

Комплекс донной сейсморазведки транзитных зон "Катран". Конструкция и результаты испытаний

- Зиборов А. В., ООО «МТЦ», СПбГУ, г. Санкт-Петербург.
- Попов Д. А., ООО «МТЦ», г. Санкт-Петербург.
- Потемка А. К., МГУ имени Ломоносова, г. Москва.
- Кудинов А. А., Половков В. В., Долотказин О. И., СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Аннотация. В работе описывается новый отечественный сейсмический комплекс «Катран» на основе автономных донных станций. Комплекс предназначен для проведения сейсмических исследований в области малых глубин (до 200 м) и решения задач как нефтяной (методы МОВ-ОГТ 2/3/4D 4C), так и инженерной сейсморазведки (методы МПВ, MASW, SWT).

Основные отличия разработанных донных станций от предшественников – это меньшие размеры и вес, а также расширенный частотный диапазон регистрируемых сигналов (перечень доступных интервалов дискретизации, помимо стандартных значений 250 мкс – 4 мс, включает значения в 62.5 и 125 мкс).

В июне 2024 года проведены натурные испытания комплекса в акватории Белого моря, получен и обработан массив высококачественных сейсмических данных.

Ключевые слова: сейсморазведка, донные станции, нодальные системы, МОВ ОГТ, сейсмический мониторинг, 4C, инженерная сейсморазведка, MASW, транзитная зона

Современная морская сейсморазведка немыслима без автономных донных регистрирующих систем. Уровень сложности решаемых задач растет из года в год, на уже исследованных ранее месторождениях проводятся работы большей плотности и детальности, обеспечивающие, после соответствующей обработки, существенный прирост информативности. Для решения актуальных вопросов от полевого оборудования и технологии исследований требуется высокая гибкость в создании разнообразных полномасштабных систем наблюдений, возможность регистрации многокомпонентных сейсмических данных и решения задач 4D сейсморазведки – все это обеспечивается использованием донных регистраторов, прежде всего в формате автономных донных станций (далее – ДС).

Сейсмические комплексы на основе ДС прошли долгий эволюционный путь от штучных изделий, применявшихся для

региональных работ (ГСЗ-КМПВ, разреженные расстановки регистраторов для дополнения данных с коротких буксируемых кос) до законченных систем, оптимизированных для производственных работ методами 3/4D МОВ ОГТ с несколькими тысячами станций. Концептуально, структура и принцип работы ДС не претерпели значительных изменений (в любом случае мы имеем дело с автономным регистратором сигналов с четырех датчиков – трех геофонов и одного гидрофона, а также системой, обеспечивающей привязку событий к точному времени), однако с точки зрения надежности, предсказуемости, технологичности и предоставляемых возможностей, современное оборудование имеет мало общего с предшественниками.

На сегодняшний день ситуация в отрасли такова, что все больше внимания уделяется исследованию и разработке морских месторождений, расположенных на участках с небольшими глубинами



▲ Рис. 1. Донные станции «Калкан», «Коралл» и «Катран» (слева-направо).

(в районе 100-150 метров) и в транзитной зоне. При этом от сейсморазведки зачастую требуется комплексное решение, включающее как проведение работ методами МОВ-ОГТ 3D 1/4С для поиска и уточнения строения месторождений, так и решение сугубо инженерных задач, связанных с вопросами строительства морских/прибрежных сооружений и разработки месторождения.

Комплекс донной сейсморазведки «Катран» разработан именно для решения подобного рода задач в условиях глубин до 200 метров. Он включает в себя весь спектр оборудования и средств для регистрации сейсмических сигналов — одноименные автономные донные станции, контейнер-лабораторию и мобильный блок управления для работы с ними, а также программное обеспечение для управления, тестирования ДС, предварительной обработки и контроля качества сейсмического материала.

Разработанная ООО «Морской Технический Центр» (г. Санкт-Петербург) в 2024 году, донная станция «Катран» является самой компактной ДС в линейке продукции компании (ДС «Калкан» / «Коралл» / «Катран», рисунок 1). Основа разработки, от которой «Катран» перенял многие черты — это хорошо зарекомендовавшая себя и широко используемая российски-

ми сервисными компаниями ДС «Коралл» (глубинность — до 1 км, масса на воздухе 20 кг, автономность 50 суток) [2]. Сохранив основные преимущества отработанной конструкции и аппаратно-программного ядра, новая станция стала легче и компактней. Ее параметры — 200 метров, 12 кг и 30 суток соответственно. Таким образом, новая ДС занимает нишу наиболее компактного регистратора для решения задач в условиях малых глубин.

Конструкция донной станции и других компонент комплекса

Разработанная донная станция имеет следующие технические характеристики (Таблица 1).

Корпус ДС выполнен из алюминиевого коррозионностойкого сплава АМгб и рассчитан на работу на глубинах до 200 м (каждая ДС при производстве проверяется в гидробаке под давлением, соответствующем максимальной глубине погружения). Ударопрочная пластиковая защита корпуса делает станцию комфортной для ручной переноски и защищает ее от повреждений, а специальная конструкция нижних и верхних накладок улучшает механический контакт регистратора с грунтом и позволяет удобно штабелировать станции при хранении и перевозке. Прямоугольная

Время автономной работы по питанию, суток	30
Максимальная рабочая глубина, м	200
Диапазон рабочих температур, °C	-10 ... +50
Количество регистрирующих каналов	4
Разрядность АЦП, бит	24
Периоды дискретизации, мс	0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2, 4
Усиление, дБ	0...36, с шагом 6
Динамический диапазон для усиления 0 дБ (для каналов геофонов), дБ	126
Устройство хранения информации	microSD карта 512 Гб
Тип внутренних часов	Термостатированный кварцевый генератор
Температурная нестабильность кварцевого генератора	5×10^{-10}
Вес на воздухе, кг	12
Размеры, мм	320x 220 x 121
Чувствительность геофонов, В/м/с	69,7
Собственная частота геофонов, Гц	15
Чувствительность гидрофона, мкВ/Па (-дБ отн. 1 В/мкПа)	60 (-204)

▲ Табл. 1. Основные характеристики «Катран».

форма корпуса практична как с точки зрения размещения внутренних блоков, так и компактности массива станций.

Внутренняя конструкция ДС спроектирована исходя, прежде всего, из наиболее полного использования свободного пространства и критериев модульности. Все важные подсистемы станции (модуль питания, модуль регистрации, датчики и т.д.) выполнены конструктивно независимыми, т.е. для доступа к произвольному модулю нет необходимости производить демонтаж других. Минимизировано число гибких межмодульных соединений, что положительно сказывается на надежности устройства.

Соотношение объема и массы станции оптимально - ДС компактна, но обладает достаточной массой для хорошего механического контакта с грунтом.

«Сердце» станции – это регистратор, он в «Катране» имеет существенные отличия от всех остальных ДС, имеющих-ся на рынке.

Нормой в сейсморазведке является сетка частот дискретизации сигнала в 0.25, 0.5, 1, 2 и 4 кГц. Однако новая станция обладает уникальной и действительно не имеющей аналогов возможностью работы на частотах 8 и 16 кГц, что позволяет оцифровывать сигналы с частотами до 6.5 кГц.

В ДС «Катран» используются традиционные геофоны GS-ONE OMNI - высококачественные всенаправленные датчики, производящиеся в России, своеобразный стандарт морского сейсмического оборудования. Имеется также возможность установки датчиков другой конструкции, например молекулярно-электронных [1].

На канале гидрофона необходимо остановиться отдельно. По сути, все выпускаемые в настоящее время зарубежные ДС оснащены гидрофонами производства High Tech и Geospace (США). Также, как и в случае с геофонами, производство кажущихся на первый взгляд простыми датчиков сопряжено с огромным количеством трудностей, и наиболее оптимальным является закупка готовых проверенных изделий.

К сожалению, продукция данных фирм недоступна в РФ, что вынуждает ориентироваться на их альтернативы. В процессе разработки и выпуска коммерческих партий ДС в числе прочих модулей был разработан гидрофон собственной конструкции. Был выполнен большой объем опытно-конструкторских работ, в результате чего все производимые компанией ДС последние 2 года комплектуются датчиками собственного производства. Основные характеристики каждого гидрофона (емкость, чувствительность) многократно проверяются в процессе производства на специальном автоматизированном стенде, в том числе после гидростатических испытаний под давлением. Все это позволило снизить процент отказа гидрофонов практически до нуля и обеспечить разброс характеристик не более 10%.

Один из важнейших модулей — термостатированный кварцевый задающий генератор (проще говоря — внутренние часы) отечественного производства ДС также заслуживает отдельного внимания. В станциях возможно использование либо атомных, либо высокоточных термостатированных кварцевых генераторов. Первые обеспечивают более высокую точность, однако крайне дороги и малодоступны. Вторые, при правильном подходе к работе с генератором, оказываются сопоставимы по итоговой

точности, уверенно выигрывая по остальным характеристикам. Две основные проблемы, которые необходимо решать при работе с данным типом генераторов — это стабильность частоты при изменении температуры окружающей среды (нелинейность ухода при резком охлаждении или нагреве) и быстрая настройка генератора перед запуском ДС на регистрацию. И если первая лежит на производителе модуля часов, то его настройка решается уже аппаратно-программными средствами сейсмического комплекса.

Другая важная составляющая любой современной донной станции — это модуль тестирования ДС и регистрации широкого спектра метаданных. Несмотря на использование надежных компонентов и технических решений, контроль всех отдельных модулей по отдельности и после сборки ДС, существует вероятность нарушения корректного функционирования какой-либо части станции. Для того, чтобы оперативно обнаружить этот факт, ДС должна иметь в своем составе инструментарий тестирования внутренних систем. В станции «Катран» это сделано в полном объеме — в ней реализован полный перечень стандартных тестов (таких как точность коэффициентов усиления, уровень собственных шумов, определение характеристик датчиков и т.д.), также ДС в процессе работы регистрирует широкий спектр внутренних параметров — температуру, давление, ориентацию в пространстве, напряжение аккумуляторных батарей и т.д. Все это вкупе с удобной реализацией пакетного тестирования позволяет оперативно проверять весь парк станций перед каждой постановкой.

Для связи с внешним оборудованием, станция оснащена герморазъемом собственной разработки ООО «МТЦ», полностью идентичным тому, который

используется в других ДС линейки. Также в составе ДС имеется магнитный сенсор с модулем световой индикации для оперативного контроля статуса на палубе, предусмотрена возможность установки RFID меток для автоматизации работ по раскладке регистраторов.

Отступая от особенностей конструкции отдельной станции, следует обратиться к другим составляющим комплекса. Наличие качественного и надежного регистрирующего модуля, не является достаточным для проведения производственных работ. Необходимо разработать и создать всю инфраструктуру для работы, обеспечить технологичные и удобные инструменты для конвейерной работы с ДС – зарядки, тестирования, запуска и остановки, скачивания, хранения и экспресс-анализа данных. Причем все составляющие должны быть удобны для транспортировки, развертывания на базе различного вида используемых судов и масштабируемы.

Для непосредственной работы со станциями на борту судна используются контейнеры-лаборатории на базе стандартных 10-ти и 20-ти футовых морских контейнеров. Каждый из них вмещает, соответственно, 120 и 240 ДС. Станции располагаются в индивидуальных ячейках, предусмотрены специальные штормовые фиксаторы. Подключение производится удобными эргономичными жгутами. Контейнеры теплоизолированы и оснащены системами кондиционирования и вентиляции, комфортны для работы оператора.

В каждом контейнере располагается массив серверов, организующих параллельную работу со всеми размещенными ДС. При этом отдельные контейнеры легко объединяются в сеть с централизованным управлением и доступом к зарегистрированным данным. Управля-

ющее программное обеспечение (ПО) постоянно модифицируется и показало свою стабильность и высокую эффективность в процессе выполненных с использованием комплекса работ. Также разработано ПО для предварительной обработки и автоматизированного анализа сейсмических данных, реализующее такие нужные и сложные для выполнения функции, как уточнение положения и ориентации модулей с учетом их возможного сноса, выявление отклонений в линейном характере ухода внутренних часов и формирование пакетов отчетной документации.

Испытания комплекса на акватории Белого моря

В июне 2024 года разработанный комплекс прошел всестороннее тестирование в рамках полноценных полевых работ, программа которых была разработана с учетом специфики проведения инженерных исследований.

Задачи испытаний были следующими:

- Тестирование ДС и контейнера-лаборатории (рисунок 2) в реальных условиях с точки зрения надежности оборудования и удобства работы с ним;
- Сравнение зарегистрированных сейсмических данных с материалами, полученными с референсной системы (в качестве нее выступали ДС «Коралл»);
- Регистрация сейсмических данных в расширенном частотном диапазоне (с частотой дискретизации 16 кГц), сравнение с материалами, полученными при регистрации с частотой 4 кГц;
- Реализация полноценных систем наблюдения, характерных для решения инженерных задач с их отработкой и последующей обработкой данных по традиционным для отрасли и нестандартным методикам.

Полигон, на котором проводились



▲ Рис. 2. Контейнер-лаборатория и донные станции. Разгрузка во время проведения испытаний.

работы, располагался в акватории Ругозерской губы (Кандалакшский залив Белого моря) вблизи ББС (беломорской биологической станции) МГУ.

Исследования производились на двух участках – малоглубинном вблизи острова Высокий (глубины моря от 10 до 25 м) и литоральном вблизи острова Оленевский (глубины – от 0 до 18 м). В качестве источников сейсмического сигнала использовались пневмоисточник Sleeve Gun I объемом 20 куб. дюймов и электроискровой источник (спаркер) с максимальной энергией 2.4 кДж.

Методически работы были разбиты на три этапа:

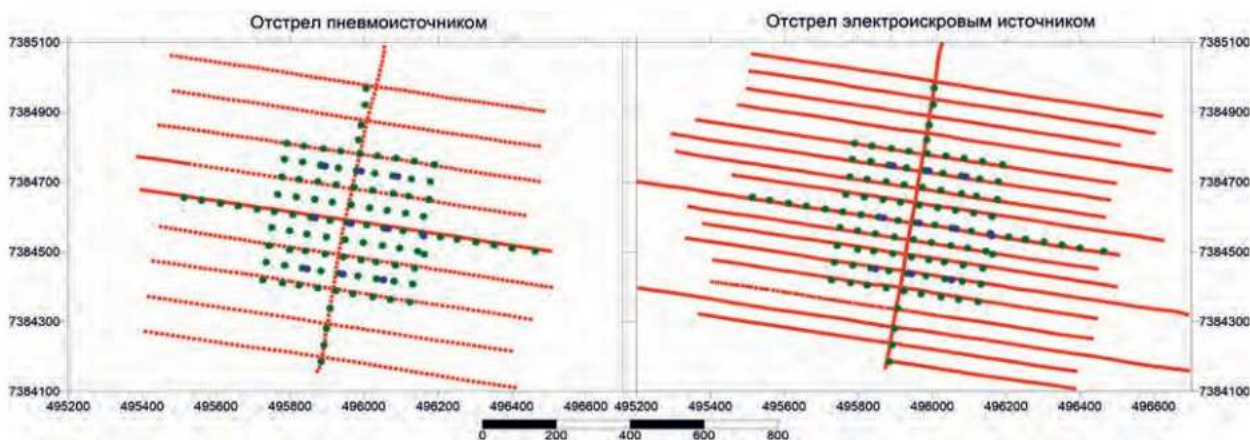
1. Отработка пространственной расстановки ДС на малоглубинном полигоне (станции расставлены по сети 50х50м с

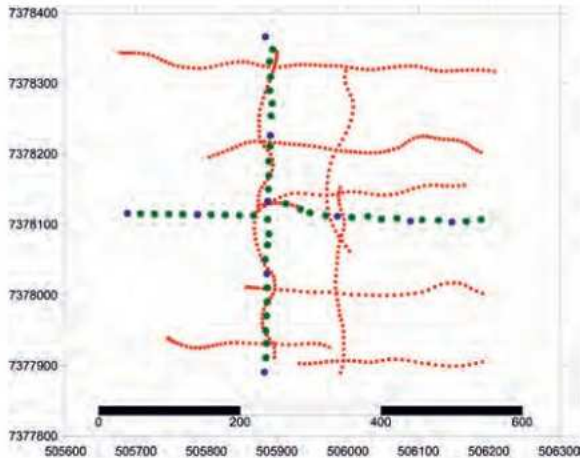
равномерным покрытием площадки 400х400м и выходом части ДС за пределы площадки; всего задействовано 114 станций – 104 ДС «Катран» и 10 контрольных ДС «Коралл»). Отстрел двумя типами источников (10 и 18 профилей соответственно), попутная регистрация сигнала на буксируемую сейсмическую косу (Рисунок 3);

2. Отработка 2D профиля на малоглубинном полигоне (24 ДС, шаг ПП 50м) с использованием технологии широкополосной синхронной сейсморазведки и отстрелом при помощи двух независимых электроискровых источников с различным заглублением и энергией;

3. Отработка крестообразной расстановки на литоральном полигоне (станции расположены на двух перпендику-

▼ Рис. 3. Система наблюдений на мелководном полигоне. Зеленым цветом обозначены ДС «Катран», синим – ДС «Коралл», красным – положение ПВ.

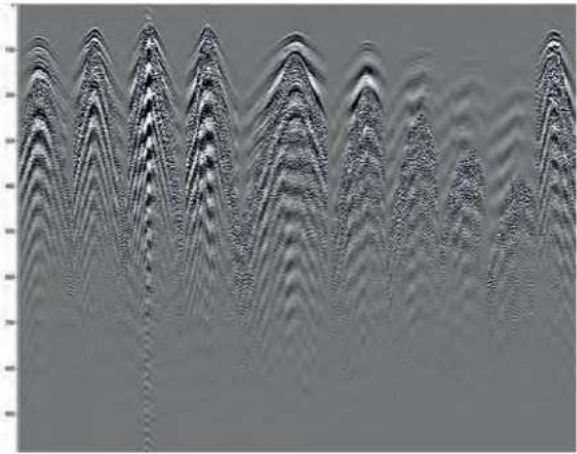




▲ Рис. 4. Система наблюдений на литоральном полигоне. Зеленым цветом обозначены ДС «Катран», синим – ДС «Коралл», красным – положение ПВ.

лярных профилях с шагом между ПП 20м, всего задействовано 60 станций – 50 ДС «Катран» и 10 контрольных ДС «Коралл») с отстрелом пневмоисточником по 7 профилям (Рисунок 4).

В результате выполнения полевых работ были зарегистрированы высококачественные сейсмические материалы, за время исследований не произошло ни одного отказа оборудования и данные были получены в полном объеме. Материалы, полученные с использованием ДС разного типа идентичны.

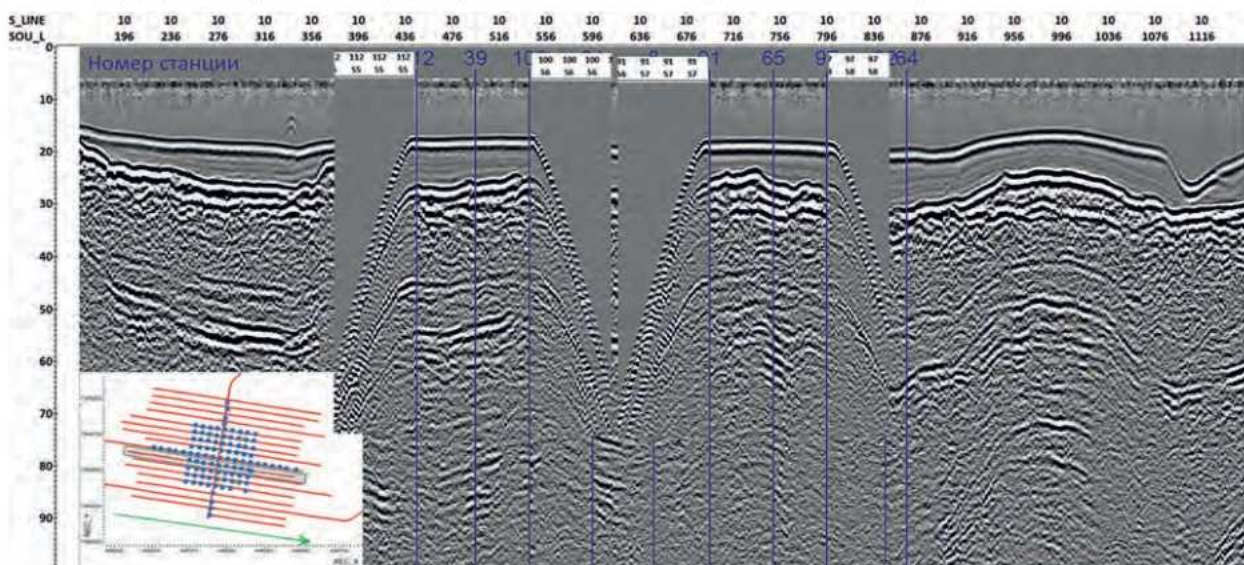


▲ Рис. 5. Пример сейсмограммы ОПП с малолунного полигона (Отстрел пневмоисточником, ДС «Катран» №118, Н компонента).

Сейсмограммы, полученные на малолунного полигоне характеризуются высоким соотношением сигнал/шум, прослеживаемостью преломленных волн на всем диапазоне удалений (при отстреле пневмоисточником, рисунок 5). Сейсмограммы ОПП с ДС после ввода соответствующих поправок за различие в глубине ПП уверенно коррелируют с разрезами, полученными при помощи буксируемой сейсмической косы (рисунок 6).

Сравнение сейсмограмм, зарегистри-

▼ Рис. 6. Временной разрез метода ССВР по линии ПВ №10. Врезками показаны сейсмограмм ОПП с ДС (Отстрел электроискровым источником, Н компонента).



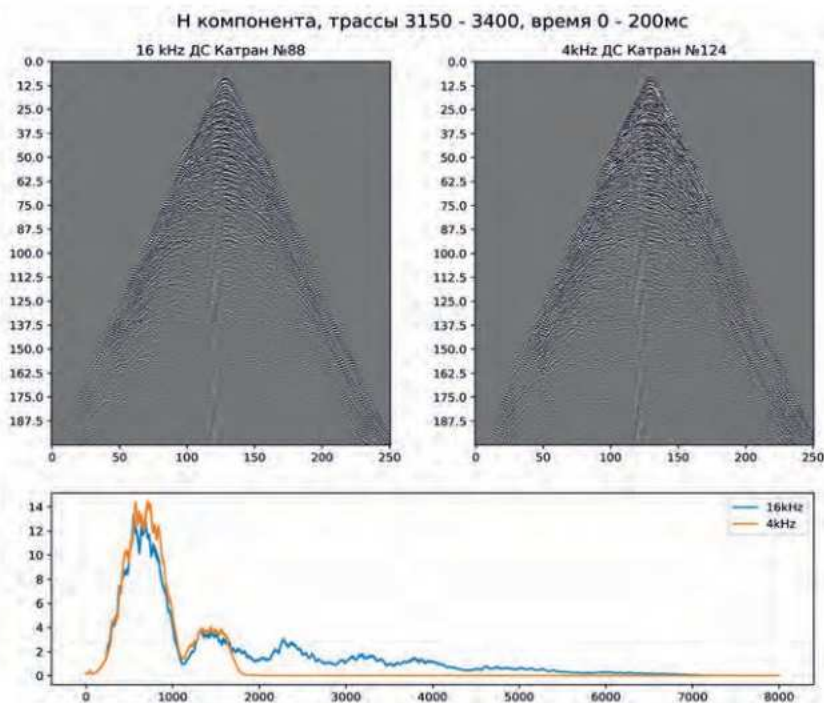


Рис. 7. Фрагменты сейсмограмм ОПП с двух ДС, относящихся к одному ПП, зарегистрированных с разными значениями частоты дискретизации и частотные спектры сигналов. Компонента Н.

рованных при частотах дискретизации 4 и 16 кГц (при отстреле высокочастотным электроискровым источником) показывает высокую идентичность записей в общем для сравниваемых станций частотном диапазоне частот (до 1700 Гц) и наличие высокочастотных компонент сигнала, лежащих за пределами данной частоты (рисунки 7-8).

Материалы, полученные с литорального полигона идентичны по качеству, и также характеризуются прослеживанием

преломленных волн на всем диапазоне удалений. На них выделяются достаточно хорошо выраженные поверхностные волны.

Сейсмические данные, зарегистрированные в полном объеме расстановок, после предварительного анализа были переданы на обработку с использованием методов MASW, SWT, МПВ (методы t_0 , 2D/3D томографии). В настоящий момент основной объем обработки еще не выполнен, однако уже получены такие

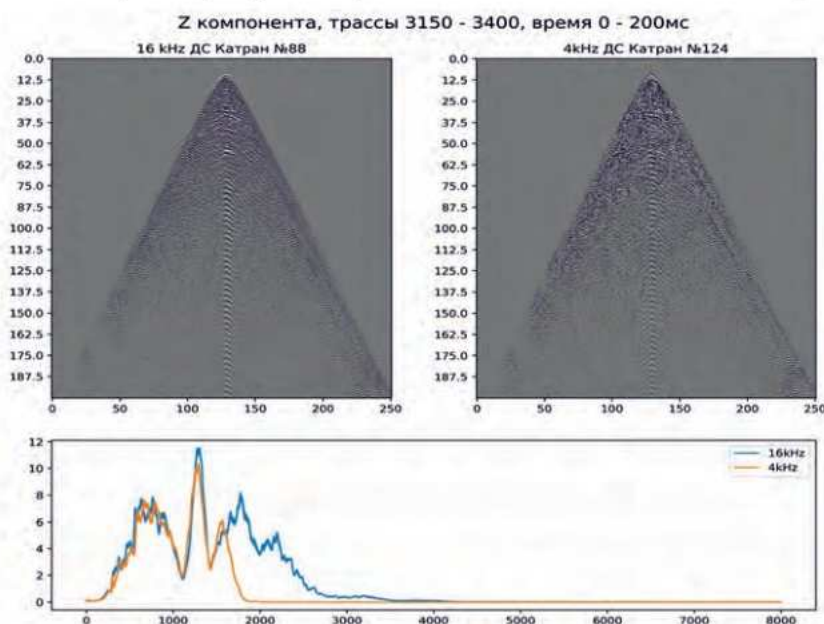
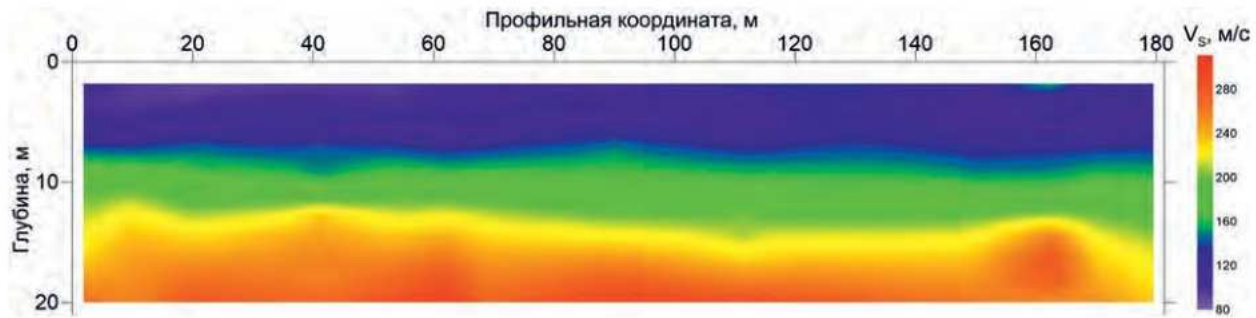


Рис. 8. Фрагменты сейсмограмм ОПП с двух ДС, относящихся к одному ПП, зарегистрированных с разными значениями частоты дискретизации и частотные спектры сигналов. Компонента Z.



▲ Рис. 9. Разрез скоростей поперечных волн, полученный по методике MASW (субмеридиональный профиль, литоральный полигон).

результаты, как разрез скоростей поперечных волн по данным MASW (рисунок 9) и карта кровли фундамента по данным МПВ (рисунок 10).

Заключение

Разработанный в 2024 комплекс донной сейсморазведки транзитных зон "Катран" основан на наиболее компактной и легкой отечественной донной станции, способной работать на глубинах до 200 метров. Обладая схожим аппаратно-программным ядром с ДС «Коралл», успешно используемой в отрасли, «Катран» обеспечивает большую гибкость при проведении исследований в условиях малых и средних глубин. Также немаловажным отличием станции является расширенная возможность регистрации высокочастотных сигналов (с частотой дискретизации до 16 кГц).

Разработанный комплекс успешно прошел полевые испытания, в ходе которых показал свою надежность,

высокие эксплуатационные характеристики и идентичность зарегистрированных данных в сравнении с референсной системой «Коралл» и буксируемой косой.

Литература

1. Казанин А. Г. и др. Инновационный цифровой сейсмический комплекс морской сейсморазведки «Краб». Разработка, внедрение и перспективы развития отечественных донных станций / Казанин А.Г., Базилевич С.О., Куома Д.Г., Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Кошелев Е.А., Ерофеев Ю.Г., Агафонов В.М., Гладилин А.В., Петров Б.Е. // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – Т. 12. – №. 253. – С. 28-35.
2. Попов Д.А. и др. Результаты испытаний донных сейсмических станций «Коралл» на акватории белого моря в 2022 году / Попов Д.А., Зиборов А.В., Долотказин И.Н., Половков В.В., Кудинов А.А. // Гоевразия – 2023: сборник материалов конференции – Москва, 2023. – С. 77-80.

► Рис. 10. Карта глубин кровли фундамента, полученная по результатам сейсморазведки МПВ (малоглубинный полигон, отстрел пневмоисточником).

