

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ СЕТИ СУША–ОКЕАН

© 2016 г. Д. Г. Левченко, И. П. Кузин, Л. И. Лобковский, К. А. Рогинский

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: levch35@mail.ru

Поступила в редакцию 20.04.2015 г.

После доработки 02.12.2015 г.

Рассматриваются преимущества и недостатки регистрации сейсмических сигналов на дне акваторий. Обосновывается необходимость создания систем длительного сейсмологического мониторинга в районах промышленного освоения шельфа и континентального склона и в районах высокой сейсмической и цунами опасности океанов и морей. Приводятся результаты использования широкополосных донных сейсмографов в экспедициях Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Предлагается для создания морской сейсмологической сети использовать автономные широкополосные донные сейсмографы с длительным сроком работы на дне и с оперативной связью через спутниковые или радио каналы.

DOI: 10.7868/S0030157416050075

ВВЕДЕНИЕ

Океаны занимают, как известно, две трети поверхности Земли, и вследствие особенностей ее геологического строения, свыше 80% всех землетрясений происходит под дном океанов и морей. В настоящее время создана развитая наземная сейсмологическая сеть, состоящая из тысяч сейсмографов и охватывающая практически все континенты. Однако наземные сейсмографы регистрируют сигналы удаленных морских землетрясений с существенными искажениями, а сигналы слабых донных землетрясений не регистрируются вовсе. По этой причине не удается адекватно оценивать тектонические процессы, происходящие в недрах Земли в их единстве и многообразии. Недостаточно исследованы также глубинное строение океанической коры и верхней мантии. В связи с этим, необходимость непрерывных сейсмических наблюдений на океаническом дне признается в настоящее время большинством сейсмологов во всем мире [3, 4, 8, 20, 28–30, 34].

В связи с активным освоением месторождений углеводородов на шельфе и континентальном склоне, прокладкой подводных трубопроводов и кабелей связи донные землетрясения и провоцируемые ими явления становятся чрезвычайно опасными как для самих морских сооружений, так и для экологии региона в целом. Из-за отсутствия морской сейсмологической сети существует недооценка сейсмической активности регионов на акваториях и, как следствие, потенциальной опасности для береговых сооружений и

населенных пунктов. Представляется также важным изучение дебита скважин при воздействии близких и удаленных землетрясений [11, 10]. Поэтому сейсмологическое обеспечение морских нефте- и газодобывающих комплексов и других крупных береговых и подводных сооружений является совершенно необходимым мероприятием.

Создание единой сейсмологической системы регистрации и обработки сигналов землетрясений и их возможных предвестников, объединяющей наземную и морскую сети, давно назрело. Однако по ряду объективных и субъективных причин морская сейсмологическая сеть до настоящего времени не существует [7, 9, 12–14, 29].

Трудности создания морской системы сейсмологического наблюдения, по нашему мнению, состоят в следующем. Поскольку донные станции должны работать в автоматическом режиме, необходимо обеспечить их высокую надежность в течение длительного срока эксплуатации. Станции должны иметь прочные корпуса для защиты аппаратуры от давления на глубине и от ударов о борт судна и о твердое дно при постановке. Практически нет промышленно выпускаемых сейсμοприемников, которые могли бы работать на донных станциях и по своим метрологическим параметрам приближались бы к наземным. Существенные сложности связаны также с обеспечением длительного питания аппаратуры и оперативной передачей сейсмологической информации на берег [2, 4, 7, 14, 22, 29].

Кардинальным решением могло бы быть использование подводных кабелей для питания донных станций, управления их работой и непосредственной передачи информации на берег. Однако стоимость прокладки морских кабелей чрезвычайно высока. Перспективным направлением представлялось использование уже имеющихся трансокеанских донных кабелей связи, которые в настоящее время не используются по прямому назначению (проекты “VENUS”, “POSEIDON”, “GEO-ТОК”). Однако и такие проекты требуют значительных капиталовложений. Кроме того, старые подводные кабели имеют низкую прочность и герметичность при подъеме и повторном использовании. Поэтому стационарные установки морских сейсмографов с кабельной связью с берегом насчитываются единицами и расположены на сравнительно небольшом расстоянии от берега [23, 22, 28].

В течение последних 20 лет появился ряд новых проектов развертывания долговременных кабельных сетей донных океанических обсерваторий. К ним относятся NEPTUNE и VENUS (Канада), MARS и OOI (США), DONET (Япония), MACHO (Тайвань), EMSO (Европа). Следует отметить, что эти проекты рассчитаны на сравнительно небольшое удаление от берега (до 500 км), в основном вблизи океанических склонов. Тем не менее, не прекращаются дискуссии о научной мотивации постановки донных обсерваторий и способах построения подводных исследовательских сетей. Большинство ученых, однако, признает, что создание долговременных донных исследовательских систем означает наступление новой эры в освоении океанов и морей и должно привести к существенному развитию новых технологий и методик и будет способствовать общему развитию науки и образования [19].

Необходимо также отметить методические проблемы, появляющиеся при регистрации сейсмических сигналов на дне. К таким проблемам относятся: возможные искажения сигналов при установке сейсмографа на слоистом мягком дне, помехи от придонных течений, особенности распространения сейсмических сигналов и микросейсм в океанической среде [7, 13, 16–18, 21, 29, 30, 32, 33].

В связи с отсутствием в настоящее время стационарной морской сейсмологической сети, для решения задач морской сейсмологии используются в основном автономные донные сейсмостанции (АДСС). Не решая всех сейсмологических задач, АДСС, тем не менее, имеют ряд преимуществ по сравнению с кабельными станциями. Их высокая мобильность позволяет быстро развертывать сеть станций практически в любом интересующем нас районе Мирового океана. Конфигурация полигона может быть выбра-

на в соответствии с конкретными задачами и имеющимся оборудованием. Состав аппаратуры и параметры сейсмометров могут меняться перед каждой постановкой. Наконец, стоимость АДСС на порядки ниже стоимости кабельных стационарных станций [3, 7, 20, 31].

Развитие морской сейсмологической сети, по нашему мнению, следует начинать по региональному принципу с так называемых “горячих точек”. В первую очередь, это относится к районам освоения морских нефтегазовых месторождений. В России это Баренцево, Печорское и Карское моря на севере, Черное и Каспийское – на юге, Охотское – на востоке. При этом кабельные донные сейсмографы могут быть интегрированы в сеть экологического мониторинга, которая должна развертываться вокруг каждой буровой или добывающей платформы. Кроме слежения за сейсмической активностью, в том числе и вызванной перераспределением тектонических напряжений при добыче, такая сеть может выполнять и другие задачи, например, доразведки месторождения, оценки запасов и др. Размещение пункта сбора данных на платформе обеспечит оперативность передачи информации и необходимые условия для ее обработки [10, 14, 30].

Другие районы преимущественного развертывания локальных сейсмологических сетей должны находиться в области “сейсмических брешей”, где ожидаются сильнейшие морские землетрясения и возможные цунами. Такие районы находятся, например, в Авачинском заливе Камчатки, в южной и центральной частях Курильских островов. В связи со значительным удалением от берегов, здесь следует устанавливать долговременные автономные донные станции с оперативной передачей экспресс-информации. Основными приборами таких станций должны быть широкополосный сейсмограф и сейсмограф сильных движений, устройство оперативного анализа данных и система связи через спутниковый или радио каналы.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ НА ДНЕ

Парк автономных донных сейсмографов, имеющих в настоящее время на вооружении в ряде развитых стран (США, Россия, Япония, Германия, Франция), как правило, предназначен в основном для целей морской сейморазведки, а также для решения ряда специфических сейсмологических задач, например, определения сейсмической активности в некоторых акваториях. В связи с этим, возможности этих сейсмографов ограничены по сравнению с наземными: более узкий частотный диапазон, меньшая чувствительность каналов, срок работы на дне обычно не

превышает двух–трех недель. Поэтому для длительного мониторинга акваторий необходимы качественно другие донные сейсмостанции, близкие по параметрам к наземным.

Ограниченная полоса частот регистрации морских сейсмографов связана, в первую очередь, с отсутствием надежных широкополосных малогабаритных и экономичных сейсмоприемников. В высококачественной наземной аппаратуре в настоящее время применяются сейсмоприемники маятникового типа (фирмы Streckeisen, Швейцария и Guralp, Англия и др.) с полосой от 0.01 до 20 Гц. Они имеют большие габариты и вес, требуют ручной установки, боятся ударов и влаги. В автономных донных сейсмографах применяются в основном малогабаритные датчики с полосой от 3 до 20 Гц. Такие сейсмографы не регистрируют поверхностные низкочастотные волны типа Релея, Лява и низкочастотные колебания дна, вызываемые волнами цунами [3–5, 34].

США и ряд других стран идут по пути адаптации наземных широкополосных сейсмографов к условиям работы на океаническом дне. Этот путь на наш взгляд связан с очень большими сложностями, поскольку условия эксплуатации сейсмографов на суше и на морском дне существенно различаются.

В качестве примера можно привести установку в 2002 г. в заливе Монтерей близ Калифорнии (США) широкополосной донной сейсмостанции МОВВ. Станция была установлена на глубине 1000 м на расстоянии 40 км от берега с помощью корабля и подводного управляемого робота. Кроме трехкомпонентного сейсмометра фирмы GURALP (Великобритания) станция содержит измеритель течений и дифференциальный манометр, что позволяет в принципе изучать влияние течений и океанических волн на помехи регистрации сейсмических сигналов. Сейсмограф оборудован устройствами для дистанционной установки блока датчиков по вертикали и по азимуту. Блок сейсмографа был заглублен в донный массив и соединен кабелем с расположенным на поверхности дна блоком, содержащим сменные накопитель информации и блок питания. Смена этих блоков производится раз в три месяца с помощью подводного робота. В настоящее время станция работает автономно, но в дальнейшем предполагается подключить телеметрический канал в виде кабельной связи или трансляционного буя.

Результаты эксплуатации показали работоспособность этой станции. Были записаны уровни штормовых микросейсм, сигналы от местных, региональных и удаленных землетрясений. Результаты записей сравнивались с записями близких сейсмографов, расположенных на суше и на островах. В то же время был выявлен большой уровень помех, вызванных придонными течениями.

В России широкополосные донные сейсмографы разрабатываются и используются в морских экспедициях, начиная с 1985 г. С их помощью был получен ряд уникальных записей сигналов местных и удаленных землетрясений, микросейсм, сейшевых колебаний, сотрясений от подводных оползней. В сейсмографах ИО РАН в течение более 30 лет применялись электрохимические сейсмоприемники типа ЭХП-17 и др. разработки Института электрохимии РАН [1, 8, 11, 23, 24]. Основные преимущества электрохимических сейсмоприемников — малая чувствительность к ударам (до 30 g), возможность работы при большом наклоне, малые габариты и вес, экономичное питание. Известный недостаток электрохимических сейсмоприемников — некоторая зависимость параметров от температуры, не существенна для донных сейсмографов и в настоящее время успешно преодолевается конструктивным путем.

Для проверки и отработки комплекса широкополосной цифровой донной сейсмостанции ИО РАН и ее программного обеспечения на стенде Лаборатории сейсмометрии Института физики Земли РАН были произведены длительные испытания с марта по август 1994 г. и с мая 1996 г. по апрель 1998 г. В ходе испытаний были зарегистрированы несколько сотен региональных землетрясений, а также несколько телесеизмических событий. При обработке сигналов определялись их энергетические спектры и функции когерентности, характерные периоды и амплитуды колебаний, спектры дневных и ночных шумов.

В результате испытаний было установлено, что разработанная аппаратура и программы (комплекса широкополосной донной станции) обеспечивают регистрацию сейсмических сигналов местных, региональных и удаленных землетрясений в частотном диапазоне от 0.05 до 25 Гц. На более низких частотах (ниже 0.05 Гц) регистрация сигналов была затруднительна из-за высокого уровня внешних помех в районе расположения ИФЗ РАН. Общая мощность потребления по питанию для донного комплекса составляла 0.8 Вт.

Оценку уровня собственных шумов электрохимических сейсмоприемников удалось получить при обработке результатов регистрации микросейсм на дне Атлантического океана (октябрь 1991 г.). Уровень максимума спектра микросейсм на частоте 0.17 Гц составил $3.6 \times 10^{-7} \text{ м/с}^2 (\text{Гц})^{1/2}$. На частотах от 0.03 до 0.12 Гц расположена область минимума спектра с уровнем ниже максимума на 30 дБ. Это оценка суммарного шума: микросейсм, собственных шумов сейсмоприемника и входных каскадов усилителя. Отсюда следует, что уровень спектральной плотности собственных шумов сейсмоприемника в этой области должен быть ниже $10^{-8} \text{ м/с}^2 (\text{Гц})^{1/2}$.

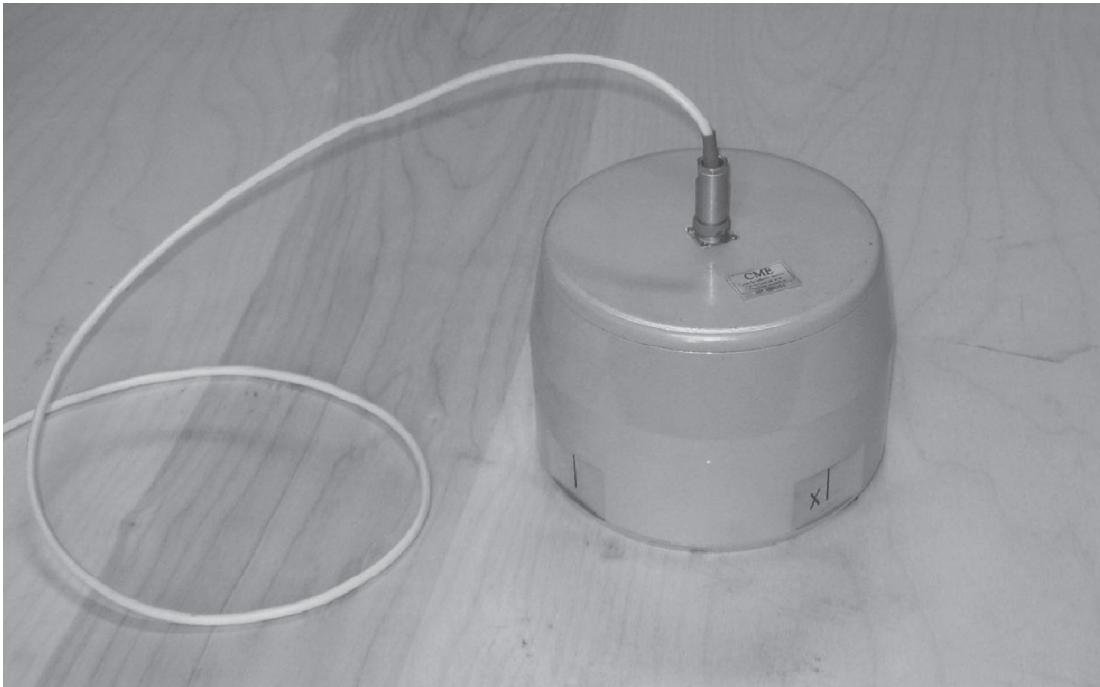


Рис. 1. Молекулярно-электронный трехкомпонентный сейсмоприемник СМЕ-4111-3х.

В последнее время были разработаны новые широкополосные молекулярно-кинетические (разновидность электрохимических) сейсмоприемники типа EP105OBS в фирме EENTEC (США) и типа СМЕ4111 в Центре молекулярной электроники Московского физико-технического института. Эти сейсмоприемники проходили экспериментальную проверку в ОКБ океанологической техники РАН с 2007 по 2014 гг.

На рис. 1 изображен внешний вид трехкомпонентного сейсмоприемника СМЕ4111, а на рис. 2 — амплитудно-частотная характеристика вертикального канала.

Для широкополосных донных сейсмографов ИО РАН и ОКБ ОТ РАН в течение ряда лет разрабатывались специальные цифровые системы сбора и регистрации сейсмических данных. Основные специфические требования к таким системам состоят в необходимости регистрации сигналов в широком частотном и динамическом диапазонах с малыми амплитудными и фазовыми искажениями, обеспечении длительной работы при малых габаритах и весе, высокой стабильности электронных часов, высокой экономичности питания, исключении вибрационных помех (отсутствие двигателей, механических реле, дисковых накопителей). Во всех системах предусматривалось три режима регистрации сигналов: непрерывный, старт-стопный по заданной программе и старт-стопный с управлением по уровню сигнала [3, 7, 9].

Конструкция донного сейсмографа в значительной степени определяет уровень помех от придонных течений, надежность постановки на дно и всплытия, удобство эксплуатации. Схема установки на дно широкополосного автономного сейсмографа ИО РАН современной модификации представлена на рис. 3. Сейсмограф состоит из выносного контейнера сейсмоприемников диаметром 450 мм и приборного контейнера диаметром 650 мм, изготовленных из титана и соединенных многожильным кабель-тросом длиной до 50 м. Общая масса сейсмографа в снаряженном состоянии составляет около 80 кг. В донном кон-

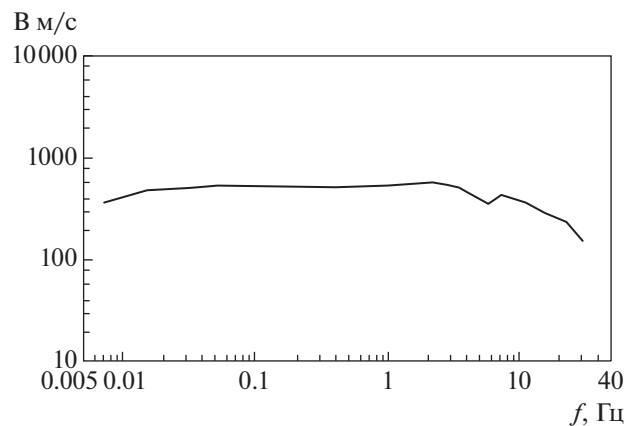


Рис. 2. Амплитудно-частотная характеристика прибора СМЕ-4111-3х, определенная с помощью широкополосного стенда Центра молекулярной электроники МФТИ.

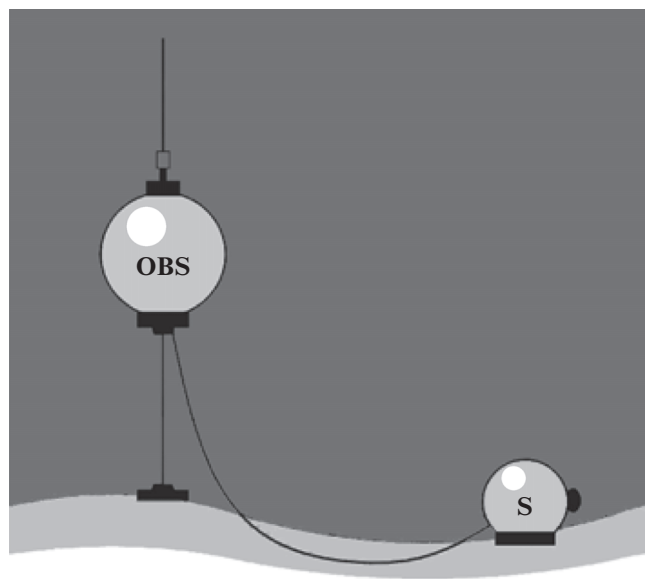


Рис. 3. Эскиз конструкции широкополосного автономного донного сейсмографа ИО РАН.

тейнере находятся вертикальный и два горизонтальных сейсмоприемника электрохимического типа, трехканальный малошумящий усилитель, фильтры ФНЧ, аналого-цифровые преобразователи, экономичный микроконтроллер с буферным устройством памяти и блок ориентации.

В приборном контейнере находятся управляющий микрокомпьютер с твердотельным накопителем, донная часть гидроакустического канала связи, размыкатель балласта, радио- и проблесковый маяки для поиска всплывшей станции и общий источник питания. Приборный контейнер имеет положительную плавучесть и удерживается у дна с помощью балласта и троса длиной около 3 м. Трос необходим для исключения засасывания контейнера мягким грунтом [7, 11, 26].

Постановка сейсмографа на дно на глубины до 5000 м производится в свободном падении путем сбрасывания за борт обеспечивающего судна. Пространственный разнос контейнеров осуществляется с помощью специального крыла, прикрепляемого к кабелю около донного контейнера. Подъем станции производится следующим образом. По гидроакустическому сигналу от судна, принимаемому через гидроакустическую антенну и блок гидроакустики, срабатывает размыкатель балласта, и станция всплывает.

В целом конструкция широкополосного донного сейсмографа ИО РАН обеспечивает достаточную надежность и удобство эксплуатации при работе в автономном режиме. Вместе с тем, аппаратура контейнера сейсмоприемников функционально представляет собой законченный комплекс и может присоединяться к кабельной ли-

нии связи и питания для работы в стационарном режиме.

В 2014 г. в ИО РАН с участием ОКБ ОТ РАН и фирмы “Геонод” была разработана и испытана кабельная донная сейсмостанция с частотным диапазоном от 0.01 до 500 Гц. Станция предназначена для работы в составе нефтедобывающих платформ и должна служить для контроля уровня сейсмической активности в районе месторождения и мониторинга процесса производства. Станция состоит из донной и береговой частей, соединенных многожильным кабель-тросом. Донная часть содержит два тракта регистрации – низкочастотный (0.01–20 Гц) и высокочастотный (1–500 Гц). Следует отметить, что задачи низкочастотного и высокочастотного трактов несколько различны. В низкочастотном диапазоне должна производиться непрерывная регистрация сигналов землетрясений, микросейсм и техногенных шумов. Объем памяти и пропускная способность канала связи здесь могут быть относительно небольшими. В высокочастотном тракте при том же динамическом диапазоне объем информации значительно больше (примерно в 10 раз), что может создавать трудности при регистрации, передаче и обработке данных. Вместе с тем, высокочастотный тракт может использоваться в специфических режимах: старт-стопном, с сжатым динамическим диапазоном, только при активном мониторинге и т.д. [12]. Внешний вид кабельной донной сейсмостанции приведен на рис. 4.

Натурные морские испытания донной станции проводились на Черноморском полигоне Южного отделения ИО РАН (г. Геленджик, Голубая бухта) в конце августа – начале сентября 2014 г. Целью морских испытаний была проверка работоспособности станции на дне, отработка методов постановки кабельных станций с помощью малых плавсредств, отработка калибровки канала регистрации с помощью электроакустических источников сигналов, а также регистрация местных сейсмических явлений. Кроме кабельной станции в непосредственной близости от нее для контроля были установлены три самовсплывающие донные сейсморазведочные станции разработки ООО “Геонод”. Результаты испытаний подтвердили основные технические характеристики станции.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕГИСТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДОННЫМИ СЕЙСМОГРАФАМИ

В ИО РАН в течение 30 лет проводятся записи сигналов землетрясений и микросейсм на дне акваторий в широкой полосе частот (0.003–20 Гц). Ниже приводятся некоторые примеры.

В октябре 1991 г. во время 5-го рейса НИС “Академик Иоффе” была проведена донная сей-



Рис. 4. Внешний вид корпуса кабельной донной сейсмостанции КДСС-1 на постаменте в испытательном бункере ОКБ ОТ РАН.

смическая регистрация в центральной Атлантике южнее Азорских островов. Сейсмограф был установлен на глубине 1660 м на удалении около 10 км к востоку от оси рифтовой долины Срединно-Атлантического хребта и примерно в 23 км северо-восточнее места пересечения долины трансформным разломом Океанографер. Было зарегистрировано удаленное (9800 км) землетрясение с магнитудой 6.7, которое произошло 19 октября в 21 час 23 мин 17 с в Гималаях. На рис. 5 представлена сжатая во времени трехкомпонентная запись этого землетрясения. Длительность землетрясения составляла 10 с, а запись сигнала продолжалась около двух часов из-за дисперсии волн. На рис. 6 представлена развернутая запись волны Лява этого землетрясения с отмеченными максимумами первой и второй гармоник. Анализ дисперсионных кривых групповых скоростей этих волн выявил неизвестные ранее для этого района волноводы на глубинах от 60 до 80 км и от 160 до 200 км [8, 23].

В северо-восточной части континентального склона Черного моря в районе строительства подводного газопровода Россия–Турция и нефтеналивного терминала у г. Новороссийск с 1999 по 2001 г. ИО РАН был выполнен комплекс геолого-

геофизических исследований. В результате донных сейсмологических наблюдений было зарегистрировано в общей сложности свыше 1200 сейсмических событий. Из них подавляющее большинство (90%) – это местные микроземлетрясения и толчки с магнитудой меньше 1–2, которые не фиксируются близлежащими береговыми сейсмостанциями. На рис. 7 приведена запись одного из местных землетрясений с магнитудой $M = 2.5$, полученной донным сейсмографом в этом районе [25].

Для проверки стабильности работы широкополосный донный сейсмограф ИО РАН в течение ряда лет испытывался в специальном подземном бункере на территории ОКБ ОТ РАН. В бункере поддерживалась температура около $+5^{\circ}\text{C}$ и влажность около 80%. В результате были записаны уровни местных сейсмических шумов, региональные сейсмические события и ряд удаленных землетрясений [5, 8].

СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОЙ СВЯЗИ С ДОННОЙ СТАНЦИЕЙ

Существенной проблемой автономных донных станций является обеспечение оперативной

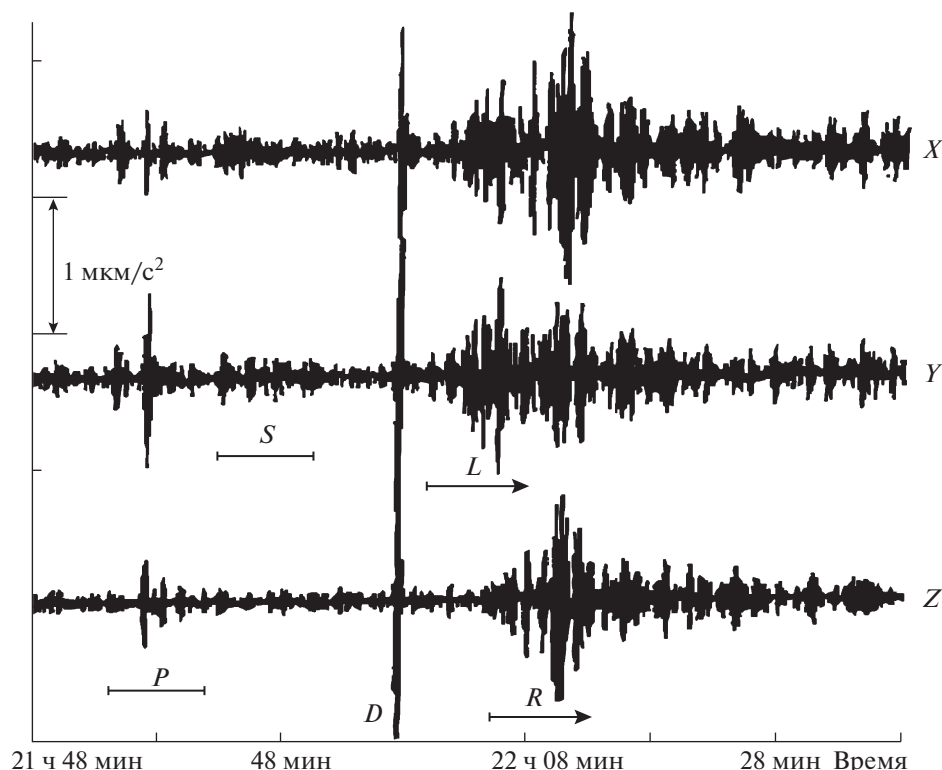


Рис. 5. Сжатая запись удаленного землетрясения 19.10.1991 г. ($L = 9800$ км, $M = 6.7$), полученная на широкополосном донном сейсмографе ИО РАН в районе Азорских островов. X, Y, Z – оси координат, P, S – первичная и вторичная фазы сигнала, L, R – волны Лява и Релея соответственно, D – импульсный сигнал неизвестной природы.

передачи информации на берег. Обычная гидроакустическая связь действует на небольшие расстояния, требует больших затрат энергии, подвержена помехам реверберации и др. Разработаны также методы, основанные на использовании всплывающих модулей, которые передают затем экспресс-сигнал через спутниковый или радиоканал. Однако в донных сейсмографах эти методы пока не применялись.

В настоящее время в автономных системах предупреждения о цунами применяются поверхностные ретрансляционные радиобуи, связанные гидроакустическим каналом с донной станцией (система DART, США и др.). Однако такая система имеет ряд недостатков. Используемые буи средних размеров (высота надводной части 2.5 м, подводной – 1.8 м) подвержены интенсивному воздействию морских волн, что снижает их срок службы и надежность каналов связи. Потери таких буев происходят в основном из-за обрыва буйрепа вследствие усталостных нагрузок. В то же время в практике морских работ известно применение долговременных буев других конструкций [6].

В 70–80-х годах прошлого века в США и СССР были разработаны и использовались для научных экспериментов так называемые стабилизированные буи. Такой буй представляет собой в первом приближении заякоренную вертикальную трубу

длиной около 50 м, погруженную на три четверти в воду. Вследствие высокой остойчивости и малой парусности такой буй даже в сильный шторм имеет малый наклон (единицы градусов) и малые вертикальные перемещения. Благодаря особой системе крепления стабилизированный буй не вращается вокруг оси, что позволяет соединять его кабелями с донными станциями. Один из таких буев был установлен в Южном отделении ИО РАН и находился в эксплуатации в течение 10 лет (1974–1984 г.) [10].

Известны конструкции долговременных буев с использованием промежуточной притопленной плавучести (веха Фруда). Такая заякоренная плавучесть находится на глубине 50–100 м, которую не достигают поверхностные волны. Поэтому динамические нагрузки на буйреп практически отсутствуют. К плавучести прикрепляется с помощью гибкой упругой связи стационарный или подвсплывающий поверхностный буй. Вследствие относительно малых размеров буя в этом случае он не оказывает существенных нагрузок на элемент связи, что обеспечивает большую долговечность конструкции (около 10 лет).

В ИО РАН по Договору с МЧС РФ в 1995–1997 гг. была разработана донная обсерватория для регистрации ряда параметров придонных вод и изучения возможных предвестников сильных морских

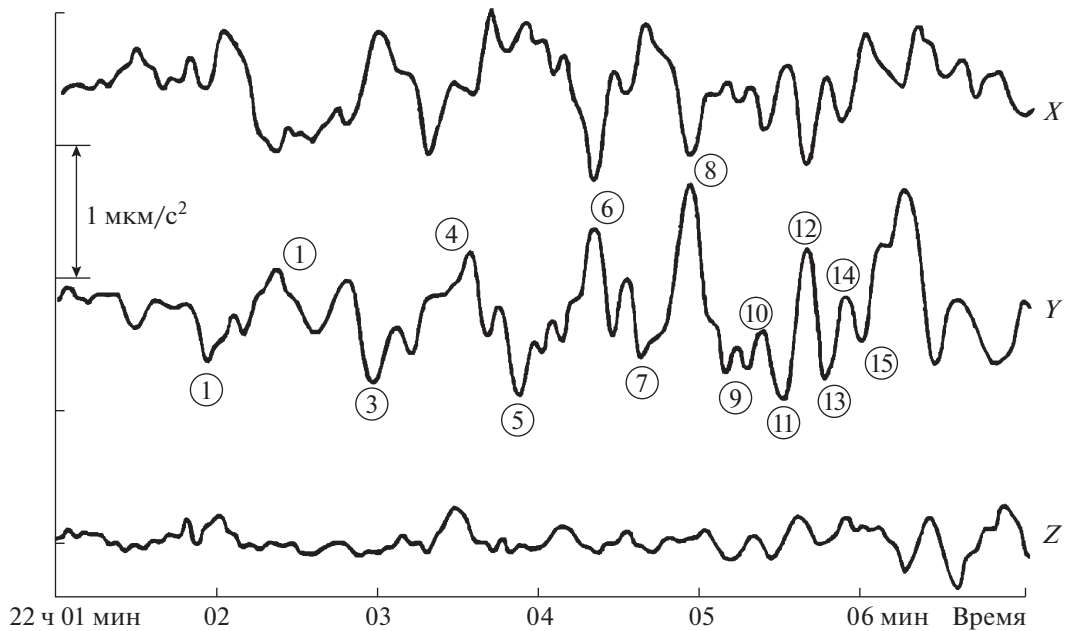


Рис. 6. Развернутая запись (по рисунку 5) волны Лява землетрясения от 19.10.1991 г.
X, Y, Z – оси координат, цифры в окружностях обозначают максимальные значения первой гармоники этой волны.

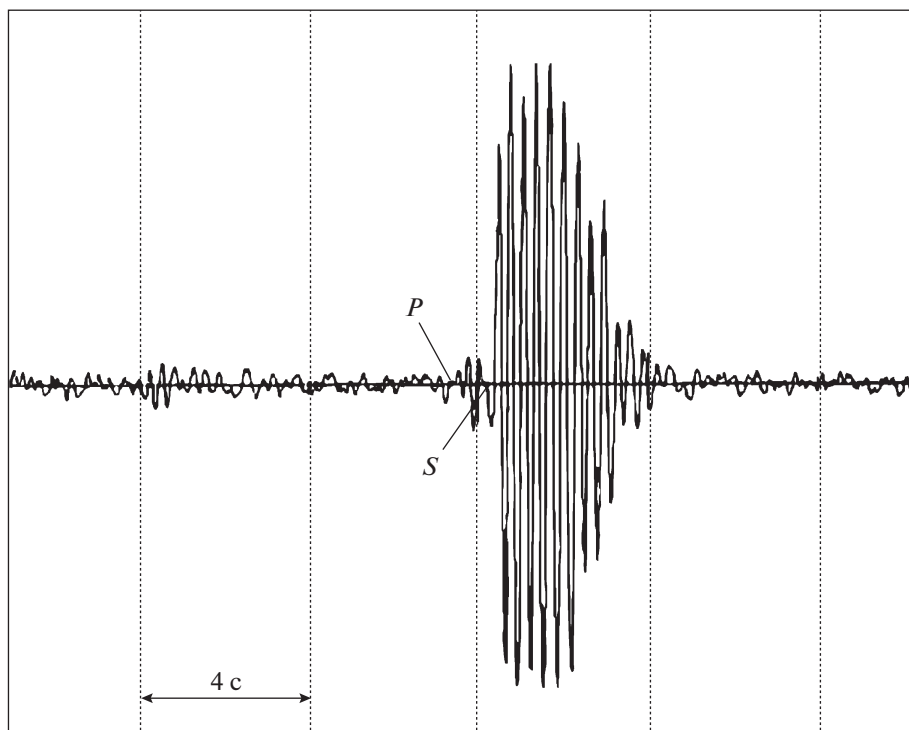


Рис. 7. Запись местного землетрясения в районе Кавказского побережья Черного моря ($L = 11$ км, $M = 2.5$).

землетрясений. Обсерватория обеспечивала измерение температуры воды, давления, скорости течений, скорости звука, спектральный состав света в видимой области (рис. 8).

Обсерватория состояла из донного измерительного комплекса, соединенного кабелем с притопленным бумом, в котором находились источники питания, и поверхностного ретрансля-

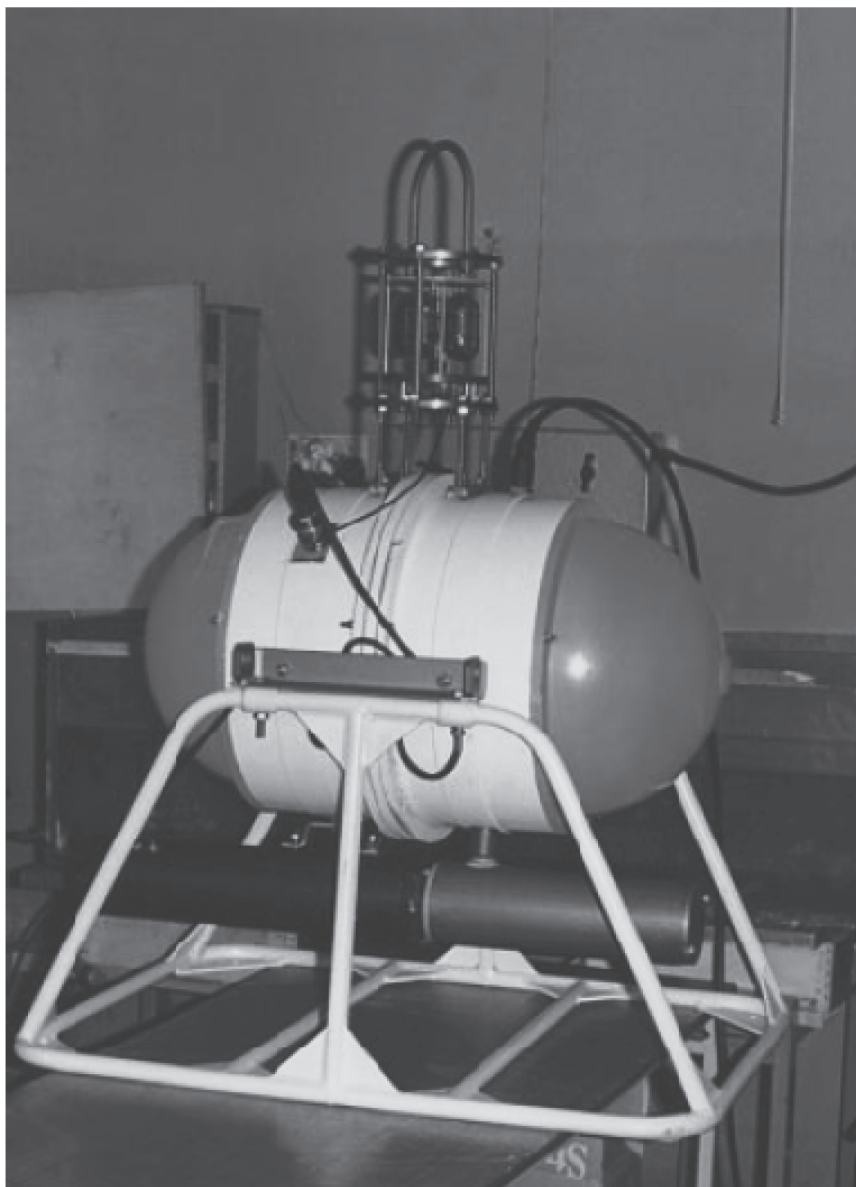


Рис. 8. Внешний вид донной обсерватории ИО РАН.

ционного радиобуя. Управление работой обсерватории и прием измеренной информации производились на расстоянии 10 км с помощью цифрового радиоканала, работающего в полудуплексном режиме. Обсерватория прошла успешные испытания в Авачинском заливе Камчатки и работала с 1995 по 1999 гг. [2, 10].

ТЕХНОЛОГИЯ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА И ОБНАРУЖЕНИЯ ВОЛН ЦУНАМИ С ПОМОЩЬЮ АВТОНОМНЫХ ДОННЫХ СЕЙСМОГРАФОВ

В настоящее время используется ряд методов контроля и предупреждения об опасности цунами. Один из методов основан на том, что скорость

распространения сейсмических волн много больше, чем скорость волны цунами. С помощью наземных сейсмографов определяются координаты гипоцентра морского землетрясения и его магнитуда и по ряду признаков оценивается возможность появления цунами. Однако такой метод крайне неточен, так как на значительных расстояниях (больших чем размеры очага) невозможно точно определить параметры деформации дна, а существенная волна цунами возникает только при вертикальных или наклонных его движениях [6].

Другой метод основан на использовании глубоководных регистраторов волн цунами, установленных вдали от побережья (DART, США; JAMSTEC, Япония). Такие регистраторы производят измерение давления или толщины водного

слоя и должны иметь очень высокую относительную чувствительность. Высота волны цунами в открытом океане в 10 см может многократно увеличиваться на мелководье и представлять существенную опасность. Другой сложностью является необходимость выделения слабого сигнала от волн цунами на фоне интенсивных помех от морских длинных волн, ветровых нагонов и изменений атмосферного давления. Например, в системе DART (США) выдача сигнала предупреждения обеспечивается только через 30 мин после момента землетрясения. При автономной постановке таких регистраторов возникают те же трудности с их питанием и передачей информации, что и для автономных сейсмографов [6].

Имеется принципиальная возможность обнаружения волн цунами с помощью спутниковых наблюдений. Однако для обеспечения требуемого разрешения по высоте и времени последовательного сканирования водной поверхности не хуже 5–10 минут необходимо запустить на орбиты несколько десятков или сотен спутников-альтиметров.

Нами предлагается технология длительного сейсмологического мониторинга на дне акваторий и обнаружения волн цунами, основанная на применении системы широкополосных автономных донных сейсмографов, снабженных чувствительными датчиками и датчиками сильных движений и ретрансляционными буйами для передачи экспресс-информации. Для создания системы мониторинга необходимо установить в районах ожидаемых сильных землетрясений несколько долговременных автономных донных сейсмографов (около десяти) на расстояниях порядка 100 км друг от друга. Эти станции будут регистрировать в широкой полосе частот сейсмические события непосредственно в зоне ожидаемого землетрясения.

В штатном режиме система будет накапливать информацию о сейсмических событиях, предшествующих сильному землетрясению. Эта информация представляет большую ценность для фундаментальных исследований сейсмических процессов в наиболее сейсмоактивных районах — зонах субдукции, структурных исследований строения коры океанического типа и верхней мантии (до глубин 200–300 км), изучения механизмов генерации и распространения микросейсм в океанической среде, томографии океана и др.

В случае катастрофического землетрясения (с магнитудой около 8 и более) донные станции с помощью датчиков сильных движений регистрируют элементы движения дна и с помощью ретрансляционных буйев передают экспресс-информацию через спутниковые или радиоканалы связи. Такая система должна обеспечивать надежную регистрацию и классификации цунамигенных зем-

летрясений и давать своевременное (в течение 5–10 минут) предупреждение об опасности.

Стоимость такой системы мониторинга будет намного (в десятки раз) ниже стоимости кабельных донных сейсмологических систем. Предварительные оценки показывают, что при малосерийном производстве одна автономная донная сейсмостанция для предлагаемой системы мониторинга должна стоить не более 10 млн. рублей. Ниже приводятся примерные технические характеристики донного сейсмографа для системы мониторинга.

Для чувствительных сейсмических каналов:

Частотный диапазон:	0.01–20 Гц
Динамический диапазон:	120 дБ
Порог чувствительности:	10^{-8} м/с

Для канала сильных движений:

Динамический диапазон:	3 г
Порог чувствительности:	10^{-4} м/с ²
Дальность гидроакустической связи:	до 10 км
Глубина постановки сейсмографа:	до 5 км
Вес сейсмографа (на воздухе):	до 100 кг
Время формирования и посылки экспресс-сигнала:	до 5 мин
Время непрерывной работы на дне без смены источников питания	3–6 мес.

На рис. 9 приведен эскиз конструкции разрабатываемой автономной донной сейсмической станции для длительного мониторинга. Донный сейсмограф, включающий сейсмоприемники, цифровой регистратор, буферную память и управляющий микропроцессор, располагается на дне и соединяется кабель-тросом с притопленным буйем. Притопленный буй, содержащий центральное устройство управления станцией и источники питания, располагается на глубине около 100 м вне зоны действия поверхностных морских волн и ветровых течений. Буй удерживается в притопленном состоянии за счет балласта, который может отсоединяться по команде. Ретрансляционный радиобуй, содержащий каналы связи с берегом и обеспечивающим судном, приемник сигналов точного времени, передатчик экспресс-информации спутниковой связи и волновой источник питания, находится на водной поверхности и соединяется кабель-тросом с притопленным буйем.

Для повышения надежности при чрезвычайных ситуациях притопленный буй и радиобуй должны быть снабжены резервными источниками питания и каналами помехоустойчивой гидроакустической связи между элементами станции и обеспечивающим судном. Смена резерв-

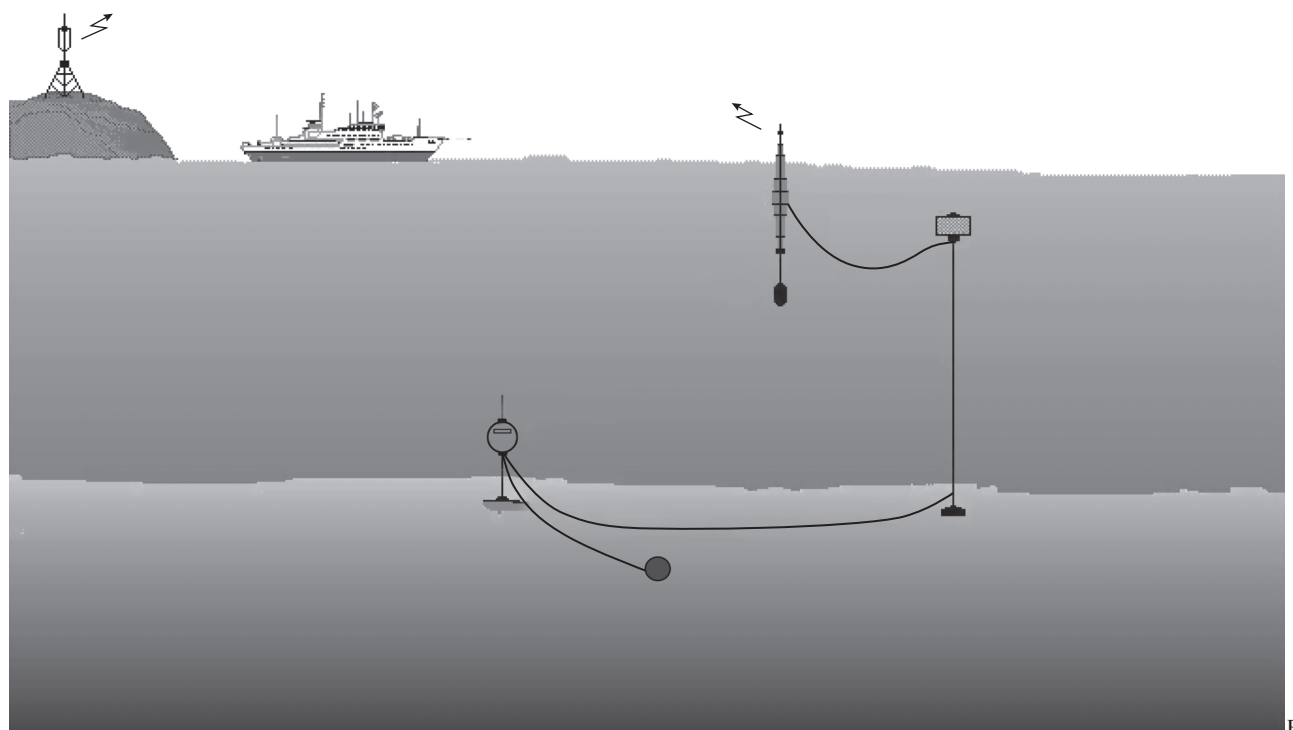


Рис. 9. Эскиз широкополосной автономной донной сейсмической станции с оперативной передачей данных.

ных источников питания должна осуществляться с помощью обеспечивающего судна примерно раз в несколько лет.

ВЫВОДЫ

1. Подавляющее большинство всех землетрясений происходит под дном океанов и морей, однако морской стационарной сейсмологической сети практически не существует. Наземные сейсмографы регистрируют сигналы удаленных морских землетрясений с существенными искажениями, а сигналы слабых землетрясений не регистрируются вовсе. По этой причине не удастся адекватно оценивать геотектонические процессы, происходящие в недрах Земли в их единстве и многообразии. Недостаточно исследованы также глубинное строение океанической коры и верхней мантии, механизмы возбуждения цунами и других сейсмических явлений. Актуальными проблемами остаются краткосрочное прогнозирование сильных морских землетрясений и предупреждение опасности цунами. Поэтому представляется совершенно необходимым создание единой сейсмологической сети на суше и на море.

2. Регистрация сейсмических сигналов на дне акваторий существенно отличается от наземной. Основные отличия состоят во влиянии водного слоя и обводненного слоя осадков, способах взаимодействия корпуса сейсмографа с мягким

дном, возбуждении помех придонными течениями. Имеются также технические трудности. Донные станции работают в автоматическом режиме, поэтому необходимо обеспечить их высокую надежность. Станции должны иметь прочные корпуса для защиты от давления на глубине и от ударов при постановке. Существенные сложности связаны также с обеспечением длительного питания автономной аппаратуры и передачей сейсмологической информации на берег. Кардинальным решением могло бы быть использование для этих целей подводных кабелей, однако стоимость прокладки морских кабелей чрезвычайно высока, а надежность при повторном использовании старых кабелей низка.

3. В связи с отсутствием в настоящее время стационарной морской сейсмологической сети, для решения задач морской сейсмологии используются в основном автономные донные сейсмостанции. Их высокая мобильность позволяет быстро разворачивать сеть станций практически в любом интересующем районе Мирового океана. Конфигурация полигона может быть выбрана в соответствии с конкретными задачами и имеющимся оборудованием. Стоимость АДСС во много раз ниже стоимости кабельных стационарных станций. Достижения современной науки и техники в области морского приборостроения позволяют преодолеть многие трудности по разработке и эксплуатации автономных донных сейсмо-

графов. Современные электронные элементы измерительной и вычислительной техники и устройства памяти позволяют обеспечить длительный срок работы автономных устройств на дне без смены источников питания. Известны конструкции долговременных буев, с помощью которых можно обеспечить устойчивую связь с автономной станцией через радио или спутниковые каналы. В связи с изложенным, создание стационарной морской сейсмологической сети по своим метрологическим параметрам приближающейся к наземной может быть выполнено, по нашему мнению, на основе долговременных автономных донных сейсмографов в обозримые сроки при приемлемых экономических затратах.

Авторы благодарят коллектив ОКБ океанологической техники РАН за активное участие в разработке и модернизации широкополосных автономных донных сейсмографов и экипажи научных судов РАН, с помощью которых были получены уникальные экспериментальные результаты по регистрации сейсмических сигналов на дне, частично приведенные в статье.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИО РАН № 0149-2014-0025, программы ФНИ, раздел VIII. Науки о Земле-75.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов О.К., Графов Б.М.* Электрохимические приемники механических колебаний и возможность их использования в сейсмометрии // Сейсмические приборы. 1978. Вып. 11. С. 203–208.
2. *Гаврилов В.А., Левченко Д.Г., Утяков Л.Л., Шехватов Б.В.* Гидрохимическая донная станция для регистрации краткосрочных предвестников морских землетрясений // Океанология. 2000. Т. 40. № 3. С. 456–467.
3. *Зубко Ю.Н., Левченко Д.Г., Леденев В.В., Парамонов А.А.* Современные донные станции для сейсмозаземки и сейсмологического мониторинга // Научное приборостроение. 2003. Т. 13. № 4. С. 70–82.
4. *Ильинский Д.А., Алешин И.М., Бургучев С.С. и др.* Опыт создания портативной автономной сейсмологической станции, работающей по протоколу реального времени // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47. № 1. С. 52–67.
5. *Кузин И.П., Левина В.И., Левченко Д.Г. и др.* О скоростях волн Р и S в зоне Беньофа Южной Камчатки // Физика Земли. 2004. № 2. С. 3–14.
6. *Левин Б.В., Носов М.А.* Физика цунами. М.: Янус, 2005. 360 с.
7. *Левченко Д.Г.* Особенности конструирования широкополосных донных сейсмографов // Океанология. 2001. Т. 41. № 4. С. 613–626.
8. *Левченко Д.Г.* Результаты регистрации широкополосных (0.003–10 Гц) сейсмических сигналов на морском дне // Океанология. 2002. Т. 42. № 4. С. 620–631.
9. *Левченко Д.Г., Мацевский С.А.* Широкополосные цифровые донные сейсмостанции // Сейсмические приборы. 2000. № 33. С. 52–68.
10. *Левченко Д.Г., Леденев В.В., Ильин И.А., Парамонов А.А.* Длительный сейсмологический мониторинг морского дна с использованием автономных донных станций // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 1. С. 5–22. doi 10.3103/S0747923910010019
11. *Левченко Д.Г., Кузин И.П., Сафонов М.В. и др.* Опыт регистрации сейсмических сигналов с использованием широкополосных электро-химических сейсмоприемников // Сейсмические приборы. 2009. Т. 45. № 4. С. 5–25.
12. *Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А. и др.* Опыт разработки и испытания комплексной кабельной донной сейсмостанции // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 39–51.
13. *Леденев В.В., Левченко Д.Г., Носов А.В.* Анализ методов построения автоматических многоцелевых донных станций // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. С. 1–8. Эл. публ.: <http://www.ngtp.ru/rub/12/25>.
14. *Лобковский Л.И., Левченко Д.Г., Леонов А.В., Амбросимов А.К.* Геоэкологический мониторинг морских нефтегазоносных акваторий. М.: Наука, 2005. 326 с.
15. *Соловьев С.Л.* История и перспективы развития морской сейсмологии. М.: Наука, 1985. 152 с.
16. *Araki E., Suyehiro K.* Long period seismic noise in deep ocean boreholes // Proc. OHP/ ION Joint Symp. Japan, 2001. P. 112–114.
17. *Bradner H., de Jerphanion L.G., Langlois R.* Ocean microseism measurements with a neutral buoyancy free-floating midwater seismometer // Bull. Seism. Soc. Amer. 1970. V. 60. № 4. P. 1139–1150.
18. *Duennebier F.K., Blackinton G., Sutton G.N.* Current generated noise recorded on ocean bottom seismometer // Mar. Geophys. Res. 1981. V. 5. № 1. P. 109–115.
19. *Favali P., Beranzoli L., De Santis A.* (Eds). Seafloor Observatories. A New Vision of the Earth from the Abyss. Springer, Praxis Publishing, Chichester, UK, 2015. 672 p.
20. *Jacobson R.S., Dorman L.M., Purdy G.M. et al.* Ocean bottom seismometer facilities available // EOS. 1991. # 12. P. 506–515.
21. *Kasahara J., Koresava S., Nagumo S.* Experimental results of vortex generation around ocean – bottom seismograph due to bottom current // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1980. V. 55. P. 169–182.
22. *Kasahara J., Toshinori S.* Broadband seismic observation in VENUS project // Int. Worksh. Sc. Use Subm. Cabl. Okinawa, Japan. 1997. P. 126–130.
23. *Levchenko D.G., Soloviev S.L., Son'kin A.V., Voronina E.V.* Recording of ocean-bottom seismic noise and of a strong earthquake in the Himalayas by broadband digital OBS installed on the Mid-Atlantic Ridge // Physics Earth and Planetary Interiors. 1994. V. 84. P. 305–320.
24. *Levchenko D.G., Timoshuk E.P., Grafov B. et al.* The comparative analysis various seismic sensors in structure digital broadband seismic station // Proceeding of the 4th International Workshop on Electrochemical Flow Measurements. Fundamentals and Applications. Lanstein, Germany. 1996. V. 17. P. 1–10.

25. *Levchenko D.G., Kuzin I.P.* General Seismicity of Black Sea and Recent Seismic Investigation in this Region // *The Black Dynamics, Ecology and Conservation* / Eds. Ryann A.L., Perkins N.J. N-Y: Nova Press, 2011. P. 208–225.
26. *Levchenko D.G., Kuzin I.P., Lobkovsky L.I., Roginsky K.A.* Peculiarity of Research of Seismicity at an Oceanic and Sea Bottom // *Horizons in Earth Science Research*. 2014. Chapter 8. V. 11. P.239–278 / Eds. Benjamin Veress B., Szigethy J. N-Y: Nova-Publishing, 2014. P. 239–278.
27. *Mikada H., Hirata K., Matsumoto H. et al.* Scientific results from underwater earthquake monitoring using cabled observatories // *The 3rd Intern. Worksh.: Scientific Use of Submarine Cables and Related Technologies*, 2003. P. 3–7.
28. *Montagner J.P., Karchewski J.F., Romanovicz B. et al.* The french pilot experiment OFMSISMOBS: first scientific results on noise level and event detection // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1994. V. 84. P. 321–336.
29. *Romanovich B., Stakes D., Dolenc D. et al.* The Monterey Bay broadband ocean bottom seismic observatory // *Ann. Geophys.* 2006. V. 49. № 2/3. P. 607–621.
30. *Shiobara H., Moshisuki M., Shinohara M. et al.* Long term OBS array observations – development and preliminary result // *Proc. OHP/ ION Joint Symp. Japan*. 2001. P. 106–108.
31. *Sutton G.H., Duennebieer F.K.* Optimum design of ocean bottom seismometers // *Mar. Geophys. Res.* 1987. V. 9. P.47–65.
32. *Trehu A.M.* A note on the effect of bottom currents on an ocean bottom seismometer // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1985. V. 75. № 4. P. 1195–204.
33. *Trehu A.M.* Coupling of ocean bottom seismometers to sediment: results of tests with U.S. Geological Survey ocean bottom seismometer // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1985. V. 75. № 1. P. 271–289.
34. *Wielandt E., Steim J.M.* A digital very-broad band seismograph // *Annales Geoph.* 1986. V. 4. P. 227–232.

Problems and Prospects of Creating a Global Seismological Network of Land and Ocean

D. G. Levchenko, I. P. Kuzin, L. I. Lobkovsky, K. A. Roginsky

The advantages and the difficulties of seismic signals registration at the ocean bottom are discussed. The necessity of creation of long-term seismic monitoring systems in the areas of industrial development of the shelf and the continental slope and in areas of high seismic and tsunami hazards is justified. The results of the use of broadband bottom seismographs in the expeditions of the P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS are described. The autonomous broadband bottom seismographs with the operational connection via satellite or radio channels are offered for creation of global marine seismological network.