

Технология многокомпонентной донной сейсморазведки на основе модулей «Turtle-500»

■ Рослов Ю.В., Воронов М.А., Половков В.В. Долотказин И.Н.,
ООО «Сейсмо-Шельф», Санкт-Петербург

В статье рассмотрены технические аспекты создания аппаратуры для реализации технологии многокомпонентной донной сейсморазведки на основе автономных донных модулей. Представлено описание аппаратурного комплекса для донной сейсморазведки, реализованной российской компанией ООО «Сейсмо-Шельф» и показаны результаты его апробации в ходе выполнения полевых работ 2D/4C-3C.

Бурное развитие современных технологий выполнения морских сейсморазведочных работ в настоящее время определяется необходимостью повышения эффективности поискового бурения с учетом выхода направлений исследований на все более сложнопостроенные геологические структуры. Эффективность поискового бурения, в первую очередь, основывается на качестве полевого сейсмического материала, являющегося необходимым условием построения достоверных геологических моделей.

Стандартная морская сейсморазведка 3D в одностудовом варианте с плавающими косами практически достигла своего технического предела. Компания PGS, например, анонсирует суда класса Titan, которые способны одновременно буксировать 24 двенадцати километровые косы, оснащенные дуальными (гидрофон+геофон) приемниками. Возможно, в будущем можно будет реализовать вариант с 30 пятнадцатикилметровыми косами, но принципиального технического прорыва в данном направлении не предвидится. Это объясняется двумя принципиальными причинами. Во-первых, регистрация сейсмических сигналов на поверхности моря не позволяет обеспечить многокомпонентную съемку, а во-вторых, система наблюдений с выделенным направлением оси приема вдоль линии кос не обеспечивает

равноазимутального покрытия исследуемой площади. Также существуют технико-технологические ограничения буксирования кос на мелководье, вблизи берегов, платформ и т.п. Если проблему полноазимутального покрытия технология буксируемых кос еще способна решить благодаря использованию нескольких судов-источников, проходу исследуемой площади под разными углами (технологии WAZ, FAZ), движению судов по криволинейным траекториям (технология coil), что, в свою очередь, приводит к резкому удорожанию производства полевых работ, то реализация многокомпонентной сейсморазведки принципиально невозможна.

Универсальное решение выше обозначенных проблем предоставляет технология донной сейсморазведки, которая предполагает размещение системы регистрации сейсмических сигналов на морском дне. В отличие от способа проведения работ с плавающими косами использование донных систем обеспечивает ряд преимуществ:

1. Позволяет обеспечить получение многокомпонентного сейсмического материала.

Расположение сейсмических датчиков на морском дне обеспечивает полноценную четырехкомпонентную регистрацию полного волнового поля, включая и поперечные волны, что в свою очередь, дает возможность рассчитать скорости

распространения поперечных волн, выявить эффекты анизотропии, получить широкий набор дополнительных динамических атрибутов, оценить фациальный состав вещества и т.д., то есть построить более достоверную геолого-геофизическую модель среды и снизить последующие геологические риски. Расположение регистрирующей аппаратуры на морском дне также улучшает качество приема сейсмической информации, свободного от влияний волнения моря, колебаний косы и так далее.

2. Позволяет реализовать на практике гораздо больше вариантов систем наблюдений.

Донная сейсморастворка позволяет реализовывать практически любые полноазимутальные системы наблюдений.

3. Обеспечивает возможность выполнения работ с использованием бесшовной технологии «суша-море».

Прослеживание возможного продолжения сухопутных месторождений на акваторию и наоборот, предполагает использование технологий сейсморастворки, позволяющих получить однородный сейсмический материал на суше и на море, что в полной мере отвечает возможностям донной сейсморастворки.

4. Лучше соответствует требованиям безопасности судоходства.

Немаловажным фактором, говорящим в пользу донной сейсморастворки, являются также ограничения, налагаемые требованиями безопасности судоходства с использованием плавающих «сейсмических кос» в районах с наличием естественных и искусственных препятствий (узких проливов, отмелей, буровых платформ), интенсивным судоходством и рыболовством и т.п.

По этим причинам западные производители сейсмического оборудования и сервисные компании уделяют огромное внимание производству оборудования, методике проведения полевых работ и обработке данных донной сейсморастворки. Появились компании, фокусирующиеся исключительно на этих направлениях, например, «FairFieldNodal», «SBGS» (SeaBedGeophysicalSolutions), «MagSeis» и другие.

Донная сейсморастворка может быть реализована с использованием двух видов приемо-регистрирующих систем – донных приемных кос и регистрирующих станций на судне и автономных донных станций, совмещающих в себе функции приема и регистрации. Если сравнить функциональные возможности обеих

№ п/п	Технологические аспекты	Станции	Косы
1.1.	Возможность реализации любых систем наблюдений	+	-
1.2.	Работа в условиях подводной инфраструктуры	+	-
1.3.	Естественные препятствия на дне	+	-
1.4.	Контакт с грунтом	+	-
1.5.	Позиционирование приемников на дне при сбросе	+	-
1.6.	Позиционирование приемников на дне с течением времени	+	-
1.7.	Скорость выполнения работ	+	-
1.8.	Устойчивость к износу; поломкам	+	-
1.9.	Контроль качества в режиме реального времени	-	+
Сейсмические аспекты			
2.1.	Максимальные удаления	+	-
2.2.	Неограниченная длина записи	+	-

◀ Табл. 1. Сопоставление функциональных возможностей донных станций и донных кос

систем (таблица 1), то использование автономных донных станций выглядит предпочтительнее по всем пунктам, кроме одного – контроля качества сейсмического материала в режиме реального времени.

Критическими проблемами технологии донной (бескабельной) сейсморазведки являются следующие позиции:

1. Отсутствие контроля качества сейсмического материала в режиме реального времени.

2. Оптимальность компоновки донного модуля, его массогабаритные параметры, автономность.

3. Необходимость обеспечения единой временной шкалы для отметки моментов возбуждения сейсмического сигнала системой пневмоисточников и его регистрации донным оборудованием.

4. Неопределенность положения и ориентации донного модуля на морском дне.

5. Оперативность подготовки донных модулей к постановке: инициализация, тестирование, скачивание информации, контроль качества данных, зарядка аккумуляторов и т.д.

6. Производительность выполнения полевых работ по технологии донной сейсморазведки.

За рамками обзора остаются вопросы обработки многокомпонентных сейсмических данных, так как эта проблема присуща более широкому классу систем наблюдений, чем только донные сейсмические модули.

Мелководный сейсмический комплекс «Turtle-500» на основе автономных донных

4-х компонентных модулей сбора сейсмических данных.

В России одной из немногих компа-

ний, развивающих технологию проведения работ по методике донной сейсморазведки с многокомпонентными станциями, является ООО «Сейсмо-Шельф», образованное Российской венчурной компанией в рамках государственной программы разработки и поддержки отечественных инновационных технологий[1]. Основной разработкой ООО «Сейсмо-Шельф» является мелководный сейсмический комплекс «Turtle-500» на основе автономных донных 4-х компонентных модулей сбора сейсмических данных.

Основой сейсмического комплекса «Turtle-500» является автономное устройство сбора сейсмических данных, т.н. донный модуль, изображенный на рис.1. Модуль предназначен для записи 4С-сейсмических данных на глубинах моря до 500м, при проведении различных сейсморазведочных работ (МПВ и МОВ) с донной регистрацией на акваториях всех типов (моря, реки, внутренние водоемы, болота), на прилегающей суше, а также для сейсмического мониторинга. Основные технические характеристики донных модулей сейсмического комплекса «Turtle-500» и их сравнение с зарубежными станциями приведены в таблице 2, 3, соответственно.



▲ Рис. 1. Внешний вид снаряженного донного модуля «Turtle-500»

▼ Табл. 2. Основные технические характеристики донных модулей сейсмического комплекса «Turtle-500»

количество сейсмических каналов	4 (X,Y,Z,H)
в том числе:	
- с геофонами (GS20-DX, OYO Geospace)	3
- с гидрофоном (Б2-М, ОАО «Элла», Зеленоград)	1
глубина погружения, до, м	500
способ подъема со дна	при помощи фала
система привязки ДМ к ПП на профиле	ручная
регистрируемые углы ориентации ортогональной тройки геофонов	крен, дифферент, азимут
диапазон частот с геофонами, Гц	10 – 250
диапазон частот с гидрофоном, Гц	0 – 200
чувствительность, В/м/с	25
шаг дискретизации данных, мс	4; 2; 1; 0,5; 0,25
разрядность АЦП (преобразование типа Δ - σ)	24
эффективный уровень шумов (в зависимости от коэффициента усиления), мкВ	0,15 – 1,50
полный динамический диапазон, дБ	140
относительный уход часов регистратора, не более	$1 \cdot 10^{-8}$
емкость накопителя данных (флеш-карта), Гб	8 (встроенная)
источник питания, напряжение питания, В	аккумуляторы, 9 – 16
автономность работы по питанию и памяти (в зависимости от режима работы), сутки	12 - 30
размеры диаметр/высота, м.	0,247/ 0,122
вес в воздухе, кг	16
удельное давление на грунт (каплинг) г/кв.см.	23

▼ Табл. 3. Сравнение основных характеристик комплексов на основе донных станций для работ на шельфе и в транзитной зоне ведущих мировых производителей и Российского комплекса «Turtle - 500» компании «Сейсмо-Шельф».

Производитель	«Fairfield Nodal» США	«GeospaceTechnologies» США	«Сейсмо-Шельф» Россия
Донный модуль	Z700	Ocean Bottom Recorder	Turtle - 500
Рабочая глубина, м	700	300	500
Габариты, м	Диаметр 0,432 Высота 0,152	Длина 0,521 Ширина 0,208 Высота 0,108	Диаметр 0,247 Высота 0,122
Диапазон рабочих температур, °С	-10 ÷ +60	-5 ÷ +50	-10 ÷ +50
Вес на воздухе, кг	29,5	11,3	16
Вес в воде, кг	18,1	4,4	9
Количество каналов записи	4	4	4
Время автономной работы по питанию, суток	45	30	15
Время переподготовки к работе (считывание данных, зарядка)	8	12 часов	12 часов
Динамический диапазон	120	120	120
Наличие компаса	Да	Нет	Да
Объем памяти, Гб	8-32	16	8
Период дискретизации, мс	2, 4	0,25 0,5 1 2 4	0,25 0,5 1 2 4
Максимальный относительный уход внутренних часов, с/с	$\pm 3 \cdot 10^{-9}$	Нет данных	$\pm 5 \cdot 10^{-9}$

Наборная часть комплекса для обслуживания, перевозки и хранения донных модулей выполнена на базе стандартного морского 20-ти футового контейнера (рис.2), вмещающего до 250 модулей и рабочие места операторов.



▲ Рис. 2. Мобильный сейсмический комплекс с донными модулями «Turtle-500»

Как решаются критические проблемы технологии донной (бескабельной) сейсморазведки в рамках сейсмического комплекса «Turtle-500»?

Отсутствие контроля качества сейсмического материала в режиме реального времени.

Отсутствие возможности контроля качества в реальном времени является сильным аргументом противников бескабельной сейсморазведки, так как исторически полевые геофизики привыкли иметь оперативный контроль качества получаемых материалов, на основании которого можно принимать управленческие решения. С другой стороны, современная технология развития модульных систем такова, что большинство производителей гарантирует, что как минимум 99% всего зарегистрированного сейсмического материала будет соответствовать производственным требованиям. Выполненные полевые работы с сейсмическим комплексом «Turtle-500» показали, что его технические показатели соответствуют мировым

стандартам - было зарегистрировано только 17 отказов оборудования на 2005 постановок. Данные показатели были достигнуты благодаря качеству и надежности измерительно-регистрирующего тракта, сборки и настройки аппаратуры, а также возможностью контроля ее параметров перед началом и в процессе работ.

Оптимальность компоновки донного модуля, его массогабаритные параметры, автономность.

Размер, форма, масса, автономность и компоновка донного модуля являются критическими параметрами для повышения производительности работ и получения высококачественного материала. Конструкция донного модуля должна обеспечивать хороший контакт с грунтом, технологичность выполнения полевых работ, минимизировать внешние и внутренние шумы. Основными характерными признаками донного модуля «Turtle-500» являются следующие:

- Корпус модуля выполнен из нержавеющей немагнитной стали, специальная пластиковая защита обеспечивает ударопрочность.
- Форма корпуса (осесимметричность) и его габариты обеспечивают надежный контакт модуля с дном, низкий уровень шума и минимизацию рисков сноса при наличии течений.
- Развесовка корпуса обеспечивает постановку донного модуля строго в едином положении верх-низ.
- Малые габариты и вес позволяют применять ручной способ постановки и подъема донных модулей и использовать в работах малые плавсредства.
- Наличие светового индикатора на корпусе модуля позволяет проводить проверку его работоспособности и

состояние непосредственно в процессе работ - перед сбросом в воду и после его подъема.

Полный перечень технических параметров можно найти в таблице 2.

Необходимость обеспечения единой временной шкалы для отметки моментов возбуждения сейсмического сигнала системой пневмоисточников и его регистрации донным оборудованием.

Поскольку донная станция является автономно работающим устройством, то отсутствует возможность синхронизировать записанную информацию с сейсмическими возбуждениями в режиме реального времени, что определяет необходимость хранения информации о времени в регистрирующей части донной станции с высокой точностью.

Донный модуль оснащен термостатированным генератором MX037/14-X59S3T-8,192 с относительным уходом времени в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-8}$ секунд/сутки. Синхронизация внутренних часов донных модулей перед началом цикла работ осуществляется по сигналу спутника GPS либо ГЛОНАС на центральном сервере в технологическом контейнере посредством подключения всех модулей через специальный разъем. После окончания циклов записи производится сверка часов в том же технологическом контейнере. Формируется база файлов временных поправок, которая автоматически учитывается в процессе предварительной обработки сейсмической информации путем линейного распределения временных уходов на период записи.

Следующим шагом в развитии ожидается применение малогабаритных т.н. "атомных" генераторов на основе цезиевых резонаторов, сведения о продаже которых уже существуют. Точность "атомных часов" - $\pm 5 \cdot 10^{-11}$ секунд/сутки.

Неопределенность положения и ориентации донного модуля на морском дне.

Точное определение местоположения донного модуля на дне и его ориентация в точке наблюдения определяет точность построения результирующего геологического разреза и является критически важным параметром. Для уточнения местоположения донного модуля «Turtle-500» в настоящее время используются программные методы, основанные на обработке сейсмических материалов (первых вступлений). Возможно также применение активных или пассивных систем гидроакустического позиционирования, например, Sonardyne или Sonarbell, соответственно. Ориентация донного модуля на морском дне обеспечивается встроенным угломером HMR3300. Информация об азимуте и угле отклонения донного модуля от вертикали записывается в специальные служебные файлы и может использоваться в обработке.

Оперативность подготовки донных модулей к постановке: инициализация, тестирование, скачивание информации, контроль качества данных, зарядка аккумуляторов и т.д.

Одним из ключевых элементов технологии «Turtle-500» является контейнерный способ организации полевых работ. Все донные модули хранятся, транспортируются и обслуживаются в едином технологическом контейнере (рис.2). В контейнерах также размещается все дополнительное оборудование – лодки-расстановщики, такелаж, рабочие места и т.д. Данный подход позволяет, во-первых, использовать для выполнения полевых работ неспециализированные сейсмические суда, во-вторых, обеспе-

чить оперативную мобилизацию в любую точку планеты и, в-третьих, легко масштабировать количество задействованного оборудования. Перед началом полевых работ в технологическом контейнере с центрального сервера производится инициализация всех донных модулей (устанавливаются необходимые параметры записи - коэффициенты усиления по каналам, частота дискретизации входного сигнала, синхронизация внутренних часов). Далее донные модули расставляются на исследуемом участке акватории в соответствии с программой работ. После выполнения цикла регистрации сейсмических данных, определяемого, в частности, автономностью донных модулей, они возвращаются в технологический контейнер для скачивания информации, зарядки аккумуляторов, контроля работоспособности и качества данных. Процедура обслуживания донных модулей перед следующей постановкой, как правило, занимает до 12 часов.

Производительность выполнения полевых работ по технологии донной сейсморазведки.

Производительность выполнения полевых работ зависит от времени обслуживания донных модулей в технологическом контейнере, что было описано выше, и от времени расстановки/сбора донных модулей. При большом количестве оборудования, потери времени на непроизводительные работы могут быть минимизированы путем распараллеливания непроизводительных процессов с процессом регистрации. Тем не менее, даже в этом случае оперативная расстановка/сбор донных модулей способствует повышению производительности. Расстановка и сбор донных модулей

может осуществляться как с крупнотоннажных судов, так и с маломерных, что особенно важно при работах на мелководье и в транзитных зонах, с маломерных судов. Использование специализированных быстроходных лодок-расстановщиков (рис.3), являющихся также частью технологии сейсмического комплекса «Turtle-500», в значительной мере повышает производительность работ. Донные модули расставляются на акватории гирляндой на фале отрицательной плавучести или с сигнальными поплавками. Также модули могут быть вынесены на береговую линию и установлены в приливно-отливной зоне или на суше. Применение бескабельной технологии обеспечивает высокую технологичность и гибкость при выполнении полевых работ.



▲ Рис. 3. Постановка донных модулей с моторной лодки

Апробация технологии многокомпонентной донной сейсморазведки на основе модулей «Turtle-500».

В 2014 году было успешно завершено выполнение ООО «Сейсмо-Шельф» морских сейсморазведочных работ 2D-4C/3C по геологическому изучению недр на акватории Печорского моря с применением исключительно Российских

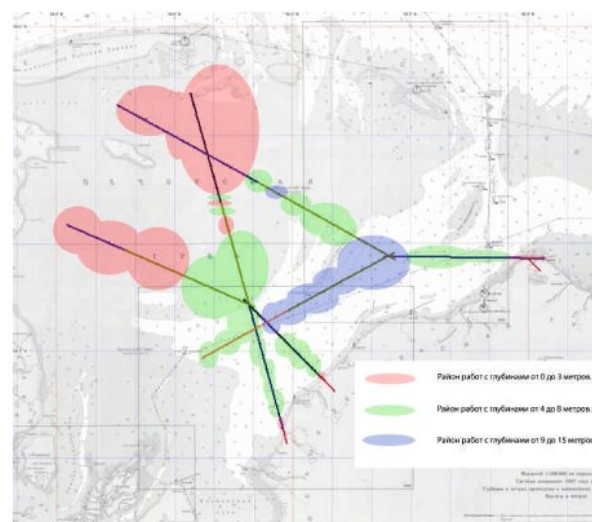
передовых технологий морской донной сейсморазведки [2]. Работы выполнялись по заказу ФГУП ВНИГРИ Федерального агентства по недропользованию при методическом сопровождении ГНЦ ФГУП «ВНИИгеосистем». Данный проект явился полномасштабной апробацией российской технологии донной сейсморазведки. В отзывах, полученных от независимых рецензентов, была отмечена уникальность выполненных полевых работ, которая заключалась в примененной отечественной инновационной технологии многокомпонентной донной сейсморазведки с использованием автономных четырехкомпонентных донных регистраторов «Turtle-500» производства ООО «Сейсмо-Шельф».

Основной целью данных работ являлось непрерывное прослеживание участков «суша-море» с целью коррекции морских структурных построений и увязки их с сухопутными профилями.

В качестве источника сейсмического сигнала в данном проекте использовались пневмоизлучатели «Малыш» разработки ООО «Пульс» (г. Геленджик), так что степень локализации полевого геофизического оборудования российского производства (многокомпонентные сейсмические донные станции, пневмоисточники, компрессоры) составила практически 100%, что делает данные работы уникальными в свете практически полного завоевания данного рынка зарубежными компаниями.

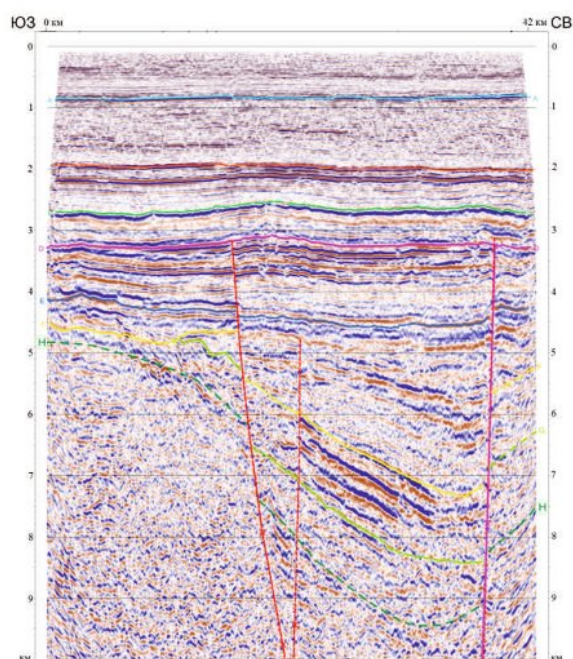
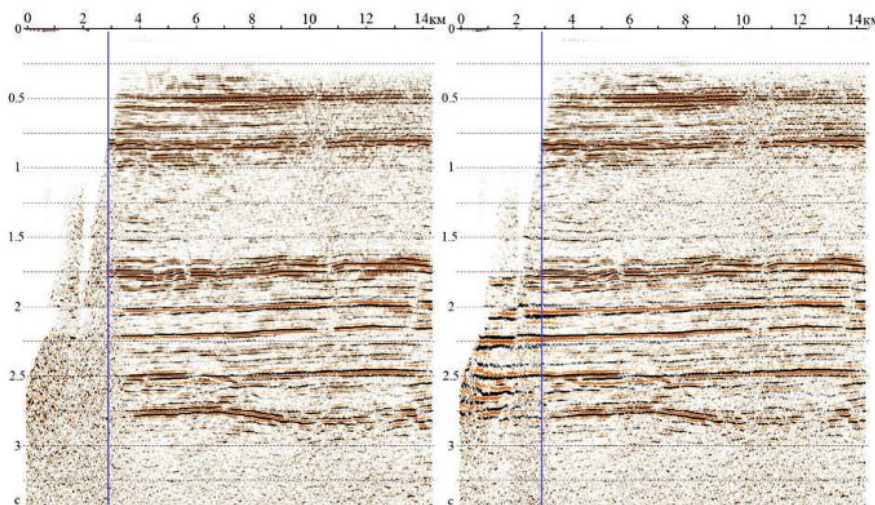
Район выполнения полевых работ (Печорская губа) отличается исключительно сложными батиметрическими и гидрогеологическими условиями. Плановые профили располагались на глубинах от 15 метров до предельного мелководья и выхода на сушу (рис.4). Гидрогео-

логический режим характеризовался мощным выносом водных масс рекой Печорой и приливо-отливными явлениями. Технология донной сейсморазведки проявила себя исключительно хорошо в наисложнейших условиях. Благодаря гибкости и универсальности, донные модули «Turtle-500» были использованы как на морской, так и на сухопутной части проекта, что позволило собрать унифицированный многокомпонентный материал и продемонстрировать высокую производительность работ. Относительно тяжелые модули обеспечивали плотный контакт с грунтом, позволяли адаптировать систему регистрации при наличии искусственных помех на линии профиля (затонувших судов). В силу климатических условий и природоохранной политики непрерывный сбор однородного сейсмического материала в транзитных зонах сталкивается с большими трудностями. В ходе выполнения данного проекта удалось обеспечить выход на сушу с донным многокомпонентным оборудованием до удалений в несколько километров и получить качественные материалы. Сейсмические



▲ Рис. 4. Батиметрическая характеристика района работ

► Рис. 5. Пример обработки сейсмических материалов суша-море по стандартной однокомпонентной методике (гидрофон, разрез изображен слева) и методом PZ суммирования (гидрофон + геофон, разрез изображен справа). Вертикальной синей линией отмечена береговая черта.



▲ Рис. 6. Пример финального сейсмо-геологического разреза

материалы, полученные по российским технологиям, по качеству не уступили, а по отдельным позициям и превзошли сейсмические материалы, полученные ранее в Печорской губе с использованием зарубежных технологий.

Результаты обработки полевых материалов. Отдельно стоит отметить преимущества многокомпонентной регистрации в транзитных зонах. На рис.6. показан разрез суша-море, полу-

ченный по стандартной однокомпонентной методике и методом PZ суммирования (гидрофон + геофон). Очевидно, что задача непрерывного прослеживания участков «суша-море» была выполнена только во втором случае. Пример финального сейсмогеологического разреза представлен на рис.6.

Обработка и комплексная интерпретация полученных материалов обеспечила информативное прослеживание целевых горизонтов на значительных глубинах, позволила увязать ранее выполненные сейсмические профили, как в Печорской губе, так и на прилегающей суше, уточнить структурные построения и современную оценку углеводородного потенциала изученной площади.

Выводы.

Технология многокомпонентной донной сейсморазведки на основе модулей «Turtle-500» российской разработки зарекомендовала себя как эффективный инструмент выполнения геологоразведочных работ на нефть и газ в шельфовых, мелководных и транзитных зонах, не уступающий по большинству параметров западным аналогам. Дальнейшее

развитие технологии донной сейсморазведки будет направлено как на повышение производительности, снижение себестоимости полевых работ, так и на развитие эффективных методик обработки и интерпретации полученной информации, в первую очередь, многокомпонентных сейсмических материалов.

Коллектив авторов выражает глубокую благодарность заместителю директора ФГУП ВНИГРИ, д.г.-м.н. Григоренко Юрию Николаевичу и ведущему научному сотруднику ФГУП ГНЦ РФ «ВНИИгеосистем», к.т.н. Аккуратову Олегу Сергеевичу за помощь и поддержку на всех этапах данной работы.

Литература

1. Н.П. Лаверов, Ю.В. Рослов, Л.И. Лобковский, А.В. Тулупов, М.А. Воронов, О.Ю. Ганжа. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4-13.
2. Рослов Ю.В., Мережко А.А., Жемчужников Е.Г, Половков В.В., Попов Д.А. Многокомпонентные сейсморазведочные работы в транзитной зоне Печорской губы с использованием мобильного комплекса модулей Turtle-500 // 6th Saint-Petersburg International Conference & Exhibition, Saint-Petersburg, Russia, 7-10 April 2014

Подробнее об авторах



Рослов
Юрий Викторович

заместитель директора
по геофизике и развитию
бизнеса ООО
«Сейсмо-Шельф»



Воронов
Михаил Аркадьевич

главный инженер
ООО «Сейсмо-Шельф»



Половков
Вячеслав Владимирович

начальник отдела
обработки и интерпретации
сейсмических данных
ООО «Сейсмо-Шельф»



Долотказин
Ильдар Ниязьевич

главный технолог
ООО «Сейсмо-Шельф»

Авторы выражают благодарность О.С.Аккуратову (ВНИИГеоинформсistem) и Ю.Н.Григоренко (ВНИГРИ) за неоценимую помощь на всех этапах работ.