

УДК 550.34.03

## О СОЗДАНИИ ЦИФРОВЫХ ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ: НАСТОЯЩЕЕ И ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ

© 2019 г. Д. А. Ильинский<sup>1,3,\*</sup>, А. А. Гинзбург<sup>2,\*\*</sup>, В. В. Воронин<sup>2</sup>, О. Ю. Ганжа<sup>1,3</sup>,  
А. Б. Манукин<sup>4,\*\*\*</sup>, К. А. Рогинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук,  
Нахимовский проспект, 36, г. Москва, 117997 Россия  
\*E-mail: dilinskiy61@mail.ru

<sup>2</sup>Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук (ИГЭ РАН),  
Уланский пер., 13, стр. 2, г. Москва, 101000 Россия  
\*\*E-mail: galab3@yandex.ru

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет),  
Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141700 Россия

<sup>4</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта,  
Б. Грузинская ул., 10, стр. 1, г. Москва, 123242 Россия  
\*\*\*E-mail: amanukin@yandex.ru

Поступила в редакцию 4.12.2018 г.

После исправления 9.01.2019 г.

Приведены сравнительные характеристики самовсплывающих цифровых донных сейсмических станций, созданных с начала 2000-х годов по настоящее время. Сформулированы требования к основным техническим характеристикам, которые необходимо выполнять при разработке самовсплывающих цифровых донных сейсмических станций нового поколения. Приведены результаты разработки основных элементов донной станции, определяющие ее главные характеристики (потребление энергии и потребительские функции): опорный генератор времени и управляющий микроконтроллер.

Представлен проект применения цифровых донных сейсмических станций для решения геологических задач в Российском секторе Черного моря. В ходе выполнения проекта должны быть решены задачи по определению глубины залегания кристаллического фундамента на вале Шатского и в Туапсинском прогибе; прослеживанию морфологии поверхности фундамента; определению скорости поперечных и продольных волн в нижней части осадочного чехла и в фундаменте; уточнению толщины земной коры Черного моря. Продление региональных профилей из Турецкого сектора Черного моря в Российский, позволит получить полную картину строения всей Восточно-Черноморской котловины. Результаты по строению осадочного чехла и земной коры в целом, полученные с помощью донных сейсмографов, позволят верифицировать и уточнить результаты исследований на региональных профилях в Черном море в 2011 г. с использованием буксируемой сейсмической длинной косы (10 км).

**Ключевые слова:** самовсплывающая цифровая донная сейсмическая станция, автономность работы, точность привязки, система единого времени.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019287-101>

### ВВЕДЕНИЕ

Начало 2000-х годов ознаменовалось созданием и использованием ряда компактных самовсплывающих цифровых донных сейсмических станций (далее по тексту ЦДСС). В России такая ЦДСС была создана в ФГУП ОКБ ОТ РАН по заказу компании «ЛАРГЕ». Эта разработка и ее модификации сейчас широко используются

в России в таких геофизических организациях, как СевМорГео, МАГЭ, СМНГ и Полярная экспедиция для исследования земной коры, осадочных подбазальтовых структур и газогидратов в океане.

Аналогичная аппаратура была создана в Германии сначала как опытная разработка Университета Гамбурга, развитая затем в компании «ГеоПро»

(GeoPro GmbH). Станции этого типа постоянно модифицировались, но тем не менее основные технические параметры оставались на уровне начала 2000-х годов. Кроме выпуска станций для собственных нужд компания выпустила и продала около 60 станций другим институтам и организациям с широкой географией от Европы до Азии (Индия и Китай) и США (Университет Техаса), включая и Россию (Институт океанологии РАН). Как и российская разработка, станции GeoPro нашли свое применение не только в глубинных исследованиях земной коры, но и для нужд нефтяной промышленности, а также для изучения локальной сейсмичности и инженерных работ. В частности, в 2002 г. была проведена первая в мире 3-мерная площадная донная сейсмическая

съемка на глубинах около 2 км в Мексиканском заливе. В 2014 г. на основе имеющихся разработок ОКБ ОТ РАН и компании «Геонод Разведка» была создана и протестирована широкополосная донная сейсмическая 8-канальная станция реального времени, передающая данные на берег по кабелю, а затем в любую точку мира по сейсмологическим протоколам реального времени [7].

### ПРОГРЕСС ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЦДСС ЗА ПОСЛЕДНИЕ 10 ЛЕТ

На примере станции второго поколения компании «Геонод Разведка» проиллюстрируем усовершенствование ее технических характеристик,

**Таблица 1.** Сравнение технических характеристик ЦДСС разных производителей

| Технические характеристики   | ФГУП ОКБ ОТ РАН (2002)  | GEOPRO (GeoPro GmbH) (2007)                                       | Геонод Разведка (2014)   |
|--|---|---|--|
| Частотный диапазон геофонов, Гц                                      | 8-70  | 4.5-1 000   | 0.5-1 000  |
| Дополнительные датчики   | Инclinometer, компас  | Компас  | Компас, 3-мерный акселерометр, термометр, датчик давления                                |
| Число бит в аналого-цифровом преобразователе                         | 21  | 24  | 32   |
| Нестабильность опорного генератора внутренней системы службы времени | $2 \cdot 10^{-8}$   | $2 \cdot 10^{-8}$   | $5 \cdot 10^{-9}$  |
| Мощность потребления в режиме записи данных, Вт                      | 0.45  | 1.2   | 0.4  |
| Непрерывное время записи данных, сут                                 | 8   | 14  | 90   |
| Способ синхронизации внутренней системы службы времени               | Внешнее подключение GPS-приемника, необходимо вскрытие контейнера | Внешнее подключение GPS-приемника, необходимо вскрытие контейнера | Автоматически с помощью встроенного GPS-приемника через радиопрозрачный корпус           |
| Интерфейсы копирования данных  | Проводной, со вскрытием контейнера                                | Проводное, без вскрытия контейнера                                | Беспроводное, без вскрытия, скорость скачивания до 15 МВ/с                               |
| Тип корпуса  | Металлическая сфера   | Стеклянная сфера  | Стеклянная сфера   |
| Средства поиска на поверхности воды после всплытия                   | Световой сигнал от лампочки внутри сферы ночью                    | Световой сигнал от лампочки внутри сферы ночью. Флаг. Радиосигнал | Световой сигнал от лампочки внутри сферы ночью. Флаг. Радиосигнал с координатами станции |
| Вес без якоря, кг  | 40  | 35  | 20   |
| Размеры (диаметр), см  | 45  | 43.2  | 33   |
| Тип размыкателя  | Электрохимический   | Электрохимический   | Электрохимический или электромеханический  |
| Наличие экологически безопасного растворимого якоря                  | Нет   | Нет   | Якорь разлагается после проведения съемки на компоненты морской воды и дна               |

сравнив их с донными станциями предыдущих поколений (табл. 1).

Преимущества технических характеристик ЦДСС разработки компании «Геонод Разведка» обусловлены существенным развитием элементной базы, используемой при создании станции.

Электронные приборы и компоненты уменьшились в размерах. Это позволило создать компактную станцию размером 330 мм в диаметре вместо 450 мм. При этом ее вес снизился вдвое, причем автономность не только не уменьшилась, а увеличилась до 90 суток за счет не только уменьшения энергопотребления, но и увеличения емкости элементов питания. Увеличился динамический диапазон регистрируемых сейсмических сигналов за счет как уменьшения собственных шумов электронной аппаратуры, так и использования 24-разрядных аналогово-цифровых преобразователей (АЦП). Снизилось энергопотребление новых компонентов, а точность системы внутренней службы времени улучшилась на порядок. При этом создание оптимальных алгоритмов временной привязки позволило обеспечить точность около 1 мс на всем времени автономной работы станции. Внешний вид станций приведен на рис. 1.

Применение технологии современной высокоскоростной беспроводной передачи данных позволило создать «необслуживаемую» станцию в период ее автономной работы. Станция «Геонод Разведка» [4] дает возможность многократных ее постановок на различных участках морского дна без вскрытия глубоководного контейнера для скачивания данных, зарядки батарей, синхронизации внутренней системы службы времени, повторной герметизации ее корпуса после подъема на борт судна и считывания информации. Трудозатраты на работу со станциями многократно снижаются. Это очень важно в полевых условиях для минимизации времени работы и, соответственно, уменьшения использования дорогостоящего судового времени.

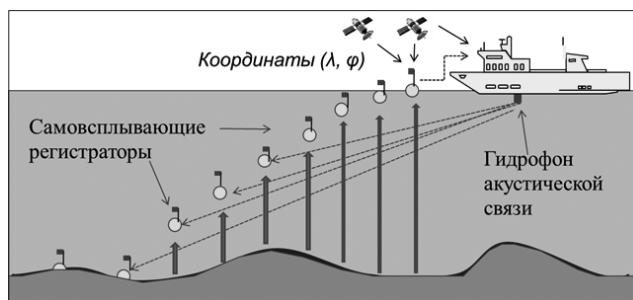


**Рис. 1.** Донные самовсплывающие станции (слева направо): ЛАРГЕ – ФГУП ОКБ ОТ РАН (2002), GeoPro GmbH (2007), «Геонод Разведка» (2014).

При разработке станции «Геонод Разведка» создана надежная система всплытия, которая включает в себя не только качественную гидроакустическую связь, но и надежный электрохимический и механический размыкатели, позволяющие использовать оборудование как в морской, так и в пресной воде. При многократных постановках станций были выяснены причины их невсплытия на поверхность, основная из них – засасывание станции рыхлыми донными осадками. Применение в разработке простейшего устройства в виде выталкивающих пружин позволило с высокой вероятностью обеспечить отрыв станции от якоря.

Изменилась и схема поиска станций на поверхности. Если раньше это был визуальный поиск, то теперь по радиоканалу передаются координаты, и поиск возможен 24 часа в сутки, даже при плохой видимости (рис. 2). В ночное время станцию хорошо видно по световому сигналу от лампочки внутри сферы.

В период создания ЦДСС «Геонод Разведка» появилось различное программно-математическое обеспечение, позволяющее в разы уменьшить время обработки и интерпретации. Расчет прямых кинематических задач стал происходить за доли секунд на ноутбуках. Визуализация стала возможна не только в виде отдельных трасс, но и в цвете с различными параметрами обработки исходных сейсмограмм. Появилась возможность увидеть не только первые вступления, но и последующие. Также развились методы томографии как по первым вступлениям, так и многоволновая, когда возможен учет различных типов волн. Основные операции осуществляются путем работы с экранными формами, а не с цифрами, вводимыми вручную, а визуализация дает возможность оперативной и наглядной интерпретации выделяемых для обработки волн.



**Рис. 2.** Сбор всплывающих станций после их последовательного вызова по гидроакустической связи. После всплытия на поверхность моря, станции автоматически синхронизируются по сигналам GPS/Глонасс, выключают регистрацию данных и передают по радиоканалу свои координаты на судно.

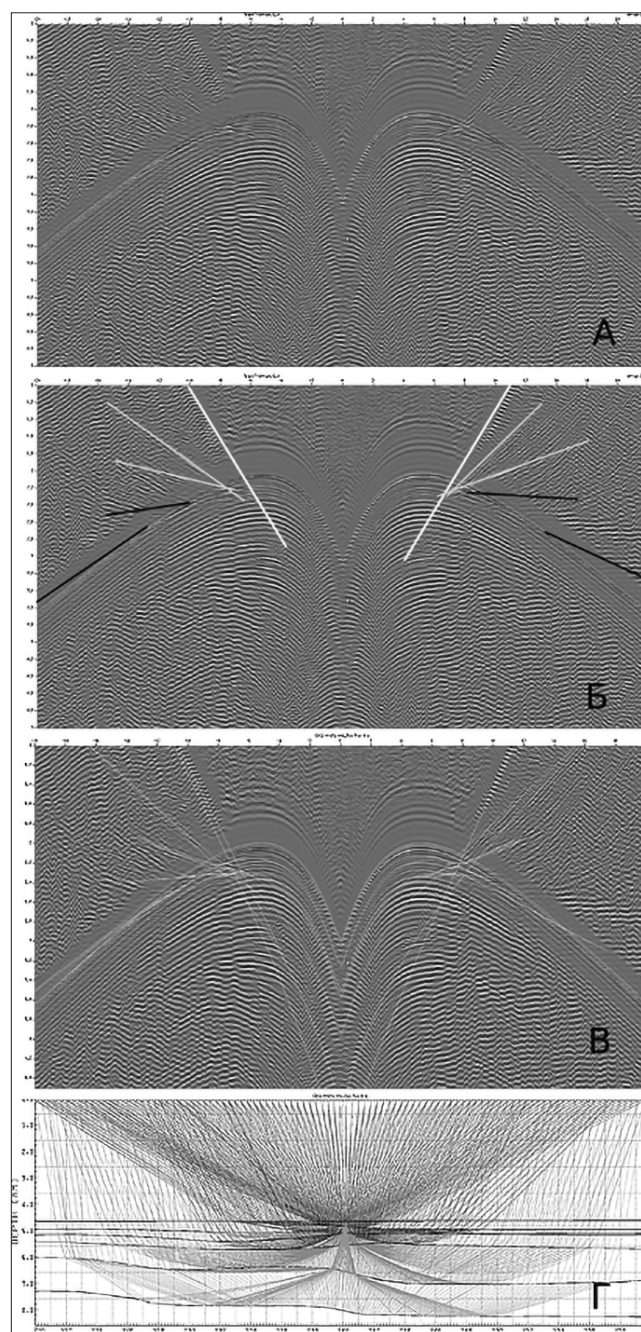
Изменился подход к процессу построения скоростных глубинных разрезов. Классическая схема работы всегда включала пикирование вступлений, их идентификацию, получение наблюдаемых годографов, сравнение с расчетными временами путем кинематического моделирования по изменяемой скоростной модели и смены идентификации пикированных годографов при необходимости [3]. Для считывания первичной

информации для скоростного разреза применялась томография по первым вступлениям, то есть вся работа по созданию скоростной модели происходила на поле годографов, интерпретация которого существенно зависит от квалификации и опыта геофизика и привносит большую долю субъективности и неопределенности.

В настоящее время графический экранный интерфейс дает возможность выделять вступления волн на поле сейсмических трасс (сейсмограмм общей точки приема) с последующим наложением на него расчетных годографов при одновременном контроле идентификации вступлений с помощью лучевых диаграмм. Подбор скоростной модели идет с помощью расчета прямой кинематической задачи. Это ускоряет процесс построения финального разреза с хорошей увязкой волнового поля. Особенно этот метод хорошо работает при построении разреза осадочного чехла, который не виден в первых вступлениях, и расслоение осадков обнаружить не удавалось. Таким образом, исследователи приблизились к действительно многоволновой сейсморазведке.

Рис. 3 иллюстрирует описанный выше подход получения скоростных разрезов осадочного чехла на примере одной станции – сейсмограммы общей точки приема (вертикальной компоненты геофона), показанной в редукции (линейная кинематическая поправка) со скоростью 2 км/с. Рисунок иллюстрирует этапы интерпретации получения скоростного разреза. На рис. 3А показана сейсмограмма после полосовой фильтрации, на рис. 3Б – разделение на слои начальной модели (разным тоном показаны волны, относящиеся к преломлениям и отражениям для различных слоев); на рис. 3В – та же сейсмограмма с наложенными на нее подсчитанными временами пробега для скоростной модели, приведенной на рис. 3Г, на которой также показаны лучи соответствующих волн. Процесс подбора результирующей модели состоит в получении такой модели, для которой времена пробега всех станций будут удовлетворять наблюдаемым временам, как это показано для одной станции на рис. 3В.

Временные затраты на получение скоростной модели с донными регистраторами на профиле длиной 420 км, включая морские работы, составили 3 недели, а на построение окончательного разреза на основе обработки информации, полученной с помощью сейсмических кос на этом же профиле, – около 3 месяцев, включая морские работы и обработку данных на берегу. Глубинный диапазон исследований с донными станциями позволяет проследить строение земной коры до верхней мантии, а на разрезах, полученных при обработке информации с сейсмических



**Рис. 3.** Построение глубинной скоростной модели для осадочного чехла – верхней части разреза земной коры при исследованиях с донными станциями на длинных профилях (пояснения в тексте).

кос (метод общей глубинной точки, ОГТ), виден в основном осадочный чехол до поверхности консолидированной коры. Иногда на разрезах ОГТ удается увидеть отражения от слоев нижней коры, которые можно надежно интерпретировать только при сопоставлении с результатами донных наблюдений.

Задачи многоволновой сейсморазведки можно решать, применяя современные самовсплывающие ЦДСС.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦДСС И ДРУГОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ТРЕБУЮЩИЕ УЛУЧШЕНИЯ

**1. Автономность работы.** При выработке требований ко вновь разрабатываемым ЦДСС авторы старались учесть, что ЦДСС могут применяться как для научных исследований, так и для промышленных нужд.

При научных исследованиях сейсмические станции расставляются в заранее заданных точках мирового океана и могут работать на дне до 1 года. Затем эти станции поднимают с помощью определенного судна. Особые требования к длительности обработки полученной информации не предъявляются. Понятно, что в этом случае ЦДСС должна иметь минимальное энергопотребление и минимальный уход внутренней системы службы времени в течение периода непрерывной эксплуатации.

В настоящее время основной промышленный метод морской сейсморазведки – это 2Д/3Д сейсмические съемки с буксируемыми косами. Региональные исследования с донными станциями обычно рассматриваются как научные или направленные на общее изучение геологического строения. Но именно такие исследования дают важную информацию для понимания геодинамической модели развития нефтегазовых бассейнов [6]. Рынок таких работ достаточно мал, и их финансирование происходит по остаточному принципу. Поэтому использование дорогих судов с вертолетными площадками для смены экипажа, дозаправщиков и прочей хорошо известной в сейсмической промышленности инфраструктуры будет не оправдано. Судна для проведения региональных работ в несколько раз дешевле (если не в десятки раз). Автономность работы судов, используемых для региональных работ, не превышает 45 суток. Этим, по сути, и определяется максимальная автономность работы таких приборов. Станция с автономностью работы до 1 года тем более подойдет для этого типа работ.

**2. Точность привязки к системе единого времени.** Точность привязки к системе единого времени каждого цифрового отчета информации, зарегистрированной

стрированной ЦДСС, должна быть меньше 1 мс в течение всего периода ее работы на дне. Такие требования к точности привязки к системе единого времени существуют у наземных сейсмических станций.

**3. Динамический диапазон цифровой регистрации.** Верхний предел динамического диапазона цифровой регистрации ограничен динамическим диапазоном промышленного геофона – 140 дБ. Сейчас наилучшие системы сейсмической регистрации обеспечивают меньший динамический диапазон 130 дБ. Дальнейший прогресс в этой области связан с появлением нового поколения аналого-цифровых преобразователей.

**4. Частотный диапазон регистрируемых сигналов** должен быть существенно расширен вниз до 0.1 Гц. Это влияет на дальность регистрации и получение изображений глубинной части сейсмического разреза. На эту характеристику также влияет соотношение сигнал/шум в месте регистрации, качество сцепления геофонов с грунтом, а также качество воспроизведения углов подхода сейсмических волн на горизонтальных компонентах.

**5. Габариты и вес станций.** Желательно иметь минимальные габариты станций, размером с футбольный мяч и весом до 10 кг. Применение новой элементной базы с пониженным энергопотреблением и использование новых, более емких аккумуляторов, возможно, основанных на новых принципах работы, позволят достичь необходимого прогресса.

**6. Удобство работы со станциями.** Время обслуживания станций должно быть минимальным. Работа с ЦДСС на палубе сводится к проведению тестов функционирования прибора, зарядке (когда это требуется), скачиванию данных, установке параметров сбора данных, если они меняются. Включение/выключение должно быть беспроводным. Взаимодействие со станциями (желательно на палубе) по беспроводному высокоскоростному интерфейсу, как и скачивание данных (15 Мбайт/с). Станции должны иметь автоматическую синхронизацию времени по сигналам GPS без вмешательства оператора. Программное обеспечение должно быть удобным и работать на всех современных мобильных платформах. Из имеющихся на рынке станций всем этим качествам удовлетворяют только станции «Геонод Разведка».

**7. Самовсплывание без оставления якоря.** В разработке ЦДСС компании «Геонод Разведка» используется экологический якорь на дне. Однако надо думать о технологии самовсплывания без оставления якоря на дне. Это делает работу со станциями еще более удобной. При больших объемах постановок не надо будет производить большое количество якорей.

**8. Средства обнаружения станций и подбора с поверхности.** Редко, но бывают проблемы со всплыванием станций из-за вязких грунтов, в этом случае (даже при наличии специальных средств борьбы с вязкими грунтами у станций компании «Геонод Разведка») станции могут всплыть в непредсказуемый период времени после ее вызова со дна. Чтобы избежать потерь таких станций и не терять время на их ожидание, необходимо применять спутниковый модем на каждой станции, который активизируется, как только она оказывается на поверхности моря. В этот момент судно получает e-mail с координатами местонахождения станции и продолжает получать несколько дней. Это позволяет спланировать работу по ее ловле, не прерывая текущей работы на профиле.

Из других средств обнаружения отметим флаг, светодиод в ночное время, радиосигнал с координатами станции. Наличие этих устройств обнаружения позволяет в перспективе использовать беспилотные катера как средства сбора станций с поверхности моря, используя автонаведение по получаемым координатам станций по радиоканалу. Такой прогресс позволит расширить погодное окно работы и сэкономить время работы при сборе станций.

**9. Обработка и интерпретация.** Необходимо развитие новых методов обработки многокомпонентных данных, таких как многоволновая обработка, полноволновая миграция многокомпонентных данных на основе системы Ламэ (неволнового уравнения) с анизотропными членами и методы полной волновой инверсии для построения детального скоростного разреза. Полноволновая инверсия использует все волны, а не чистит разрез от нежелательных водных, кратных, обменных и прочих волн. Ее применение также позволит уточнить необходимые параметры оптимального шага расстановки станций. Технология ОГТ при планировании съемки исходит из того, что для освещения верхних границ используются только однократно отраженные волны. Если же задействовать преломленные, обменные и кратные волны для их освещения, то, возможно, требования к оптимальному шагу между станциями сильно изменятся.

### ЭЛЕМЕНТЫ ЦИФРОВОЙ ДОННОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В ИГЭ РАН для создания сейсмостанции нового поколения проведены работы по разработке главных элементов донной станции, которые обеспечивают пониженное энергопотребление, позволяют выполнить все требования, необходимые для подъема, поиска на поверхности и ско-

рейшего считывания записанной информации, что удовлетворяет приведенным выше требованиям. Эти элементы – контроллер ЦДСС и внутренняя служба времени.

Структурная схема современной самовсплывающей ЦДСС представлена на рис. 4. Эти станции широко используются для разведки газонефтеносных месторождений на шельфах, а также для научных исследований на дне мирового океана. Основные потребительские характеристики донных станций: 1) автономность работы, 2) уменьшение времени обслуживания станции при подготовке к погружению, после подъема с глубины на корабль и считывания информации, 3) обеспечение требований к точности привязки получаемой сейсмической информации к системе единого времени.

Первые две характеристики определяют в общем экономичность проводимых морских работ, так как основная стоимость, например, сейсмо-разведочных работ определяется ежесуточной стоимостью аренды корабля. Точность привязки информации к системе единого времени будет определять точность границ потенциальных месторождений газа и нефти в недрах.

### Контроллер для ЦДСС

Контроллер ЦДСС предназначен для управления работой всех ее элементов (считывание информации с сейсмометров, управление контроллером гидроакустического канала связи, измерение сигналов системы ориентации датчиков донной станции в пространстве, подача сигналов на размыкание балласта, синхронизация системы службы времени перед постановкой и после подъема от GPS-приемника, передача считанной информации на внешний накопитель по Wi-Fi,

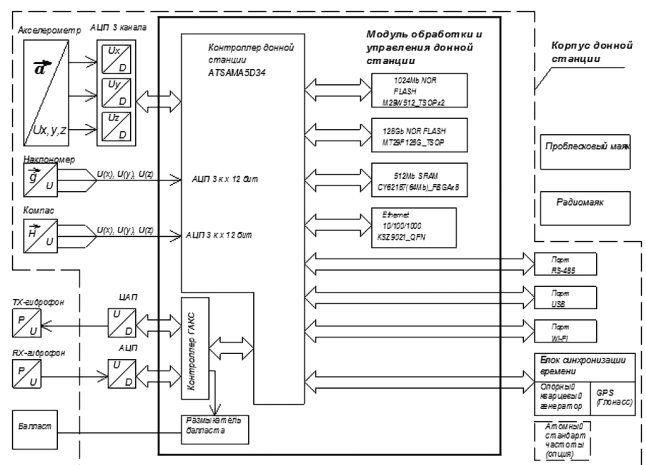


Рис. 4. Структурная схема ЦДСС.

**Таблица 2.** Расчет энергопотребления компонентов контроллера ЦДСС

| Название компонента, составляющего контроллер | Тип элемента    | Потребление энергии, mW |               |
|---|-----------------|-------------------------|---------------|
|   |                 | Активный режим          | Standby режим |
| MCU – главный процессор контроллера ЦДСС      | ATSAMA5D34      | 200                     | 0.5           |
| 64-Mbit (4M x 16) SRAM, 8 шт = 64 МБайт       | CY62187EV30     | 22                      | 0.15          |
| 1Gb NOR FLASH, 2 шт = 256 МБайт               | JS28F00AM29EWLA | 100                     | 0.5           |
| MCU2 вспомогательный процессор для АЦП        | ATSAM4LS2C      | 4.5                     | 4.5           |
| АЦП 4 channel, 24 бит                         | ADS1220         | 1.4                     | 0.4           |
| MMC memory card                               |                 | 1000                    | 0             |
| <b>ИТОГО</b>                                  |                 | <b>~1230</b>            | <b>~10</b>    |

мониторинг и самотестирование всех элементов в процессе эксплуатации).

Микропроцессоры, использовавшиеся в разных донных сейсмических станциях, программировались специфически и были, как правило, завязаны на конкретного программиста очень высокой квалификации. Процесс программирования был очень трудоемким и занимал годы. Здесь сделана попытка использовать самые современные процессоры, которые имеют многозадачную операционную систему Linux. Это позволит в дальнейшем создать ядро практически для любого геофизического оборудования, программы для которого смогут писать на языках высокого уровня типа С++ программисты не очень высокой квалификации.

Модуль электроники создается на основе микроконтроллера с ядром ARM Cortex-A5 (производства Atmel) с наилучшим показателем величины потребления на MIPS под управлением операционной системы высокого уровня Linux. Минимизация энергопотребления данного контроллера будет достигаться тем, что обслуживание элементов донной станции будет проходить за единицы микросекунд, остальное время процессор будет «спать».

Центральный контроллер – на основе SAMA5D34 микроконтроллера под управлением операционной системы Linux, 64 Мбайт оперативной памяти на основе 8 SRAM чипов и 256 Мбайт постоянной перезаписываемой памяти типа NOR FLASH для начальной загрузки операционной системы и управляющей программы. Обмен накопленными данными на поверхности посредством интерфейса GigaEthernet и Wi-Fi.

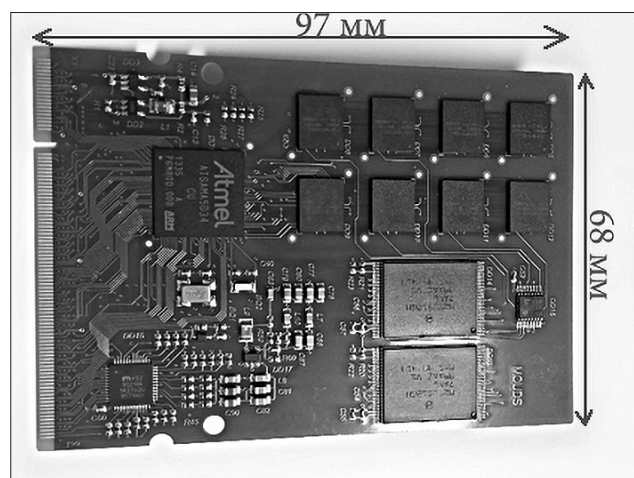
Логика работы контроллера следующая. Донная станция осуществляет сбор сейсмических данных на дне с помощью постоянно функционирующего микропотребляющего контроллера,

который управляет аналого-цифровыми преобразователями, подключенными к выходам сейсмометров. Опрос контроллера АЦП, аккумуляция показаний в буфер памяти и регулярная передача центральному контроллеру для сохранения во флеш-память объемом 128 Гб проводится несколько раз в час. Остальное время главный процессор контроллера находится в спящем режиме.

В табл. 2 приведен расчет энергопотребления основных компонентов, составляющих контроллер ЦДСС.

Так как работа центрального контроллера на дне предполагается в импульсном режиме в течение нескольких секунд за час, то средняя потребляемая мощность ЦДСС планируется не более 100 мВт. В таблице не учтены мощности потребления сейсмических датчиков и системы службы времени. Причем уменьшение потребления мощности внутренней системой службы времени ЦДСС возможно, о чем сказано ниже.

На рис. 5 приведен общий вид изготовленного по документации ИГЭ РАН контроллера ЦДСС.

**Рис. 5.** Контроллер для ЦДСС нового поколения.

### Опорный генератор для ЦДСС

В цифровых донных сейсмических станциях опорный генератор — очень важный элемент. Дело в том, что если работу наземных сейсмостанций можно синхронизировать по сигналам GPS каждую секунду, то донные станции синхронизируются от GPS только перед постановкой, работают они на дне, где сигналы GPS недоступны. Поэтому точность привязки сейсмической информации, регистрируемой ЦДСС, будет определяться нестабильностью частоты опорного генератора. В частности, если нестабильность опорного генератора составляет  $10^{-6}$  Гц/с, то уход системы службы времени за сутки может составлять ~90 мс. Донные станции работают на дне от 2 недель до года: можно представить, каков будет «уход» внутренних часов ЦДСС. При скорости регистрируемых сейсмических волн от 5 до 10 км/с погрешность обрабатываемой информации по определению границ подводных газонефтеносных месторождений будет составлять несколько километров в зависимости от времени между постановкой донной станции и временем регистрации отраженных волн (при сейсморазведке).

За рубежом разработаны и выпускаются уже опорные рубидиевые и цезиевые генераторы большой стабильности до  $10^{-11}$ – $10^{-13}$  Гц/с, но они потребляют значительную энергию в процессе эксплуатации, так как они термостатированные. Диапазон потребления в зависимости от типа генераторов — от 120 мВт до 1 Вт.

Например, атомный опорный генератор Quantum™ SA.45s CSAC, внешний вид которого приведен на рис. 6, имеет следующие характеристики: потребляемая мощность  $\leq 120$  мВт, объем 16.5 см<sup>3</sup>, габариты 4.06 × 3.53 × 1.14 см, вес 35 г, старение  $< 3.0 \cdot 10^{-10}$ /месяц, выход 10 МГц, меандр, формат CMOS 0–3.3 В, выход 1 PPS, вход 1 PPS для синхронизации, герметичный корпус, интерфейс RS-232 для управления и мониторинга, режим сверхмалого энергопотребления менее 100 мВт, краткосрочная стабильность  $2.5 \cdot 10^{-10}$  в секунду.

Предполагалось реализовать при работе ЦДСС на дне моря схему синхронизации на основе прецизионного рубидиевого или цезиевого опорного гене-



Рис. 6. Атомный опорный генератор Quantum™ SA.45s CSAC размером с небольшую микросхему.

ратора, который включался бы для синхронизации службы времени ЦДСС 1 раз в сутки. При этом процесс синхронизации требовал 1 час работы в сутки, таким образом экономилась бы энергия питания ЦДСС. Однако выяснилось, что стоимость таких генераторов достигает 4 тыс. долларов, и их применение значительно удорожает стоимость донной станции, которая доходит до 30 тыс. долларов, и идет вразрез с требованиями по импортозамещению.

Покупные отечественные кварцевые генераторы не проходят либо по чрезмерному энергопотреблению, либо по недостаточной стабильности частоты. Параметры доступных кварцевых генераторов приведены в табл. 3.

Целью работы являлось создание опорного генератора (ОГ) для обеспечения требуемых частотно-временных характеристик ЦДСС нового поколения. Главное требование к создаваемому генератору — минимальное энергопотребление и нестабильность частоты, приближенная к рубидиевым и цезиевым аналогам.

Идея службы времени ЦДСС основана на предположении, что частота кварцевого генератора имеет стабильную зависимость от температуры, что обеспечивает возможность цифровой компенсации температурной погрешности. В этом случае температурные поправки можно вводить с очень высокой точностью, определяемой только погрешностью измерения температуры. Сейчас существуют цифровые термометры, позволяющие измерять температуру с очень высокой разрешающей способностью до 0.01°C. Для ЦДСС был разработан и изготовлен кварцевый ОГ с пониженным энергопотреблением на базе прецизионного вакуумного резонатора типа K1, соответствующего техническим условиям РЦ3.382.255ТУ. Современные способы обработки данных позволяют использовать кварцевые резонаторы без точной подгонки частоты генерации до номинального значения. Это дает возможность избежать применения корректирующей емкости в схеме включения резонатора и, следовательно, исключить ее дестабилизирующее влияние на частоту генерации.

Определение зависимости частоты ОГ от температуры кристалла резонатора с дискретностью 0.01°C позволяет получить таблицы соответствия и записать эти данные в памяти ЦДСС, а именно: значения температуры корпуса кварцевого резонатора ОГ и значения частоты ОГ на протяжении всего времени нахождения ЦДСС на дне в рабочих условиях.

Сейсмическая информация, получаемая ЦДСС, записывается в память станции с привязкой к системе текущего времени, начальное значение кото-



Таблица 3. Параметры кварцевых генераторов

| № | Название, тип                   | Изготовитель                 | Частота (МГц)/ относительная погрешность | Питание: напряжение (В)/ мощность (Вт) |
|---|---------------------------------|------------------------------|--|--|
| 1 | Сонет, термостатированный       | Омский НИИ приборостроения   | 10/1·10 <sup>-8</sup>                    | 12/0.3                                 |
| 2 | Астра, термостатированный       | Тот же                       | 10/5·10 <sup>-8</sup>                    | 12/0.25                                |
| 3 | Фиалка, термокомпенсированный   | - « -                        | 10/1·10 <sup>-6</sup>                    | 12/0.02                                |
| 4 | ГК-36-ТК, термокомпенсированный | Фирма «Морион», С.-Петербург | 10/2·10 <sup>-6</sup>                    | 12/0.036                               |
| 5 | ГК-88-ТК, термокомпенсированный | Тот же                       | 10/2·10 <sup>-6</sup>                    | 12/0.036                               |
| 6 | ГК-52-П, термокомпенсированный  | - « -                        | 10/1·10 <sup>-5</sup>                    | 5/0.005                                |

рого задается при синхронизации часов при старте измерений.

После подъема ЦДСС сейсмические измерения прекращаются, происходит синхронизация часов станции по сигналам ГЛОНАСС, и выполняется окончательная привязка сейсмической информации к системе единого времени.

Метод использования значения частоты ОГ как функции от температуры кристалла резонатора наряду с простотой и эффективностью имеет технологическую погрешность, которая обусловлена тем фактом, что физически невозможно непосредственно измерять температуру кварцевого кристалла по следующим причинам:

- площади корпусов кварцевого резонатора и датчика температуры и коэффициенты теплопроводности материалов их корпусов различны, а значит, величины тепловых сопротивлений  $R_{\text{кв-воздух}}$  и  $R_{\text{дт-воздух}}$  не могут быть равными;
- между корпусами резонатора и датчика температуры всегда существует тепловое сопротивление  $R_{\text{кв-дт}}$ , отличное от нуля;

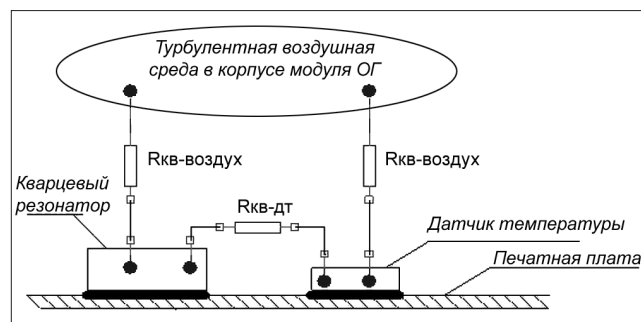


Рис. 7. Схема теплового состояния пары «кварцевый резонатор – датчик температуры».

- воздушная среда внутри корпуса модуля ОГ имеет турбулентный характер, что не позволяет достичь равенства температур корпусов резонатора и датчика температуры даже в стационарном режиме работы самой станции ЦДСС.

Минимальная погрешность метода достигается при идеальном тепловом контакте корпусов резонатора и датчика температуры, когда тепловое сопротивление  $R_{\text{кв-дт}}$  близко к нулю, что показано на схеме теплового состояния пары «кварцевый резонатор – датчик температуры», приведенной на рис. 7.

Из вышесказанного следует, что минимизация величины теплового сопротивления  $R_{\text{кв-дт}}$  потребует оригинальных конструкторских решений, подлежащих тщательной экспериментальной проверке.

На рис. 8 представлен внешний вид опорного кварцевого генератора. Основные технические ха-



Рис. 8. Опорный кварцевый генератор ЦДСС нового поколения.



**Рис. 9.** Цифровой термостат, в котором применяется элемент Пельтье, и выставленная заранее температура удерживается с точностью  $\pm 0.02^\circ\text{C}$ .

характеристики разработанного ОГ: номинальная частота 5 МГц (или 10 МГц); диапазон рабочих температур от 0 до  $+6^\circ\text{C}$ ; долговременная относительная стабильность частоты  $\sim 5 \cdot 10^{-9}$ ; потребляемая мощность не более 50 мВт.

При использовании для каждого образца ОГ индивидуальной подгонки параметров цепей частотной термокомпенсации, опираясь на прецизионное измерение температуры кварцевого резонатора с дискретом  $0.01^\circ\text{C}$ , реально достичь значения долговременной нестабильности частоты не хуже  $\pm 5 \cdot 10^{-10}$  от частоты генерации. Достижение предельных параметров ОГ по стабильности частоты потребует оригинальных конструкторских решений, позволяющих минимизировать тепловое сопротивление  $R_{\text{КВ-ДТ}}$  между корпусами кварцевого резонатора и датчика температуры ДТ.

#### *Методика проведения экспериментальных исследований*

Для проверки идеи была создана измерительная установка на основе цифрового термостата, в котором температура устанавливалась и удерживалась с точностью до  $0.02^\circ\text{C}$ . В термостат (рис. 9) помещался разработанный генератор с высокоточным датчиком температуры, а частота

генерации измерялась на персональном компьютере с помощью специальной программы. Синхронизация измерений проходила по секундным меткам с приемника GPS.

Измерение частоты ОГ проводилось по меткам СЕВ GPS. Полученные данные приведены в табл. 4, где  $T$  – рабочая температура ОГ;  $F_{\text{ОГ}}$  – измеряемая частота ОГ;  $F_{\text{Пр}}$  – частота ОГ, приведенная к начальной рабочей температуре через коэффициент температурно-частотной зависимости.

#### *Сравнение с аналогами опорных генераторов*

Лучшие отечественные источники прецизионных частот в настоящее время – изделия фирмы ОАО «МОРИОН» из Санкт-Петербурга, которые наиболее близки по техническим характеристикам к нашим кварцевым генераторам, а из атомных стандартов – FE-5650A, выпускаемый по лицензии американской компании Frequency Electronics Inc. (FEI) – лидера мировой индустрии рубидиевых стандартов. Технические характеристики ОГ ИГЭ РАН и изделий ОАО «МОРИОН» приведены в табл. 5.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА ЧЕРНОГО МОРЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВЫХ ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Использование цифровых сейсмических донных станций в геофизических исследованиях обладает рядом преимуществ, так как позволяет получать новые знания о строении земной коры и ее осадочного чехла, а также верифицировать и уточнять результаты наблюдений, полученных с помощью технологии буксируемых сейсмических кос. Покажем это на примере исследований земной коры российского сектора Черного моря, что можно сделать с имеющимся парком в 60 сейсмических донных станций модели «Геонод Разведка». Предлагаем сделать продолжение региональных длинных профилей, выполненных в 2005 г. Институтом океанографии Саутгемптонского университета Великобритании [14] с использованием донных регистраторов в Восточно-Черноморской котловине (рис. 10), в российский сектор Черного моря.

**Таблица 4.** Данные экспериментального исследования ОГ

| $T, [^\circ\text{C}]$            | 0.00        | 1.00                | 2.00                | 4.00                | 8.00               |
|----------------------------------|-------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|
| FOГ, [Гц]                        | 5000645.738 | 5000645.617         | 5000645.491         | 5000645.246         | 5000644.757        |
| FПр, [Гц]                        | 5000645.738 | 5000645.739         | 5000645.735         | 5000645.734         | 5000645.733        |
| $\delta F, [\text{Гц}/\text{с}]$ | –           | $+2 \cdot 10^{-10}$ | $-6 \cdot 10^{-10}$ | $-8 \cdot 10^{-10}$ | $-1 \cdot 10^{-9}$ |

**Таблица 5.** Технические характеристики ОГ ИГЭ РАН и изделий ОАО «МОРИОН»

| Наименование           | Частота, МГц | Долговременная нестабильность | Диапазон рабочей температуры | Питание, В | Мощность потребления |
|------------------------|--------------|-------------------------------|------------------------------|------------|----------------------|
| ОГ ИГЭ РАН             | 5            | $1 \cdot 10^{-9}$ за 12 мес.  | 0°C...5°C                    | 12         | ≤50 мВт              |
| ГК200М-ТС ОАО «МОРИОН» | 10           | $2 \cdot 10^{-8}$ за 12 мес.  | -40°C...85°C                 | 12         | 3 Вт                 |
| FE-5650А ОАО «МОРИОН»  | 10           | $2 \cdot 10^{-10}$ за 12 мес. | -10°C...55°C                 | 5 и 15-18  | 14 Вт                |
| FE-5680А ОАО «МОРИОН»  | 10           | $2 \cdot 10^{-10}$ за 12 мес. | -10°C...55°C                 | 15-18      | 15 Вт                |

Примечание: Долговременная нестабильность частоты рубидиевых стандартов FE-5650А и FE-5680А в обычном исполнении составляет  $2 \cdot 10^{-9}$ .

#### Геологические задачи, которые можно решить при проведении работ на продолжении профилей 2005 г.:

- определение глубины залегания кристаллического фундамента на вале Шатского и Туапсинском прогибе на длинных профилях;
- прослеживание морфологии поверхности фундамента;
- определение скорости поперечных и продольных волн в нижней части осадочного чехла и фундаменте;
- уточнение толщины коры.

#### Совместная интерпретация данных 2005 г. и новых данных по продленным в российский сектор Черного моря региональным профилям позволит:



**Рис. 10.** Профили с донными станциями в восточной части Черного моря. Черные квадраты показывают положение донных регистраторов на 4 профилях с донными станциями в 2005 г. [12-14] в турецком секторе Черного моря. Тонкие штрихпунктирные линии – предлагаемое продолжение этих профилей в российский сектор Черного моря. Линия, идущая с северо-запада на юго-восток, – предлагаемый длинный профиль вдоль вала Шатского. Общая длина предлагаемых новых профилей – 1400 км.

- прояснить генезис образования Восточно-Черноморской впадины. На современных палеотектонических реконструкциях вал Шатского уже с байосского времени (171 млн лет) соприкасался непосредственно с Понтидами южного берега Черного моря. Осадочные горизонты, соответствующие этому геологическому времени, – последние видимые по глубине отражения на разрезах, полученных с помощью буксируемых кос [2, 4, 5]. Исследования с применением донных станций позволят продлить известную геологическую историю в более раннее время, а также полнее использовать аналогии в строении турецкого сектора Черного моря для прогнозирования нефтегазоносности российского сектора [5];

- дать более определенную датировку осадков нижней части осадочного чехла, так как профили 2005 г. проходили через пробуренные скважины, а их продолжение в российский сектор позволит привязать новые сейсмические изображения к данным бурения;

- определить:
  - существование, объем и местоположение продуктов рифтового подплавления в форме подкоровой интрузии или вулканических образований;
  - тип расширения земной коры в центре котловины и направление, относительно которого сопряженные континентальные окраины симметричны;
  - распределение расширения коры между верхней и нижней корой;
  - природу утончения земной коры поперек Восточной Черноморской котловины и сопряженных с ней континентальных окраин;
  - историю развития напряжений в котловине.

#### Проведение донной съемки по системе региональных профилей международной исследовательской программы 2011 г., выполненных с длиной (10 км) косой (рис. 11)

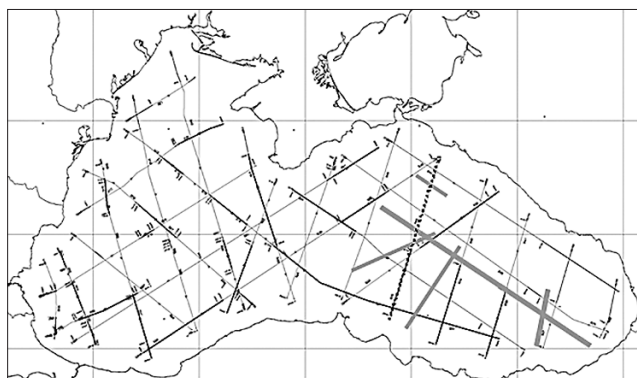
Работы на длинных региональных профилях вдоль изученных линий методом буксируемых кос позволят:

- получить надежную скоростную модель для Р и S волн, и тем самым определить более точное положение глубинных осадочных слоев, поверхности и морфологии кристаллического фундамента и границы Мохоровичича;

- по различиям в скоростных разрезах и морфологии границ выделить типы коры для Черного моря и основные глубинные элементы, имеющие определяющее значение для восстановления истории развития и формирования современной коры Черного моря;

- основными проблемами, возникающими при обосновании стратиграфической привязки мезозойских горизонтов в пределах российского сектора Черного моря, являются отсутствие скважинных данных, а также сложность прямой передачи стратификации от скважин, пробуренных на суше, обусловленная отсутствием сейсмических профилей в переходной зоне суша-море. Донные станции могут заполнить этот пробел, так как у них нет связанных с работой на малой и предельно малой глубине ограничений, и выполнить работы по технологии ОГТ в переходной зоне для связи морских данных с сухопутными скважинами [8-10];

- выделяемый в разрезе вала Шатского (в районе структуры Палласа) перспективный нефтегазоносный верхнеюрский сейсмокомплекс по кинематическим и динамическим характеристикам близок как надвинутому с севера мел-палеогеновому флишевому комплексу Анапского выступа, так и подстилающим его нижнесреднеюрским породам переходного метаморфизованного комплекса. Наиболее надежный способ определения его литотипа – скоростной анализ с использова-



**Рис. 11.** Положение региональных профилей на Черном море. Сплошные тонкие черные и серые линии – региональные профили с длинной косой (10 км), выполненные на судне «Мезень» в 2011 г.; толстые серые линии – 4 профили с донными станциями 2005 г. (82 донные станции [1, 16]) и короткий профиль ИОАН 2004 г. (5 донных станций) на вале Шатского; черный пунктир – профиль ОГТ.

нием данных преломленных и закрытически отраженных волн, полученных на длинных профилях, пресекающих эту структуру вдоль и поперек оси вала Шатского.

На рис. 12 показан пример того, что могут дополнительно дать исследования с донными станциями [14, 15] на длинных профилях по сравнению с результатами, полученными с помощью донных станций в 2005 г. (длинный профиль в котловине) и в 2011 г. с помощью буксируемой длинной косы (профиль, оттененный короткой толстой серой линией на рис. 11).

**Примерная оценка времени выполнения проекта с наиболее популярными параметрами 2Д съемки с донными станциями**

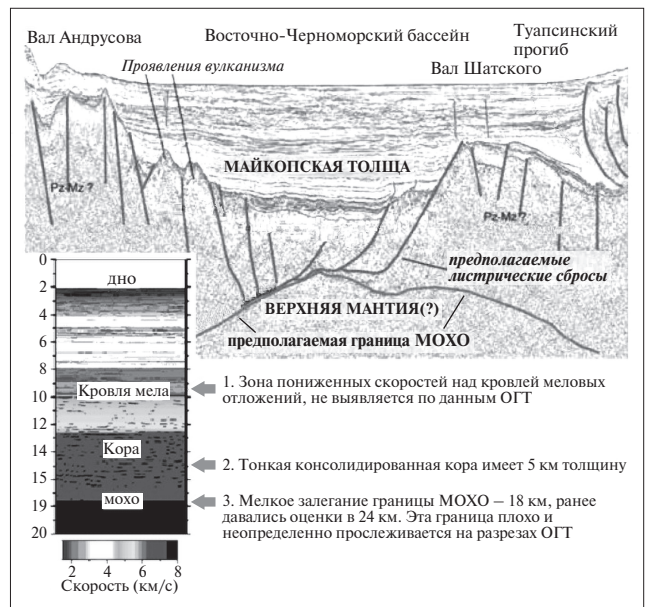
Время работ определялось на основании опыта выполненных проектов с донными станциями модели «Геонод Разведка», начиная с 2011 г. и по настоящее время.

*Параметры сейсмической съемки с донными станциями*

Расстояние на профиле между донными станциями – 10 км.

Длина расстановки донных станций – 600 км.

Количество донных станций в одной расстановке – 60.



**Рис. 12.** Сейсмический разрез (вверху) через Восточную котловину Черного моря, полученный в 2011 г. с помощью длинной косы (10 км), и скоростной разрез (слева) Восточной котловины, полученный при исследованиях с помощью донных станций 2005 г. [1, 15, 16]. Положение профиля ОГТ показано на рис. 11.

**Таблица 6.** Этапы работы на профиле 600/800-60

| Этап работы на профиле 600/800-60                                  | Количество часов на этап | Количество суток на этап |
|--|--------------------------|--------------------------|
| Расстановка станций на профиле. 60 станций на длине профиля 600 км | 50                       | 2.08                     |
| Прострелка профиля длиной 800 км со скоростью 4.5 узла             | 108                      | 4.5                      |
| Сбор станций на профиле 600 км, глубина моря 2 км                  | 112                      | 4.67                     |
| Общее время на работу  | 270                      | 11.25                    |
| Запас времени на простой, погоду                                   | 18                       | 0.75                     |
| <b>ИТОГО</b>   | <b>288</b>               | <b>12</b>                |

Максимальное удаление источник-приемник для крайних станций на профиле – 100 км.

Общая длина прострелки источником – 800 км.

Объем группового пневмоисточника от 48 л (3000 куб. дюймов).

Расстояние между источниками излучений – 120 м или 60 с.

Скорость судна при отстреле профиля – 4.5 узла.

Глубина буксировки пневмоисточника – 10 м.

#### *Производительность проведения работ по опыту предыдущих исследований*

Профиль с параметрами съемки, описанными выше, назовем “профиль 600/800-60”. Работы могут проводиться на одном судне, которое используется для отработки сейсмическим источником и для постановки и подъема донных станций. Для его отработки нужно 12 дней, расчет времени работы базируется на данных, представленных в табл. 6.

Таким образом, для реализации первого этапа программы работ с донными станциями в российском секторе Черного моря, которая проиллюстрирована на рис. 10 (1400 пог. км), необходимо около 30 суток (2 полных этапа по 12 суток и один укороченный в 6 суток).

### ВЫВОДЫ

В статье приведены сравнительные характеристики самовсплывающих цифровых донных сейсмических станций, изготавливаемых с начала 2000-х годов по настоящее время.

Сформулированы требования к основным техническим характеристикам для разработки самовсплывающих цифровых донных сейсмических станций нового поколения.

Приведены результаты разработки основных элементов донной станции, среди которых ар-

хитектура управляющих контроллеров донной станции и высокоточный кварцевый генератор, обеспечивающий точность службы времени при низком потреблении энергии и стоимости.

Даны предложения по изучению земной коры Черного моря на длинных региональных профилях с существующим парком 60 донных станций модели «Геонод Разведка».

Дан расчет времени проведения проекта с донными станциями на основе опыта работ в других проектах.

**Источник финансирования.** *Статья подготовлена в рамках выполнения госзадания и плана НИР по теме №г.р. АААА-А19-119021190077-6. Финансовая поддержка при подготовке статьи была оказана в рамках государственной программы повышения конкурентоспособности ведущих университетов Российской Федерации среди ведущих мировых научно-образовательных центров (проект 5-100).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Амелин Н., Леончик М., Петров Е., Сенин Б.* Геология без границ: новые данные о региональной геологии Черного моря // *Oil & Gas Journal Russia*. 2014. №12. С. 44-48.
2. *Афанасенков А.П., Никишин А.М., Обухов А.Н.* Геологическое строение и углеводородный потенциал Восточно-Черноморского региона. М.: Научный Мир, 2007. 172 с.
3. *Зверев С.М.* ГСЗ на океанах за 30 лет экспедиций: методика и волновые поля // *Физика Земли*. 1999. № 7-8. С. 143-163.
4. *Ильинский Д.А., Разумов А.Ю., Корнеев А.А., Русалин А.М., Гоц И.А.* Инновационный подход и мобильная технология реализации сейсморазведки в приливно-отливной зоне в труднодоступных районах Арктики // *Сейсмические приборы*. 2013. Т. 49. № 2. С. 58-70.
5. *Исмаилов Д.Ф., Терехов А.А., Шайнуров Р.В.* Поднятие Палласа в Черном море – мезозой-

- ский погребенный рифовый массив // ДАН АН СССР. 1991. Т. 319. № 4. С. 935-938.
6. Лаверов Н.П., Рослов Ю.В., Лобковский Л.И., Тулупов А.В., Воронов М.А., Ганжа О.Ю. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 2-13.
  7. Левченко Д.Г., Лобковский Л.И., Ильинский Д.А., Раушенбах И.Б., Леденев В.В., Рогинский К.А. Опыт разработки и испытания комплексной кабельной донной сейсмостанции // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50. № 4. С. 23-35.
  8. Попович С.В. Геологические предпосылки нефтегазоносности северо-восточной части Чёрного моря // Геология нефти и газа. 2000. № 6. С. 14-20.
  9. Пудовкин А.А., Хорттов А.В. Сейсмостратиграфические особенности и перспективы нефтегазоносности вала Шатского // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2002. №1. С. 40-46.
  10. Туголесов Д.А., Горшков А.С., Мейснер Л.Б. и др. Тектоника мезокайнозойских отложений Черноморской впадины. М.: Недра, 1985. 215 с.
  11. Хорттов А.В., Непроchnов Ю.П. Глубинное строение и некоторые вопросы нефтегазоносности южных морей России // Океанология. 2006. №2. С. 114-122.
  12. Minshull T.A., White N.J., Edwards R.A., Shillington D.J., Scott C.L., Demire, A., Shaw-Champion M., Jones S.M., Erduran M., Besevli T., Coskun G., Raven K., Price A., Peterson B. Seismic Data Reveal Eastern Black Sea Basin Structure // EOS: transactions American Geophysical Union. 2005. V. 86. N 43. P. 413-428.
  13. Robinson A.G., Rudat J.H., Banks C.J., Wiles R.L. Petroleum geology of the Black Sea // Marine and Petroleum Geology. 1996. V. 13. №2. P. 195-223.
  14. Scott C.L., Shillington D. J., Minshull T.A., Edwards R.A., Brown P.J. and White N.J. Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin// Geophysical Journal International. 2009. V. 178. P. 1145-1163.
  15. Shillington D.J., White N., Minshull T.A., Edwards G.R.H., Jones S.M., Edwards R.A., Scott C.L. Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models // Earth and Planetary Science Letters. 2008. V. 265. N 3-4. P. 360-378.
  16. [http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS\\_GEO\\_Black\\_SeaSPAN.pdf](http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf)
  2. Afanasenkov, A.P., Nikishin, A.M., Obukhov, A.N. *Geologicheskoe stroenie i uglevodorodnyi potentsial Vostochno-Chernomorskogo regiona* [Geological structure and hydrocarbon potential of the east Black Sea region]. Moscow, Nauchnui mir Publ., 2007, 172 p. (in Russian)
  3. Zverev, S.M. DSS at oceans for the last 30 years of projects: methods and wave fields. *Fizika Zemli*, 1999, no. 7-8, pp. 143-163. (in Russian)
  4. Il'inskiy, D.A., Razumov, A.Yu., Korneev, A.A., Rusalin, A.M., Gotz, I.A. Innovative Approach and Mobile Technology of Seismic Exploration in the Remote Hard-To-Reach Tidal Areas of Arctic. *Seismicheskie pribory*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 58-70. (in Russian)
  5. Ismagilov, D.F., Terekhov, A.A., Shainurov, R.V. Pallas bank in the Black Sea as a Mesozoic buried rift block. *Doklady Akademii nauk SSSR*, 1991, vol. 319, no. 4, pp. 935-938. (in Russian)
  6. Laverov, N.P., Roslov, Yu.V., Lobkovskii, L.I., Tulupov, A.V., Voronov, M.A., Ganzha, O.Yu. Prospect of seabed seismic exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, no. 4, 2011, p. 2-13. (in Russian)
  7. Levchenko, D.G., Lobkovskiy, L.I., Il'inskiy, D.A., Raushenbakh, I.B., , Ledenev, V.V., Roginskii, K.A. Case study in the development and field testing of multifunctional cable sea bottom seismic recorder. *Seismicheskie pribory*, 2014, vol. 50, no.4, pp. 23-35. (in Russian)
  8. Popovitch, S.V. Geological background for oil and gas deposits in the northeast part of the Black sea. *Geologiya nefi i gaza*, 2000, no. 6, pp. 14-20. (in Russian)
  9. Pudovkin, A.A. and Khortov, A.V. Seismostratigraphic features and prospects for oil and gas deposits at Shatsky Ridge. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, 2002, no. 1, pp. 40-46. (in Russian)
  10. Turgolesov, D.A., Gorshkov, A.S., Meisner, L. B., et al. *Tektonika mezokainozoiskikh otlozhenii Chernomorskoj vpadiny* [Tectonics of Meso-Cenozoic deposits in the Black Sea depression], Moscow, Nedra Publ., 1985, 215 p. (in Russian)
  11. Khortov, A.V., Neprochnov, Yu.P. Deep structure and some questions about oil and gas deposits in the southern Russian seas. *Okeanologiya*, 2006, no. 2, pp. 114-122. (in Russian)
  12. Minshull, T.A., White, N.J., Edwards, R.A., Shillington, D.J., Scott, C.L., Demire, r.A., Shaw-Champion, M., Jones, S.M., Erduran, M., Besevli, T., Coskun, G., Raven, K., Price, A., and Peterson, B. Seismic Data Reveal Eastern Black Sea Basin Structure. *EOS: Transactions American Geophysical Union*, 2005, vol. 86, no. 43, pp. 413-428.
  13. Robinson, A.G., Rudat, J.H., Banks, C.J., Wiles, R.L. Petroleum geology of the Black Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, vol. 13, no. 2, pp. 195-223.

## REFERENCES

14. Scott, C.L., Shillington, D.J., Minshull, T.A., Edwards, R.A., Brown, P.J. and White, N.J. Wide-angle seismic data reveal extensive overpressures in the Eastern Black Sea Basin. *Geophysical Journal International*, 2009, vol. 178, pp. 1145-1163.
15. Shillington, D.J., White, N., Minshull, T.A., Edwards, G.R.H., Jones, S.M., Edwards, R.A., Scott, C.L. Cenozoic evolution of the eastern Black Sea: A test of depth-dependent stretching models. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, vol. 265, no. 3-4, pp. 360-378.
16. [http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS\\_GEO\\_Black\\_SeaSPAN.pdf](http://www.iongeo.com/content/documents/Resource%20Center/Brochures%20and%20Data%20Sheets/Data%20Sheets/Data%20Library/DS_GEO_Black_SeaSPAN.pdf)

## TOWARDS A DESIGN OF NEW GENERATION DIGITAL SEISMIC SEABED SEISMOGRAPHS – CURRENT STATE AND FUTURE OUTLOOK

D. A. Il'inskiy<sup>1,3,\*</sup>, A. A. Ginzburg<sup>2,\*\*</sup>, V. V. Voronin<sup>2</sup>, O. Yu. Ganzha<sup>1,3</sup>,  
A. B. Manukin<sup>4,\*\*\*</sup>, K. A. Roginskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences,  
Nakhimovskii pr., 36, Moscow 117997 Russia  
\*E-mail: dilinskiy61@mail.ru*

<sup>2</sup>*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,  
Ulanskii per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia  
\*\*E-mail: galab3@yandex.ru*

<sup>3</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology (State University),  
Institutskii per., 9, Dolgoprudnyi, Moscow oblast, 141700 Russia*

<sup>4</sup>*Shmidt Institute of Physics of the Earth, B. Gruzinskaya ul. 10, str. 1,  
Moscow, 123242 Russia  
\*\*\*E-mail: amanukin@yandex.ru*

The paper presents the comparative characteristics of self-pop-up digital seabed seismometers that have been developed since the early 2000s. The requirements for the main technical characteristics that should be considered for developing the new-generation of self-pop-up seabed seismometers have been proposed. The microcontroller and reference frequency generator are the key parts for a seabed seismometer design. The paper provides the development results of these key components, which are essential for the seismometer performance (power consumption and functionality).

A draft proposal for seabed seismic exploration project in the Russian sector of the Black Sea solving the current actual geological problems is presented. Implementation of the project will contribute to determination of the crystalline basement depth within the Shatsky ridge and the Tuapse depression; detection of P and S wave velocities in the lower part of sedimentary cover and in the basement, and to the refinement of the Earth's crust thickness. The extension of regional seabed seismic lines from the Turkish to the Russian sector of the Black Sea will give the scientists a clearer picture of the Earth's crust structure over the whole east Black Sea basin. The results of seabed studies will verify and improve the results of the Black Sea 2011 towed-streamer survey (with 10 km streamer) on the sedimentary cover structure and the Earth's crust.

**Keywords:** *self-pop-up digital seabed seismograph, period of autonomous work, accuracy of time in seabed seismograph.*

**DOI:** <https://doi.org/10.31857/S0869-78092019287-101>