

НТР

**НАУКА
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
РАЗРАБОТКИ**

**SCIENCE AND TECHNOLOGICAL
DEVELOPMENTS**

2018. Том 97, № 1
тематический выпуск

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ
ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ
ПРИРОДНЫХ ОПАСНОСТЕЙ**

**Часть 1.
Приборы и технологии**

Рецензируемый научный журнал, в котором публикуются материалы по различным областям фундаментальной и прикладной науки, анализируется опыт внедрения новых технологий, изобретений и открытий.

УДК 550.34.03

ВМОРАЖИВАЕМЫЙ АВТОНОМНЫЙ ГЕОГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ БУЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

© 2018 г. А.Л. Собисевич¹, Д.А. Преснов¹, В.М. Агафонов², Л.Е. Собисевич¹

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия
²Московский физико-технический институт (государственный университет),
Московская обл., г. Долгопрудный, Россия

Автор для переписки: Д.А. Преснов, e-mail: presnov@physics.msu.ru

Главное

- разработаны новая информационно-измерительная платформа и программное обеспечение
- создано семейство автономных геогидроакустических буйев для систем ледового класса
- проведены долговременные сопоставительные измерения
- подтверждена работоспособность и оценены основные параметры нового прибора
- прибор соответствует мировым аналогам по ключевым характеристикам

Аннотация. Представлены результаты разработки, создания опытных образцов и натурных испытаний геогидроакустических измерительных буйев нового поколения, которые предназначены для использования как самостоятельно, при проведении акустических, сейсмических, гидроакустических и сейсмоакустических измерений в море или на суше (в том числе и в скважинах), так и в составе распределенных антенных систем ледового класса, предназначенных для мониторинга покрытых дрейфующими льдами морских акваторий Арктики. Геогидроакустический ледовый буй представляет собой законченный информационно-измерительный автономный прибор, в составе которого предусмотрено применение как сменных приемных модулей – комбинированных векторно-скалярных гидроакустических (0,01–2,5 кГц) и широкополосных молекулярно-электронных (0,03–50 Гц) приемников нового поколения, так и авторских средств оцифровки принимаемой информации, записи во внутреннюю память и последующей оперативной передачи получаемых научных данных. Информационно-измерительная система построена на основе 24-битного аналого-цифрового преобразователя, обеспечивающего регистрацию сигналов в большом динамическом диапазоне, что позволяет выполнять измерения при помощи аналоговых широкополосных датчиков как в пассивном, так и в активном режимах. Отличительной особенностью геогидроакустического буя является интеграция в его состав элементов питания, что обеспечивает возможность надёжной автономной работы всей измерительной системы в течение нескольких недель. Результаты продолжительных лабораторно-стендовых испытаний, проведённых в геофизической обсерватории ГС РАН в г. Обнинск, показали высокие технические возможности разработанных геогидроакустических буйев нового поколения. Сопоставительный анализ при измерении сигналов, вызванных микросейсмическим шумом и телесейсмическими землетрясениями, подтвердил, что предлагаемый измерительный прибор не уступает мировым аналогам по ключевым характеристикам.

Ключевые слова: сейсмометр, буй, молекулярно-электронный преобразователь, АЦП, геогидроакустическое волновое поле, информационно-измерительная система, антенна ледового класса.

Цитируйте эту статью как: Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Агафонов В.М., Собисевич Л.Е. Вмораживаемый автономный геогидроакустический буй нового поколения // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97, № 1. С.25–34. [Тематический выпуск "Прецизионный геофизический мониторинг природных опасностей. Часть 1. Приборы и технологии"]. DOI: 10.21455/std2018.1-3

Введение

Государственная стратегия освоения Арктики ставит перед нашими учёными ряд сложных и пока не решенных до конца проблем, связанных как с мониторингом водной среды в интересах обеспечения национальной безопасности, так и с разведкой запасов углеводородов в покрытых льдами морях Арктики. Для их решения в Арктике создается российская система мониторинга землетрясений [Рогожин и др., 2015], осуществляется сейсмический и инфразвуковой мониторинг ледников. Это позволит следить за активностью выводящих ледников, что обеспечит повышение безопасности судоходства в северных морях [Асминг и др., 2012, 2016; Виноградов и др., 2014; Федоров, Асминг, 2015]. Последние достижения в этой области [Собисевич и др., 2017] позволяют одновременно изучать характеристики морского дна, водного слоя и ледового покрова путём измерения полного геогидроакустического поля при помощи сейсмических и комбинированных векторно-скалярных гидроакустических приёмников [Гордиенко и др., 1993].

Развитие разработанной в ИФЗ РАН инновационной технологии глубинного мониторинга неоднородных слоистых геологических структур [Дмитриченко и др., 2018] потребовало разработки нового класса измерительных приборов, включая и вмораживаемые автономные геогидроакустические буи, которые позволяют вести измерения одновременно на льду, в водной среде и на морском дне. Первые принципиальные макеты новых приборов без чувствительных элементов и электронной записывающей системы были представлены в 2017 г. [Собисевич и др., 2017].

В рамках настоящей работы создано 5 опытных образцов приборов, функционально готовых к тестированию их эксплуатационных характеристик. При этом основное внимание уделялось разработке автономной информационно-измерительной системы и применению нового чувствительного элемента, вмораживаемого в лёд и действующего по принципу сейсмометра-велосиметра.

Принципы работы и устройство геогидроакустического измерительного модуля

Геогидроакустический измерительный буй предназначен для осуществления автономной регистрации сейсмических, гидроакустических и при необходимости акустических сигналов в течение нескольких недель, накопления и передачи данных по проводному или беспроводному интерфейсу и удаленной проверки надлежащей работы, а также для объединения нескольких модулей в единую телесеismicкую сеть. В состав устройства функционально входят три основных модуля (рис. 1, а): аналоговый однокомпонентный молекулярно-электронный измеритель типа СМЕ-4211V (1), источник тока, обеспечивающий работу всех узлов системы (2), и регистратор сейсмических сигналов типа NDAS-8224 (3). Разработка защищена патентом [Агафонов и др., 2018].

Аналоговый сейсмический датчик (1) работает на принципах молекулярно-электронного переноса [Агафонов et al., 2015; Агафонов и др., 2013]. Внешние сейсмические возмущения благодаря силам инерции вызывают перетекание рабочей жидкости датчика через электрохимическую ячейку устройства. Возникновение конвективного потока в преобразователе меняет установившийся в системе характер распределения концентрации основных носителей заряда, что вызывает вариации катодного тока, пропорциональные внешнему возмущающему сигналу.

Сейсмические датчики, построенные по технологии МЭП, являются чрезвычайно надежными приборами, они не требуют ни специальных средств, ни специальных методов при транспортировке и установке, не нуждаются в обслуживании, арретировании

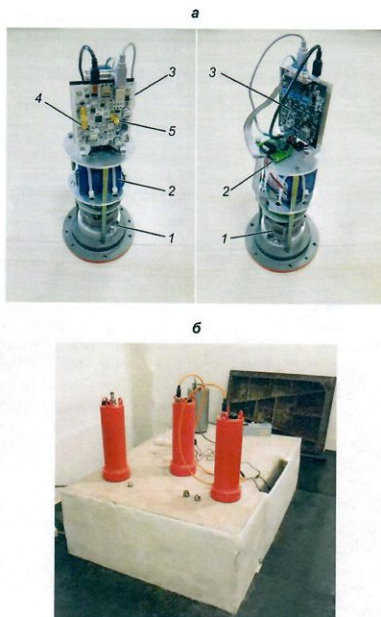


Рис. 1. Конструкция геогидроакустического модуля (а) и внешний вид размещения геогидроакустических буйв на постаменте в г. Обнинск 30.08.2017 г. (б): 1 – аналоговый молекулярно-электронный вертикальный сейсмический датчик; 2 – литий-ионная батарея с платой согласования; 3 – 24-разрядный регистратор сейсмических сигналов; 4 – разъем подключения внешней антенны Wi-fi; 5 – разъем подключения внешней антенны GPS

Fig. 1. Geohydroacoustic module design and the position of geohydroacoustic buoys on the pedestal in Obninsk 08.30.2017: 1 – analog molecular-electron vertical seismic sensor, 2 – lithium-ion battery with matching board, 3 – 24-bit seismic signal recorder, 4 – external Wi-fi antenna connection socket, 5 – external GPS antenna connector

и центрировании массы и хорошо подходят для полевых измерений, а также для быстрого развертывания сейсмической сети [Агафонов и др., 2013]. Технические параметры датчика представлены в таблице.

Источник питания построен на основе цилиндрических литий-ионных элементов питания. Общий размер аккумулятора, упакованного в единый корпус, составляет 51×56×77 мм, а общая емкость батареи при комнатной температуре – около 7000 мА·ч. Номинальное напряжение, выдаваемое батареями, составляет 9–12.6 В. Поскольку цифровой блок (3) и аналоговый молекулярно-электронный измеритель (1) имеют разные

Параметры молекулярно-электронного сейсмодатчика

Полоса частот	0.033 ($T=30\text{ с}$)–50 Гц
Коэффициент преобразования	2000 В/(м/с) – дифф. Выход
Максимальный регистрируемый сигнал	± 5.0 мм/с
Интегральный шум в полосе 0.033–50 Гц	76 нм/с
Питание / потребление сейсмометра	10.5–30 В DC, 12 мА (стандарт)
Температурный диапазон работы	(–40...+55 °С)
Допустимый угол установки	$\pm 15^\circ$
Вес	0.4 кг

напряжения питания (+5 В и +12 В соответственно), предусмотрена специальная плата согласования, преобразующая напряжение батареи в +5 В для питания цифрового регистратора.

Регистратор (3) предназначен для использования в составе автономных систем сбора данных с батарейным питанием. Его основу составляет аналого-цифровой преобразователь типа сигма-дельта с 22 эффективными разрядами. Частота оцифровки выбирается из следующих значений: 1, 10, 50, 100, 250, 500, 1000 Гц. Применяемый модуль отличается малым энергопотреблением (менее 300 мВт в процессе регистрации), что позволяет существенно увеличить время его автономной работы при заданных габаритах устройства.

Для передачи данных и конфигурирования системы используются проводное USB или беспроводное Wi-Fi соединения (разъем (4) на рис. 1, а), а внутренняя память объемом 32 Гб позволяет вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. В регистраторе имеются цепи для подачи тестовых сигналов на сейсмические датчики, а также питание ± 2.5 В. Интегрированный модуль GPS позволяет синхронизировать сейсмические события с точным мировым временем, автономно запускать и останавливать запись по заданному расписанию и идентифицировать пространственную точку расположения измерительного модуля на земной поверхности для индивидуализации модулей в телесеismicческой сети.

Геогидроакустический измерительный модуль помещен в прочный пылевлагозащищенный корпус со степенью защиты не ниже IP 67. На верхнюю крышку модуля выведены внешняя совмещенная антенна модуля Wi-Fi/GPS и герметичный многофункциональный разъем типа PC-10. Этот разъем обеспечивает возможность зарядки аккумулятора модуля, чтение данных с регистратора, программирование цифрового модуля, световую индикацию работы устройства и наличия зафиксированного модулем спутникового сигнала GPS. При подключении к разъему светоиндикаторной заглушки на электронные платы прибора поступает энергоснабжение от внутреннего аккумулятора.

Разработанное программное обеспечение выполняет следующие функции: отображение списка устройств, отображение параметров состояния устройств (координаты, синхронизация часов, ориентация и т.п.), отображение сейсмограммы для одного или нескольких устройств, отображение и сохранение сейсмограммы в памяти устройства.

Лабораторно-стендовые испытания геогидроакустического измерительного модуля

Проведены обсерваторские исследования основных характеристик широкополосных сенсоров в составе буев ледового класса в заглубленных боксах на измерительных постах геофизического комплекса Геофизической службы РАН (г. Обнинск).

Многочасовой обсерваторский эксперимент (с 30.08. по 08.09.2017 г.) позволил сопоставить амплитудные и фазовые частотные характеристики буя с прецизионными сейсмометрами. В качестве эталонного сейсмометра использовался велосиметр Streckeisen STS-1V/VBB, который является основным инструментом постоянно действующей сейсмической станции Обнинск (OBN); кроме того, были проанализированы данные с велосиметра Guralp CMG-3ESP.

На рис. 2 представлено сопоставление частотных характеристик, заявленных изготовителями приборов, с частотными характеристиками геогидроакустического буя с установленным датчиком СМЕ. Streckeisen и Guralp обладают приемлемой чувствительностью вплоть до периодов 250 и 100 с соответственно; имеющиеся данные ограничены частотой Найквиста сверху – 10 и 20 Гц соответственно. В настоящей работе рассматривается частотный диапазон 0.03–10 Гц. Сейсмостанции расположены в месте, защищенном от посторонних шумов лесополосой. Геофизический постамент (рис. 1, б) находится на глубине ~20 м, температура составляла ~12 °С, также была отмечена высокая влажность.

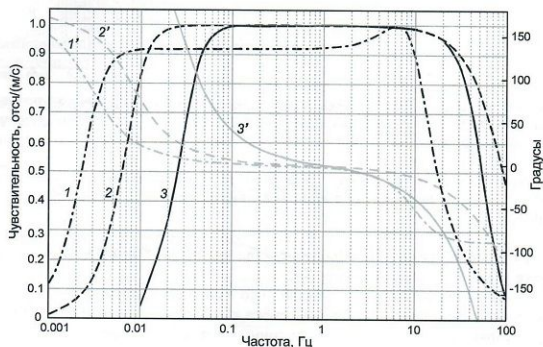


Рис. 2. Амплитудно-частотная (АЧХ) (1–3) и фазо-частотная (ФЧХ) (1'–3') характеристики приборов Streckeisen (1, 1'), Guralp (2, 2') и СМЕ (3, 3')

Fig. 2. Amplitude-frequency (1–3) and phase-frequency (1'–3') characteristics of the devices Streckeisen (1, 1'), Guralp (2, 2') и СМЕ (3, 3')

Обращает на себя внимание более низкая по сравнению с эталонными приборами чувствительность СМЕ на периодах более 20 с. Эта проблема решается применением другого калибровочного коэффициента, что делает записи абсолютно идентичными. Кроме того, отметим, что на периодах более 20 с запись велосиметра Guralp оказалась зашкаленной.

Наиболее информативное событие, произошедшее в мире за время измерений – это землетрясение магнитудой 8.1 в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени. На рис. 3 представлена синхронная (по максимальным значениям) запись этого события всеми тремя приёмниками, отфильтрованная в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, с учетом представленной на рис. 1 частотной характеристики прибора СМЕ.

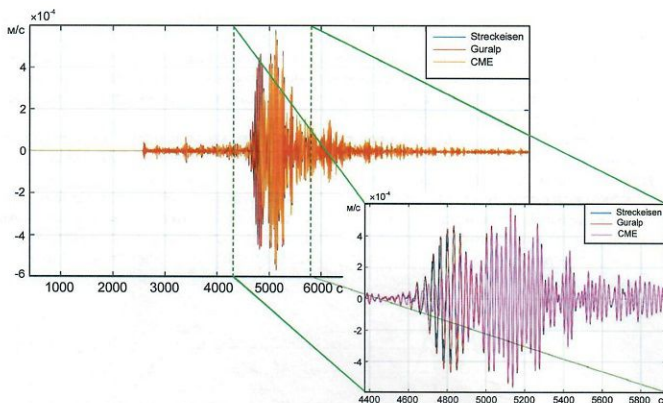


Рис. 3. Сопоставление записей, полученных приборами Streckeisen, Guralp и CME в частотном диапазоне 0.03–10 Гц, землетрясения магнитудой 8.1, произошедшего в Мексике 08.09.2017 г. в 04:49 по всемирному времени

Fig. 3. A comparison of the records made with Streckeisen, Guralp и CME devices in a frequency range 0.03–10 Гц of the earthquake of magnitude 8.1 that occurred in Mexico on 08.09.2017 at 04:49 Universal Time

Записи других приборов не калибровались, так как их АЧХ и ФЧХ можно считать линейными в указанной полосе частот.

Результаты эксперимента показали, что основные параметры геогидроакустического буя ледового класса стабильны также в диапазоне частот 0.03–50 Гц. По всем основным характеристикам информационно-измерительная система буя не уступает современным сейсмостанциям мирового уровня, а разработанные и использованные программы сбора, обработки и передачи информации являются достаточно надёжными. Необходимо также подчеркнуть, что молекулярно-электронные преобразователи сегодня начинают применяться в сейсморазведке на суше [Горбенко и др., 2016], под водой [Антонов и др., 2017], а также проходят первые испытания в ледовых условиях [Преснов и др., 2017].

Таким образом, с использованием инновационных технологий разработаны новые принципиальные подходы к созданию компактного сейсмоакустического прибора, реализующего многокомпонентную регистрацию геогидроакустического сигнала в сложных ледовых условиях, а построенный уникальный информационно-измерительный комплекс не уступает по основным показателям зарубежным аналогам. Созданное семейство опытных образцов геогидроакустических буй ледового класса построено на модульной платформе, что позволяет использовать в их составе различные типы широкополосных сенсоров с большим динамическим диапазоном для автономной регистрации упругих колебаний.

Благодарности

Настоящее исследование выполнено при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-02046), а также гранта Президента Российской Федерации для поддержки научных школ № НШ-5545.2018.5. Авторы выражают благодарность аспирантам А.Н. Антонову и П.Д. Груздеву за весомый вклад в подготовку и первые испытания нового прибора.

Литература

- Агафонов В.М., Авдюхина С.Ю., Егоров Е.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е. Патент РФ № 2650839 // Б. И. 2018. № 11.
- Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 1. С. 5–18.
- Антонов А.Н., Авдюхина С.Ю., Егоров И.В., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Шабалина А.С. Широкополосная сейсмическая станция для сейсморазведки на морском дне и в транзитной зоне на основе молекулярно-электронных датчиков // Материалы научно-практической конференции “Сейсмические технологии-2017”. 2017. С. 64–67.
- Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И. Сейсмонифразвуковой мониторинг на Шпицбергене // Сейсмические приборы. 2012. Т. 48, № 3. С. 32–45.
- Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акустический журнал. 2016. Т. 62, № 5. С. 582–591. DOI: 10.7868/S0320791916040031
- Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н. Сейсмонифразвуковой мониторинг деструкции ледников (пилотный эксперимент на архипелаге Шпицберген) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 1. С. 5–15.
- Горбенко В.И., Жостков Р.А., Лиходеев Д.В., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Вопросы применимости молекулярно-электронных сейсмоприемников в пассивной сейсморазведке на примере изучения глубинного строения Калужской кольцевой структуры по данным анализа поверхностных волн // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52, № 3. С. 5–19.
- Горищенко В.А., Гончаренко Б.И., Илюшин Я.А. Особенности формирования векторно-фазовой структуры шумовых полей океана // Акустический журнал. 1993. Т. 39, № 3. С. 455–466.
- Дмитриченко В.П., Преснов Д.А., Руденко О.В., Собисевич А.Л., Собисевич Л.Е., Суханов П.Д., Тихоцкий С.А., Шуруп А.С. Патент РФ № 2646528 // Б. И. 2018. № 7.
- Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич А.Л., Шуруп А.С. Naturные наблюдения сейсмоакустических волн в условиях покрытого льдом водоёма // Изв. РАН. Сер. физ. 2017. Т. 81, № 1. С. 76–80. DOI: 10.7868/S0367676517010239
- Рогожин Е.А., Антоновская Г.Н., Капустян Н.К. Современное состояние и перспективы развития системы сейсмического мониторинга Арктики // Вопросы инженерной сейсмологии. 2015. Т. 42, № 1. С. 58–69.
- Собисевич А.Л., Преснов Д.А., Жостков Р.А., Собисевич Л.Е., Шуруп А.С., Лиходеев Д.В., Агафонов В.М. Геоакустический шумовой мониторинг подледных акваторий северных морей // Наука и технологические разработки. 2017. Т. 96, № 3. С. 31–46. [Тематический выпуск “Прикладная геофизика: новые разработки и результаты. Часть 1. Сейсмология и сейсморазведка”]. DOI: 10.21455/std2017.3-1
- Федоров А.В., Асминг В.Э. Мониторинг активности ледников Шпицбергена сейсмическим методом // Наука и технологические разработки. 2015. Т. 94, № 4. С. 44–52.
- Agafonov V.M., Neeshpapa A.V., Shabalina A.S. Electrochemical Seismometers of Linear and Angular Motion. Encyclopedia of Earthquake Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015. DOI: 10.1007/978-3-642-36197-5_403-1

Сведения об авторах

СОБИСЕВИЧ Алексей Леонидович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-30-60. E-mail: alex@ifz.ru

ПРЕСНОВ Дмитрий Александрович – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-30-60. E-mail: presnov@physics.msu.ru

АГАФОНОВ Вадим Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры вакуумной электроники, Московский физико-технический институт (государственный университет). 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. E-mail: agvadim@yandex.ru

СОБИСЕВИЧ Леонид Евгеньевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7(499) 254-30-60. E-mail: sobis@ifz.ru