

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

УДК 550.34.03

© Ю. Н. Зубко, Д. Г. Левченко, В. В. Леденев, А. А. Парамонов

**СОВРЕМЕННЫЕ ДОННЫЕ СТАНЦИИ
ДЛЯ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ
И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА**

В статье рассматриваются научно-технические проблемы, с которыми сталкиваются конструкторы донных станций для сейсмологических исследований, и современные пути их решения. На примере разработки станции АДСС-1 в сравнении с существующими станциями прослеживаются тенденции в этой области прибор- и аппаратостроения.

ВВЕДЕНИЕ

Морские сейсмологические исследования находят в настоящее время все более широкое применение в связи с активным промышленным освоением прибрежных районов акваторий. Морская сейсморазведка является основным средством поиска нефти и газа на шельфе и континентальном склоне океанов и морей. Однако строительство и эксплуатация газо- и нефтедобывающих комплексов и средств их транспортировки требуют проведения тщательного сейсмологического мониторинга с целью исследования естественной сейсмической активности региона.

Вследствие особенностей тектонического строения Земли большинство сейсмических событий (до 80 %) происходит под дном морей и океанов [1]. Многие крупные морские месторождения нефти и газа находятся в районах повышенной сейсмической активности (Каспийское море, шельф острова Сахалин, район Персидского залива и др.). Однако даже в районах с относительно невысокой средней сейсмической активностью необходимо проводить тщательное сейсмическое микрорайонирование для выявления активных тектонических разломов Земной коры, грязевых вулканов и других опасных для строительства зон. Кроме того, в ходе эксплуатации месторождения вследствие извлечения больших объемов нефти и газа нарушается естественное тектоническое равновесие в земной коре, что может привести к активизации сейсмических процессов. Примером могут служить разрушительные землетрясения возле Нефтегорска на Сахалине и в районе Газли в Средней Азии.

Следует отметить, что даже сравнительно небольшие землетрясения (порядка 2–3 баллов) могут вызвать из-за разжижения донных осадков сход подводных лавин и оползней, что представляет серьезную опасность для морских промыш-

ленных объектов — нефтегазовых платформ, донных трубопроводов и электрических кабелей.

В связи с изложенным к автономным донным сейсмостанциям, используемым как для целей сейсморазведки, так и для сейсмологических исследований, предъявляется в настоящее время ряд жестких требований [2]. Наряду с достаточно высокими метрологическими характеристиками эти станции должны обеспечивать легкость обслуживания и низкую стоимость эксплуатации. Для повышения производительности работ при сейсморазведке сейчас используются одновременно несколько десятков донных сейсмостанций. В связи с высокой стоимостью судового времени обслуживающих судов (около 10–30 тыс. долларов в сутки) время подготовки, спуска и подъема таких станций должно быть сокращено до минимума. При проведении сейсмологического мониторинга на значительных площадях морского дна требуется многократная постановка и подъем автономных донных сейсмостанций (АДСС), что также связано с расходом судового времени.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К АДСС

Основные требования, предъявляемые к современным многоцелевым донным сейсмостанциям, можно сформулировать следующим образом:

- 1) достаточно высокая чувствительность и большой динамический диапазон регистрации сигналов;
- 2) широкий частотный диапазон регистрации, с возможностью его перестройки;
- 3) заданная автономность работы на дне при регистрации в непрерывном или старт-стопном режимах;
- 4) высокая помехоустойчивость к воздействию внешних помех (температуры, придонных течений и др.);
- 5) легкость изменения основных характери-

стик станции (частотного диапазона, числа каналов регистрации и др.);

6) устойчивое сцепление станции с дном, надежная работа в наклонном положении станции и др.;

7) легкость постановки на дно и подъема станции на поверхность;

8) надежность и легкость обнаружения станции на дне и на поверхности акватории;

9) быстрота регенерации станции (считывание зарегистрированных данных и подготовка к новой постановке, смена питания);

10) малые габариты и вес;

11) устойчивость к ударам о дно и борт судна.

Следует отметить, что повышение реальной чувствительности донных сейсмостанций прямо связано с увеличением производительности сейсморазведочных работ. Длина профилей в современной морской сейсморазведке, вдоль которых располагаются донные станции, достигает 200–300 км. Для уверенной регистрации сейсмических сигналов на таких расстояниях требуется достаточная мощность излучателей зондирующих сигналов и высокая чувствительность сейсмостанций. При проведении сейсмологического мониторинга необходимо регистрировать слабые и микро землетрясения для уточнения сейсмической активности региона, обнаружения активных тектонических разломов и т. д. Оценки показывают, что порог чувствительности донных сейсмостанций должен обеспечиваться на уровне 10^{-7} В·с/м.

Динамический диапазон донной сейсмостанции определяется возможными изменениями уровня входных сигналов. Минимальными сигналами следует считать естественный уровень микро-сейсм на дне, который составляет в среднем около 10^{-7} м/с на частоте 5 Гц. В качестве максимального можно принять сигнал, который преобразуется стандартными электромагнитными сейсмоприемниками без существенных искажений (около 0.05 м/с на частоте 5 Гц), что соответствует сигналу от сильного землетрясения с магнитудой 7 на расстоянии от гипоцентра около 50 км [3]. Таким образом, динамический диапазон измеряемых сигналов составляет около 115 дБ.

Частотный диапазон регистрации сейсмостанций выбирается в зависимости от требования обеспечения должной глубинности и разрешающей способности сейсморазведки и требования уверенной регистрации слабых землетрясений при сейсмологическом мониторинге. Частотный диапазон большинства современных многоцелевых сейсмостанций составляет от 3–5 до 200–300 Гц. Поскольку частотный диапазон регистрации связан с объемом требуемой памяти, а значит, и со временем автономной работы на дне, в современных станциях верхняя граница частотного диапа-

зона обычно может изменяться от 20–30 до 200–300 Гц.

Под автономностью работы донной сейсмостанции обычно понимается время непрерывной регистрации сигналов. Это время определяется тремя основными факторами: емкостью источника питания, объемом памяти накопителя сигналов и стабильностью донных часов.

Современные технологии морских сейсморазведочных работ требуют обеспечения времени непрерывной регистрации на дне от нескольких дней до двух–трех недель. Это связано с неустойчивостью морской погоды и возможностью непредвиденных задержек работ. При проведении сейсмологического мониторинга время непрерывной регистрации землетрясений на дне должно быть как можно больше (до 1 месяца). Задача в этом случае облегчается тем, что верхнюю границу частотного диапазона можно уменьшить до 20–30 Гц, и требования к стабильности донных часов значительно снижаются.

Время нахождения сейсмостанции на дне можно существенно увеличить, если обеспечить ее старт-стопный режим работы. При этом снижается средняя скорость заполнения памяти и потребление энергии питания. Старт-стопный режим работы обеспечивается либо по жесткому расписанию, либо путем непрерывного анализа принимаемых сигналов и регистрации только определенных их видов. Следует отметить, что при старт-стопном режиме регистрации непрерывно работают донные часы и управляющее устройство сейсмостанции.

Требования к стабильности часов современных донных автономных сейсмостанций достаточно высоки. Эти требования связаны с необходимостью согласованной обработки записей со всех донных станций. Для сейсморазведочной станции при обеспечении высокой разрешающей способности погрешность хода часов за 10 суток не должна превышать единиц миллисекунд. В случае регистрации землетрясений на дне требуется привязка различных их фаз к Единой мировой системе времени. Временная погрешность часов в этом случае должна составлять не более 100 миллисекунд за месяц регистрации. Простой подсчет показывает, что в случае линейного роста временной погрешности относительная нестабильность часов как в случае сейсморазведочных работ, так и при регистрации землетрясений не должна превышать 10^{-8} .

ТЕМПЕРАТУРНО-КОМПЕНСИРОВАННЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ЧАСЫ

Основная погрешность часов донной сейсмостанции определяется температурной зависимостью частоты кварцевого генератора. Для исключения этой зависимости применяются в основном

Табл. 1. Основные характеристики ряда промышленных кварцевых генераторов

№ п/п	Название, тип	Разработчик	Частота (МГц), относительная погрешность	Питание: напряжение (В), мощность (Вт)
1	<i>Сонет</i> , термостатированный	Омский НИИ Прибо- ростроения	10, 10^{-8}	12, 0.3
2	<i>Астра</i> , термостатированный	”	10, $5 \cdot 10^{-8}$	12, 0.25
3	<i>Фиалка</i> , термокомпенсирован.	”	10, 10^{-6}	12, 0.02
4	<i>ГК-36-ТК</i> , термокомпенсирован.	Фирма "Морион", Ст.-Петербург	10, $2 \cdot 10^{-6}$	12, 0.036
5	<i>ГК-88-ТК</i> , термокомпенсирован.	”	10, $2 \cdot 10^{-6}$	12, 0.036
6	<i>ГК-52-П</i> , термокомпенсирован.	”	10, 10^{-5}	5, 0.005

два приема: термостатирование кварцевого генератора или измерение температуры и введение термокомпенсации. Серийные кварцевые генераторы с термостатом обеспечивают требуемую точность часов, однако потребляют значительную энергию (около 0.25–0.3 Вт), что соизмеримо с общим потреблением сейсмостанции. Термокомпенсированные кварцевые генераторы потребляют по питанию несколько милливатт, однако имеют относительную погрешность около 10^{-6} , что не удовлетворяет требованиям к автономным донным станциям. В табл. 1 приведены основные характеристики некоторых промышленно выпускаемых кварцевых генераторов.

Основной причиной относительно низкой стабильности промышленных термокомпенсированных кварцевых генераторов является то, что датчиками температуры являются термосопротивления, а компенсация температурной зависимости частоты осуществляется аналоговым путем (изменением напряжения питания генератора или емкости р-п перехода шунтирующих транзисторов). В этом случае погрешность генератора зависит от качества подбора термокомпенсирующих цепей. Такой подбор весьма трудоемок, и результат не стабилен во времени. Новые возможности обеспечивает цифровая компенсация температурной погрешности [4, 5, 6]. В этом случае температурные поправки можно вводить с очень высокой точностью, определяемой только погрешностью измерения температуры и погрешностью таблицы по-

правок. Измерение температуры можно производить с высокой точностью с помощью кварцевого термометра. Таблица температурных поправок может определяться с высокой точностью для каждого кварцевого резонатора и храниться в памяти компьютера.

Погрешность временного кода $\Delta t(t_k)$ определяется интегрированием функции частоты опорного генератора за все время наблюдения t_k

$$\Delta t(t_k) = \int_0^{t_k} [f(t)/f_0 - 1] dt,$$

где f_0 — постоянная составляющая и $f(t)$ — текущее значение частоты опорного генератора. Полагая, что частота опорного генератора $f(t)$ и частота температурозависимого генератора $F(t)$ зависят в основном от текущего значения температуры (пренебрегаем влиянием других факторов за их малостью):

$$f(t) = f[T(t)], \quad F(t) = F[T(t)]. \quad (1)$$

Если конструктивно обеспечено равенство температур обоих кварцевых резонаторов и зависимости (1) однозначны, то можно поставить в соответствие частоты опорного и температурозависимого генераторов с помощью табличного оператора P : $f(F) = P[F]$. Этот оператор должен храниться в памяти компьютера. Тогда поправка временного кода $\Delta \tau(t_k)$ определяется выражением

$$\Delta\tau(t_k) = \int_0^{t_k} [f\{P[F(t)]\}/f_0 - 1] dt. \quad (2)$$

Предварительные оценки показали, что если в опорном генераторе используется прецизионный кварцевый резонатор двухповоротного (ДП) среза на частоте 7 МГц по седьмой механической гармонике, имеющий температуру первого экстремума в области 10–15 °С, со старением не более 10⁻¹⁰ в месяц, а в качестве датчика температуры взят кварцевый резонатор термочувствительного Y-среза, кварцевые генераторы с цифровой компенсацией температурной погрешности могут обеспечить при работе в диапазоне температур 0–10 °С погрешность ухода частоты не хуже 10⁻⁸, что приемлемо для донных сейсмографов.

Необходимо отметить, что кварцевые генераторы подвержены старению. При этом частота прецизионных генераторов меняется (обычно растет) с относительной погрешностью около 10⁻⁹ в год. Поэтому все кварцевые генераторы необходимо периодически проверять и корректировать. Для цифровых компенсированных генераторов такая корректировка может производиться автоматически по специальным программам с использованием сигналов от GPS.

ВЛИЯНИЕ ПРИДОННЫХ ТЕЧЕНИЙ

Существенным источником погрешностей для донных сейсмостанций являются придонные течения. Как показывают специальные исследования, в зависимости от глубины постановки станции и конкретных условий скорости этих течений могут меняться от долей до десятков сантиметров в секунду [1, 7, 8]. Течения носят ламинарный или турбулентный характер, меняют направление и могут непосредственно раскачивать сейсмостанцию при неплотном сцеплении ее с дном. Другой механизм воздействия течений состоит в генерации акустических помех в воде за счет завихрений вокруг выступающих частей донной станции или неровностей дна. Было проведено также моделирование этих процессов [9], качественно подтвердившее основные результаты экспериментов. В ходе этих работ было установлено, что начиная со скоростей течений 2–3 см/с на выступающих частях донных станций появляются завихрения (вихри Кармана), которые приводят к возникновению колебаний, воздействующих на чувствительные сейсмоприемники донных станций. Однако в известных публикациях не приводятся количественные оценки интенсивности помех и не даются конкретные рекомендации по их уменьшению. Это связано, по-видимому, с недостаточной разработанностью количественной теории турбулент-

ного движения жидкости, а также с недостаточным объемом экспериментальных данных в этой области [10].

Следует отметить, что скорость придонных течений падает с уменьшением расстояния до дна. Отсюда следует очевидный вывод о необходимости максимального приближения элементов донной станции ко дну, а корпуса донных станций должны быть достаточно плоскими. Однако на практике это сделать обычно не удается. Например, корпуса самовсплывающих донных станций необходимо выполнять хорошо обтекаемыми в вертикальном направлении во избежание их опрокидывания или наклона при постановке. Не все тонкомерные элементы станции можно спрятать внутрь корпуса.

Рассмотрим три основных механизма возбуждения помех придонными течениями. Первый — это прямое раскачивание контейнера с сейсмоприемниками нестационарными потоками. Второй — возбуждение акустических колебаний в воде за счет появления турбулентности около выступающих частей донной станции [11]. Третий — возбуждение акустических колебаний за счет вибрации упругих элементов станции под воздействием турбулентного потока. Следует отметить, что в специальной литературе в основном рассматривается только второй механизм возбуждения помех и даются оценки только частот колебаний [1, 9]. Поэтому рассмотрим эти механизмы подробнее.

В общем случае вода является вязкой сжимаемой жидкостью. Свойства течения характеризуются, как известно, числами Рейнольдса

$$R = \rho u l / \eta, \quad (3)$$

где ρ — плотность, η — динамическая вязкость, u — средняя скорость течения жидкости, l — характерный размер (масштаб), близкий к размерам источника турбулентности. При критических числах Рейнольдса ($R_{кр} \approx 2000$ для воды) течение становится турбулентным. В дальнейшем будем рассматривать развитую турбулентность при больших числах Рейнольдса или ламинарное течение при $R < R_{кр}$. Согласно [10], вблизи тела, помещенного в поток, непосредственно за линией отрыва образуется крупномасштабная турбулентность с характерными размерами l . Затем масштаб турбулентности уменьшается, а область расширяется. Наконец, мелкомасштабная турбулентность диссипирует, т. е. переходит в тепло. Следует отметить, что при больших числах Рейнольдса вязкостью жидкости можно обычно пренебречь, что упрощает выражения для турбулентности [10, 11]. Другое упрощение состоит в возможности пренебрежения сжимаемостью воды при рассмотрении колебаний малого источника излучения с размерами $l \ll \lambda$, где λ — длина волны акустических колебаний.

Остановимся на вопросе частотного диапазона пульсаций, так как он определяет частоту помех. В работе [10] даются нижняя и верхняя оценки частот пульсаций, связанные с масштабом турбулентности и числами Рейнольдса:

$$u/l < \omega < (u/l)(R/R_{кр}) = u^2 \rho / \eta R_{кр}. \quad (4)$$

Рассмотрим механизм непосредственного воздействия течений на контейнер сеймостанции. В зависимости от характера и скорости набегающего потока за обтекаемым телом остается ламинарный или турбулентный след. В обоих случаях непосредственно за телом образуется вихревая область, которая вызывает его колебания. Ламинарный след отличается отсутствием перемешивания слоев в безвихревой области следа. В случае турбулентного течения появляется дополнительное раскачивание контейнера за счет пульсаций самого потока. Радиус турбулентного следа растет с расстоянием r пропорционально $r^{1/3}$, а средние скорости пульсаций уменьшаются пропорционально $r^{2/3}$. Отсюда следует достаточная устойчивость турбулентного следа с расстоянием. Однако вместе с уменьшением скорости пульсаций уменьшаются и числа Рейнольдса. При этом турбулентный след переходит в ламинарный. Поток воздействует на сферический контейнер с силой, пропорциональной средней скорости течения u , пульсационной скорости Δu и квадрату радиуса сферы a [10]:

$$\Delta F \sim u \cdot \rho \cdot \Delta u \cdot a^2. \quad (5)$$

Скорость колебаний V сферического контейнера с сеймостанцией прямо пропорциональна пульсационной скорости потока жидкости Δu и зависит от массы контейнера и сопротивления воды (присоединенная масса). Эту скорость удобно представить через среднюю плотность контейнера $\rho_{\text{конт}}$ и плотность жидкости ρ

$$V = 3\rho \cdot \Delta u / (\rho + 2\rho_{\text{конт}}). \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует, что для уменьшения влияния течений необходимо увеличивать массу контейнера и уменьшать его объем и поперечное сечение. Следует отметить, что этот вывод в определенной степени противоречит требованиям увеличения сцепления блока сеймоприемников с мягким дном [12], поэтому здесь требуется компромиссное решение.

Рассмотрим вопрос возбуждения акустической помехи турбулентным течением. Для оценки энергетических соотношений в турбулентном потоке введено понятие удельной энергии в единице массы жидкости за единицу времени [10]. Например, удельная энергия диссипации

$$\varepsilon_{\text{дис}} \sim (\Delta u)^3 \cdot \eta / (l \cdot R_{кр}). \quad (7)$$

В (7) и дальше даются оценки пропорциональности, а не равенства, поэтому используется соответствующий знак $\sim$. Это связано с тем, что количественные оценки соотношения u и Δu для турбулентного движения в общем случае неизвестны.

Основной источник акустической помехи сосредоточен непосредственно за телом на расстоянии $\sim l$ от линии отрыва. Дано соотношение [10] для удельной звуковой энергии, вызванной турбулентностью, в пределах этой области

$$\varepsilon_{\text{зв}} \sim (\Delta u)^8 / (l \cdot c^5) = (\Delta u / c)^5 \cdot (\Delta u / l)^3 \cdot l^2, \quad (8)$$

где c — скорость звука в воде. Здесь отношение $(\Delta u / l)$ имеет размерность частоты и соответствует некоторой частоте пульсаций потока. Найдем отношение (8) к выражению (7) для энергии диссипации, равной в первом приближении исходной энергии турбулентности:

$$\varepsilon_{\text{зв}} / \varepsilon_{\text{дис}} \sim (\Delta u / c)^5.$$

Так как Δu много меньше c , то эффективность излучения звука за счет турбулентности потока можно считать очень низкой.

Поскольку для частотного диапазона донных широкополосных сейсмографов характерно соотношение $\lambda \gg r_{\text{конт}} \gg l$ (где λ — длина звуковой волны, $r_{\text{конт}}$ — расстояние от источника турбулентности до станции, l — размер излучателя), то область излучения помехи можно считать точечным источником поля, а вследствие коррелированности пульсаций — близким к монополю. Поэтому скорость частиц жидкости акустической волны $v_{\text{тур}}$ будет уменьшаться в ближней зоне ($\lambda \gg r$) пропорционально квадрату расстояния r , т. е.

$$v_{\text{тур}} \sim \Delta u / r^2. \quad (9)$$

Рассмотрим вопрос излучения акустической помехи колеблющимися упругими элементами донной станции. Такими элементами являются тонкомерный трубчатый каркас, антенна, буйреп, соединительные кабели и др. В соответствии с формой и способом движения элементов излучение носит дипольный характер. Колебания этих элементов возбуждаются обтекающим потоком и могут иметь резонансные максимумы, однако вследствие большого сопротивления воды добротность их невелика. В соответствии с [11] запишем для случая малого ($l \ll \lambda$) гармонически колеблющегося тела в ближней зоне ($kr \ll \lambda$) выражение:

$$v_{\text{кол}} \sim (1/r^3) \cdot \Delta u \cdot e^{jkr} \cdot \cos \theta, \quad (10)$$

где $v_{\text{кол}}$ — скорость частиц в акустической волне,

k — волновое число, r — расстояние, θ — угол между вектором скорости тела и направлением распространения волны.

Сравним уровни акустических помех, возбуждаемых турбулентными вихрями и колеблющимися элементами станции. Запишем отношение удельной (на единицу длины) интенсивности излучения колеблющегося $J_{\text{кол}}$ и пульсирующего $J_{\text{пул}}$ цилиндров одинакового диаметра d . Согласно [10], получаем

$$J_{\text{кол}} / J_{\text{пул}} = 2\pi^2 \cdot d^2 / \lambda^2. \quad (11)$$

Поскольку справедливо ($d \ll \lambda$), то это отношение мало. В первом случае (9) излучение равнонаправленно, во втором (10) оно носит дипольный характер и зависит от направления. Из (11) следует, что интенсивность излучения помех за счет колебаний упругих элементов много меньше, чем за счет завихрений у этих элементов, и затухание скорости в этом случае с расстоянием происходит гораздо быстрее: по квадратичному закону (9) и в третьей степени (10) соответственно. Следует отметить, что из-за малых размеров излучателей и низких скоростей их движения (по сравнению с длиной волны и скоростью звука) эффективность излучения в обоих случаях достаточно мала. Она растет с ростом частоты пульсаций и размеров излучателя примерно в третьей степени [10, 11]. Однако, несмотря на то, что лишь малая доля энергии турбулентности преобразуется в звуковую помеху, вследствие высокой чувствительности сейсмографов (порог чувствительности составляет 10^{-7} м/с) эти помехи могут оказывать существенное влияние на сейсмоприемники, расположенные в непосредственной близости от источника турбулентности.

Основываясь на полученных соотношениях, рассмотрим некоторые конкретные вопросы выбора конструктивных параметров широкополосных донных сейсмометров. Вначале остановимся на частотном диапазоне помех, возникающих за счет турбулентных явлений на элементах станции. В соответствии с (4) нижний предел частот турбулентности зависит от средней скорости течений и размеров этих элементов, верхний предел зависит, кроме того, от отношения чисел Рейнольдса. Характерные размеры этих элементов составляют: приборный корпус ~ 1 м; внешние элементы (гидроакустическая антенна, проблесковый маяк и др.) — 0.1 м; буйреп (для буйковых станций), соединительные кабели, рама, радиоантенна — 0.01 м (диаметр). Характерные скорости придонных течений, при которых проявляются помехи [7, 9], составляют от ~ 0.02 м/с до 0.5 м/с. Рассматривая условия развитой турбулентности ($R / R_{\text{кр}} > 10$ и полагая, что частотный диапазон помех совпадает с диапазоном пульсаций турбу-

лентности, получаем в соответствии с приведенными выше формулами частоты от 0.03 до 500 Гц. Поскольку частотный диапазон многоцелевых сейсмометров составляет в среднем 1–200 Гц, то помехи полностью его перекрывают. В низкочастотной части диапазона сейсмометра возможно возникновение помех за счет турбулентных явлений на резко выраженных неровностях дна размером от 1 до 10 м. Поэтому широкополосные сейсмометры целесообразно размещать по возможности на ровном дне.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АДСС

Для морской сейсморазведки и регистрации местных землетрясений на дне длительное время использовались аналоговые регистраторы [1]. Это было связано с их исключительной простотой, надежностью и экономичностью питания. Однако в настоящее время благодаря успехам цифровой электроники появилась возможность создания цифровых донных сейсмостанций, которые по основным метрологическим характеристикам значительно превосходят аналоговые, обеспечивая высокую надежность, простоту обслуживания и экономичность питания. Кроме того, цифровые сейсмостанции позволяют быстро изменять программу функционирования на дне в зависимости от конкретных условий. Цифровые записи считываются и вводятся непосредственно в судовые компьютеры в форме удобной для просмотра и обработки [13, 14].

В качестве устройств долговременной памяти в современных цифровых донных сейсмостанциях применяются энергонезависимые устройства: твердотельная память на основе технологий "флэш" или специальные жесткие диски, устойчивые к ударам и влаге. Накопители на жестких дисках имеют емкость до нескольких десятков гигабайт, применяемая в настоящее время твердотельная флэш-память — единицы гигабайт. Следует отметить, что при одномодульной конструкции станции жесткие диски создают сильные вибрационные помехи для сейсмоприемников. В связи с этим в сейсморазведочных станциях применяют промежуточные твердотельные накопители, в которые записываются зондирующие сигналы, с последующей перезаписью на жесткий диск. В сейсмологических станциях момент землетрясения может совпасть со временем перезаписи, поэтому здесь применение жестких дисков нежелательно.

Основными параметрами, которые выбираются перед постановкой станции на дно, являются: число каналов регистрации (обычно от 1 до 6); время дискретизации (обычно от 1 до 32 мс с кратностью 2); режим работы регистратора (непрерыв-

ный или старт-стопный). При сокращении числа измерительных каналов и увеличении периода дискретизации уменьшается скорость записи информации, что в принципе позволяет увеличить время регистрации при ограниченном объеме памяти или сократить время считывания записанной информации на судне. При изменении периода дискретизации необходимо соответственно изменять полосу пропускания тракта усиления для исключения наложения высокочастотных сигналов при аналого-цифровом преобразовании. В настоящее время разработаны достаточно надежные и экономичные 24-разрядные сигма-дельта аналого-цифровые (АЦП) преобразователи. Эти АЦП обеспечивают время дискретизации до 1 мс и меньше, имеют внутренние перестраиваемые цифровые фильтры, низкий уровень помех преобразования. С помощью таких АЦП удастся обеспечить динамический диапазон регистрации сейсмических сигналов до 120 дБ и больше, что полностью удовлетворяет требованиям к многоцелевым донным сейсмографам. При использовании скоростных АЦП можно значительно упростить фильтры низкой частоты на их входе, обеспечив частоту преобразования на порядок и более превышающую частоту среза фильтров.

С целью увеличения времени автономности донной станции, кроме непрерывного режима работы регистратора, обычно предусматривается старт-стопный по жесткой программе и ждущий режим регистрации с краткой записью предыстории события. Для организации ждущего режима в системе используется наиболее часто применяемый для целей обнаружения сейсмических сигналов так называемый STA/LTA-детектор, использующий алгоритм вычисления отношения энергий сигналов с короткопериодным и долгопериодным усреднением. Недостатком такого детектора, как известно, является пропуск первого вступления при работе по сильно когерентному сигналу. Для улучшения характеристик детектора была разработана трехканальная версия с использованием признака группового совпадения "2 из 3-х". Это означает, что данные трех сейсмических каналов анализируются тремя независимыми детекторами, а сигнал обнаружения вырабатывается только при совпадении сигналов тревоги, по крайней мере, в двух каналах из трех. В случае обнаружения события в системе вырабатывается сигнал, разрешающий сохранить предыдущий файл данных во внешней памяти, в противном случае он стирается.

Важным параметром современных донных сейсмостанций является время регенерации, т. е. суммарное время считывания записанной информации, ввода новой программы и кода времени, смены или зарядки источников питания, механической разборки и сборки станции. Допустимое время регенерации тесно связано с методикой по-

становки донных станций. Поскольку станции устанавливаются на дно с определенным разносом (обычно в несколько единиц или первых десятков миль), время перехода судна в требуемую точку и его позиционирование составляет не менее часа. Современные цифровые регистраторы позволяют считывать информацию со скоростью в несколько мегабайт в секунду, что при обычном объеме памяти в единицы гигабайт составляет время считывания несколько десятков минут. Ввод новой программы и кода времени при хорошей работе GPS и проверка функционирования станции занимают несколько минут. Зарядка аккумуляторов обычно продолжается несколько часов, поэтому должна быть предусмотрена замена аккумуляторов или батарей питания. Механическая разборка и сборка станции при рациональной конструкции может составлять около часа. В целом темпы регенерации донных сейсмостанций сопоставимы с темпом продвижения судна вдоль профиля при расстановке и подъеме станций.

Для обеспечения нормальной работы автономной донной станции, ее успешного обнаружения и подъема на борт обслуживающего судна необходим целый ряд вспомогательных устройств. Поскольку сейсмоприемники являются векторными приборами, необходимо знать их ориентацию в пространстве. Обычно вертикальный и горизонтальный сейсмоприемники для обеспечения их работоспособности соответственно ориентированы с помощью карданового подвеса (с погрешностью до 5–10°). Для определения ориентации горизонтальных сейсмоприемников по азимуту используется электромагнитный компас, показания которого фиксируются в устройстве памяти. Так как чувствительность сейсмоприемников и компаса зависят от угла наклона, для уточнения измерений иногда вводят наклономеры, устанавливаемые на блоке сейсмоприемников и на конструктиве станции. Для обнаружения станции на поверхности используется радиомаяк, который начинает работать после всплытия станции. На судне должно быть приемное устройство, позволяющее определять расстояние и направление на радиомаяк. Для обнаружения всплывшей станции в ночное время используется проблесковый маяк.

Для обнаружения станции на дне, определения расстояния до нее и подачи команд управления используется аппаратура двухсторонней гидроакустической связи. Эта аппаратура должна обладать высокой помехоустойчивостью для исключения ложных команд на всплытие и сбоя в определении расстояний. Донная часть аппаратуры должна быть высокоэкономичной по питанию. Для этих целей используются направленные прием и излучение, сложные системы кодировки сигналов, дублирование посылок и ответов и т. д. В результате в лучших системах гидроакустиче-

ской связи удастся снизить вероятность ложного вызова до 10^{-8} . Это означает одно ложное срабатывание при непрерывных вызовах в течение 20 лет.

По конструкции донные сеймостанции разделяются на буйковые и самовсплывающие. Буйковые имеют поверхностный или притопленный сигнальный буй, соединенный буйрепом с якорем, и далее с помощью дополнительного защитного фала — с контейнером станции. Буйковые станции опускаются на дно последовательно с помощью лебедки, находящейся на обеспечивающем судне.

Самовсплывающие станции имеют положительную плавучесть, опускаются на дно в свободном падении под действием прикрепленного балласта и всплывают при отсоединении балласта по таймеру или по команде с судна. По гидроакустическому сигналу от судна, принимаемому через гидроакустическую антенну и блок гидроакустики, срабатывает размыкатель балласта, и станция всплывает. Поиск станции на поверхности производится с помощью радиомаяка, проблескового маяка (в ночное время) или гидроакустического канала связи.

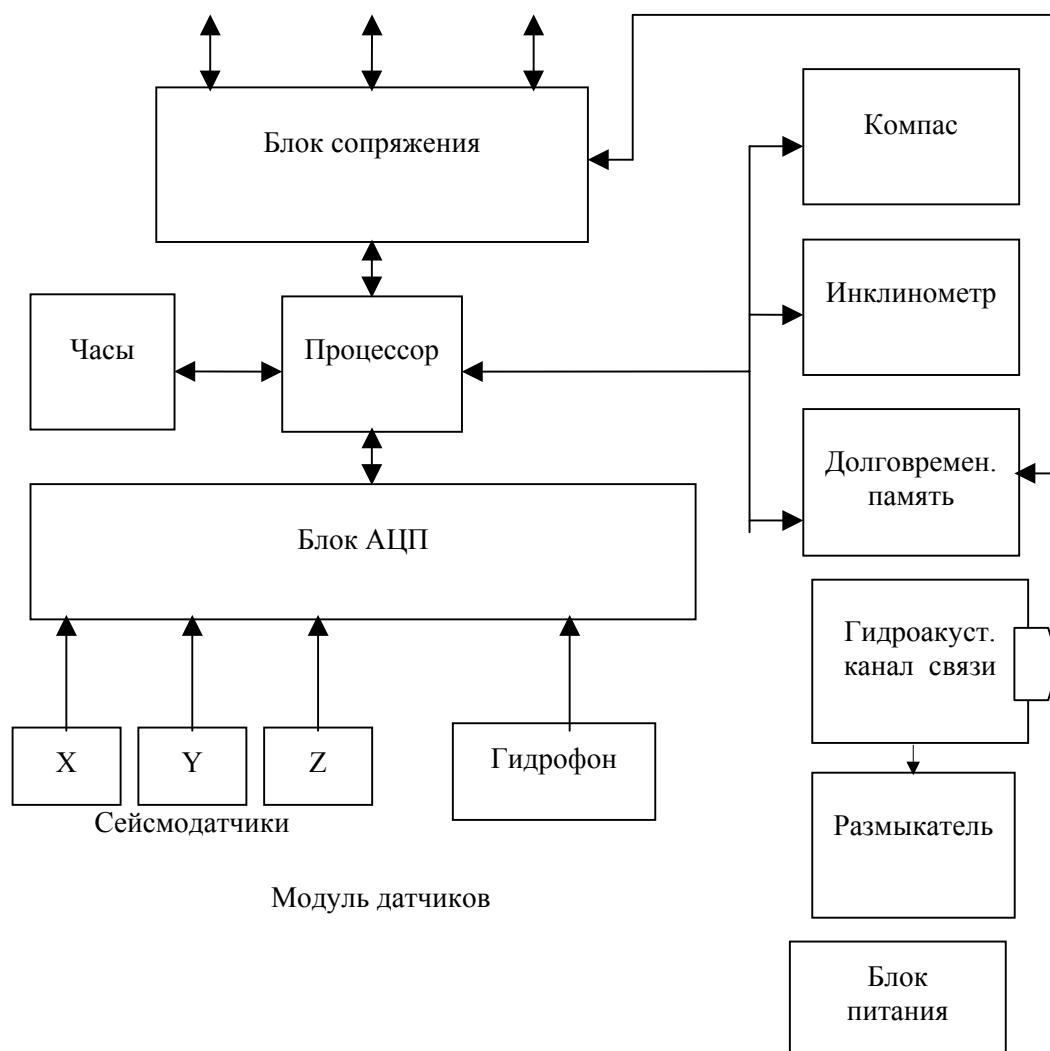


Рис. 1. Блок-схема донной сеймостанции АДСС-1

Самовсплывающие донные сеймостанции имеют целый ряд существенных преимуществ: малые габариты и вес, сравнительную легкость и быстроту постановки и подъема, возможность использования недорогих судов малой и средней тоннажности. Вместе с тем к конструкции самовсплывающей донной станции предъявляется ряд серьезных и часто противоречивых требований. При малых размерах и весе необходимо обеспечить хорошее сцепление с грунтом, большую автономность по питанию. Быстрые погружение и всплытие должны сочетаться со слабым ударом о дно при погружении. Гидроакустическая и радиоантенны, приспособления для спуска и вылова станции не должны вызывать завихрений от придонных течений и т. д.

Для обеспечения высокой мобильности современные донные самовсплывающие сеймостанции обычно выполняют в одномодульной конструкции. При этом в корпусе размещаются блок сеймоприемников в карданном подвесе, аналоговые элементы трактов регистрации, АЦП и управляющий компьютер, накопитель информации, блок гидроакустического канала связи, источники питания, компас и другие вспомогательные элементы. Снаружи корпуса размещаются измерительный гидрофон, гидроакустическая антенна, антенна радиомаяка, проблесковый маяк, размыкатель балласта и приспособления для постановки и вылова станции. Корпус сеймостанции должен обеспечивать надежную защиту от высокого давления (до 600 атм), от внешних ударов и иметь положительную плавучесть для быстрого всплытия в районе обслуживаемого судна. Конструкция балласта и размыкателя должны обеспечивать устойчивое крепление к корпусу станции, хорошее сцепление с грунтом и легкое отделение при всплытии. В настоящее время наибольшее применение получили электромеханические и электрохимические размыкатели балласта. Работа первых не зависит от состава воды, но они имеют сравнительно большие вес и габариты. Электрохимические размыкатели, работа которых основана на растворении металлической проволоки под действием электролиза, плохо работают в пресной или насыщенной газами среде, но размеры их и вес минимальны.

В качестве примера рассмотрим самовсплывающую донную сеймостанцию АДСС-1 разработки ОКБ ОТ РАН. Станция предназначена для целей сейсморазведки и регистрации сигналов землетрясений в диапазоне частот выше 5 Гц. Блок-схема станции с обозначением элементов приведена на рис. 1. На рис. 2 показан внешний вид станции. Схематический разрез АДСС-1 представлен на рис. 3. Внутри прочного корпуса (1) расположены: трехкомпонентный блок сеймоприемников в карданном подвесе (3), блок управления и регистрации (2), блок канала гидроакустической связи (4), ис-



Рис. 2. Внешний вид самовсплывающей сеймостанции АДСС-1

точник питания (5). К блоку сеймоприемников прикреплены компас и наклономер, другой наклономер соединен с корпусом. Снаружи прочного корпуса находятся: антенна гидроакустической связи (6), измерительный гидрофон (7), проблесковый маяк (8), размыкатель балласта (9) и защитное ограждение (10). Балласт изготовлен из железобетона, имеет чашеобразную форму и тесно прижат снизу к корпусу станции с помощью упругих строп. Другие концы строп присоединены к размыкателю балласта (9), находящемуся в верхней части станции. На дне балласта в специальном углублении размещен поплавок-ловитель, соединенный пропиленовым фалом с корпусом станции.

Основными особенностями станции являются: применение твердотельного накопителя информации на флэш-элементах памяти; использование генератора кода времени с цифровой компенсацией температурной погрешности кварцевого резонатора; быстрое считывание накопленной информации (до 2 Мб в секунду); представление результатов записи в форме, удобной для обработки (формат SEG-Y); малое потребление питания; хорошая обтекаемость придонными течениями.

Подготовка станции на борту судна состоит в замене питания, установке требуемой программы и точного времени, сборке и герметизации, присоединении к балласту. В верхней части балласта имеются специальные скобы (не показаны на рисунке), за которые станция крепится к подъемному механизму и выносится за борт судна при постановке. Станция опускается на дно в свободном падении грузом вниз со скоростью около

1 м/с. После достижения дна станция включается на регистрацию через определенное время, в течение которого записываются показания компаса и наклономеров. По гидроакустическому каналу с судна определяется расстояние до станции и уточняются ее координаты (триангуляционным методом). Регистрация сейсмических сигналов и сигнала гидрофона может производиться в непрерывном или старт-стопном режимах. Подъем станции производится по внутреннему таймеру или по гидроакустическому сигналу с обеспечивающего судна. В этом случае от блока гидроакустики станции подается постоянный ток на размы-

катель балласта через воду и тонкий провод, удерживающий упругие стропы. После растворения провода стропы разжимаются и станция всплывает вследствие положительной плавучести корпуса (8 кгс). При этом вследствие специальной балансировки станция переворачивается гидроакустической антенной вниз, а проблесковым маяком вверх. Поплавок-ловитель всплывает рядом со станцией и облегчает ее подъем на борт судна. Поиск станции на поверхности можно производить с помощью гидроакустического канала связи, определяя расстояние до судна и направление на станцию триангуляционным методом.

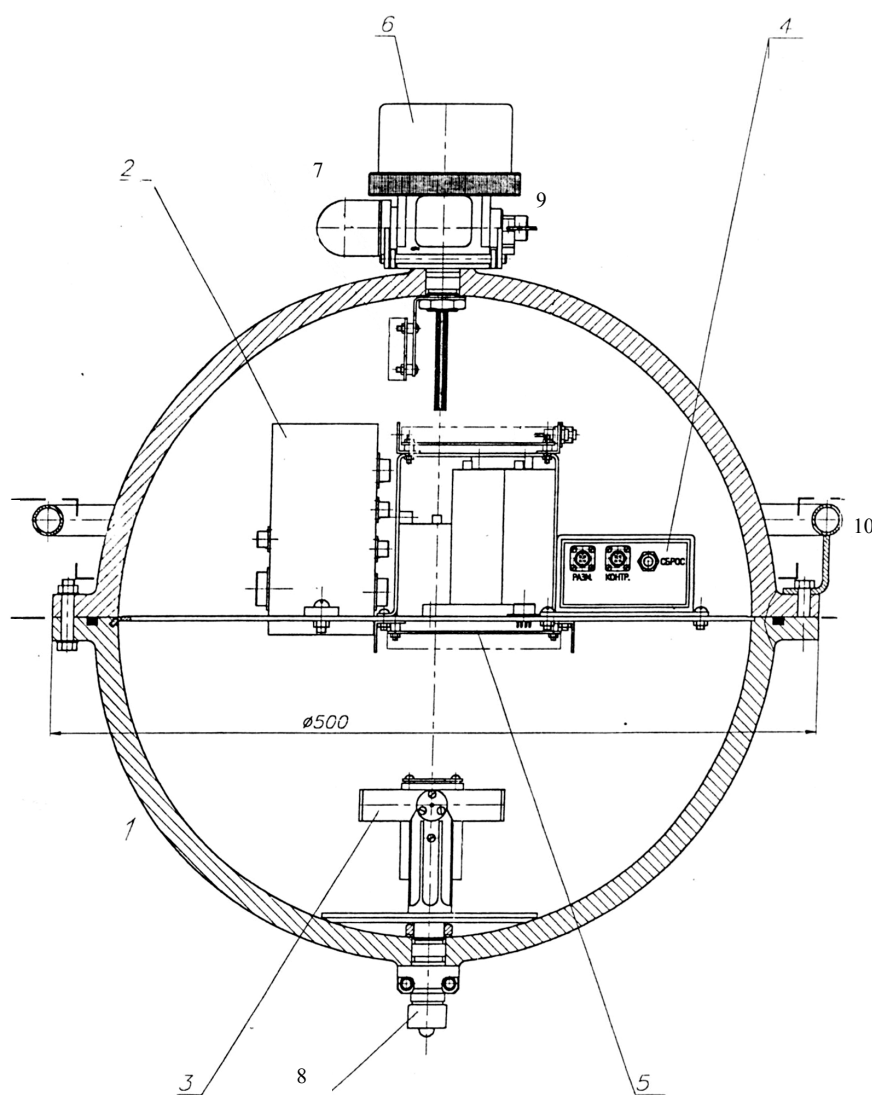


Рис. 2. Схематический вертикальный разрез донной сеймостанции АДСС-1. 1 — корпус; 2 — блок управления и регистрации; 3 — трехкомпонентный блок сейсмоприемников в карданном подвесе; 4 — блок канала гидроакустической связи; 5 — источник питания; 6 — гидроакустическая антенна; 7 — измерительный гидрофон; 8 — проблесковый маяк; 9 — размыкатель балласта; 10 — защитное ограждение

Табл. 2. Сравнительные характеристики автономных донных сейсмостанций АДСС-1 (ОКБ ОТ РАН, г. Москва), SEDIS-4 (GeoPRO, Гамбургский университет, ФРГ), Садко-1 (ГЕОН, г. Москва; ЛОГИС, г. Жуковский; ГП Техморгео, г. Мурманск)

Технические данные	АДСС-1	SEDIS-4	Садко-1
Основные особенности	Самовсплывающая	Самовсплывающая	Буйковая
Диапазон регистрируемых частот (Гц)	5–125	3–400	3–240
Шаг дискретизации (мс)	2, 4, 8, 16	1, 2, 4, 8, 16, 32	1, 2, 4, 8, 16, 32
Динамический диапазон (дБ)	105	120	140
Число каналов регистрации	4	6	4
Чувствительность геофонов (В·с/м)	20	—	20
Чувствительность гидрофона (мкВ/Па)	25	—	—
Порог чувствительности сейсмоканалов (м/с)	10^{-8}	—	10^{-8}
Нестабильность кварцевых часов	10^{-8} (расчетн.)	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-8}
Емкость памяти (Гб)	2 (флэш)	4.3 (диск)	3.9 (флэш)
Время непрерывной регистрации (сутки)	20 (8 мс)	20 (4 мс)	30
Мощность потребления питания (Вт)	0.35	0.7	1.6
Карданный подвес	Механический	Гелиевый	—
Положительная плавучесть (кгс)	8	5	—
Вес станции (без балласта, кгс)	40	25	37
Вес балласта (кгс)	30	17	—
Материал корпуса	Алюминий	Стекло	Алюминий, сталь
Максимальная глубина (м)	6000	6700	6000

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОВРЕМЕННЫХ ДОННЫХ СТАНЦИЙ

В заключение рассмотрим основные параметры и конструкции трех современных донных сейсмостанций, предназначенных для сейсморазведки и регистрации сигналов землетрясений. В табл. 2 приведены данные самовсплывающих сейсмостанций АДСС-1 разработки ОКБ ОТ РАН, SEDIS-4 разработки фирмы GeoPro (Гамбургский университет) и Садко-1 совместной разработки ГП ГЕОН, фирмы ЛОГИС и ГП Техморгео.

Все три станции цифровые, многоканальные,

рассчитанные на время непрерывной регистрации до 20–30 суток и рабочую глубину до 6000 м. Основное отличие станций состоит в том, что АДСС-1 и SEDIS-4 — самовсплывающие, а Садко-1 — буйковая станция. Частотные диапазоны станций удовлетворяют в основном требованиям сейсморазведки и сейсмологического мониторинга. У SEDIS-4 частотный диапазон расширен в сторону высоких частот для увеличения разрешающей способности сейсморазведки, а у Садко-1 — в сторону низких частот для повышения глубинности и регистрации обменных волн. Верхняя граница частотного диапазона и соответственно час-

тоты дискретизации у всех трех станций могут изменяться в зависимости от заданной программы.

Динамические диапазоны регистрации станций в основном совпадают и определяются максимальным напряжением источника питания усилителей. В Садко-1 увеличение динамического диапазона производится программно за счет изменения усиления усилителей. Пороги чувствительности сейсмометрических каналов и канала гидрофона (Садко-1 без гидрофона) сделаны минимальными, определяемыми уровнем шумов усилителей и коэффициентом преобразования датчиков сигналов. В качестве сейсμοприемников выбраны в SEDIS-4 и Садко-1 индукционные геофоны SM-6 фирмы Input-Output (США) и аналогичные геофоны GS-20 фирмы Ойо-Гео Импульс (Россия, Уфа) применены в АДСС-1.

Кварцевые часы донных станций разработаны с использованием разных принципов функционирования: в АДСС-1 с цифровой термокомпенсацией, в Садко-1 с термостатированием (от фирмы Морион, Ст.-Петербург), в SEDIS-4 с аналоговой термокомпенсацией. В связи с этим часы отличаются точностью и экономичностью.

В качестве источника питания в АДСС-1 использованы три аккумулятора (2 шт. по 6 вольт и 1 шт. 12 вольт), в Садко-1 имеется 2 аккумулятора по 6 вольт, SEDIS-4 содержит 2 аккумулятора по 12 вольт и 50 батарей по 1.5 вольта (батареи должны быть спаяны в 4 блока). АДСС-1 потребляет по питанию в два раза меньше, чем SEDIS-4, и в четыре раза меньше, чем Садко-1.

Конструктивно станции существенно различаются. Станция Садко-1 имеет отрицательную плавучесть, содержит прочный алюминиевый корпус диаметром 450 мм, прикрепленный к раме, сваренной из стальных труб и уголков. Эта рама обеспечивает хорошее сцепление с грунтом, но может создавать помехи при наличии придонных течений. Кроме того, различие металлов рамы и корпуса должно приводить к повышенной коррозии последнего. Станции АДСС-1 и SEDIS-4 имеют положительную плавучесть, оснащены размыкателями балласта и устройствами для связи с судном и обнаружения на поверхности после всплытия. Конструкция АДСС-1 подробно описана выше. Корпус станции SEDIS-4 диаметром 430 мм выполнен из прочного стекла и имеет защитный пластмассовый кожух. Стекло не подвержено коррозии в воде, но требует бережного отношения при сборке станции. На верху станции закреплен стержень, к которому крепятся антенна радиомаяка, измерительный гидрофон, и сигнальный выпел. Этот стержень может создавать помехи от завихрений, вызываемых течениями. Балласт представляет собой стальную решетку, соединенную с кожухом станции с помощью скобы. Недостатком такого крепления является то, что

кожух соединяется с решеткой только в одной точке. При этом течения могут раскачивать станцию и создавать помехи.

ВЫВОДЫ

1. Автономные донные сейсмостанции (АДСС) находят в настоящее время широкое применение для морской сейсморазведки и сейсмологического мониторинга в районах промышленного освоения акваторий.

2. АДСС, применяемые для указанных целей, должны обладать, кроме высоких метрологических характеристик, повышенной мобильностью, простотой обслуживания, малым временем постановки и подъема, экономичностью питания.

3. Для получения необходимой точности часов автономной донной станции при обеспечении высокой экономичности питания разработаны прецизионные кварцевые генераторы с цифровой компенсацией температурной погрешности.

4. Придонные течения могут создавать существенные помехи работе АДСС, раскачивая корпус станции и создавая завихрения на выступающих частях. Для уменьшения этих помех необходимо уменьшать поперечное сечение станции при увеличении ее веса, исключать тонкомерные наружные элементы, увеличивать обтекаемость корпуса, выбирать для постановки станций относительно ровное дно.

5. Сравнение основных технических и эксплуатационных характеристик трех типов современных автономных донных сейсмостанций, предназначенных для сейсморазведки и сейсмологического мониторинга, показало определенные тенденции развития АДСС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев С.Л. История и перспективы развития морской сейсмологии. М.: Наука, 1985. 152 с.
2. Рыков А.В. Моделирование сейсмометра. М.: ОИФЗ РАН, 1995. 87 с.
3. Кузин И.П. Соотношение между макросейсмической интенсивностью в баллах и параметрами сейсмических воздействий при сильных землетрясениях // Физика Земли. 2002. № 4. С. 99–100.
4. Криволапов Г.И., Левченко Д.Г., Шеин Б.Н., Чернецкий Г.А. Способ временной привязки информационной системы и устройство для его осуществления. А.с. 1586404 СССР от 25.12.1987.
5. Левченко Д.Г., Мухин В.Л., Шеин Б.Н. Способ хронирования информации автономной донной станции и устройство для его осуществле-

- ния. А.с. 1512344 от 30.07.1987.
6. Левченко Д.Г., Мухин В.Л. Экономичные часы для автономных донных сейсмостанций // Сборник материалов Всесоюзной школы "Технические средства и методы исследования мирового океана". Геленджик: ИО АН СССР, 1989. С. 58–59.
 7. Контарь Е.А., Левченко Д.Г., Соловьев С.Л. Влияние придонных течений в сочетании с рельефом дна на шумовые условия в точке наблюдений // Вулканол. и сейсмол. 1991. № 4. С. 97–103.
 8. Duenneber F.K., Blackinton G., Sutton G.N. Current generated noise recorded on ocean bottom seismometers // Mar. Geophys. Res. 1981. V.5, N 1. P. 109–115.
 9. Kasahara J., Koresava S., Nagumo S. et al. Experimental results of vortex generation around ocean - bottom seismograph due to bottom current // Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo: Univ., 1980. V. 55. P. 169–182.
 10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. С. 137–193, 350–410.
 11. Lighthill M.I. On sound generated aerodynamically: 1. General theory. London: Proc. Roy. Soc., 1970. A211. 1107 p.
 12. Sutton G.H., Duenneber F.K., Iwatake B. Coupling of ocean bottom seismometers to soft bottoms // Mar. Geophys. Res. 1981. V. 5, N 1. P. 35–51.
 13. Levchenko D.G., Timoshuk E.P., Grafov B.M. 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.
 14. Levchenko D.G. Broadband digital bottom stations // Inter. Conf. PACON-99. Moscow, 1999. P. 1–8.

ОКБ океанической техники РАН, Москва
(Зубко Ю.Н., Леденев В.В., Парамонов А.А.)

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва (Левченко Д.Г.)

Материал поступил в редакцию 16.07.2003.

MODERN BOTTOM SEISMIC EXPLORATION AND MONITORING STATIONS

Yu. N. Zubko, D.G. Levchenko*, V. V. Ledenev, A. A. Paramonov

Special Design Bureau of Oceanic Engineering RAS, Moscow
**P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow*

The paper is devoted to scientific and technical problems associated with construction of bottom seismic stations and modern ways to solve them. The main trends in this field of instrument- and equipment engineering are considered by the example of development of the ADCC-1 station and its comparison with the existing ones.