

Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир)

© 2020 Д. В. Костылев*^{1,2}, Н. В. Богинская²

¹Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

²Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

*E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Резюме. В статье приведены основные характеристики и исследованы спектральные и регистрационные возможности трех типов экспериментальных образцов молекулярно-электронных гидрофонов с различными размерами электрохимической преобразующей ячейки, которые были установлены в центральной части юга о. Сахалин и на о. Кунашир (южная часть Курильской гряды) в конце 2018 г. На о. Кунашир апробирован гидрофон на новой технологической основе (с увеличенной, относительно ранее проводимых исследований, чувствительностью датчика). Оборудование подобного типа для наблюдений на территории Сахалинской области применялось впервые. В результате непрерывных сейсмоакустических наблюдений на о. Кунашир в 7 случаях из 35 исследованных (с 1.05.2019 по 29.02.2020) землетрясений обнаружен низкочастотный упреждающий сигнал (НУС), все 7 событий имели глубину гипоцентра больше 80 км. В районе Центрально-Сахалинского разлома кроме возможности регистрации НУС изучены спектральные особенности в записи волновых форм для разных условий установки приборов. Показано, что влияние такого атмосферного фактора, как ветровая нагрузка, значительно воздействует на гидрофоны, расположенные в мелководном водоеме и неглубокой открытой скважине. Однако молекулярно-электронные гидрофоны продемонстрировали способность вести полноценную регистрацию сейсмических событий независимо от условий установки приборов.

Ключевые слова: сейсмоакустические наблюдения, молекулярно-электронный гидрофон, спектральная плотность, сейсмические события, низкочастотный упреждающий сигнал

Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island)

Dmitry V. Kostylev*^{1,2}, Natalya V. Boginskaya²

¹Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

²Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: d.kostylev@imgg.ru

Abstract. The article presents the main characteristics and studies spectral and recording capabilities of experimental samples of three types of molecular-electronic hydrophones with different sizes of electrochemical converting cells, which were installed in the central part of the south of Sakhalin Island and on Kunashir Island (southern part of the Kuril ridge) at the end of 2018. A hydrophone on a new technological basis (with an increased sensor sensitivity relative to previously conducted studies) was approved on Kunashir Island. Equipment of this type was used for observations on the territory of the Sakhalin region for the first time. As a result of continuous seismoacoustic observations on Kunashir Island, in seven cases out of 35 studied (from May 1, 2019 to February 29, 2020) earthquakes, a low-frequency anticipatory signal (LFAS) was detected, and all seven events had a depth of hypocenter of more than 80 km. In the area of the Central Sakhalin fault, in addition to the possibility of registering the LFAS, spectral features in the recording of waveforms were studied for different conditions of instrument installation. It is shown that the influence of such atmospheric factor as wind load significantly affects hydrophones located in a shallow water body and a shallow

open borehole. However, molecular-electronic hydrophones have demonstrated the ability to fully record seismic events regardless of the installation conditions of the equipment.

Keywords: seismoacoustic observations, molecular-electronic hydrophone, spectral density, seismic events, low-frequency anticipatory signal

Для цитирования: 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. <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.486-499>

For citation: Kostylev D.V., Boginskaya N.V. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). *Geosistemy perhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2020, vol. 4, no. 4, pp. 486–499. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2020.4.4.486-499>

Благодарности и финансирование

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 18-07-00966А, «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа».

Acknowledgements and Funding

This work was carried out with partial support from the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) No. 18-07-00966A, «Study of trigger deformation effects based on the data on Sakhalin's seismicity using a new type of seismic sensors».

Введение

Сейсмоакустические исследования сегодня востребованы в сейсморазведке, при оценке рисков в морском и прибрежном строительстве, в системах охраны акваторий и прочих океанографических наблюдениях. Не последнее место в этом списке занимает изучение сейсмических процессов с использованием гидроакустических систем. Как было ранее показано [Борисов и др., 2013], применение малогабаритных гидрофонных систем в условиях мелководья позволяет регистрировать региональные землетрясения, в том числе слабомагнитудные и глубокофокусные, локальные микроземлетрясения, производить оценку параметров землетрясений, фиксировать сигналы геоакустической эмиссии, выявлять напряженно-деформированные состояния геологических пород.

На о. Сахалин и Курильских островах гидроакустические озерные и сейсмические береговые наблюдения проводились в 2006–2012 гг. в районе Центрально-Сахалинского разлома о. Сахалин, а также на островах Кунашир и Шикотан [Борисов и др., 2012; Борисов, Борисов, 2017]. Наблюдения проводили при помощи гидрофонных автономных сейсмостанций, разработанных и изготовленных в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) для долговременного ги-

дроакустического наблюдения за сейсмической активностью [Борисов и др., 2013].

Данные наблюдения носили преимущественно экспедиционный характер. Несмотря на большое количество помех при регистрации гидроакустических записей, удалось установить [Борисов и др., 2012], что слабые землетрясения уверенно регистрируются гидрофонными станциями. Также было показано [Борисов и др., 2012], что для некоторых слабых землетрясений характерно появление сверхкраткосрочного признака сейсмического события – низкочастотного упреждающего сигнала (НУС). Интересно, что зарегистрированные гидроакустические отклики в виде НУС хорошо видны на частоте 6 Гц, а продолжительность сигнала составляет примерно 3 % от общей продолжительности записи волновой формы.

В настоящей работе исследованы спектральные и регистрационные возможности трех типов гидрофонов в зависимости от их конструктивных особенностей. Гидрофоны 769 и 891 были установлены в совершенно разных условиях, что помогло выявить воздействие различных атмосферных факторов на работу оборудования. С использованием молекулярно-электронного гидрофона 770, предоставленного ООО «Р-сенсорс», на о. Кунашир

проводились непрерывные гидроакустические наблюдения, которые позволили получить непротиворечивые данные сравнительно с более ранними исследованиями.

Широкополосные гидрофоны на основе молекулярно-электронного переноса для проведения сейсмоакустического мониторинга

Существуют различные технологии изготовления гидрофонов – датчиков, измеряющих вариации акустического давления. Наиболее распространены гидрофоны, основанные на электродинамическом, пьезоэлектрическом и магнестрикционном эффектах. Независимо от технологии, использованной при создании гидрофонов, возможности измерения слабых сигналов с помощью гидрофонов ограничены уровнем регистрируемых помех, не относящихся к полезному сигналу и представляющих, с точки зрения процессов измерения, шум. В настоящем исследовании представлены результаты практического опыта использования гидрофонов, созданных на основе молекулярно-электронного переноса заряда (МЭП) ООО «Р-сенсорс» в сотрудничестве с Центром молекулярной электроники Московского физико-технического института (МФТИ) [Зайцев и др., 2019]. Технология МЭП, успешно зарекомендовавшая себя в области сейсмологии

и геофизических исследований, нашла применение и при разработке датчиков давления, отличных от традиционных пьезокерамических, микромеханических и оптоволоконных. Отличительными особенностями датчиков на основе МЭП являются исключительно высокая чувствительность и низкий уровень собственных шумов в области инфранизких частот. Фундаментальные принципы работы систем на основе МЭП достаточно подробно изложены в литературе [Huang et al., 2013; Бугаев и др., 2018]. Основу любого устройства, работающего по технологии МЭП, составляет электрохимическая преобразующая ячейка.

Конструкция и основные принципы работы молекулярно-электронного гидрофона с отрицательной обратной связью показаны на рис. 1 [Zaitsev et al., 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.

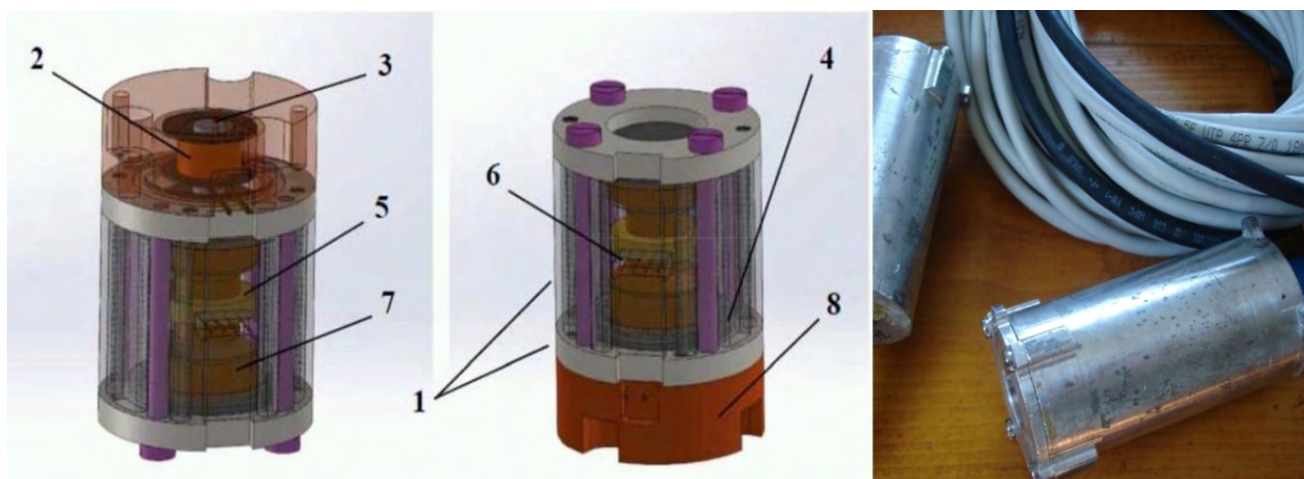


Рис. 1. Конструкция и внешний вид молекулярно-электронного гидрофона [Zaitsev et al., 2018]. 1 – внешний корпус гидрофона, 2 – катушка, 3 – магнит, 4 – мембраны, 5 – электропакет, 6 – электрические клеммы анодов и катодов, 7 – раствор электролита, 8 – верхняя крышка.

Figure 1. Construction and appearance of a molecular-electronic hydrophone [Zaitsev et al., 2018]. 1 – outer case, 2 – coil, 3 – magnet, 4 – membranes, 5 – electrical package, 6 – electrical terminals of anodes and cathodes, 7 – electrolyte solution, 8 – upper cover.

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 [Zaitsev et al., 2019].

Для проведения сейсмоакустических наблюдений на Сахалине и Курильских островах компанией «Р-сенсорс» были предоставлены три экспериментальных образца гидрофона, различающиеся размерами ячейки: 6 × 6 мм, 3 × 3 мм и 2 × 2 мм, а также жесткостью мембран (табл. 1).

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 (рис. 2).

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 меньший спад амплитудно-частотной характеристики.

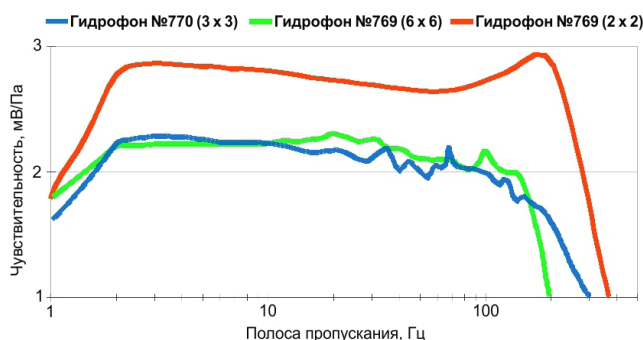


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики образцов молекулярно-электронных гидрофонов с различным размером ячейки.

Figure 2. Amplitude-frequency characteristics of samples of molecular-electronic hydrophones with different cell sizes.

Таблица 1. Сводная таблица с характеристиками экспериментальных образцов*
Table 1. Summary table with characteristics of experimental samples*

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.

*According to the technical documentation by the producer.

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

Note. All hydrophones dimensions: diameter 33 mm, height 47 mm; operating temperature range: –40...+65 °С.

Расположение и оснащение пунктов наблюдений

В качестве территории для исследования возможностей предоставленных гидрофонов были выбраны участок в центральной части юга о. Сахалин в районе Центрально-Сахалинского разлома и о. Кунашир, расположенный в южной части Курильских островов (рис. 3). На юге о. Сахалин проживает большая часть населения Сахалинской области, поэтому вопросы сейсмического мониторинга для этого района актуальны. Южные Курильские острова составляют часть Курило-Камчатской дуги, являющейся классическим примером субдукции Тихоокеанской литосферной плиты под материк, что обуславливает уровень сейсмичности региона – один из самых высоких на Земле.

Места размещения оборудования выбирали исходя из наличия инфраструктуры и приемлемых условий регистрации.

В районе Центрально-Сахалинского разлома в качестве мест установки гидрофонов были выбраны комплексный геофизический полигон ИМГиГ ДВО РАН в селе Петропавловское Анивского района [Kostylev et al., 2019] и пункт сейсмического мониторинга в составе локальной сети юга Сахалина Са-

халинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) в урочище Загорское Долинского района [Семенова и др., 2018]. В первом случае для установки гидрофона на полигоне была построена специальная самообводняющаяся скважина глубиной 3.5 м. Скважина обсажена перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Во втором случае установка гидрофона производилась в открытом водоеме (пруд размером 3 × 9 м) на глубине 0.5 м.

На о. Кунашир местом установки гидрофона послужил 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 [Демежко и др., 2009]. Гидрофон размещен в этой скважине на глубине 25 м в обсадной колонне диаметром 245 мм.

Таким образом, все точки сейсмоакустических наблюдений оборудованы как автономные пункты инструментальных наблюдений (ПИН), являющиеся частью полигонов комплексных геофизических наблюдений. Пример схемы оснащения полигона, с выделением в его составе оборудования автономных пунктов сейсмоакустических наблюдений, представлен на рис. 4. Полный перечень характеристик пунктов наблюдений приведен в табл. 2.

Для сбора данных на всех пунктах наблюдений использован регистратор сейсмических сигналов NDAS-8226 (URL: http://r-sensors.ru/ru/products/data_loggers/ndas-8226_rus/) – 24-разрядная система, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических данных в полевых условиях. Отличительные признаки системы – простота в использовании и надежность в сочетании с высокими техническими характеристиками. Для передачи данных и конфигурирования системы используются USB и Wi-Fi соединения; 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/ГЛОНАСС.

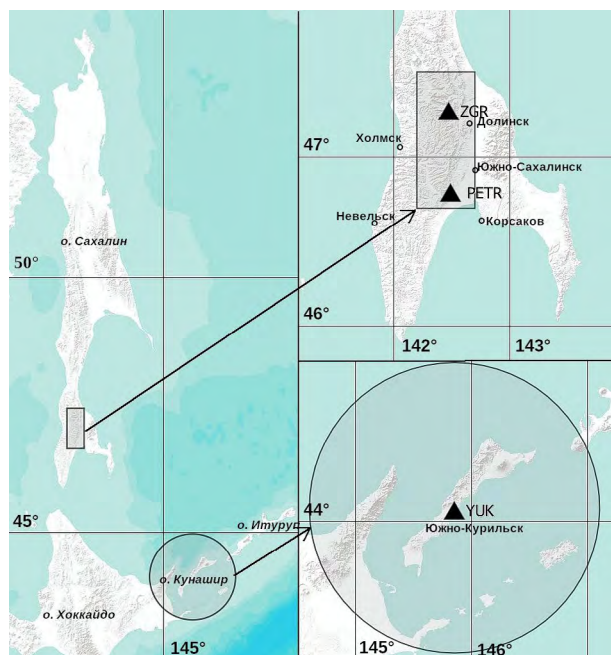


Рис. 3. Районы сейсмоакустических исследований и места размещения пунктов наблюдений.

Figure 3. Areas of seismoacoustic research and location of observation points.

Таблица 2. Характеристики пунктов наблюдений
Table 2. Characteristics of observation points

Характеристика	«Петропавловское» (PETR)	«Загорское» (ZGR)	«Южно-Курильск» (YUK)
Номер гидрофона	769	891	770
Координаты	46.789° N; 142.496° E	47.305° N; 142.489° E	44.035° N; 145.861° E
Глубина установки, м	3.5	0.5	25
Дата установки	24.10.2018	11.06.2020	27.04.2019
Регистратор сейсмических сигналов	NDAS-8226 (s/n 4403)	NDAS-8226 (s/n 4410)	NDAS-8226 (s/n 4404)
Система электропитания	Аккумулятор В.В. Battery BP 5-12 (12V; 5 Ah). Зарядное устройство Сонар УЗ205.01	Аккумулятор Delta DT 1265 (12V; 65 Ah)	Аккумулятор CSB GP 1272 (12V, 7Ah). Зарядное устройство Сонар УЗ205.01

Электропитание пунктов, за исключением ПИН «Загорское», где отсутствует подключение к электрической сети, обеспечивается 12-вольтовым источником питания с внешним аккумулятором, что гарантирует работу комплекса в случае отключения электроэнергии. На ПИН «Загорское» используется герметизированный свинцово-кислотный аккумулятор емкостью 65 А×ч, обеспечивающий автоном-

ное электропитание комплекта (регистратор-гидрофон) до 50 сут непрерывной работы.

Настройка параметров работы оборудования производится с использованием приложения NDAS, предназначенного для управления регистраторами серии NDAS. Приложение позволяет производить начальное конфигурирование устройства до начала работы, контроль состояния системы, запись сейсмических



Рис. 4. Оснащение комплексного геофизического полигона «Петропавловское». Красной рамкой выделено оборудование для сейсмоакустических наблюдений.

Figure 4. Equipment of the “Petropavlovskoe” complex geophysical test site. Equipment for seismoacoustic observations is shown within red frame.

сигналов на встроенный носитель – SD-карту, просмотр записываемой информации в реальном времени.

В соответствии с концепцией создания автономных пунктов инструментальных наблюдений организован удаленный доступ к регистрируемым данным, а также контроль и управление работой установленного оборудования. Для обеспечения удаленного доступа и управления работой регистрирующего оборудования используется Wi-Fi маршрутизатор с поддержкой 4G, который позволяет управлять работой системы через Интернет. Модем-маршрутизатор подключается к NDAS-8226 с помощью Wi-Fi-соединения, что позволяет ему быть расположенным независимо от местоположения регистратора. Работа с регистратором в режиме удаленного доступа производится через веб-интерфейс NDAS, который предназначен для конфигурирования устройств NDAS, в том числе, и на смартфонах и планшетах. Он позволяет производить те же операции, что и программа NDAS. В режиме удаленного доступа основными процедурами при работе с веб-интерфейсом являются контроль статуса и управление устройством, режим просмотра сигнала в реальном времени и доступ к каталогу FTP-сервера устройства. Доступ к FTP-серверу позволяет обеспечить получение информации с регистратора любым устройством, имеющим подключение к сети Интернет.

После введения комплектов регистрирующей аппаратуры в эксплуатацию для каждого ПИН было проведено исследование шумовых характеристик 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 (рис. 5) 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.

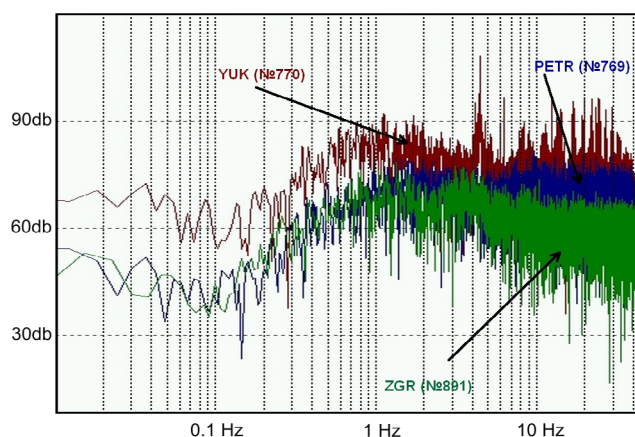


Рис. 5. Спектральная плотность мощности шумового сигнала (децибеллы по отношению к $\mu\text{Pa}^2/\text{Гц}$) гидрофонов пунктов инструментальных наблюдений.

Figure 5. Power spectral density of the noise signal (decibels in relation to $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) of hydrophones of instrumental observation points.

Результаты наблюдений

ПИН «Южно-Курильск» (остров Кунашир)

Сейсмоакустические наблюдения в ПИН «Южно-Курильск» 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.

В работе [Борисов и др., 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 перед слабыми землетрясениями низкочастотного упреждающего сигнала (НУС, сейсмоакустический отклик на подвижку геологического массива перед сейсмическим разрывом) нашло подтверждение лишь в некоторых случаях.

Для проведения исследований в данном аспекте авторами была выбрана прямоугольная область с координатами от 43.0° до 45.0° N и от 145.0° до 147.0° E. 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 ней составило 17 за аналогичный период времени. Глубины гипоцентров варьировали от 16 до 147 км. Из 35 зарегистрированных землетрясений в 7 случаях был выявлен НУС. Все 7 событий имели глубину гипоцентра более 80 км и располагались преимущественно в Южно-Курильском проливе. На рис. 6 показано расположение эпицентров землетрясений, пять из которых имеют четко выраженный акустический сигнал частотой 5 Гц и продолжительностью от 3 до 13 с. На двух землетрясениях сигнал не столь выражен, но его частота совпадает с частотой идентифицированных нами упреждающих сигналов.

На рис. 7 представлена в виде примера запись волновых форм землетрясений, произошедших 14.10.2019 и 18.12.2019, а также частотные характеристики самих сигналов и сейсмических событий.

Систематизируем полученные нами на о. Кунашир результаты.

Низкочастотный упреждающий сигнал выявлен нами в 20 % случаев от общего количества сейсмических событий и для половины числа глубоководных землетрясений (с глубиной более 80 км). НУС имел место практиче-

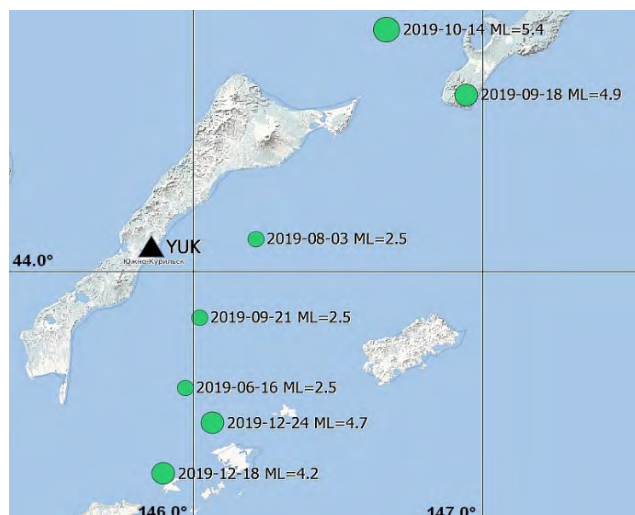


Рис. 6. Сейсмические события с идентифицированным упреждающим сигналом.

Figure 6. Seismic events with an identified anticipatory signal.

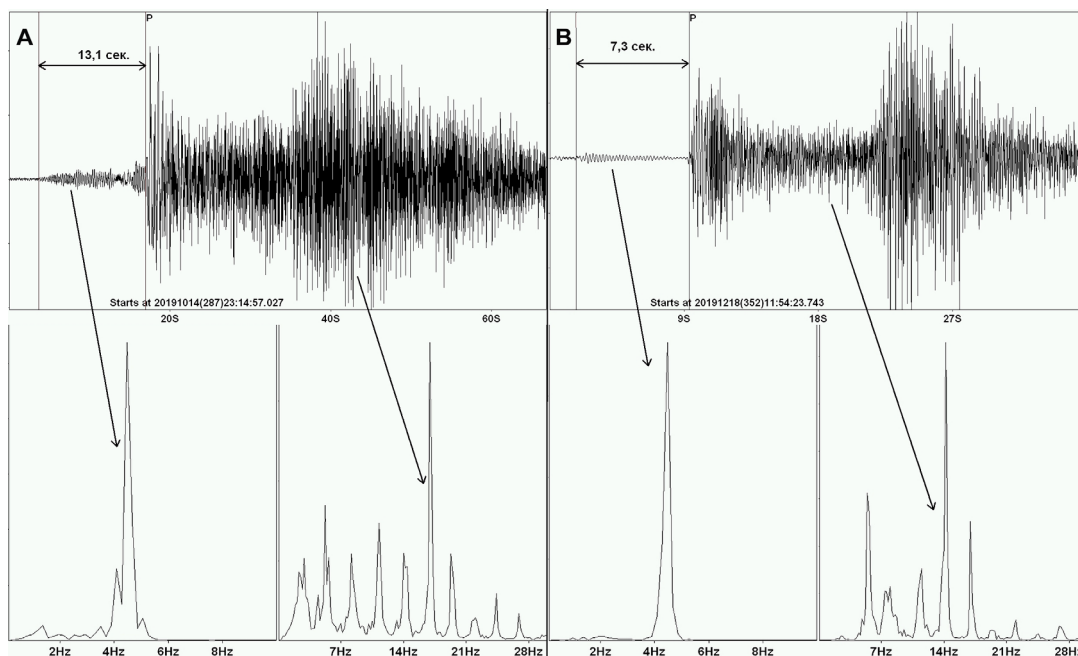


Рис. 7. Примеры записи сейсмических событий с упреждающим сигналом и спектральный анализ (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) упреждающего сигнала и сейсмического события по записям, построенный как функция автокорреляции сигнала в программном комплексе ДИМАС [Дрознин, Дрознина, 2010]. А – 14.10.2019, В – 18.12.2019.

Figure 7. An example of seismic events recording with anticipatory signal and spectral analysis (with the degree of correlation highlighted along the vertical axis) of the anticipatory signal and seismic event from the records, built as a function of signal autocorrelation in the DIMAS software package [Droznin, Droznina, 2010]. A – 14.10.2019, B – 18.12.2019.

ски для каждого второго такого события. Несмотря на то что НУС связывают в основном с коровыми землетрясениями, происходящими на дне океана в зонах субдукции, подобные сигналы в некоторых случаях отмечены и перед глубоководными событиями [Сасорова, 2005].

Параметры выделенных низкочастотных колебаний (период, амплитуда, частота сигнала, время упреждения и структура самого сигнала) варьируют незначительно. Период колебаний составил 0.2 с, колебания появляются за 3–13 с до прихода *P*-волны, их можно наблюдать на сейсмических записях без предварительного фильтра. Сходство параметров можно объяснить тем, что землетрясения с очагами в пределах одного региона характеризуются незначительным разбросом параметров НУС [Сасорова, 2005].

ПИН «Петропавловское» и «Загорское» (район Центрально-Сахалинского разлома)

Некоторые результаты наблюдений с помощью гидрофона ПИН «Петропавловское» были представлены ранее [Камнев и др., 2019]. В 2020 г. аналогичные исследования проведены для гидрофона новой модификации, размещенного в ПИН «Загорское». Для анализа регистрационных возможностей нового гидрофона, их сравнения с гидрофоном ПИН «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 46.7–47.5° N и 142.2–142.7° E. Каталог включает в себя 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, обработку которых провели в программном комплексе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010]. Для удобства обработки сейсмологических материалов использовали различные виды фильтров. По результатам обработки установлено, что из 31 землетрясения четкая запись вступлений имеется у 14 событий по записям волновых форм ПИН «Петропавловское» и для 22 событий по записям ПИН «Загорское». Результаты анализа регистрационных возможностей ПИН показаны на рис. 8, иллюстрирующем пространственное распределение зарегистрированных комплексов событий в зависимости от их магнитуд и расположения эпицентров. Сейсмические события, уверенно зарегистрированные ПИН, показаны цветными маркерами, а неидентифицированные на записях гидрофонов – полупрозрачными маркерами.

Из представленного рисунка видно, что при совместном использовании гидрофонов ПИН

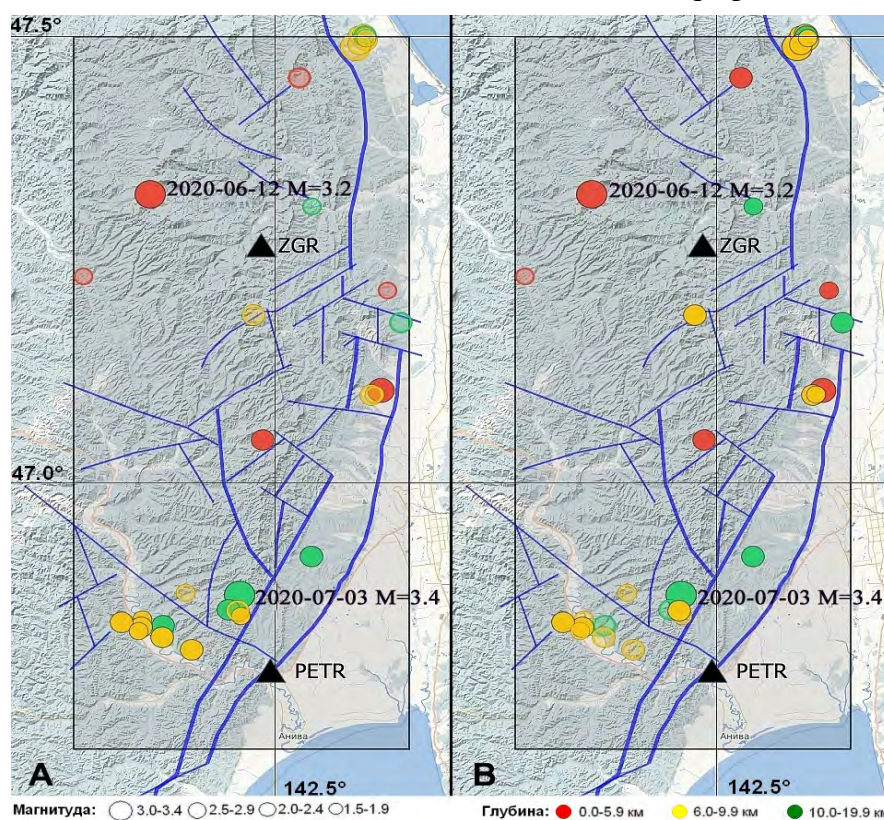


Рис. 8. Регистрационные возможности гидрофонов ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В).

Figure 8. Registration capabilities of hydrophones of the “Petropavlovskoe” (A) and “Zagorskoe” (B) instrumental observation points.

«Петропавловское» и ПИН «Загорское» регистрируются 93.5 % сейсмических событий с $M \geq 1.8$ в районе исследований. При этом ПИН «Петропавловское» уверенно регистрирует сейсмические события с $M \geq 2.5$ в радиусе до 30 км от места установки, а ПИН «Загорское» – на расстоянии более 50 км, что объясняется гораздо более низким уровнем техногенных помех в месте установки оборудования ПИН «Загорское», а также усовершенствованной конструкцией используемого гидрофона. Различия в конструкции гидрофонов, очевидно, вносят специфику и в формы записей и характеристики регистрируемых событий. На рис. 9 отображены типичные варианты регистрации на примере наиболее сильных сейсмических событий, произошедших за исследуемый период на примерно одинаковом удалении (10–15 км) от пунктов наблюдений. Для ПИН «Петропавловское» это сейсмическое событие 03.07.2020 ($M = 3.4$), а для ПИН «Загорское» – событие 12.06.2020 ($M = 3.2$). Указанные сейсмические события выделены на рис. 8.

Видно, что для гидрофона, расположенного в обводненной скважине («Петропавловское»), регистрация сейсмического события характеризуется спектром с более высокими частотами колебаний (20 Гц), а регистрация сейсмических событий гидрофоном в открытом водоеме при практически полном отсутствии техногенных помех происходит на частотах до 10 Гц.

Влияние атмосферных факторов

На практике, в условиях автономных ПИН, на работу гидрофонов оказывают воздействие атмосферные явления, степень влияния которых определяется, в том числе, и способом установки гидрофона. Для гидрофона, установленного в глубокой скважине (Южно-Курильск), была проведена оценка влияния на работу гидрофона атмосферных параметров (таких как уровень атмосферного давления и значения уровня воды в скважине) по следующей методике: для записей волновых форм продолжительностью 7 сут построена усредненная огибающая сигнала, которая была дополнена информацией об уровнях давления и уровне воды в скважине в месте установки гидрофона. Из рис. 10 очевидно, что изменение давления и уровня воды не оказывают существенного влияния на работу прибора. 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 (ПИН «Загорское») и неглубокой скважине (ПИН «Петропавловское») в период прохождения тайфуна «Хагупит» 7 августа

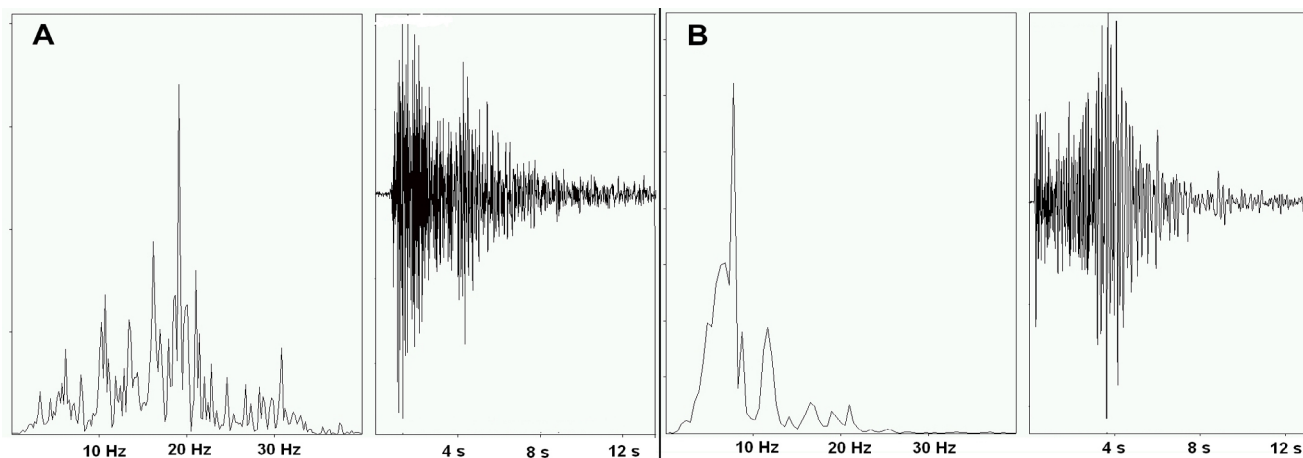


Рис. 9. Форма и спектральная составляющая частоты (с выделением по вертикальной оси степени корреляции) регистрируемых сейсмических событий для ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В).

Figure 9. Waveform and spectral component of the frequency (with the degree of correlation highlighted along the vertical axis) of recorded seismic events of the “Petropavlovskoe” (A) and “Zagorskoe” (B) instrumental observation points.

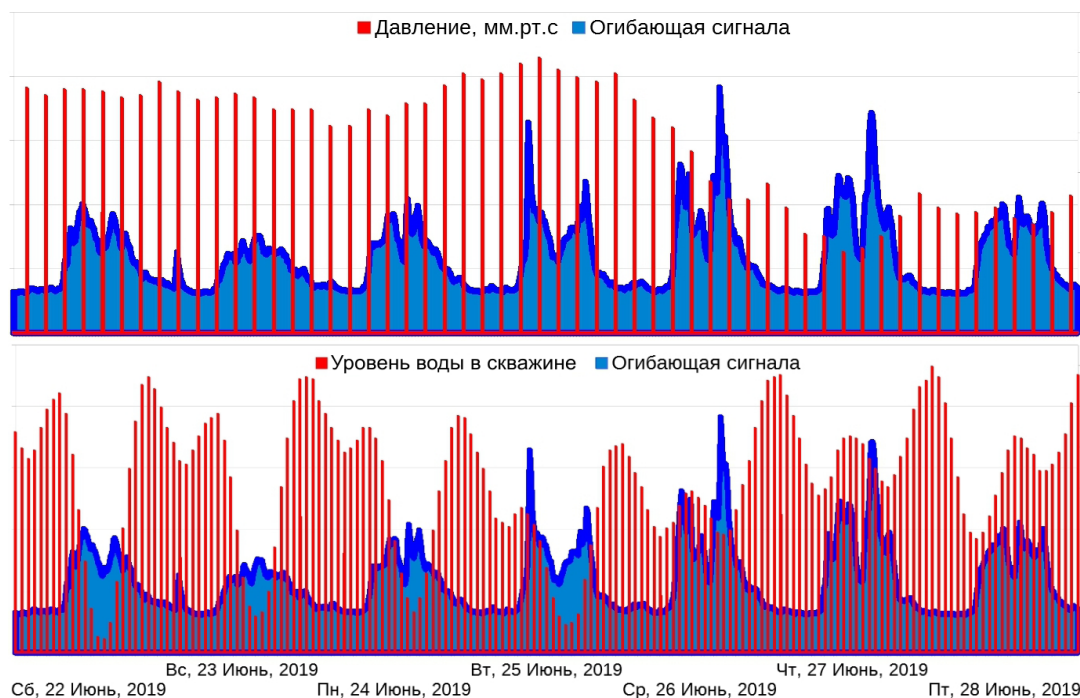


Рис. 10. Соотношения уровня атмосферного давления по данным метеостанции «Южно-Курильск» (вверху) и уровня воды в скважине с установленным гидрофоном (по данным уровнемера гидростатического «Кедр-ДМ» ОСП «СахГРЭ», http://www.geomonitoring.ru/download/IB/2018_dfo.pdf) и огибающей сигнала гидрофона.

Figure 10. The ratio of the atmospheric pressure level according to the Yuzhno-Kurilsk meteorological station (above) and the water level in the well with the installed hydrophone (according to the hydrostatic level gauge Kedr-DM OSP SakhGRE, http://www.geomonitoring.ru/download/IB/2018_dfo.pdf) and hydrophone signal envelope.

(Долинская правда, № 33, 14 авг. 2020 г.). Тайфун оказал сильное влияние на районы установки ПИН. Так, по данным ближайших к пунктам наблюдений метеостанций, в Долинском районе (ПИН «Загорское») за 12 ч выпало 73 мм осадков, а порывы ветра достигали 15 м/с, а в Анивском районе (ПИН «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 рис. 11.

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.

Исследование влияния атмосферных факторов на работу ги-

дрофонов позволит в дальнейшем выработать оптимальные инженерно-конструкторские решения, позволяющие минимизировать воздействие окружающей среды. При этом совместный анализ сейсмоакустических и других

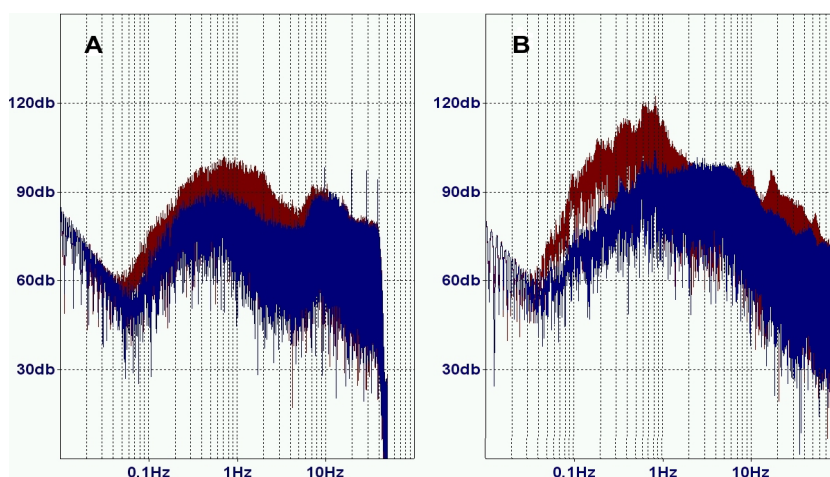


Рис. 11. Спектральная плотность сейсмического шума (децибеллы по отношению к $\mu\text{Pa}^2/\text{Гц}$) на ПИН «Петропавловское» (А) и ПИН «Загорское» (В) в период прохождения тайфуна (красный цвет) – 7 августа 2020 г. и после окончания выпадения осадков – 9 августа 2020 г. (синий цвет).

Figure 11. Spectral density of seismic noise (decibels in relation to $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$) of the «Petrovskoye» (A) and «Zagorskoye» (B) instrumental observation points during the typhoon passage (red) – August 7, 2020 and after the end of precipitation – August 9, 2020 (blue).

геофизических данных (включая возмущения, связанные с циркуляцией атмосферы, магнитными бурями и солнечной активностью) может быть направлен на разработку методик краткосрочных заключений по развитию сейсмического режима на о. Сахалин и в районе Южных Курильских островов.

Заключение

В статье представлены результаты сейсмоакустических наблюдений на островах Сахалин и Кунашир с помощью молекулярно-электронных гидрофонов. Несмотря на неизбежное влияние на работу оборудования техногенных и атмосферных факторов, выбор мест и способов установки оборудования следует признать удачным. Опыт эксплуатации молекулярно-электронных гидрофонов показал соответствие характеристик, полученных в результате практических наблюдений, характеристикам, заявленным производителем.

В используемых для сейсмоакустических наблюдений приборах (регистраторе и гидрофоне) отсутствуют элементы точной механики и движущихся механических частей, что гарантирует их высокую надежность и устойчивость к нежелательным внешним воздействиям. Это подтверждается опытом применения этих приборов на пунктах наблюдений. Несмотря на достаточно жесткие условия эксплуатации –

100%-ю влажность в летний период для Южно-Курильска и температуры $-5...-10$ °С в зимний период, используемый комплект оборудования показал, в целом, очень высокую степень надежности. Простой регистрации составили не более 0.01 % от времени работы комплекса.

Анализ записей с гидрофонной станции на о. Кунашир выявил в 20 % случаев из 35 зарегистрированных землетрясений наличие низкочастотного упреждающего сигнала – перед широкофокусными землетрясениями (глубина гипоцентра больше 80 км). Частотный диапазон идентифицированных сигналов составляет в среднем 4–6 Гц, а продолжительность сигнала варьирует от 3 до 13 с.

Наблюдения в зоне Центрально-Сахалинского разлома показали, что молекулярно-электронные гидрофоны позволяют не только зафиксировать такой геофизический параметр, как низкочастотный упреждающий сигнал, но и вести полноценную регистрацию сейсмических событий независимо от условий установки приборов.

Изучение реакции молекулярно-электронных гидрофонов на воздействие внешних факторов может быть полезным для разработчиков при создании серийного изделия. Так, образец 891 (ПИН «Загорское») послужил основой для серийного продукта компании «Р-сенсорс» (гидрофон МТАС-30).

Список литературы

1. Борисов А.С., Борисов С.А. **2017**. Оценка параметров гидроакустических сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в районе Центрально-Сахалинского разлома. *Геосистемы переходных зон*, 3(2): 64–70. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070
2. Борисов А.С., Борисов С.А., Левин Б.В., Сасорова Е.В. **2012**. Наблюдения слабых землетрясений гидрофонной станцией на мелководье южных Курильских островов. *Геодинамика и тектонофизика*, 3(2): 103–113. https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-2-0065
3. Борисов А.С., Борисов С.А., Гурский В.В. **2013**. Гидрофонные автономные сейсмостанции в задаче детальных сейсмологических наблюдений. В кн.: *IV науч.-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 30 сент. – 4 окт. 2013, Петропавловск-Камчатский*. Петропавловск-Камчатский: Камчат. фил. Геофиз. службы РАН, т. 1: 313–317. URL: http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/techn/Borisov_etc.pdf
4. Бугаев А.С., Антонов А.Н., Агафонов В.М., Белотелов К.С., Вергелес С.С., Дудкин П.В., Егоров Е.В., Егоров И.В., Жевненко Д.А. и др. **2018**. Измерительные приборы на основе молекулярно-электронных преобразователей. *Радиотехника и электроника*, 63(12): 1249–1262.
5. Демежко Д.Ю., Рывкин Д.Г., Юрков А.К., Дергачев В.В., Корсунцев В.Г. **2009**. Комплексные геотермические исследования в скважине kun-1 (о. Кунашир). Ч. I: Вертикальное распределение температур, тепловой поток, влияние рельефа, гидрогеологии, распространение суточных волн. *Уральский геофизический вестник*, 1(14): 18–29.
6. Дроздин Д.В., Дроздина С.Я. **2010**. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS. *Сейсмические приборы*, 46(3): 22–34.

7. Зайцев Д.Л., Егоров Е.В., Авдюхина С.Ю., Рыжков М.А. **2019**. Молекулярно-электронный гидрофон: патент RU 2678503 С1. № 2017146249; заявл. 27.12.2017; опубл. 29.01.2019.
8. Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. **2019**. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования. *Геосистемы переходных зон*, 3(4): 390–402. <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402>
9. Костылев Д.В., Богинская Н.В. **2019**. Об опыте использования молекулярно-электронных сейсмических датчиков на Сахалине и Южных Курилах. В кн.: *VII науч.-технич. конф. «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России», 29 сент. – 5 окт. 2019, Петропавловск-Камчатский*. Петропавловск-Камчатский: КФ ФИЦ ЕГС РАН, т. 1: 455–458. URL: <http://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/techn/kostilev.pdf>
10. Сасорова Е.В. **2005**. Особенности разномасштабных пространственно-временных проявлений сейсмического процесса в Тихоокеанском регионе: наблюдения, статистика, моделирование: *дис. ... д-ра физ.-мат. наук*. М., Институт океанологии РАН, 342 с.
11. Семенова Е.П., Костылев Д.В., Михайлов В.И., Паршина И.А., Ферчева В.Н. **2018**. Оценка сейсмичности Южного Сахалина по методике СОУС'09. *Геосистемы переходных зон*, 2(3): 191–195. doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195
12. Huang H., Agafonov V., Yu H. **2013**. Molecular electric transducers as motion sensors: a review. *Sensors*, 13(4): 4581–4597. <https://doi.org/10.3390/s130404581>
13. 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 Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012009). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009>
14. Zaitsev D.L., Avdyukhina S.Y., Ryzhkov M.A., Evseev I., Egorov E.V., Agafonov V.M. **2018**. Frequency response and self-noise of the met hydrophone. *J. of Sensors and Sensor Systems*, 7(2): 443–452. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018>
15. Zaitsev D., Egorov E., Ryzhkov M., Velichko G., Gulenko V. **2019**. Low-frequency, low-noise molecular-electronic hydrophone for offshore and transit zone seismic exploration. In: *19-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 28 June – 7 July 2019, Albena, Bulgaria*: Conf. proceedings, vol. 1: 961–968.

References

1. Borisov A.S., Borisov S.A. **2017**. Estimation of parameters of hydroacoustic signals of high frequency geoaoustic emission within Central Sakhalin Fault area. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, (3): 64–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070>
2. Borisov A.S., Borisov S.A., Levin B.W., Sasorova E.V. **2012**. Hydroacoustic observations of weak earthquakes in shallow waters of the Southern Kuril Islands. *Geodynamics & Tectonophysics*, 3(2): 103–113. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/gt-2012-3-2-0065>
3. Borisov A.S., Borisov S.A., Gurskiy V.V. **2013**. [Autonomous hydrophone seismic stations in the task of detailed seismic observations]. In: *IV nauch.-tekhnicheskaya konf. «Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii». 30 sent. – 4 okt. 2013, Petropavlovsk-Kamchatskiy [IV scientific and technical conference “Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East”, 29 Sept. – 5 Oct. 2013, Petropavlovsk-Kamchatskiy]*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchat. fil. Geofiz. sluzhby RAN [Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchatka Branch of the Geophysical Survey of RAS], vol. 1: 313–317. URL: http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/techn/Borisov_etc.pdf
4. Bugaev A.S., Antonov A.N., Agafonov B.M., Vergeles S.S., Dudkin P.V., Egorov E.V., Egorov I.V., Zhevnenko D.A., Zhabin S.N. et al. **2018**. Measuring devices based on molecular-electronic transducers. *J. of Communications Technology and Electronics*, 63(12): 1339–1351. <https://doi.org/10.1134/s1064226918110025>
5. Demezhko D.Yu., Ryvkin D.G., Yurkov A.K., Dergatchev V.V., Korsuntsev V.G. **2009**. Complex geothermal investigations in the borehole kun-1 (Kunashir Island). Pt. 1: Vertical temperature distribution, heat flow, topography and hydrogeology influence, diurnal wave propagation. *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik [Ural Geophysical Bulletin]*, 1(14): 18–29. (In Russ.).
6. Droznin D.V., Droznina S.Y. **2011**. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. *Seismic Instruments*, 47(3): 215–224. <https://doi.org/10.3103/s0747923911030054>
7. Zaytsev D.L., Egorov E.V., Avdyukhina S.Yu., Ryzhkov M.A. **2019**. *Molekulyarno-elektronnyy gidrofon [Molecular electronic hydrophone]*: patent RU 2678503 С1. № 2017146249; appl. 27.12.2017; publ. 29.01.2019. (In Russ.).
8. Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. **2019**. Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 3(4): 390–402. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402>

9. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. **2019**. [On the experience of using molecular-electronic seismic sensors on the Sakhalin and South Kuriles]. In: *VII nauch.-tekhnich. konf. «Problemy kompleksnogo geofizicheskogo monitoringa Dal'nego Vostoka Rossii», 29 sent. – 5 okt. 2019, Petropavlovsk-Kamchatskiy [VII scientific and technical conference “Problems of complex geophysical monitoring of the Russian Far East”, 29 Sept. – 5 Oct. 2019]*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: KF FITs EGS RAN [KB FRC UGS RAS], vol. 1: 455–458. (In Russ.). URL: <http://www.emsd.ru/conf2019lib/pdf/techn/kostilev.pdf>
10. Sasorova E.V. **2005**. *Osobennosti raznomasshtabnykh prostranstvenno-vremennykh proyavleniy seysmicheskogo protsessa v Tikhookeanskom regione: nablyudeniya, statistika, modelirovanie* [Features of different-scale space-time manifestations of the seismic process in the Pacific region: observations, statistics, simulation]: [dissertation of doctor of physical and mathematical sciences]. Moscow, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 342 p. (In Russ.).
11. Semenova E.P., Kostylev D.V., Mikhailov V.I., Parshina I.A., Fercheva V.N. **2018**. Evaluation seismicity in Southern Sakhalin with the use of the method SOUS'09. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2(3): 191–195. (In Russ.). <https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195>
12. Huang H., Agafonov V., Yu H. **2013**. Molecular electric transducers as motion sensors: a review. *Sensors*, 13(4): 4581–4597. <https://doi.org/10.3390/s130404581>
13. 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. In: *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 324(012009). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009>
14. Zaitsev D.L., Avdyukhina S.Y., Ryzhkov M.A., Evseev I., Egorov E.V., Agafonov V.M. **2018**. Frequency response and self-noise of the met hydrophone. *J. of Sensors and Sensor Systems*, 7(2): 443–452. <https://doi.org/10.5194/jsss-7-443-2018>
15. Zaitsev D., Egorov E., Ryzhkov M., Velichko G., Gulenko V. **2019**. Low-frequency, low-noise molecular-electronic hydrophone for offshore and transit zone seismic exploration. In: *19-th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 28 June – 7 July 2019, Albena, Bulgaria: Conf. proceedings*, 1: 961–968.

Об авторах

КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», младший научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, fily77@mail.ru