2018 году в с. Петропавловское Анивского района Сахалинской области развернут полигон для комплексных геофизических исследований, который включает сейсмические приборы нового поколения: сейсмометр СМЕ-6111 и гидрофон. Второй молекулярно-электронный гидрофон установлен в пункте сейсмического мониторинга СФ ФИЦ ЕГС РАН в урочище Загорское Долинского района. Установка третьего гидрофона, разработанного в рамках проекта, выполнена на одном из островов Южно-Курильской гряды (о. Кунашир). Местоположения и схемы размещения оборудования показаны на рисунке 1.

Для монтажа и запуска сейсмической аппаратуры на полигоне Петропавловское, проведено тестирование площадки для выбора мест установки сейсмических пунктов⁴. Выполнены сейсморазведочные работы с целью изучения строения верхней части литологического разреза почв в месте размещения оборудования. Организована сеть станций, состоящая из молекулярного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 с регистратором NDAS-8226, дополнительной станции на базе короткопериодного сейсмоприемника СПВ-3к с регистратором Дельта03 и гидрофона⁵. Также полигон оборудован

⁴ 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.

⁵ Каменев П.А., Костылев Д.В., **Богинская Н.В.**, Закупин А.С. Геофизические

многоэлектродной системой геоэлектрических измерений и регистратором уровня почвенного радона.

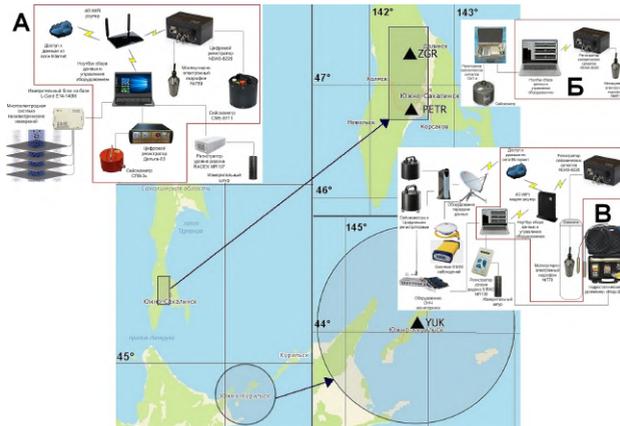


Рисунок 1 - Районы сейсмических и сейсмоакустических исследований, места размещения пунктов и их оснащение в селе Петропавловское (врезка А), в урочище Загорское (врезка Б) и на о. Кунашир (врезка В).

Сейсмометр СМЕ-6111 установлен в сейсмокамере, представляющей собой заглублённый в грунт герметизированный модуль с бетонным основанием.

Для монтажа гидрофона на полигоне Петропавловское построена скважина глубиной 3.5 метра, обсаженная перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Пробуренная скважина постоянно обводняется, что создает необходимые условия для работы гидрофона.

Установка гидрофона в урочище Загорское произведена в открытом водоеме размером 3×9 м на глубине 0.5 м.

На о. Кунашир местом установки гидрофона послужил геодинамический полигон на базе сейсмической станции «Южно-Курильск». На территории полигона расположена наблюдательная скважина гидрогеодеформационного мониторинга структурного подразделения «СахГРЭ» АО «Дальневосточное ПГО» глубиной 303.3 м. Гидрофон размещен в этой скважине на глубине 25 м в

обсадной колонне диаметром 245 мм.

В п. 2.2 проведена настройка оборудования с использованием приложения NDAS-8226, предназначенного для управления регистраторами серии NDAS-8226, а также настройка сетевых параметров сейсмометра и гидрофонов.

В п. 2.3 описана методика сбора и обработки данных, показаны примеры записей сейсмических событий, зарегистрированных новой аппаратурой⁶.

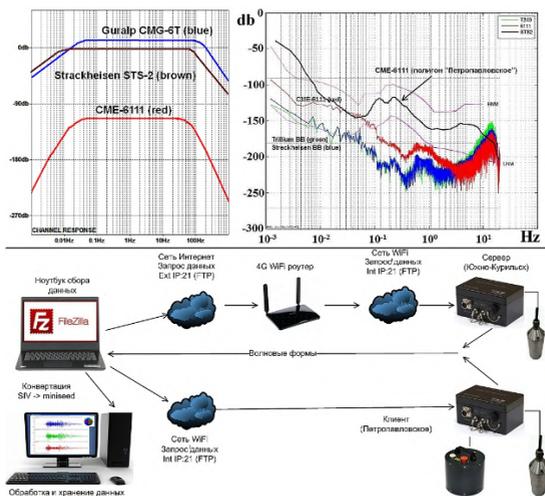


Рисунок 2 — Амплитудно-частотные характеристики (слева сверху) и спектральная плотность шума сейсмометра CME-611, установленного на полигоне Петропавловское (справа сверху), а также схема организации доступа к данным станций с молекулярно-электронными датчиками (внизу).

Для корректного использования полученных данных в программе DIMAS на основании информации о частотной характеристике сейсмометра CME-6111 в представлении полюсов и нулей, были подготовлены Response файлы (AЧХ) для комплекта оборудования сейсмометр CME-6111 + регистратор NDAS-8226 (рисунок 2 слева сверху), а для определения пригодности

⁶ 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.

сейсмических данных станции была выполнена оценка относительно модели шума Петерсона и произведено сравнение с теоретическим собственным шумом прибора по данным производителя. Как видно на рисунке 2 (сверху справа) шумы станции соответствуют принятым стандартам. Для доступа к данным на карте памяти регистратора NDAS наиболее удобным способом является использование FTP-сервера, поддерживаемого программным обеспечением регистратора. На рисунке 2 (снизу) показаны два типа подключения к карте памяти регистратора. Полученные данные сохраняются во внутреннем формате регистратора NDAS (SIV) на внешнем носителе. Для перевода данных в другие форматы используется конвертер данных, прилагаемый к устройству. Оптимальным форматом для использования в современных программах обработки сейсмических данных является формат MiniSEED, в который и проводилась конвертация.

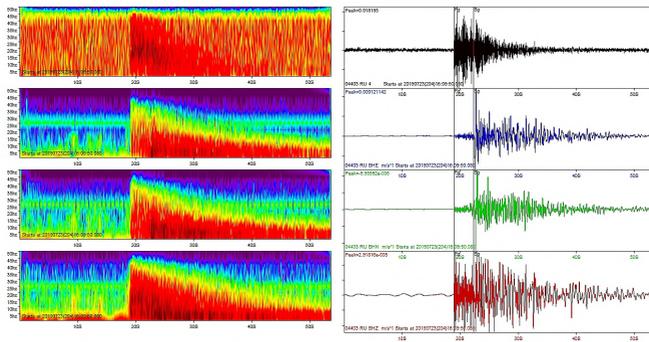


Рисунок 3 - Волновые формы (справа) и спектрограммы (слева) сейсмического события с $M=3.3$ произошедшего 23 июля 2019 г., полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника СМЕ-6111 (цветные волновые формы) и прототипа молекулярно-электронного гидрофона (черная волновая форма).

В основе реализованной системы обработки данных лежит ПК DIMAS, разработанный в КФ ФИЦ ЕГС РАН. При обработке сейсмических событий, автором были учтены особенности коровой сейсмичности о. Сахалин⁷. Землетрясения в южной части острова

⁷ Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. Развитие метода

характеризуются малой общей длительностью записи и высокочастотным составом. В случае слабых землетрясений очень важно отличать эти вступления от помех. Пример записи локального события показан на рисунке 3. В п.2.4 приведены результаты исследований регистрационных и спектральных возможностей сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофонов⁸. Помимо оценки регистрационных возможностей, на основе данных, полученных при использовании новейших комплектов оборудования, установленных на полигоне Петропавловское, отдельно проведены работы по исследованию сейсмичности на полуострове Крильон за период 2018- 2021 гг.^{9, 10}.

Для проведения сейсмоакустических исследований (п. 2.5) использованы записи гидрофона, установленного на полигоне Южно-Курильск. Выборка событий составила 35 землетрясений с $M \geq 2.0$ за период с мая 2019 г. по февраль 2020 г. в районе Южно-Курильского пролива. Из 35 землетрясений в 7 случаях выявлен предшествующий землетрясению низкочастотный сигнал¹¹.

Таким образом, создана и апробирована методика установки молекулярно-электронных датчиков для проведения геофизических исследований на островах Сахалин и Кунашир.

Третья глава посвящена оценке влияния внешних воздействующих факторов на эксплуатацию молекулярно-электронных приборов.

В п. 3.1 представлены результаты выполненных в 2020-2022 гг. исследований по оценке воздействия импульсов напряжения и возбуждения тока в земной коре на уровень сейсмического шума,

среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 Г.) // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 11. – С. 1904-1911.

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.

⁹ 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.

¹⁰ 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.

¹¹ 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.

регистрируемого молекулярно-электронными приборами.

Эксперимент проведен в 4 этапа в течение 2020–2022 гг. Испытания по оценке воздействия генератора импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр впервые проведены в ИМГиГ ДВО РАН в октябре 2020 года. Общая схема расположения комплексного полигона Петропавловское, сейсмических станций и разломных структур юга о. Сахалин приведена на рисунке 4. На этом же рисунке (врезка А) показано положение возбуждающего электрического диполя АВ, образованного двумя заземленными электродами.

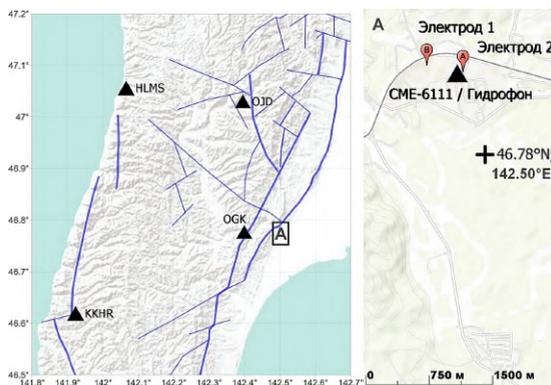


Рисунок 4 - Карта расположения сейсмических станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН (черные треугольники) и разломов юга о. Сахалин (синие линии). Врезка А: расположение электродов и сейсмических приборов полигона комплексных геофизических наблюдений.

В ходе экспериментов в 2021–2022 гг. проведено 12 сеансов электроразведки. На каждом этапе время зондирования и параметры импульсов тока одинаковы: серия в 200 импульсов 20 секунд длительности, с паузами 20 секунд. Для каждого сеанса анализировались сейсмические записи продолжительностью 4 часа каждая. Для всех 12 случаев электроразведки записи практически идентичны, небольшие различия заключаются в наличии или отсутствии прочих шумов, не связанных с возбуждением в среде импульсов тока. 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 5.

Рисунок показывает для дней, предшествующих эксперименту (27–28 октября), типичный суточный характер изменения уровня сейсмического шума – уменьшение его уровня в ночные периоды и увеличение во время дневной активности. Совершенно иной характер отмечается 29 октября (время начала записи шума 29 октября на рисунке соответствует времени начала эксперимента). 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.

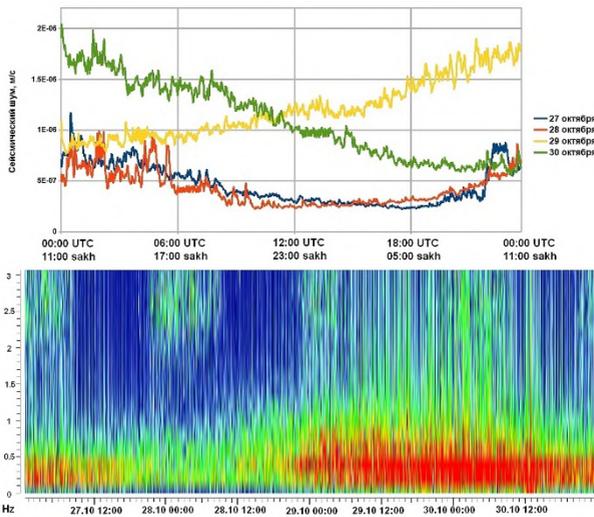


Рисунок 5 - Сейсмический шум и его спектральный состав, зарегистрированный молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 до и после проведения эксперимента.

При этом, на фоне повышенного от сейсмоэлектрического эффекта II рода уровня шума, не возникло затруднений с регистрацией сейсмических событий прибором СМЕ-6111. На рисунке 6 приведена запись (без предварительной фильтрации) землетрясения (30-10-2020 г., O=05:34 (UTC), 47.257N 142.178E, ML=3.3) и его спектр. Наглядно

видно, что частотный состав и волны легко идентифицируются даже на фоне сильного низкочастотного шума.

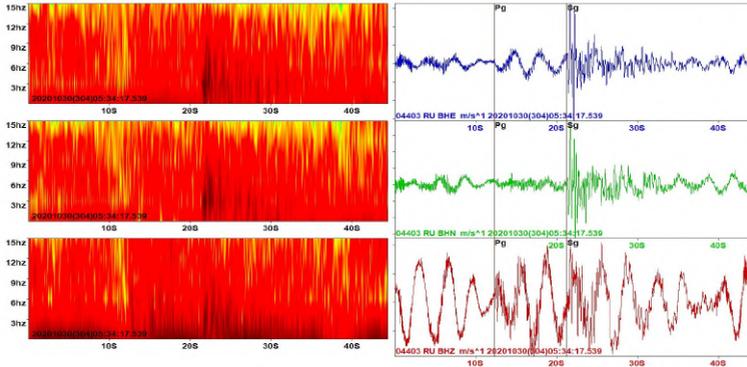


Рисунок 6 - Спектральный состав (слева) и запись от произошедшего во время проведения эксперимента сейсмического события (справа), полученные молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111.

Как показано на рисунке 7, полигон Петропавловское, на котором проводились эксперименты, расположен в непосредственной близости от электрической подстанции 110 кВ и линий электропередач на 110 и 35 кВ. Это является довольно мощным источником электромагнитных помех, которые могут снизить качество функционирования приборов. Тем не менее, на волновых формах и спектрограммах от землетрясения произошедшего на юге острова с магнитудой $M_L=2.2$, не наблюдается никаких затруднений в его идентификации и проявлений помех на спектрограмме сигналов. Представлены данные как от молекулярно-электронных приборов, так и от механического короткопериодного сейсмометра.

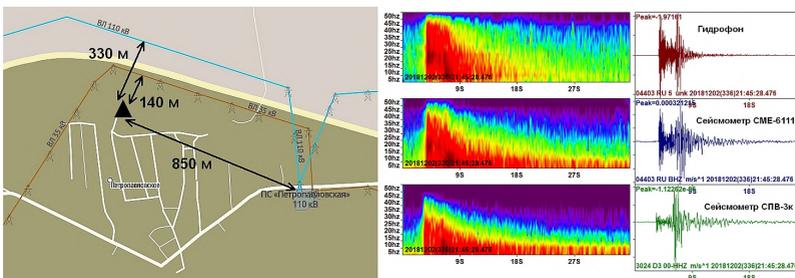


Рисунок 7 – Схема расположения электрической подстанции вблизи от

полигона Петропавловское (сверху) и волновые формы и спектрограммы от произошедшего землетрясения (снизу).

Таким образом, при испытаниях генератора импульсных напряжений, установлено, что молекулярно-электронные приборы устойчиво регистрируют все периоды электровоздействий на среду и их продолжительность¹².

В п. 3.2 проведен анализ воздействия экзогенных факторов на сейсмический шум, регистрируемый молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111. Для оценки степени воздействия атмосферных явлений было проведено сравнение записей сейсмического шума сейсмометром СМЕ- 6111 с записями сейсмометра STS-2. Исследования для сейсмометров, установленных на станции «Южно-Сахалинск» и, в частности, для STS-2, выполнены автором в 2020 году. На построенных огибающих сигнала шума выявлены импульсные аномалии, причинами которых оказались атмосферные явления в виде циклонов. Анализ полученных результатов показал, что основное влияние на уровень сейсмического шума для всех исследуемых записей оказывает совокупность воздействий климатических и атмосферных факторов¹³.

В п. 3.3 выполнена оценка влияния атмосферных и гидрологических факторов на работу гидрофонов, установленных в разных условиях. Для гидрофона в глубокой скважине на полигоне Южно-Курильск уровень атмосферного давления и уровень воды в скважине не оказывают существенного влияния на работу прибора. Для гидрофонов, работающих в условиях мелководного водоема и неглубокой открытой скважины, влияние природных факторов выражено более значительно.

В п. 3.4 для анализа стабильности характеристик МЭП сейсмометра СМЕ-6111 проведено исследование зависимости результатов определения энергетических параметров землетрясений от окружающей температуры. За период с декабря 2018 г. по август

¹² Богомолов Л.М., Костылев Д.В., **Костылева Н.В.**, Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С. Наблюдения обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода при электрoзондированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 115-131.

¹³ **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.

2019 г. отобраны наиболее значительные сейсмические события в районе южной части о. Сахалин и их записи сейсмометром СМЕ-6111 полигона Петропавловское и серийным сейсмометром STS-2 с./ст. «Южно-Сахалинск». Далее по каждой компоненте рассчитан энергетический класс каждого землетрясения. При этом для зимних месяцев получилось значительное превышение (в 1.2–1.3 раза) энергетических показателей, рассчитанных на основании записей сейсмометра СМЕ-6111, по сравнению с данными по записям сейсмометра STS-2.

Исходя из предположения о влиянии низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, проведен детальный анализ зависимости характеристик сейсмометра от изменения температуры в период с декабря 2019 г. по январь 2020 г. С этой целью сейсмометр СМЕ-6111 установлен в сейснопавильоне станции «Южно-Сахалинск» на общем постаменте с серийным сейсмометром STS-2 и проведена обработка имеющихся качественных записей приборов для определения энергетических показателей по каждому из приборов. Результаты расчетов показывают практически полную идентичность сравниваемых энергетических параметров по показаниям разных приборов. Отсюда следует, что работа молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111 при температуре порядка +4°C и выше не приводит к искажению регистрируемых параметров и приемлема для эксплуатации такого типа сейсмических приборов¹⁴.

Таким образом, получено подтверждение влияния температуры на работу молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111 и уточнены значения температуры, при которой начинается нарушение стабильности характеристик прибора¹⁵.

Общая оценка стабильности АЧХ сейсмометра СМЕ-6111 была выполнена по методике (Костылев, Богинская, 2022) и проведена за полных 4 года (16 сезонов) его эксплуатации. Полученные результаты отношений значений магнитуд локальных

¹⁴ 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).

¹⁵ 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.

сейсмических событий юга о. Сахалин, определенных по записям сейсмометра СМЕ-6111 к значениям магнитуд, определенным по записям эталонного сейсмометра STS-2 (с/ст «Южно-Сахалинск») представлены на рисунке 8. Там же показан «дрейф» АЧХ прибора для периода со значительным превышением значений. Полученные результаты показывают, что за исключением 5 сезонов, во время которых эксплуатация прибора производилась при отрицательных температурах, стабильность АЧХ сохранялась на эталонном уровне.

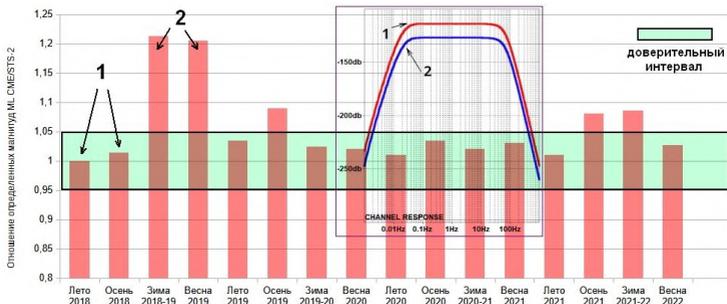


Рисунок 8 — Оценка стабильности параметров сейсмометра СМЕ-6111 и АЧХ, построенные за 16 сезонов его эксплуатации.

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. 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 ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ
ДИССЕРТАЦИИ**

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе ядра Российского индекса научного цитирования eLibrary Science index:

1. 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%, ИФ SJR – 0.174).
2. **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%, ИФ JCI – 0.570).
3. 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).
4. 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).
 5. 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).

**Научные статьи в журналах, входящих в перечень изданий,
рекомендованных ВАК при**

Министерстве образования и науки РФ:

6. 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%).
7. 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/gtr.2020.4.4.486- 499. (ИФ РИНЦ: 0.672. 1.75 п.л., авторский вклад 50%).

8. 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 электрозондированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома // Геосистемы переходных зон. – 2023. – Т. 7, № 2. – С. 115-131. – DOI 10.30730/gtr.2023.7.2.115-131. (ИФ РИНЦ: 0.672. 2.13 п.л., авторский вклад 30%).
9. 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%).
10. 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%).
11. 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%).

Иные публикации:

12. 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).