

УДК 550.34.038.3

Опыт и особенности эксплуатации молекулярно-электронного сейсмометра на о. Сахалин

© 2022 г. Д.В. Костылев^{1,2}, Н.В. Богинская^{1,2}

¹СФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; ²ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия

Поступила в редакцию 01.08.2022 г.

Аннотация. На развёрнутой площадке комплексных геофизических наблюдений в селе Петропавловском продолжено тестирование широкополосного молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, установленного в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа». Проведены сравнения результатов обработки записей волновых форм и сейсмического шума сейсмометра СМЕ-6111, установленного в сейсмокамере в селе Петропавловском, в периоды малоснежной зимы 2018–2019 гг. и в условиях большой величины снежного покрова зимой 2021–2022 гг. с целью определения энергетических характеристик произошедших сейсмических событий. Результаты тестирования в 2018–2019 гг. позволили авторам сделать предположение о влиянии низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, которые выражались в завышении энергетических характеристик сейсмических событий по результатам обработки записей волновых форм сейсмометра. Большая же величина снежного покрова зимой 2021–2022 гг. показала, что стабилизация температуры подпочвенного грунта привела к стабилизации параметров сейсмометра. Дополнительно был проведён анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума для обоих зимних периодов. Для периода 2018–2019 гг. наблюдается превышение эталонной модели высокого уровня шума (NHNМ) на низких частотах для горизонтальных каналов, а для зимы 2021–2022 гг. таких нарушений нет из-за значительной величины снежного покрова, компенсирующей влияние помех, что положительно сказывается на стабильности характеристик самого прибора и повышении качества сейсмических данных.

Ключевые слова: молекулярно-электронный преобразователь, молекулярно-электронный сейсмометр, амплитудно-частотные характеристики, сейсмические записи, сейсмический шум, сеймопавильон.

Для цитирования: 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: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.07>. EDN: XYMQGF

Введение

Технология, основанная на переносе молекулярных электронов (МЭП), является одной из самых перспективных в изготовлении датчиков линейного движения, таких, как акселерометры и геофоны. Низкочастотные датчики линейного движения на основе МЭП обладают высокой чувствительностью, низким уровнем собственных шумов в области инфранизких частот и механической прочностью, а сфера их применения довольно широка. Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП достаточно подробно изложены в литературе, в том

числе научно-популярной [Huang *et al.*, 2013; Bugaev *et al.*, 2018]. Основу любого устройства, работающего по технологии МЭП, составляет электрохимическая преобразующая ячейка.

В последние годы было проведено много исследований температурного поведения характеристик молекулярно-электронных преобразователей, например, [Krishtop, 2014; Chikishev *et al.*, 2019]. Рабочий диапазон прибора, стабильность характеристик, общая чувствительность и собственный шум существенно зависят от температуры. Результаты поведения характеристик молекулярных электронных преобразователей описаны и в условиях высоких температур,

и в экстремальных условиях подземных выработок со значительно повышенными температурами [Evseev *et al.*, 2019].

Ранние результаты наблюдений за работой датчиков подобного типа на о. Сахалин [Kostylev *et al.*, 2019] показали, что МЭП-датчики устойчивы к ударам, работают при разных углах наклона к вертикали, экономичны в электроснабжении. Сравнительный анализ записей сейсмических событий показал, что записи сильных землетрясений не отличаются от записей традиционных станций и при обработке текущей сейсмологической информации могут быть использованы молекулярно-электронные приборы.

В данной работе авторы представили результаты исследований, в которых было продолжено тестирование МЭП-датчиков в условиях низких температур, их влияние на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, которое выражается в завышении (занижении) энергетических характеристик сейсмических событий по результатам обработки записей волновых форм сейсмометра. Для детального анализа наличия или отсутствия такой зависимости в декабре 2019 г. сейсмометр СМЕ-6111 был установлен в сейсмопавильоне станции «Южно-Сахалинск» на общем постаменте с сейсмометром STS-2. Проведены сравнения результатов обработки записей волновых форм и сейсмического шума сейсмометра СМЕ-6111, установленного в сейсмокамере в с. Петро-

павловском, в период малоснежной зимы 2018–2019 гг. и в условиях большой величины снежного покрова зимой 2021–2022 гг.

Характеристики места наблюдения и оборудования

До 2018 г. на о. Сахалин опыт эксплуатации сейсмометров, построенных на основе молекулярно-электронной технологии, ограничивался временными сейсмическими наблюдениями Института морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН и испытанием сейсмометров в Сахалинском филиале (СФ) ГС РАН в 2004 году. Новым этапом в приобретении опыта использования таких устройств на о. Сахалин стала работа в 2018–2020 гг. над проектом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа». Этот проект осуществлялся ИМГиГ ДВО РАН совместно со специалистами СФ ФИЦ ЕГС РАН и Московского физико-технического института (МФТИ). Для обеспечения непрерывных наблюдений в рамках проекта на юге острова в селе Петропавловском (46.79°N, 142.50°E) была развернута площадка комплексных геофизических наблюдений, которая включала в себя, в том числе, широкополосный молекулярно-электронный сейсмометр СМЕ-6111 (рис. 1).

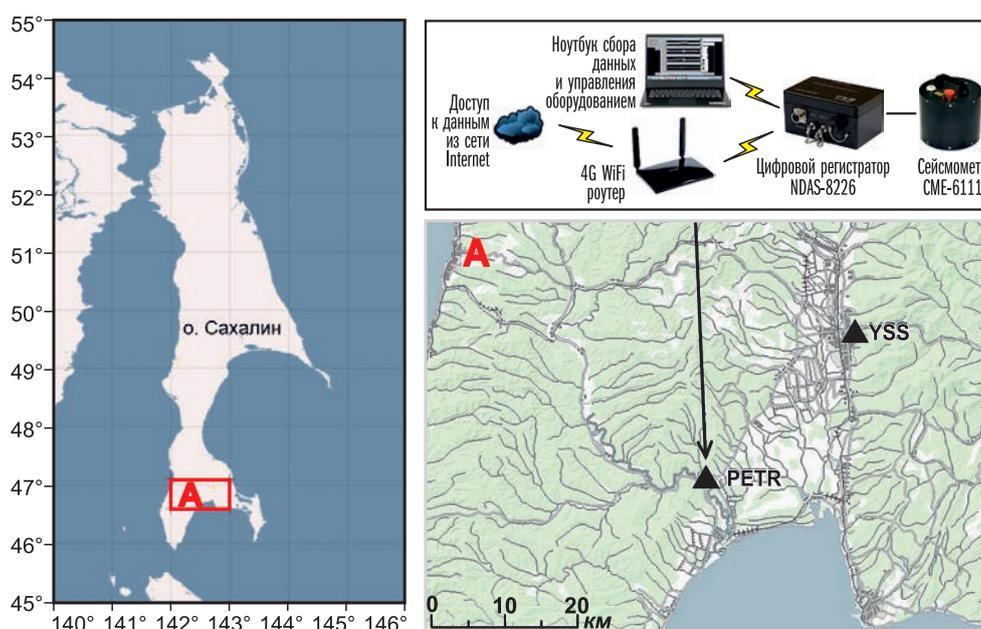


Рис. 1. Карта о. Сахалин.

На врезке справа указаны район установки и схема используемого оборудования на площадке с. Петропавловского (PETR), дополнительно показано расположение сейсмической станции «Южно-Сахалинск» (YSS)

Чтобы оценить пригодность выбранного участка для сейсмических наблюдений, предварительно проводилось тестирование места возможной установки оборудования с целью определения уровня шумов, а также корректного определения стационарных поправок. 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 приемлемо. Для изучения строения верхней части геологического разреза и детального уточнения состава и свойств почв полигона совместно с Камчатским филиалом (КФ) ФИЦ ЕГС РАН были проведены сейсморазведочные работы на территории, выбранной для размещения оборудования [Макаров и др., 2018].

В рамках проекта для проведения сейсмических наблюдений 10 июня 2018 г. была начата регистрация комплектом оборудования, состоящего из молекулярного широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 с регистратором NDAS-8226. СМЕ-6111 – высокоточный широкополосный (частотный диапазон 0.016 Гц (60 с) – 50 Гц) сейсмометр, характеризующийся низким собственным шумом, высокой линейностью и широким динамическим диапазоном. Наличие силовой обратной связи должно обеспечивать высокую температурную и временную стабильность параметров [Сейсмометр ..., 2022]. В качестве системы сбора данных использовался регистратор сигналов NDAS-8226 – 24-разрядная сейсмическая система сбора данных, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических данных в полевых условиях [Регистратор ..., 2022]. Отличительные признаки систе-

мы – простота в использовании и надёжность в сочетании с высокими техническими характеристиками. Для передачи данных и конфигурирования системы обычно используются USB и Wi-Fi-соединения, а 32 ГБ внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/GLONASS. Для обеспечения удалённого доступа и управления работой регистрирующего оборудования используется 4G модем-маршрутизатор, который позволяет управлять работой системы через сеть Интернет. Модем-маршрутизатор подключается к NDAS-8226 с помощью Wi-Fi-соединения, что позволяет ему находиться независимо от местоположения NDAS-8226. Питание системы обеспечивается 12-вольтовым источником питания с внешним аккумулятором, что гарантирует работу комплекса в случае отключения электроэнергии.

Размещение оборудования было осуществлено в соответствии с концепцией автономного пункта инструментальных наблюдений (АПИИ), реализованного в СФ ФИЦ ЕГС РАН [Костылев, 2021]. Согласно этой концепции, доступ к данным обеспечивается без участия обслуживающего персонала с передачей регистрируемых данных по сети Интернет, а сейсмометр располагается в быстровозводимой защищённой сейсмокамере, устанавливаемой вблизи оборудования регистрации и передачи данных. Сейсмокамера представляет собой заглублённый в грунт (глубина $40\text{--}50 \text{ см}$) герметизированный модуль с бетонным основанием и защитой от температурных перепадов (рис. 2).

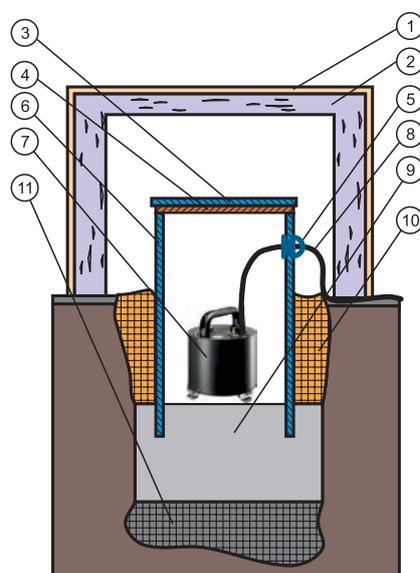


Рис. 2. Фотография сейсмокамеры с сейсмометром (слева) и схема сейсмокамеры (справа).

- 1 – защитный кожух;
- 2 – теплоизоляция;
- 3 – крышка модуля;
- 4 – уплотнительное кольцо;
- 5 – гермоввод;
- 6 – корпус модуля;
- 7 – сейсмометр;
- 8 – сигнальный кабель;
- 9 – бетонное основание;
- 10 – засыпка;
- 11 – щебень

кулярно-электронного широкополосного сейсмометра для идентификации записей сейсмических событий различной удалённости. Однако в процессе обработки данных и сравнении полученных результатов с результатами Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск» были выявлены некоторые особенности очевидно связанные с условиями эксплуатации оборудования, что также отмечалось и в других случаях опыта использования молекулярно-электронных сейсмометров в регионах с пониженными температурами [Кобелева, Гилёва, 2019].

Определение оптимальных условий эксплуатации

Для анализа стабильности характеристик молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111 была проделана нижеописанная работа по оценке зависимости значений энергетических параметров сейсмических событий от влияния окружающей температуры. За период с декабря 2018 г. по август 2019 г. отображены 28 наиболее

значительных сейсмических событий 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, сделанные сейсмометром СМЕ-6111 (с регистратором NDAS-8226) геофизического полигона «Петропавловское» (PETR), и записи, сделанные сейсмометром STS-2 (регистратор Quanterra Q330HR) РИОЦ «Южно-Сахалинск» (YSS). Запись каждого сейсмического события обработана в программном комплексе DIMAS [Droznin, Droznina, 2011] 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 табл. 1, в которой для каждого события указаны значения, полученные в результате определения энергетических классов землетрясений.

Таблица 1. Результаты обработки сейсмических событий в районе южной части острова Сахалин за период с декабря 2018 г. по август 2019 г. по записям молекулярно-электронного сейсмометра и записям РИОЦ «Южно-Сахалинск»

№ в каталоге	Дата, мм.гггг	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	12.2018		7.4	7.3		11.1	10.6
SKHS180752	12.2018		9.0	8.5		9.5	8.5
SKHS180757	12.2018	8.4	6.8	7.4	8.5	8.3	7.7
SKHS180765	12.2018	6.0	7.3	7.6	7.6	8.1	8.5
SKHS180772	12.2018	5.1	6.9	6.8	7.4	7.7	7.0
SKHS190015	01.2019	7.4	7.8	8.0	9.8	8.7	9.4
SKHS190036	01.2019		6.8	6.6		7.5	7.0
SKHS190039	01.2019	5.9	7.4	7.3	7.6	8.9	9.0
SKHS190114	01.2019		4.6	5.1		7.0	7.3
SKHS190171	02.2019	6.0	5.5	5.6	6.7	7.5	7.6
SKHS190185	03.2019		5.6	5.9		6.5	7.0
SKHS190190	03.2019		5.9	6.4	6.0	8.3	8.0
SKHS190192	03.2019	6.2	6.4	6.3	7.2	7.8	7.8
SKHS190196	03.2019		5.8	6.0	5.2	6.3	6.1
SKHS190309	03.2019		4.6	5.5		8.2	7.2
SKHS190381	04.2019		5.8	6.0		6.8	6.4
SKHS190383	04.2019	6.3	7.3	7.5	6.6	7.3	7.3
SKHS190415	04.2019		6.1	6.0		8.8	8.6
SKHS190472	05.2019		7.0	7.6	5.9	6.8	7.0
SKHS190484	06.2019	5.4	7.1	7.4	5.7	7.2	7.4
SKHS190518	06.2019	5.4	7.1	6.8	7.1	7.8	6.8
SKHS190519	06.2019	5.7	6.0	6.6	5.9	6.8	6.8
SKHS190484	06.2019	6.5	8.0	8.2	8.5	9.5	9.1
SKHS190575	06.2019	4.4	6.0	6.3	6.9	7.9	7.7
SKHS190617	07.2019		6.4	6.8		6.2	6.0
SKHS190643	08.2019	10.5	11.1	11.5	10.6	11.9	11.7
SKHS190657	08.2019		7.8	7.7		7.5	6.8
SKHS190662	08.2019	6.1	7.5	7.8	6.4	7.0	6.9

Из табл. 1 видно, что для зимних месяцев наблюдается значительное превышение (в 1.2–1.3 раза) энергетических показателей, рассчитанных на основании записей сейсмометра СМЕ, относительно данных, полученных по записям сейсмометра STS-2 (установленного в сейсмопавильоне РИОЦ «Южно-Сахалинск» (YSS)), расположенного на расстоянии 27 км от пункта наблюдений «Петропавловское» (PETR). Было сделано предположение о влиянии низких температур на амплитудно-частотные характеристики молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111, которое выражается в завышении энергетических характеристик сейсмических событий по результатам обработки записей волновых форм сейсмометра. Данное 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 можно предположить, что температурный режим в сейсмокамере должен примерно соответствовать температуре почвы на глубине 20–40 см, полученной по многолетним наблюдениям на метеорологических станциях Южного Сахалина. В частности, нами 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, когда наблюдаются низкие температуры воздуха и высота снежного покрова сравнительно небольшая. В период начала исследований 2018–2019 гг., в декабре 2018 г., средняя высота снежного покрова составляла всего 20 см (по данным метеостанции «Южно-Сахалинск»), что является незначительным для Сахалина снежным покровом и, несомненно, сказалось на температурах в слое 0.2–0.4 м. На основании этих данных был построен совмещённый график зависимостей изменения соотношения посчитанных энергетических классов

сейсмических событий по данным СМЕ-6111 и STS-2 от времени года и температуры почвы в слое 20 см (рис. 3), который наглядно показывает, что при достижении температур почвы 4–8°C рассчитанные энергетические классы по СМЕ-6111 и STS-2 (расположенном в термостабильных условиях павильона сейсмической станции «Южно-Сахалинск») становятся практически идентичными. Это говорит о явной зависимости качества регистрации сейсмических событий молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111 от температуры окружающей среды.

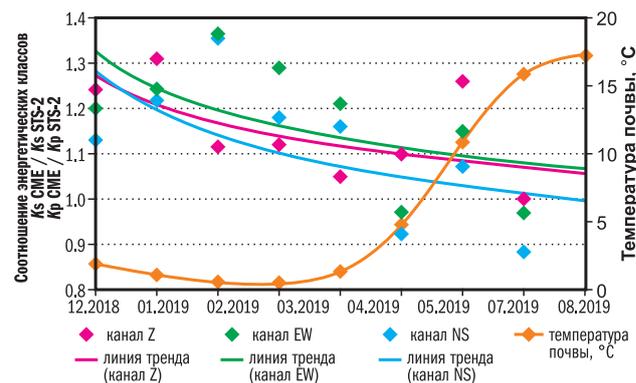


Рис. 3. Зависимость соотношения энергетических классов по данным СМЕ-6111 к STS-2 в различные месяцы и годовой ход температуры грунта на юге Сахалина в период 2018–2019 гг.

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, например, на виброплатформе для оценки изменения в АЧХ, проведены вычисления изменения чувствительности сейсмометра по нижеописанной 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 и STS-2 для одного и того же сейсмического события. В нашем случае было выявлено уменьшение чувствительности сейсмометра СМЕ 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 (рис. 4).

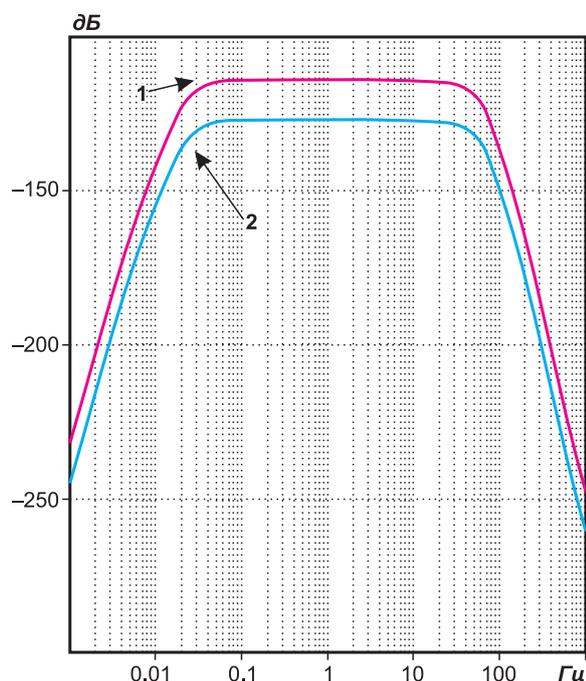


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики NS-канала сейсмометра СМЕ-6111, построенные для эталонного значения коэффициента преобразования (1) и для вычисленного коэффициента преобразования при работе сейсмометра в зимний период (2)

Для детального анализа наличия или отсутствия 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 сейсмотавильоне станции «Южно-Сахалинск» на общем постаменте с сейсмометром STS-2 (рис. 5).

Сейсмотавильон 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 $+4^{\circ}\text{C}$.

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 (телесеismicкие, региональные и локальные), имеющие качественные записи по обоим приборам, и была проведена их обработка в программе DIMAS [Droznin, Droznina, 2011] для определения энергетических показателей по каждому из приборов. Результаты обработки представлены в табл. 2 и 3.

Как видно по представленным в таблицах результатам, приборы показали практически полную идентичность в сравниваемых параметрах (магнитудах и (или) энергетических классах). Таким образом, можно сделать вывод, что



Рис. 5. Внешний вид сейсмотавильона сейсмической станции «Южно-Сахалинск» и размещённых в нём сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2

Таблица 2. Результаты обработки телесеismicических и региональных событий по записям сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2

№ в бюллетене станции «Южно-Сахалинск»	Параметры землетрясений: дата, <i>дд.мм.гггг</i> время в очаге, <i>чч.мм:сс.с</i> глубина очага <i>h</i> , км	Координаты землетрясений	Расстояние от станции «Южно-Сахалинск», км	Сравниваемые параметры					
				STS-2			СМЕ-6111		
				<i>MS</i>	<i>ML</i>	<i>MPV(A)</i>	<i>MS</i>	<i>ML</i>	<i>MPV(A)</i>
3801/19	26.12.2019 17:13:53.9 <i>h</i> =20	58.7°N 158.9°E	1668	5.1			5.1		
17/20	02.01.2020 18:23:54.2 <i>h</i> =27	35.8°N 141.3°E	1196	5.4			5.4		
19/20	03.01.2020 01:19:07.3 <i>h</i> =209	40.2°N 139.7°E	808			6.5			6.4
20/20	03.01.2020 20:46:40.6 <i>h</i> =6	48.9°N 141.9°E	222		3.6			3.5	
37/20	05.01.2020 08:08:10.2 <i>h</i> =46	47.8°N 155.5°E	1020	4.2			4.2		
51/20	07.01.2020 01:16:56.3 <i>h</i> =170	40.6°N 140.0°E	714			4.7			4.7
54/20	07.01.2020 06:05:17.4 <i>h</i> =14	2.3°N 96.3°E	6626	6.2			6.2		
55/20	07.01.2020 08:24:28.8 <i>h</i> =13	17.9°N 66.8°W	12210	6.5			6.5		
71/20	09.01.2020 08:38:06.1 <i>h</i> =10	62.4°N 171.1°E	2471	6.7			6.7		
79/20	09.01.2020 16:37:13.3 <i>h</i> =5	50.1°N 142.9°E	352		3.7			3.7	
95/20	10.01.2020 15:10:43.7 <i>h</i> =316	45.5°N 142.6°E	150			4.6			4.6
114/20	11.01.2020 15:55:42.9 <i>h</i> =38	43.4°N 146.5°E	480		4.2	4.7		4.2	4.8
118/20	12.01.2020 09:25:32.8 <i>h</i> =280	45.2°N 141.5°E	242			3.8			3.9
132/20	13.01.2020 19:53:48.6 <i>h</i> =61	36.1°N 139.9°E	1198	4.0			4.1		
135/20	14.01.2020 04:25:48.6 <i>h</i> =51	36.4°N 140.8°E	1190	3.4			3.5		
137/20	14.01.2020 06:26:27.8 <i>h</i> =90	46.2°N 152.4°E	750			4.6			4.6
146/20	15.01.2020 11:31:34.3 <i>h</i> =97	42.8°N 145.2°E	500	4.1		5.2	4.1		5.2
157/20	16.01.2020 16:31:11.4 <i>h</i> =58	52.1°N 159.9°E	1348	5.1			5.1		
160/20	16.01.2020 21:51:00.8 <i>h</i> =47	52.1°N 159.8°E	1360	4.2			4.3		
180/20	18.01.2020 04:32:02.1 <i>h</i> =86	43.1°N 144.2°E	450			3.7			3.8
197/20	19.01.2020 21:30:01.2 <i>h</i> =462	47.4°N 146.9°E	320			3.4			3.4
203/20	20.01.2020 18:59:59.2 <i>h</i> =98	44.1°N 147.4°E	480			4.5			4.5
209/20	22.01.2020 02:39:55.9 <i>h</i> =100	46.3°N 152.1°E	730			4.9			5.0

Таблица 3. Результаты обработки локальных seismicических событий по записям сейсмометров СМЕ-6111 и STS-2

№ в бюллетене станции «Южно-Сахалинск»	Параметры землетрясений: дата, <i>дд.мм.гггг</i> время в очаге, <i>чч.мм:сс.с</i> глубина очага <i>h</i> , км	Координаты землетрясений	Расстояние от станции «Южно-Сахалинск», км	Сравниваемые параметры			
				STS-2		СМЕ-6111	
				<i>ML</i>	<i>K_S</i>	<i>ML</i>	<i>K_S</i>
31/20	05.01.2020 03:25:26.0 <i>h</i> =5	47.0°N 143.7°E	72	1.5	6.1	1.9	6.5
43/20	05.01.2020 23:16:22.8 <i>h</i> =6	47.5°N 142.5°E	74	2.6	8.0	2.0	7.8
70/20	09.01.2020 05:37:22.1 <i>h</i> =5	46.9°N 142.2°E	60	0.2	5.2	0.2	5.3
73/20	09.01.2020 10:08:51.3 <i>h</i> =2	47.1°N 142.6°E	22	0.3	4.9	0.4	6.0
76/20	09.01.2020 11:00:58.7 <i>h</i> =9	46.7°N 142.7°E	36	1.1	5.7	1.3	5.6
83/20	09.01.2020 19:30:44.1 <i>h</i> =14	46.9°N 142.4°E	30	1.2	5.1	1.0	4.7
84/20	09.01.2020 20:18:20.8 <i>h</i> =17	46.9°N 142.4°E	30	1.5	6.6	1.3	6.3
85/20	09.01.2020 21:19:52.5 <i>h</i> =11	46.9°N 142.4°E	26	1.7	6.1	2.0	7.1
192/20	19.01.2020 11:57:52.9 <i>h</i> =10	46.4°N 142.5°E	60	1.1	4.3	0.8	4.6

работа молекулярно-электронного сейсмометра при температурах порядка +4°C не приводит к искажению регистрируемых параметров и приемлема для эксплуатации такого типа seismicических приборов. Также можно предположить, что реальная температура в зимний период в сейсмометре 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. (табл. 4) по методике, аналогичной анализу записей зимы 2018–2019 гг.

Таблица 4. 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	Дата, мм.гггг	Энергетические классы по STS-2 (YSS)			Энергетические классы по СМЕ (PETR)		
		<i>P</i> (<i>Z</i> канал)	<i>Se</i> (канал <i>EW</i>)	<i>Sn</i> (канал <i>NS</i>)	<i>P</i> (<i>Z</i> канал)	<i>Se</i> (канал <i>EW</i>)	<i>Sn</i> (канал <i>NS</i>)
SKHS211061	12.2021	7.2	7.1	7.2	8	8.1	8.1
SKHS211076	12.2021	5.3	5.6	5.2	5.5	5.5	4.9
SKHS211080	12.2021	5.9	6.8	6.6	7.6	7.4	6.6
SKHS211081	12.2021	4.9	5.5	5.8	5.0	6.5	6.4
SKHS211083	12.2021	7.4	7.7	7.7	8.1	8.4	8.1
SKHS220002	01.2022	3.0	4.0	4.0	3.0	4.1	3.9
SKHS220009	01.2022	6.7	7.8	7.6	6.5	7.8	7.6
SKHS220019	01.2022	6.9	7.1	7.3	7.1	7.4	7.2
SKHS220028	01.2022	9.2	9.8	9.6	9.0	10.2	9.8
SKHS220048	01.2022	6.6	7.9	8.2	6.6	7.7	7.6
SKHS220087	01.2022	6.6	7.2	7.3	7.2	8.0	8.0
SKHS220122	01.2022	6.5	7.7	7.5	6.5	7.7	7.9
SKHS220128	01.2022	5.5	6.7	6.3	5.8	6.8	6.5
SKHS220153	02.2022	4.1	4.2	3.7	5.1	4.7	5.0
SKHS220160	02.2022	6.5	8.4	8.5	7.0	8.8	8.3
SKHS220162	02.2022	5.2	6.9	6.6	6.3	8.3	7.4
SKHS220163	02.2022	5.7	7.1	6.9	4.6	8.5	7.4
SKHS220171	02.2022	11.4	11.3	11.7	11.4	12.2	11.8
SKHS220172	02.2022	9.7	9.5	10.2	10.1	10.6	9.9
SKHS220179	02.2022	7.4	10	9.5	7.5	10.3	9.1
SKHS220207	02.2022	5.1	5.4	5.8	6.1	5.9	6.1
SKHS220211	02.2022		3.8	3.9		3.1	2.7
SKHS220221	02.2022		3.3	3.2		5.1	4.7
SKHS220222	02.2022	7.0	7.0	7.1	7.1	8.0	7.7
SKHS220228	03.2022	7.4	8.2	7.8	8.8	7.8	8.2
SKHS220249	03.2022	7.7	6.2	6.2	6.5	6.6	6.5
SKHS220270	03.2022		5.0	5.0		4.8	4.6
SKHS220284	03.2022		3.5	3.5		3.5	3.5
SKHS220289	03.2022		3.5	3.7		3.4	3.4
SKHS220292	03.2022		4.6	4.7		5.0	4.8
SKHS220293	03.2022		4.5	4.6		4.7	4.7
SKHS220299	03.2022	6.7	6.7	6.9	6.6	7.5	7.4
SKHS220313	03.2022	6.5	6.4	6.3	6.6	6.7	6.5

Из табл. 4 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 в с. Петропавловском 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 роль в стабилизации температуры подпочвенного грунта и, соответственно, стабилизации параметров сейсмометра. В цифровом выражении зима 2021–2022 гг., в отличие от мало-снежной зимы 2018–2019 гг., характеризовалось значительным превышением уровня снежного

покрова на юге о. Сахалин относительно средних значений (табл. 5).

Столь значительная разница в высоте снежного покрова, очевидно, не могла не сказаться на температуре почвы на интересующей нас глубине (порядка 40 см). Используя известные значения температуры почвы под оголённым грунтом и под среднестатистическим покровом [Климат ..., 1982], были получены предполагаемые значения температуры на глубине 40 см в условиях различной высоты снежного покрова. Расчётные значения температуры и соответствующие им усреднённые соотношения классов землетрясений, определённые в табл. 1 (зима 2018–2019 гг.) и в табл. 4 (зима 2021–2022 гг.), представлены на рис. 6.

Таблица 5. 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]

Месяц, декада	Высота снежного покрова, см		
	зима 2018–2019 гг.	зима 2021–2022 гг.	среднее значение
Декабрь, 1 декада	6	4	14
Декабрь, 2 декада	11	9	21
Декабрь, 3 декада	17	18	27
Январь, 1 декада	19	24	31
Январь, 2 декада	24	70	34
Январь, 3 декада	25	68	39
Февраль, 1 декада	29	62	44
Февраль, 2 декада	32	62	45
Февраль, 3 декада	31	85	47
Март, 1 декада	27	81	47
Март, 2 декада	18	73	46
Март, 3 декада	18	52	42

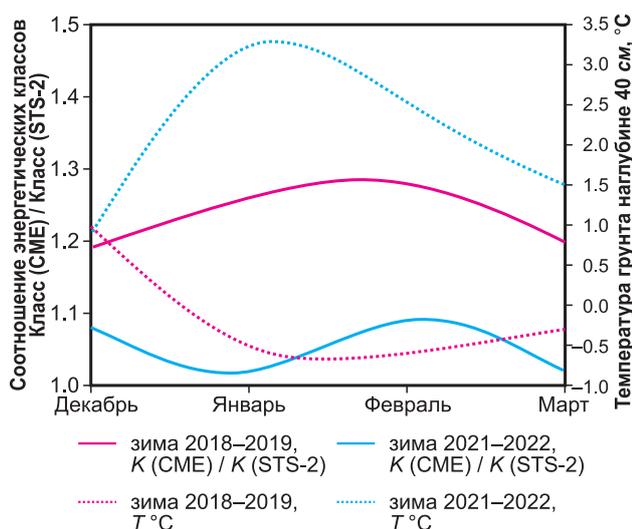


Рис. 6. Корреляция погрешности в определении энергетических классов и изменения температуры грунта под снежным покровом на юге Сахалина зимой 2018–2019 гг. и 2021–2022 гг.

Таким образом, ещё раз получено подтверждение влияния температуры на работу, и уточнены значения температур, при которых начинает наблюдаться нарушение стабильности характеристик используемого молекулярно-электронного сейсмометра. Согласно рис. 6, можно предположить, что влияние начинает проявляться при температурах ниже $+1^{\circ}\text{C}$.

В рамках исследования дополнительно был проведён анализ уровня спектральной плотности мощности сейсмического шума по алгоритму [McNamara, Boaz, 2005], подробно описанному

в работах [Sycheva et al., 2020; Федоров и др., 2022], отдельно для зим 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 рис. 7.

Как видно из рис. 7, 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.

Выводы

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 $+4^{\circ}\text{C}$. При этом получаемые результаты практически неотличимы от данных гораздо более дорогостоящего STS-2.

Практические результаты, представленные в работе, не противоречат ранее опубликованным экспериментальным исследованиям [Krishtop, 2014; Chikishev et al., 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 температур (от -5 до $+20^{\circ}\text{C}$) может составлять более одного порядка, что непосредственно приводит к искажениям значений энергетических характеристик сейсмических событий при их обработке, либо требует корректировки АЧХ в используемых программах. В настоящее

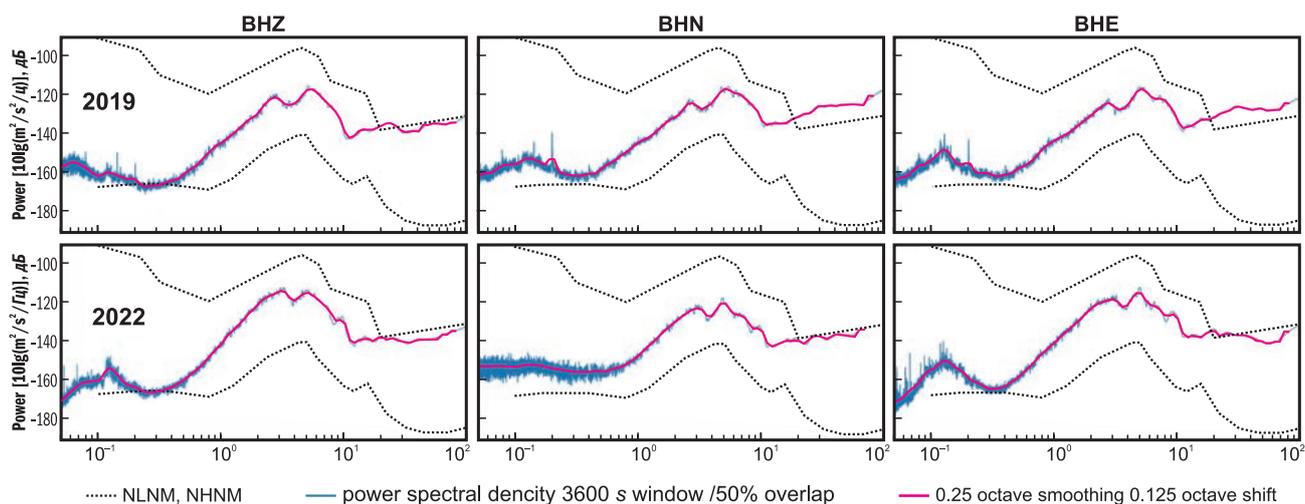


Рис. 7. Спектральная плотность мощности сейсмического шума станции PETR для зимы 2018–2019 гг. (сверху) и зимы 2021–2022 гг. (снизу) для различных каналов

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.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01471-22) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Литература

- Архив погоды в Южно-Сахалинске // Расписание погоды [сайт]. — URL: https://tr5.ru/Архив_погоды_в_Южно-Сахалинске (дата обращения 31.07.2022).
- Климат Южно-Сахалинска / Под ред. Ц.А. Швер, Д.Ф. Лазаревой. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. — 256 с.
- Кобелева Е.А., Гилёва Н.А. Влияние температурного режима на АЧХ широкополосных сейсмометров СМЕ-4211 // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIV Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. — С. 55. — EDN: QHPXDZ
- Костылев Д.В. Формирование единой системы сбора сейсмологической информации в Сахалинском филиале ФИЦ ЕГС РАН // Российский сейсмологический журнал. — 2021. — Т. 3, № 1. — С. 41–53. doi: 10.35540/2686-7907.2021.1.03. — EDN: JQPBFA
- Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В., Рылов Е.С., Дудченко И.П. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме на юге острова Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. — 2018. — Т. 25, № 5. — С. 99–114. doi: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114. — EDN: SNZAFN
- Михайлов В.И., Семёнова Е.П. Результаты детального сейсмического мониторинга. Юг о. Сахалин // Землетрясения России в 2018 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. — С. 106–110. — EDN: APZEDM
- Михайлов В.И., Семёнова Е.П. Результаты детального сейсмического мониторинга. Юг о. Сахалин // Землетрясения России в 2019 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. — С. 106–110. — EDN: BUXHME
- Регистратор сигналов NDAS-8226 // R-Sensors [сайт]. — URL: https://r-sensors.ru/ru/products/data_loggers/ndas-8226_rus/ (дата обращения 31.07.2022).
- Сейсмометр СМЕ-6111 // R-Sensors [сайт]. — URL: <https://r-sensors.ru/ru/products/seism/СМЕ-6111-rus/> (дата обращения 31.07.2022).
- Специализированные массивы для климатических исследований // Метеорологический архив ВНИИГМИ-МЦД [сайт]. — URL: <http://aisori-meteo.ru/waisori/> (дата обращения 31.07.2022).
- Федоров И.С., Асминг С.В., Гоев А.Г., Волосов С.Г. Расширение сети сейсмических наблюдений на Кольском полуострове // Российский сейсмологический

- журнал. — 2022. — Т. 4, № 1. — С. 63–72. doi: 10.35540/2686-7907.2022.1.05. — EDN: QSUMPP
- 2018-ER_App13_Southern-Sakhalin_2018.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2018 году» // Землетрясения России [сайт]. — [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. — URL: http://www.gsras.ru/zr/app_18.html
- 2019-ER_App13_Southern-Sakhalin_2019.xls [Электронный ресурс]: Список приложений для ежегодника «Землетрясения России в 2019 году» // Землетрясения России [сайт]. — [Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022]. — URL: http://www.gsras.ru/zr/app_19.html
- Bugaev A.S., Antonov A.N., Agafonov B.M., Belotelov K.S., Vergeles S.S., Dudkin P.V., Egorov E.V., Egorov I.V., Zhevnenko D.A., Zhabin S.N., Zaitsev D.L., Krishtop T.V., Neeshpara A.V., Popov V.G., Uskov V.V., Shabalina A.S., Krishtop V.G. Measuring devices based on molecular-electronic transducers // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2018. — V. 63. — P. 1339–1351. doi: 10.1134/S1064226918110025
- Chikishev D.A., Zaitsev D.L., Belotelov K.S., Egorov I.V. The temperature dependence of amplitude- frequency response of the MET sensor of linear motion in a broad frequency range // IEEE Sensors Journal. — 2019. — V. 19. — P. 9653–9661. doi: 10.1109/JSEN.2019.2927859
- Droznin D.V., Droznina S.Ya. Interactive DIMAS program for processing seismic signals // Seismic Instruments. — 2011. — V. 47, N 3. — P. 215. doi: 10.3103/S0747923911030054
- Evseev I., Zaitsev D., Agafonov V. Study of transfer characteristics of a molecular electronic sensor for borehole surveys at high temperatures and pressures // Sensors. — 2019. — V. 19. — P. 2545. doi: 10.3390/s19112545
- Fokina A., Zaitsev D., Egorov E. Simple and cheap method of MET geophones and seismic accelerometers temperature sensitivity stabilization in a wide temperature band // 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. — Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology, 2020. — P. 411–418. doi: 10.5593/sgem2020/1.2/s05.053. — EDN: UHYMIH
- Huang H., Agafonov V., Yu H. Molecular electric transducers as motion sensors // Sensors. — 2013. — V. 13. — P. 4581–4597. doi: 10.3390/s130404581
- 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. — V. 324, N 1. — P. 012009. doi: 10.1088/1755-1315/324/1/012009. — EDN: FGILWF
- Krishtop V.G. Experimental modeling of the temperature dependence of the transfer function of rotational motion sensors based on electrochemical transducers // Russian Journal of Electrochemistry. — 2014. — V. 50. — P. 350–354. doi: 10.1134/S1023193514040053
- McNamara D.E., Boaz R.I. Seismic noise analysis system, power spectral density probability density function: stand-alone software package // U.S. Geological Survey Open File Report. — 2005. — V. 1438. — 30 p.
- 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).
- Sycheva N.A., Mansurov A.N., Kuzikov S.I., Sychev I.V. A Study of Seismic Noise Level at the KNET Stations // Journal of Volcanology and Seismology. — 2020. — V. 14, N 4. — P. 229–245. doi: 10.1134/S0742046320040065. — EDN: USFLUW
- Zaitsev D., Egorov I., Agafonov V. A comparative study of aqueous and non-aqueous solvents to be used in low-temperature serial molecular-electronic sensors // Chemosensors. — 2022. — V. 10, N 3. — P. 111. doi: 10.3390/chemosensors10030111

Сведения об авторах

Костылев Дмитрий Викторович, нач. отдела Сахалинского филиала Федерального государственного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН), г. Южно-Сахалинск, Россия; науч. сотр. Федерального государственного учреждения науки Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск, Россия. ORCID: 0000-0002-8150-9575. E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Богинская Наталья Владимировна, инженер СФ ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия; науч. сотр. ИМГиГ ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск, Россия. ORCID: 0000-0002-3126-5138. E-mail: fily77@mail.ru

Experience and features of the operation of the molecular–electronic seismometer on Sakhalin Island

© 2022 D.V. Kostylev^{1,2}, N.V. Boginskaya^{1,2}

¹SD GS RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; ²IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

Received August 1, 2022

Abstract At the complex geophysical observation site in the village of Petropavlovskoye, testing of the CME-6111 broadband molecular–electron seismometer, installed as part of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) project “Study of trigger deformation effects based on the data on Sakhalin’s seismicity using a new type of seismic sensors” was continued. The results of processing waveform records and seismic noise of the CME-6111 seismometer installed in the seismic camera in the village of Petropavlovskoye during the period of little snow in the winter of 2018–2019 and in conditions of a large amount of snow cover in the winter of 2021–2022 were compared in order to determine the energy characteristics of the seismic events that occurred. The results of testing in 2018–2019 allowed the authors to make an assumption about the effect of low temperatures on the amplitude–frequency characteristics of the CME-6111 molecular–electronic seismometer, which was expressed in an overestimation of the energy characteristics of seismic events based on the results of processing of the seismometer waveform records. The large amount of snow cover in the winter of 2021–2022 showed that the stabilization of the temperature of the subsoil led to the stabilization of the seismometer parameters. Additionally, an analysis was made of the level of the power spectral density of seismic noise for both winter periods. For the period 2018–2019 there is an excess of the New High Noise Model (NHNM) at low frequencies for horizontal channels and for the winter of 2021–2022 there are no such violations due to the significant amount of snow cover that compensates for the influence of interference, which has a positive effect on stability performance of the instrument itself and improve the quality of seismic data.

Keywords Molecular–electronic sensors, molecular–electronic seismometer, amplitude–frequency characteristics, seismic records, seismic noise, seismic pavilion.

For citation Kostylev, D.V., & Boginskaya, N.V. (2022). [Experience and features of the operation of the molecular–electronic seismometer on Sakhalin Island]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(3), 81–93. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.3.07>. EDN: XYMQGF

References

- Bugaev, A.S., Antonov, A.N., Agafonov, B.M., Belotelov, K.S., Vergeles, S.S., Dudkin, P.V., Egorov, E.V., Egorov, I.V., Zhevnenko, D.A., Zhabin, S.N., Zaitsev, D.L., Krishtop, T.V., Neeshpapa, A.V., Popov, V.G., Uskov, V.V., Shabalina, A.S., & Krishtop, V.G. (2018). Measuring Devices Based on Molecular–Electronic Transducers. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 63, 1339–1351. doi: [10.1134/S1064226918110025](https://doi.org/10.1134/S1064226918110025)
- Chikishev, D.A., Zaitsev, D.L., Belotelov, K.S., & Egorov, I.V. (2019). The Temperature dependence of amplitude–frequency response of the MET sensor of linear motion in a broad frequency range. *IEEE Sensors Journal*, 19, 9653–9661. doi: [10.1109/JSEN.2019.2927859](https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2927859)
- Droznin, D.V., & Droznina, S.Y. (2011). Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3):215. doi: [10.3103/S0747923911030054](https://doi.org/10.3103/S0747923911030054)
- Evseev, I., Zaitsev, D., & Agafonov, V. (2019). Study of transfer characteristics of a molecular electronic sensor for borehole surveys at high temperatures and pressures. *Sensors*, 19:2545. doi: [10.3390/s19112545](https://doi.org/10.3390/s19112545)
- Fedorov, I.S., Asming, S.V., Goev, A.G., & Volosov, S.G. (2022). [Expansion of the seismological monitoring network on the Kola Peninsula]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 4(1), 63–72. doi: [10.35540/2686-7907.2022.1.05](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2022.1.05). EDN: QSUMPP
- Fokina, A., Zaitsev, D., & Egorov, E. (2020). Simple and cheap method of MET geophones and seismic accelerometers temperature sensitivity stabilization in a wide temperature band. In *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020* (pp. 411–418). Sofia, Bulgaria: STEF92 Technology Publ. doi: [10.5593/sgem2020/1.2/s05.053](https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s05.053). EDN: UHYMIH
- Huang, H., Agafonov, V., & Yu, H. (2013). Molecular electric transducers as motion sensors. *Sensors*, 13, 4581–4597. doi: [10.3390/s130404581](https://doi.org/10.3390/s130404581)

- IRIS. Data Services Products. (2022). Noise Toolkit PDF-PSD. Noise Toolkit PDF/PSD bundle. Retrieved from <http://ds.iris.edu/ds/products/noise-toolkit-pdf-psd/>
- Kobeleva, E.A., & Gileva, N.A. (2019). [Influence of the temperature mode on amplitude-frequency characteristics broadband of seismometers CME-4211]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XIV Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XIV International Seismological Workshop. Ed. A.A. Malovichko] (p. 55). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: QHPXDZ
- Kostylev, D.V., Bogomolov, L.M., & Boginskaya, N.V. (2019). About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 324(1):012009. doi: 10.1088/1755-1315/324/1/012009. EDN: FGILWF
- Kostylev, D.V. (2021). [Formation of a unified system for collecting seismological information in the Sakhalin branch of the GS RAS]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(1), 41-53. doi: 10.35540/2686-7907.2021.1.03. EDN: JQPBFA
- Krishtop, V.G. (2014). Experimental modeling of the temperature dependence of the transfer function of rotational motion sensors based on electrochemical transducers. *Russian Journal of Electrochemistry*, 50, 350-354. doi: 10.1134/S1023193514040053
- Makarov, E.O., Firstov, P.P., Kostylev, D.V., Rylov, E.S., & Dudchenko, I.P. (2018). [First results of subsurface radon monitoring by network of points, operating in the test mode on the south of Sakhalin Island]. *Vestnik KRAUNTs. Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences], 25(5), 99-114. doi: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114. EDN: SNZAFN
- McNamara, D.E., & Boaz, R.I. (2005). Seismic noise analysis system, power spectral density probability density function: Stand-alone software package. *U.S. Geological Survey Open File Report*, 1438, 30 p. *Meteorologicheskii arkhiv VNIIGMI-MTsD* [Meteorological Archive of VNIIGMI-MCD]. (2022). [Specialized arrays for climate research]. Retrieved from <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/> (In Russ.).
- Mikhailov, V.I., & Semenova, E.P. (2020). [Results of detailed seismic monitoring. South of Sakhalin Island]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2018 godu* [Earthquakes in Russia in 2018] (pp. 106-110). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: APZEDM
- Mikhailov, V.I., & Semenova, E.P. (2021). [Results of detailed seismic monitoring. South of Sakhalin Island]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2019 godu* [Earthquakes in Russia in 2019] (pp. 106-110). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: BUXHME
- Raspisanie pogody* [Weather schedule]. (2022). [Weather archive in Yuzhno-Sakhalinsk]. Retrieved from https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Южно-Сахалинске (In Russ.).
- R-Sensors. Products. (2022). Data logger NDAS-8226. Retrieved from https://r-sensors.ru/en/products/data_loggers/ndas-8226_eng/
- R-Sensors. Products. (2022). Seismometer CME-6111. Retrieved from <https://r-sensors.ru/en/products/seism/cme-6111-eng/>
- Shver, Ts.A., & Lazareva, D.F. (1982). *Klimat Iuzhno-Sakhalinska* [The climate of Yuzhno-Sakhalinsk]. Leningrad, USSR: Gidrometeoizdat Publ., 256 p. (In Russ.).
- Sycheva, N.A., Mansurov, A.N., Kuzikov, S.I., & Sychev, I.V. (2020). A study of seismic noise level at the KNET stations. *Journal of Volcanology and Seismology*, 14(4), 229-245. doi: 10.1134/S0742046320040065. EDN: USFLUW
- Zaitsev, D., Egorov, I., & Agafonov, V. (2022). A comparative study of aqueous and non-aqueous solvents to be used in low-temperature serial molecular-electronic sensors. *Chemosensors*, 10(3), 111. doi: 10.3390/chemosensors10030111
- Zemletriaseniia Rossii* [Earthquakes in Russia]. (2022). [List of applications for the yearbook "Earthquakes in Russia in 2018"]. 2018-ER_App13_Southern-Sakhalin_2018.xls. Available at: http://www.gsras.ru/zr/app_18.html (In Russ.).
- Zemletriaseniia Rossii* [Earthquakes in Russia]. (2022). [List of applications for the yearbook "Earthquakes in Russia in 2019"]. 2019-ER_App13_Southern-Sakhalin_2019.xls. Available at: http://www.gsras.ru/zr/app_19.html (In Russ.).

Information about authors

Kostylev Dmitry Viktorovich, Head of Department of the Sakhalin Division of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (SD GS RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; Researcher of the Institute of Marine Geology and Geophysics Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (IMGG FEB RAS), Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. ORCID: 0000-0002-8150-9575. E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Boginskaya Natalya Vladimirovna, Engineer of the SD GS RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia; Researcher of the IMGG FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia. ORCID: 0000-0002-3126-5138. E-mail: fily77@mail.ru