

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566

SEISMIC SURVEY IN TRANSIT ZONE. KRAB SYSTEM FULL-SCALE TESTS (STAGE 2)

D. A. Ilinskiy, K. A. Roginskiy, O. Y. Ganzha

P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

It is emphasized that the Russian complex of "KRAB-400" seismic bottom stations was developed for hydrocarbon survey on the continental shelf of the Russian Federation within the framework of import substitution program. The tests carried out on a limited sample of 10% of the complex bottom stations in the first stage have revealed unavailability of the complex for further tests. This fact has dictated the necessity to develop procedures for hardware integrated check to identify engineering faults. The second stage of full-scale tests performed on the basis of the developed integrated check procedures is described in the paper. The test procedures to validate the key parameters of bottom stations are explained. They include the adjustment of seismic signal source, accuracy assessment for seismic station timer, identity evaluation for bottom station seismic channels, assessment of station displacement on the seabed with respect to the shipboard launch point, analysis of station compass and tiltmeter indications on the seabed, definition of hydrophone channel optimum gain. The technology of seismic profile mapping using MultiChannel Seismic (CDP method) at test range is offered. The performed tests have revealed that the overall reject rate of stations by the various parameters (failed hydrophones, reversed polarity of connection, channels nonidentity, failure to meet timer specifications) is 9.18% of total number of stations. This reject rate is unacceptable for the field trials. Regardless of hardware engineering deficiencies the second stage of tests has validated the general system availability to gain high-quality seismic data. Hardware performance is rated at the level of the best world-class products. The processed seismic data has enabled evaluating the accuracy of the obtained results, developing recommendations for designer to enhance reliability and efficiency of the stations ready for pilot testing at one of the licensed areas of the continental shelf of the Russian Federation.

Keywords: transition zones, import substitution, seismic survey, autonomous seismic bottom station, CDP time section.

For citation:

Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. KRAB system full-scale tests. Stage 2." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.

УДК 550.834.08

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ. НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ КРАБ (ЭТАП 2)

Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа

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

Отмечается, что для разведки углеводородов на континентальном шельфе Российской Федерации в рамках программы импортозамещения был разработан отечественный комплекс сейсмических донных станций «КРАБ-400». Испытания первого этапа, проведенные на ограниченной выборке 10 % донных станций комплекса, показали неготовность комплекса к циклу дальнейших испытаний. В этой связи возникла необходимость создания методики комплексной проверки аппаратуры для выявления технологических недостатков. В статье дано описание второго этапа натурных испытаний на основе разработанной

методики комплексной проверки. Раскрыты методы проверки основных параметров донных станций. Методика проверки включала в себя подбор параметров источника сейсмических сигналов, оценку точности хода часов сейсмических станций, оценку идентичности сейсмических каналов донных станций, оценку смещения положения станции на дне относительно точки сброса с борта судна, анализ показания компаса и накломера станций на дне, определение оптимальной величины усиления канала гидрофона. Показана технология построения сейсмического профиля по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки на опытном полигоне. Проведенные испытания показали, что общий процент брака станций по различным параметрам (нерабочие гидрофоны, обратная полярность подключения, неидентичность каналов, несоответствие часов требованиям технического задания) составляет 9,18 % от общего числа станций. Данный процент брака является недопустимым при проведении опытно-методических работ. Несмотря на технические недостатки аппаратуры, в целом второй этап проведения испытаний показал, что система работоспособна и может обеспечить получение качественного сейсмического материала. Технические характеристики оборудования находятся на уровне мировых образцов. По результатам обработки сейсмических данных была проведена оценка качества полученных результатов, даны рекомендации разработчику по повышению надежности и работоспособности станций в целях подготовки их к проведению опытно-промышленных испытаний на одном из лицензионных участков континентального шельфа Российской Федерации.

Ключевые слова: транзитные зоны, импортозамещение, сейсморазведка, автономные сейсмические донные станции, временной разрез ОГТ.

Для цитирования:

Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы КРАБ (этап 2) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 551–566. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-551-566.

Введение (Introduction)

В связи с санкционной политикой ряда европейских стран и нарастающим интересом отечественных компаний-недропользователей по освоению континентального шельфа Российской Федерации была разработана программа по импортозамещению промышленного оборудования для освоения шельфовых месторождений. В статье дано описание второго этапа натурных испытаний отечественной системы сейсмических донных станций (СДС) — «КРАБ», разработанной в рамках программы импортозамещения в акватории Черного моря на базе Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук.

Для исследования был использован комплекс СДС «КРАБ», доработанный по результатам первого этапа испытаний [1]. Была разработана методика и программа проверки элементов комплекса на соответствие требованиям технического задания. Методика проверки включала в себя подбор параметров источника сейсмических сигналов, оценку точности хода часов сейсмических станций, оценку идентичности сейсмических каналов донных станций, оценку смещения положения станции на дне относительно точки сброса с борта судна, анализ показания компаса и накломера станций на дне, определение оптимальной величины усиления канала гидрофона. Проведенная на первом этапе проверка случайной выборки сорока СДС, по тестируемым параметрам показала, — процент брака составляет 9,18 %, что является недопустимым при проведении полевых работ. Были построены сейсмические профили по методу отраженных волн в модификации общей глубинной точки [2]–[4], полученные результаты обработаны и выданы замечания разработчику для устранения перед проведением натурных испытаний на одном из лицензионных участках континентального шельфа Российской Федерации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Актуальность полномасштабного тестирования системы «Краб» и методические рекомендации для его проведения.

Проведенные на первом этапе [1] испытания ограниченной выборки, состоящей из сорока СДС, что составляет 10 % комплекса «КРАБ-400», показали практически полную неготовность комплекса не только к промышленным, но даже к натурным испытаниям. Работа спуско-подъем-

ных устройств (СПУ) не могла обеспечить корректную расстановку СДС по профилю. Механизмы СПУ не отвечали требованиям техники безопасности к работам на палубе судна. По результатам постановки СДС на этом этапе были получены сейсмические данные недостаточного качества для проведения производственных работ. Применение ортогонально ориентированных геофонов, корректно работающих при отклонениях от горизонтальной оси донной станции на дне не более 20° , требует тщательной процедуры постановки. Разработанное в составе комплекса СПУ не позволяло реализовать это условие. В результате при постановке станций на двух профилях процент брака сейсмического материала в среднем составил 25 %.

Следует отметить, что при работе на каменистых участках дна, характерных для рельефа опытного полигона, принципиальная постановка станции в горизонтальном положении не представляется возможной. В связи с этим на втором этапе было принято решение применить ручной метод постановки СДС, который позволит уменьшить процент брака, вызванный неправильным положением станций на дне. Испытания СПУ, разработанного в составе комплекса, наглядно показали, что автоматизация этого процесса может осуществляться только при помощи очень сложных устройств [5] (<https://www.inapril.com/automation/>), защищенных патентами [6].

Первый этап выявил существенную неидентичность СДС по величине усиления канала гидрофона, несоблюдение полярности его подсоединения, несоответствие положения осей геофона положению осей электронного компаса, а также плохую юстировку компаса и инклинометра. Поэтому актуальным является вопрос разработки методик тестирования элементов системы, проведение тестирования, выявление критических параметров с указанием источника неидентичности и составление дефектной ведомости. Для подтверждения работоспособности оборудования данный этап испытаний должен завершиться постановкой двух линейных профилей и получением качественных сейсмических данных.

Проверка СДС «КРАБ» на идентичность.

Второй этап натурных испытаний комплекса «КРАБ» проходил на базе Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН. К испытаниям было представлено 176 СДС. Отсутствие специального лабораторного прецизионного оборудования для проведения тестирования сейсмических каналов [7], [8] обусловило необходимость разработки методики испытаний, максимально приближенной к реальной работе устройств на дне. Станции были подготовлены к работе и группами по 16 шт. устанавливались на погружную технологическую площадку (ПТП) — рис. 1. На ПТП они были сориентированы в одном направлении по положению разъемов и зафиксированы во избежание их возможного смещения при погружении в воду. Глубина моря в районе погружения станций составила 8 м. Для проверки на идентичность проводилось по шестьдесят излучений пневматическим источником с интервалом 5 с для каждой из групп станций.

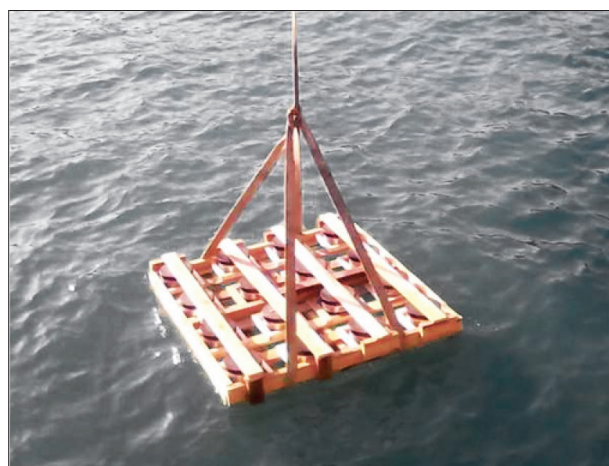


Рис. 1. Погружная техническая площадка с шестнадцатью донными станциями

Для анализа данные для каждой станции нарезались по 5 с от начала времени срабатывания каждого излучения. Были получены сейсмограммы общей точки приема для каждой компоненты (три компоненты геофона — X , Y , Z и гидрофон H). На рис. 2 для СДС с заводским номером № 444 и номерами излучений 10–30 показан пример сейсмограммы общей точки приема четырехкомпонентной записи. Здесь и далее приняты следующие условные обозначения: H — канал гидрофона; Z — вертикальная компонента геофона; X и Y — горизонтальные ортогональные компоненты геофона. На вертикальной шкале показаны номера излучений. Горизонтальная шкала дана в секундах от момента каждого излучения. Видна хорошая повторяемость и стабильность работы пневмоисточника.

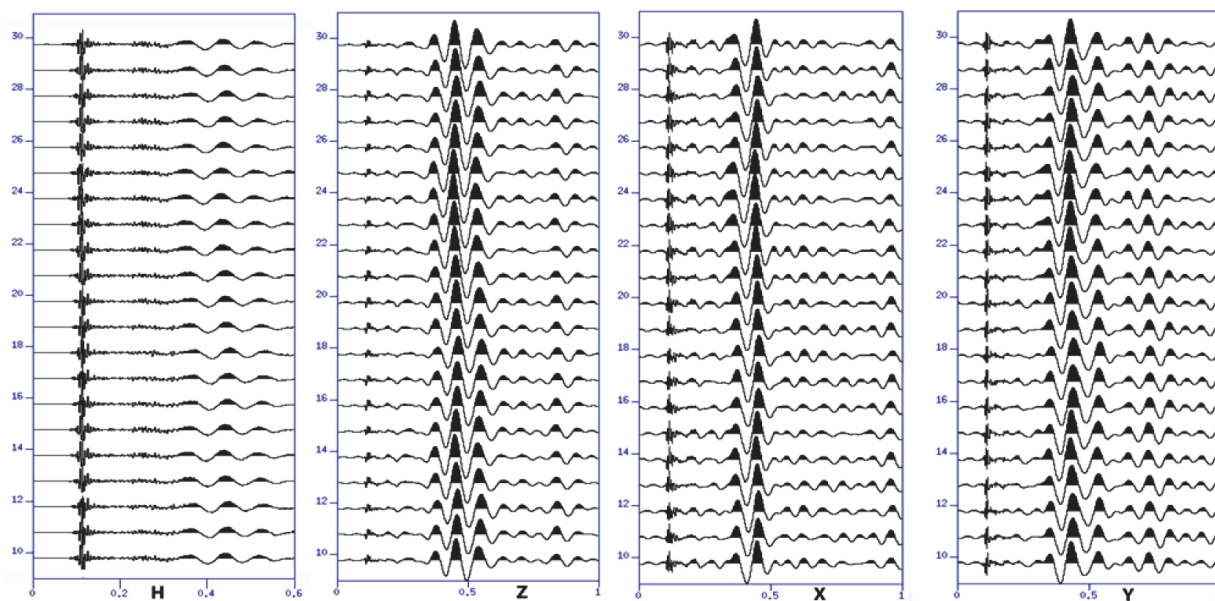


Рис. 2. Сейсмограммы общей точки приема для станции № 444 для четырех компонент: H , Z , X , Y

Данные для гидрофона приведены с автоматической регулировкой усиления, длина окна которой составляет 0,2 с для демонстрации низкочастотной компоненты поля в последующих вступлениях, и не видна без регулировки усиления из-за большого перепада амплитуд между первыми вступлениями и последующими. Для геофонов не наблюдается такого перепада амплитуд и поэтому сейсмограммы общей точки приема для этих каналов даны без регулировки амплитуд.

Опытные испытания и результаты (Pilot Tests and Results)

Подбор параметров сейсмического источника. При подготовке к работе была выполнена оптимизация объема пневмоисточника и его заглубление. Анализ показал, что заглубление 2 м и объемом 0,6 л являются оптимальными параметрами.

Первичная обработка всех сейсмограмм общей точки приема показала хорошую повторяемость и стабильность работы пневмоисточника. Пример стабильности приведен на рис. 2.

Оценка точности хода часов СДС. Перед началом работы СДС производится настройка термостатированного генератора внутренних часов станции с использованием секундных импульсов PPS, получаемых от системы GPS. При работе станции относительное отклонение точности хода часов не должно превышать гарантированной величины 5×10^{-9} . Одна станция показала небольшое превышение отклонения точности хода часов $5,8 \times 10^{-9}$ по сравнению с требованиями технического задания, а две станции показали существенное отклонение $5,6 \times 10^{-8}$ и $-1,1 \times 10^{-7}$. Данные этих станций были забракованы.

Оценка идентичности сейсмических каналов. Оценка идентичности — это комплексная проверка системы «КРАБ» на одинаковое усиление каналов между различными СДС, проверка полярности подключения геофонов и гидрофонов, отсутствие каналов без сейсмических данных. Результатом проверки является «Дефектная ведомость», передаваемая разработчику для устране-

ния недостатков. После получения сейсмограмм общей точки приема для каждой станции и каждой компоненты они объединялись и сортировались по излучениям, полученные сейсмограммы общего пункта излучения подвергались анализу. Рассмотрим процесс анализа на примере данных шестнадцати станций одного из тестовых измерений (условно пронумеруем станции от 1 до 16 в соответствии с позициями на ПТП).

На рис. 3 показана сейсмограмма общей точки излучения для канала гидрофона. Номера позиций станций «КРАБ» даны на вертикальной шкале слева. Горизонтальная шкала показывает секунды с момента излучения. На рис. 3, а показаны трассы, отнормированные на общий максимум. На рис. 3, б представлены трассы, отнормированные на максимальное значение в каждой трассе.

Анализ данных показывает:

- канал гидрофона СДС № 16 в нерабочем состоянии;
- на каналах СДС № 2, 4–11, 13, 14 сейсмограммы идентичны;
- усиление канала СДС № 12 не соответствует остальным станциям;
- на каналах СДС № 1 и № 15 имеются фазовые сдвиги;
- запись на канале СДС № 3 отличается от записей нормальных каналов.

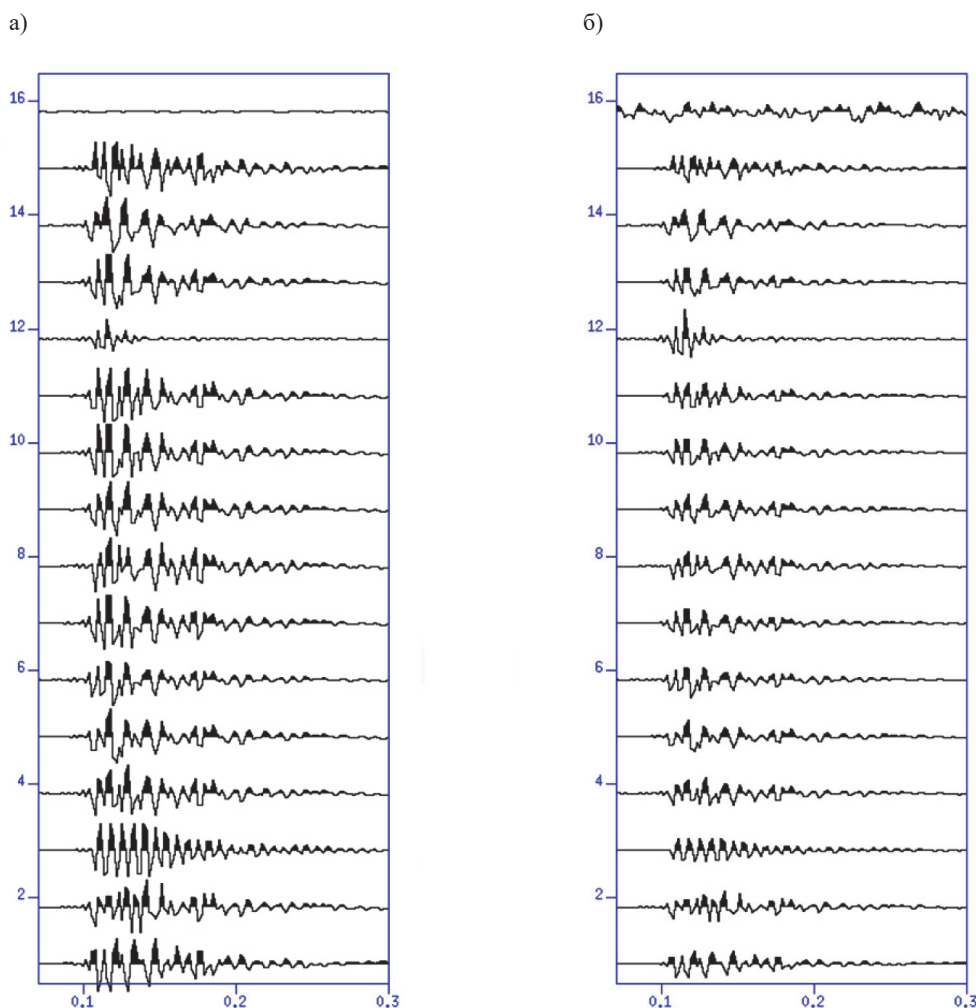


Рис. 3. Сейсмограмма общего пункта взрыва для группы испытаний каналов станции № 7:

а — канал гидрофона; б — излучение № 16

Условные обозначения:

по горизонтали — время в секундах; по вертикали — номер позиции СДС на ПТП

На рис. 4 показана выборка из одиннадцати идентичных трасс с хорошей амплитудно-фазовой идентичностью и одинаковым коэффициентом усиления гидрофона для излучения № 26.

Величина коэффициента усиления была установлена равной 41 на соответствующих СДС. На рис. 5 показаны данные канала гидрофона для СДС с номерами каналов станций № 1, 2 и 15. Канал № 2 взят как пример идентичной записи. Каналы станций № 1 и 15 имеют перевернутую фазу по отношению к другим станциям при сохранении формы записи. При монтаже СДС не соблюдена полярность подключения гидрофона к усилителю.

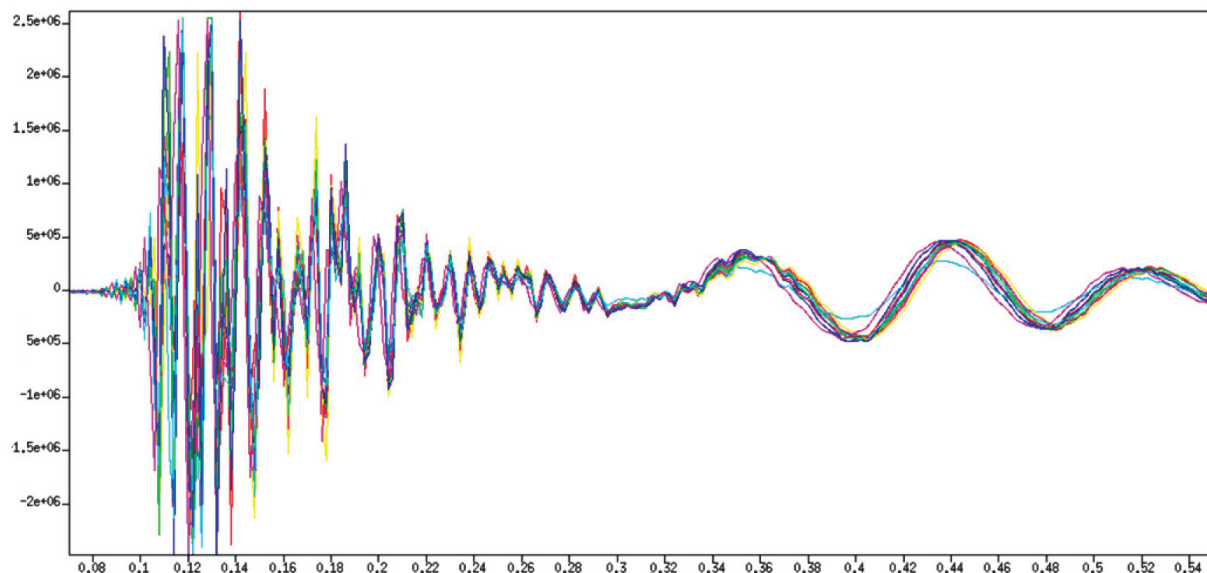


Рис. 4. Сейсмограммы гидрофона для СДС № 2, 4–11, 5, 13, 14

Условные обозначения:

по горизонтали — время в секундах (с); по вертикали — напряжение в мкВ

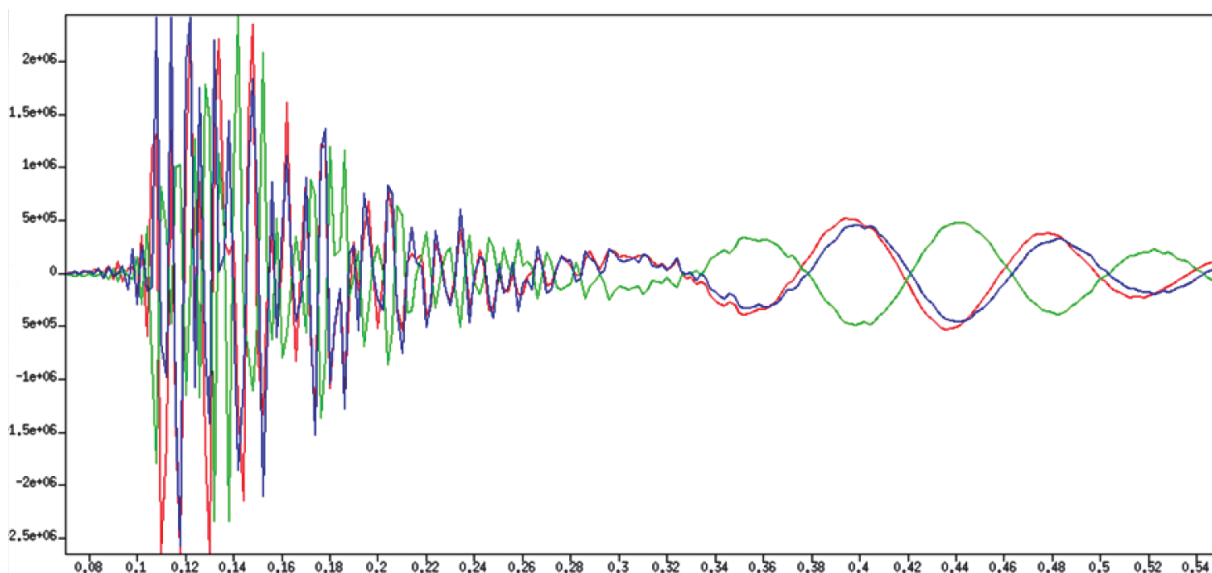


Рис. 5. Сейсмограммы гидрофона для СДС № 1, 2 и 15

Условные обозначения:

СДС № 1 — красная линия; СДС № 2 — зеленая линия; СДС № 15 — синяя линия;
по горизонтали — время в секундах (с); по вертикали — напряжение в мкВ

Аналогичным образом были проанализированы данные записей СДС всех групп испытаний. В результате тестирования 176 станций было выявлено следующее:

– на пяти СДС гидрофоны не работают по разным причинам (2,8 %);

- на шести СДС гидрофоны подключены с обратной полярностью (3,5 %);
- три СДС показали неидентичность канала гидрофона (1,75 %);
- две СДС показали несоответствие часов требованиям технического задания (1,1 %).

Общий процент брака составил 9,18 %, что является недопустимым при промышленном использовании комплекса.

Постановка СДС по линейному профилю. Неудачная конструкция СПУ [1] выявила сложность создания устройств для механизации спуско-подъема СДС при транзитных сейсмических работах с целью уменьшения доли ручного труда. Необходимость правильной постановки станций для опытно-промышленных испытаний привела к разработке новой методики раскладки СДС. Ключевыми моментами для обеспечения оптимальной постановки станций являлись:

- обеспечение спуска станций в воду в «свободном» режиме без натяжения несущего кабель-троса;
- недопущение протяжки гирлянды станций по дну возникшим натяжением несущего кабель-троса;
- обеспечение постановки СДС в точки, соответствующие заранее подготовленным координатам профиля [9].

Обработка методики постановки производилась с использованием двадцати СДС на двух линейных профилях с борта НИС «Парус». Точки постановки станций на профиле были заранее рассчитаны и загружены в навигационный компьютер на мостике судна, в который приходили сигналы DGPS. На рис. 6 показана постановка СДС на профилях через 50 и 25 м соответственно, далее выполнялся отстрел профиля длиной 2,4 км пневмоисточником с застрелами по 700 м от каждого конца профиля. В начале и конце линии расстановки станций были установлены концевые буи с грузами.

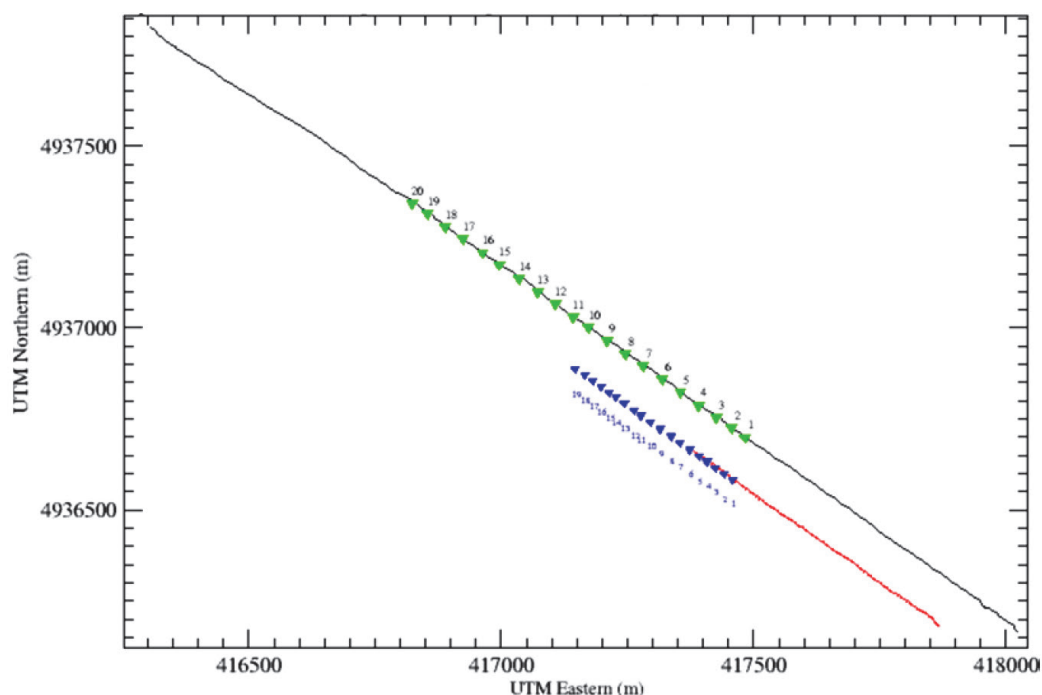


Рис. 6. Планируемое положение 20 СДС

Условные обозначения:

- зеленые треугольники — профиль 1 (расстояние 50 м);
- синие треугольники — профиль 2 (расстояние 25 м);
- черная линия — отстрел на профиле 1; красная линия — отстрел на профиле 2

Технология постановки станций заключалась в следующем. Судно шло по навигационному компьютеру и выходило на линию профиля заранее, до достижения первой точки постановки

концевого буйа. За 1 мин до достижения точки постановки первого концевого буйа с кормы судна выбрасывался норвежский буй на фале, соединенном с грузом концевого буйа. В момент достижения точки постановки концевого буйа по команде с мостика с кормы выбрасывался груз концевого буйа, а привязанный к нему несущий фал линии начинал вручную вытравливаться в воду. В момент достижения судном точки сброса первой станции она сбрасывалась по команде инженера-гидрографа. По достижении следующей точки постановки станции процедура повторялась и так до последней станции, после которой через 100 м выбрасывался груз и второй концевой буй.

Целью расстановки стала проверка способа постановки станций на дно в более жестких условиях, в отличие от предыдущего теста, при расстоянии между станциями, равном 25 м. При той же скорости судна 3 уз необходимо проводить постановку станций в два раза чаще — каждые 16 с. В данном случае глубина места постановки станций по профилю больше, чем расстояние между ними, и скорость движения судна по профилю больше, чем скорость свободного падения станции в воде. Это создает ситуацию, когда предыдущая станция еще не достигла дна, а следующая за ней уже находится в воде. Главной целью этой расстановки является проверка правильности раскладки станций на дне и оценка качества полученных данных.

Отстрел профилей с помощью пневмоисточника. В качестве источника был использован один сейсмический источник, разработанный ООО «Пульс» [10], с объемом рабочей камеры 1,2 л и с глубиной подвеса пушки 4 м. Излучения проводились при давлении 130 бар, средней скорости судна 3,86 уз и расстоянием между каждым излучением 10 м. Излучения проводились каждые 5 с с привязкой по времени излучения к соответствующему импульсу GPS приемника. Точное время излучения и его координаты фиксировались.

На первом профиле было проведено 241 излучений сейсмического источника, общая длина линии отстрела составила 2389 м, включая застрелы с обоих концов по 700 м. Отстрел профиля занял 20 мин. На втором профиле было проведено 76 излучений. Общая длина отстрела составила 760 м, включая отстрел с одной стороны 250 м. Продолжительность отстрела составила 7 мин (рис. 6).

Подъем станций со дна. Подъем станций осуществлялся тем же способом, что и на первом этапе натурных испытаний [1], на следующий день после постановки станций и отработки пневмоисточником. На первом профиле после подъема на борт первых пяти станций обнаружился зацеп ведущего фала станций из-за неоднородности дна. Было принято решение остановить подъем и вызвать водолазов для решения проблемы зацепа несущего фала. Выяснилось, что несущий кабель-трос сделал круговую петлю вокруг камня-скалы на дне моря. После освобождения от зацепа подъем оставшихся на дне станций прошел без происшествий. Подъем СДС на втором профиле был выполнен в штатном режиме. Таким образом подтвердились существенные недостатки постановки СДС гирляндным методом в районах, для которых характерны препятствия на дне.

Смещение положения СДС на дне относительно точки сброса по преплоту. Анализ смещения СДС по отношению точки сброса производился по водной волне [11]. На рис. 7 приведены графики отклонения СДС от точек, определяемых преплотом для обоих профилей. На профиле 1 в среднем сдвиг равен 65 м, что свидетельствует о систематической ошибке при расстановке станций. На профиле 2 в среднем сдвиг равен 0 м, что свидетельствует об отсутствии систематической ошибки при расстановке станций.

Причина образования систематической ошибки состояла в постоянной задержке порядка 83 мс. Эта величина была определена путем сравнения сейсмограм с теоретическими модельными расчетами времени прихода водной волны. Задержка была вызвана двумя причинами: задержкой срабатывания пневмоисточника 33 мс и 50 мс постоянной задержкой, возникающей при работе аппаратуры СДС.

После устранения систематической ошибки отклонения от преплота составляют менее 15 м, что укладывается в стандарты промышленных работ.

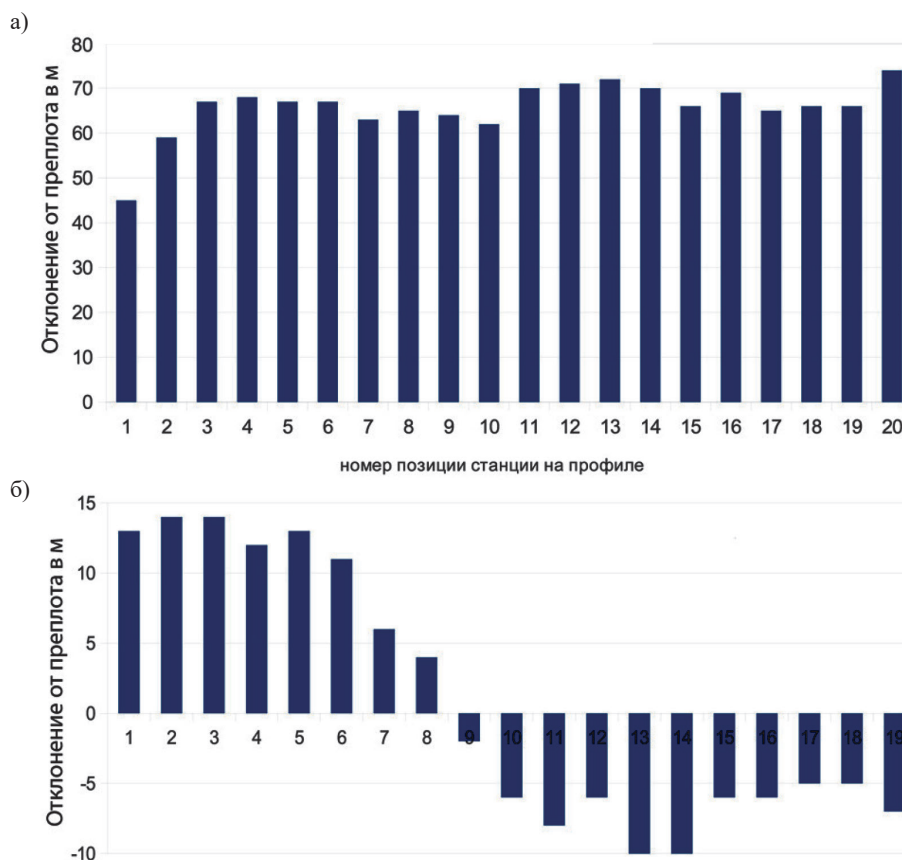


Рис. 7. Статистика сдвига положения станций на дне относительно преплота:

а — профиль 1 — расстояние между СДС 50 м;
б — профиль 2 — расстояние между станциями 25 м

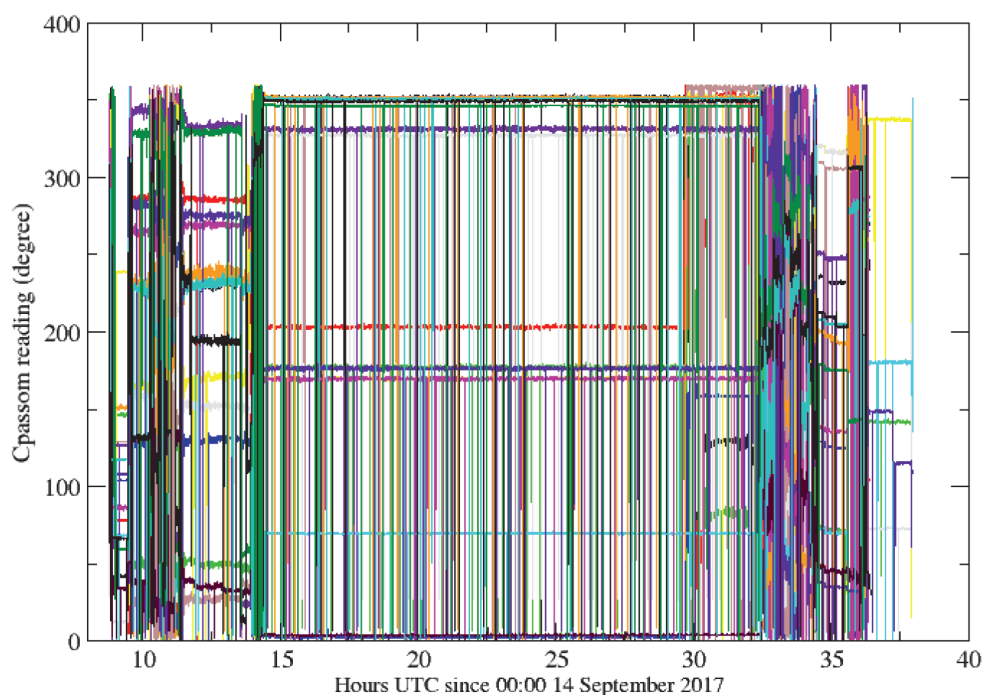
Анализ данных показаний компаса и наклонов донных станций (крена и дифферента). На рис. 8 показаны данные, полученные на станциях по измерениям азимута (см. рис. 8, а) и углов крена (см. рис. 8, б) цифровыми датчиками. Данные дифферента имеют такой же вид, что и данные крена. Большое количество ложных измерений затрудняет интерпретацию данных и требует специального математического обеспечения для обработки записанных значений и получения нужной информации об азимуте, угле крена и дифференте станции.

В тестовом режиме все данные приходилось выводить на графики и вручную снимать правильные показания компаса, крена и дифферента. Среднее значение наклона станций на профилях составило 3,3 град. Максимальное отклонение от горизонта было 12,2 град., что не превышает допустимой величины 20 град. для геофонов DX-20 (<http://geospace-ufa.ru/catalog/geofony/gx20dx.html>). У четырех СДС отсутствовали данные измерения компаса и инклинометров из-за исчерпанности памяти для записи этих измерений. Новая методика постановки станций полностью себя оправдала для постановки 20 СДС, и был получен 100 % результат по качеству данных. Все станции были поставлены в горизонтальное положение с учетом допустимых наклонов.

Определение оптимального усиления канала гидрофона. Оценка усиления канала гидрофона проводилась по сводным монтажах сейсмограмм общего пункта приема для канала гидрофона без регулировки усиления и с его выравниванием. На монтаже с автоматической регулировкой усиления видно, что все гидрофоны работали. На монтаже без регулировки видно, что на позициях № 4, 7, 15 коэффициент усиления 6 амплитуды сигнала заметно меньше, в отличие от остальных, где коэффициент усиления 41.

На рис. 9 показаны сейсмограммы самых ближних удалений 0–10 м от источника для 20 станций профиля 1 на канале гидрофона. На рис. 9, б все трассы распределены по позициям станции на ТПП, на рис. 9, а те же сейсмограммы для станций на позициях № 4, 7, 15 с уменьшенным усилением гидрофона, на рис. 9, в сейсмограммы для всех станций на ТПП. Видно, что три станции с уменьшенным усилением не дают перегрузку на ближних удалениях и не искажают форму полученного сигнала от пушки, в то же время все остальные каналы показывают сильную перегрузку сигнала и искажение его формы вследствие того, что выбранный коэффициент усиления 41 оказался завышенным для работы с пушкой конкретной конфигурации и усиление канала гидрофона следует уменьшить.

а)



б)

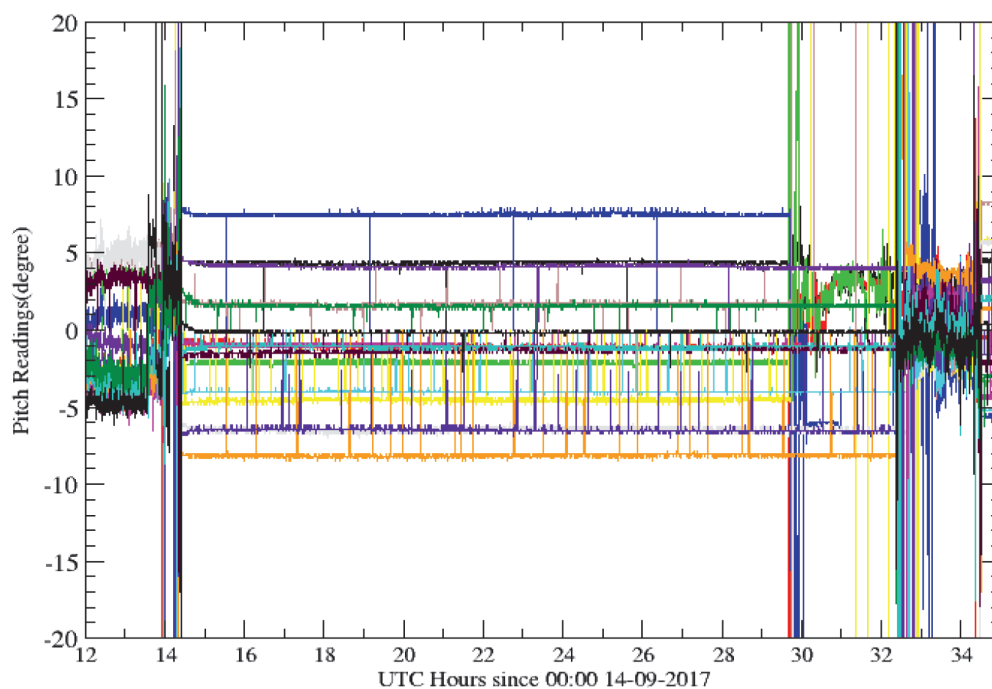
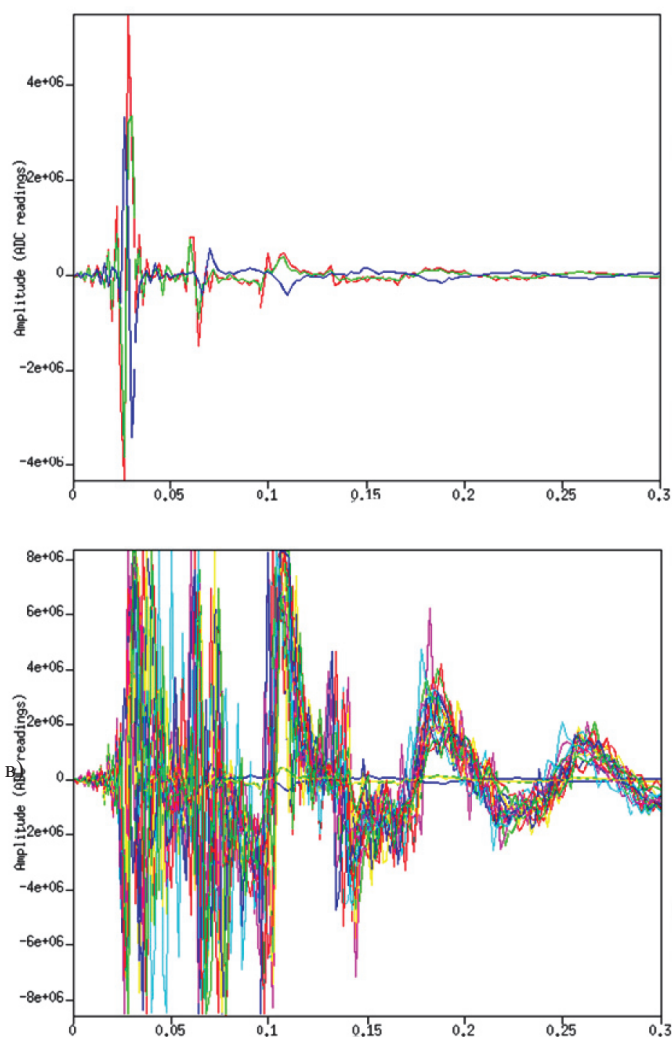


Рис. 8. Примеры записи данных азимута (а) и углов крена (б)

а)



б)

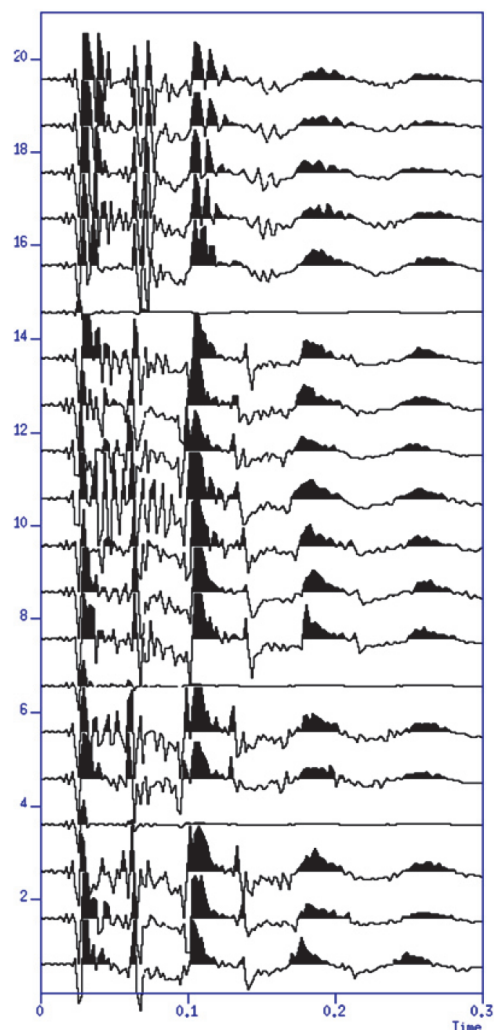


Рис. 9. Сейсмограммы ближних удалений канала гидрофона для профиля 1

Условные обозначения:

- а — сейсмограммы для станций на позициях № 4, 7, 15 с уменьшенным коэффициентом усиления;
- б — трассы распределены по позициям станций на ТПП;
- в — сейсмограммы всех станций на ТПП

Оценка качества полученных сейсмических данных. На рис. 10 представлена суперсборка данных каналов гидрофона (см. рис. 10, а) и вертикального геофона (см. рис. 10, б), отсортированных по удалению источник-приемник. Видна хорошая однородность данных и даже без суммирования по методу общей глубинной точки [12], [13] видны мощные отражения во времени 2,2, 2,6 и 3,2 с. Для горизонтальных компонент X , Y суперсборки не рассчитывались, так как азимут СДС на дне был разный, и суперсборка не имеет смысла без поворота оси X вдоль профиля [14].

Для общего контроля качества на профилях 1 и 2 были сделаны суммарные разрезы по методу общей глубинной точки (ОГТ) [3]. Вычисление положения точек ОГТ производилось с шагом 15 м. На рис. 11, б показано продольное положение точек ОГТ в локальной системе координат для профиля 1. Координата X ОГТ для наглядности смещена с 0 до 5 м. Точки ОГТ показаны черным цветом, положение СДС на профиле показано красными треугольниками, а координаты срабатывания сейсмического источника показаны зелеными точками.

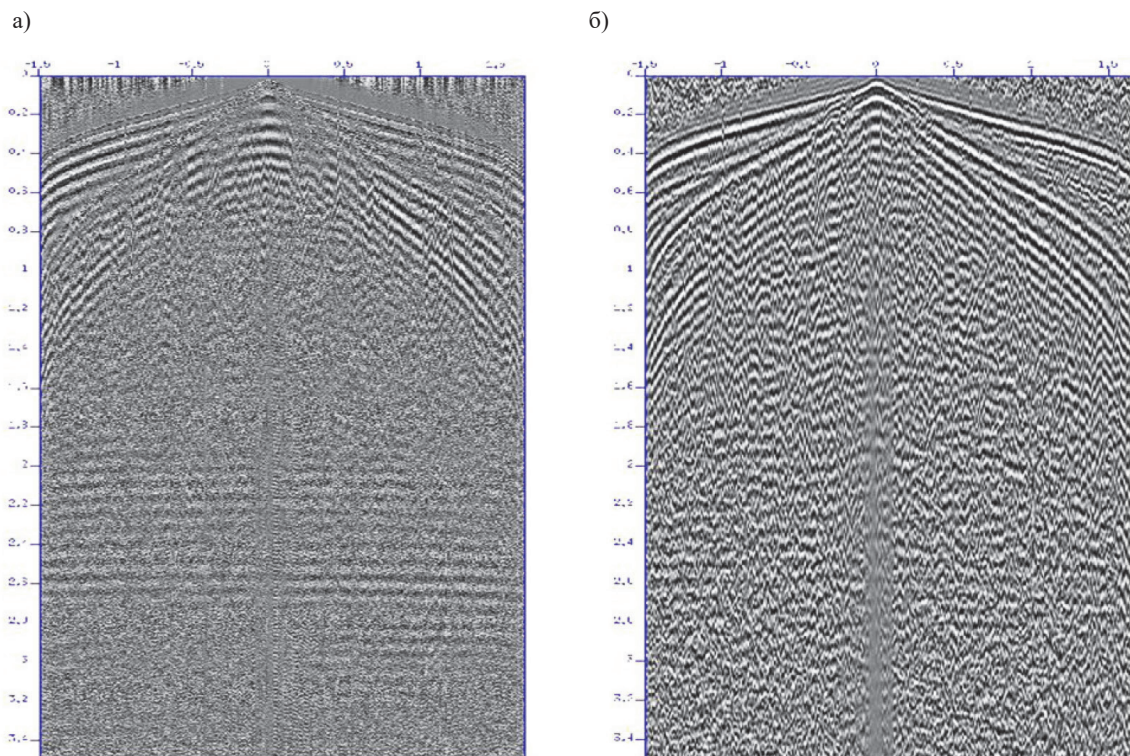


Рис. 10. Суперборки каналов H (а) и Z (б) для первого профиля

На рис. 11, а представлена полученная кратность изображения для точек ОГТ вдоль профиля. Кратность по краям изображения поднимается от 0 до 60 и затем в середине изображения сохраняется на этом значении..

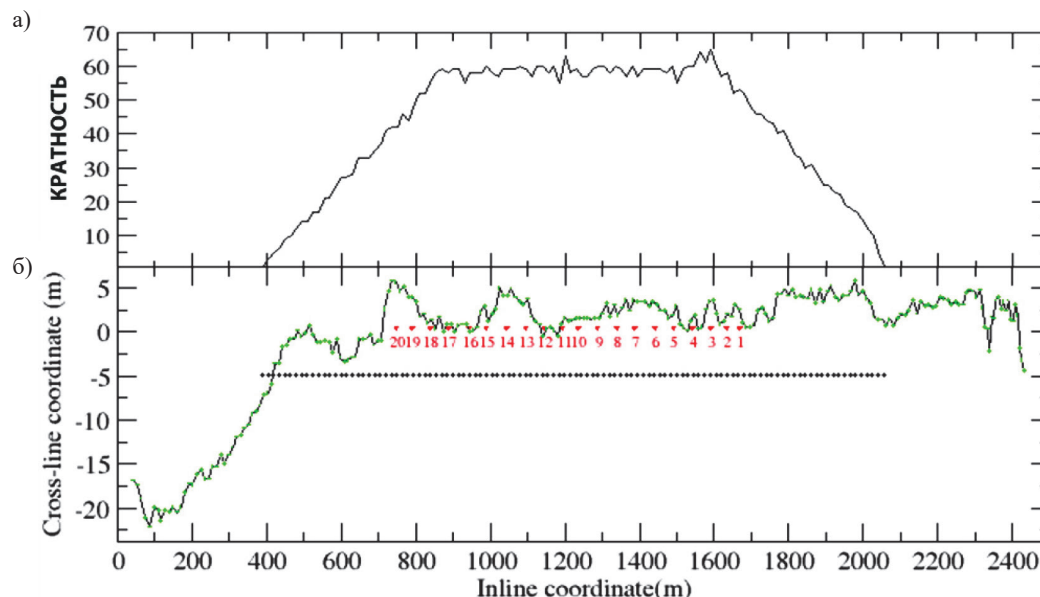
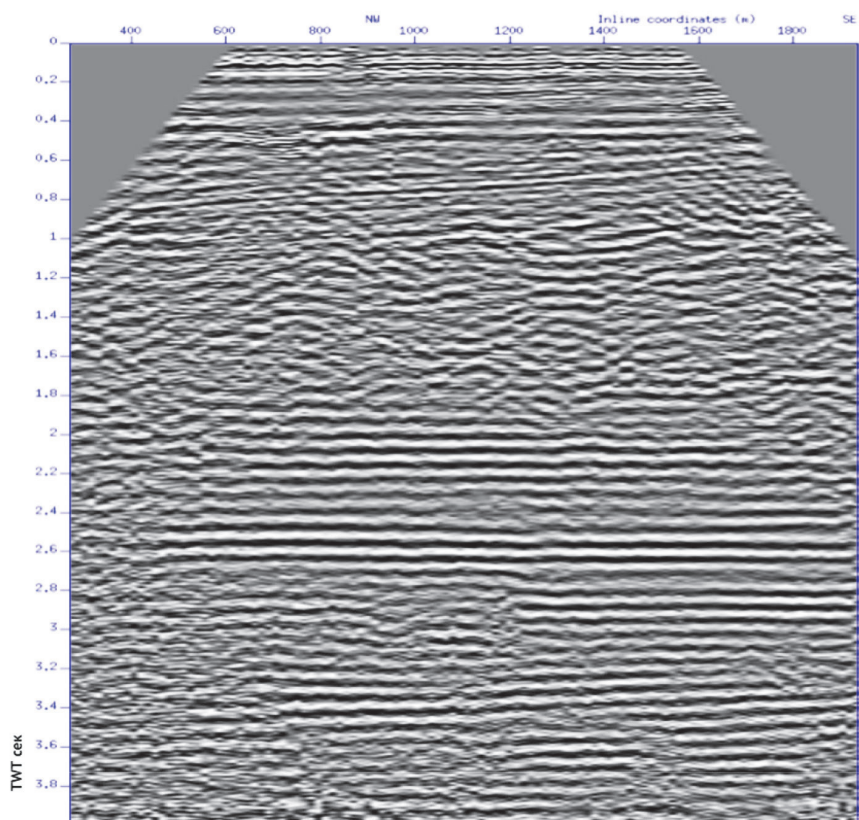


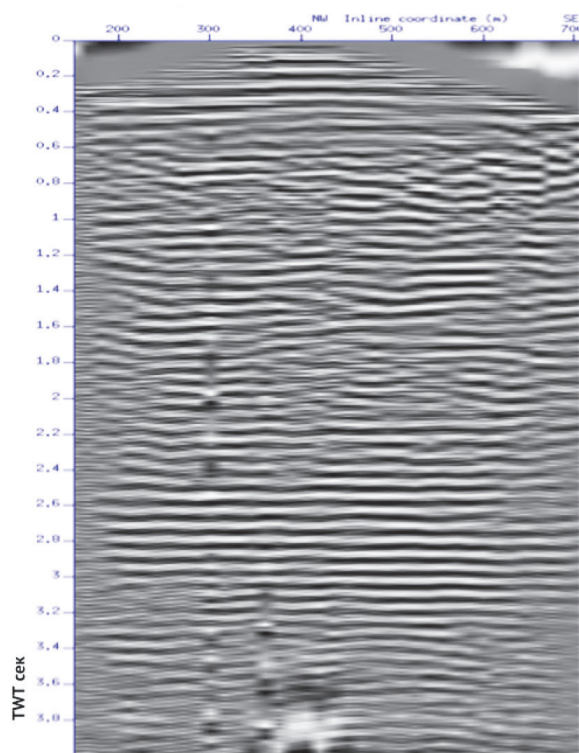
Рис. 11. Изменение кратности вдоль профиля (а) и положение точек ОГТ в локальной системе координат (б)

На рис. 12 представлены финальные временные разрезы ОГТ для канала гидрофона, рассчитанные для обоих профилей. На рис. 12, в приведена кривая интервальных скоростей, полученных при подборе скоростей суммирования для изображения профиля 1.

а)



б)



в)

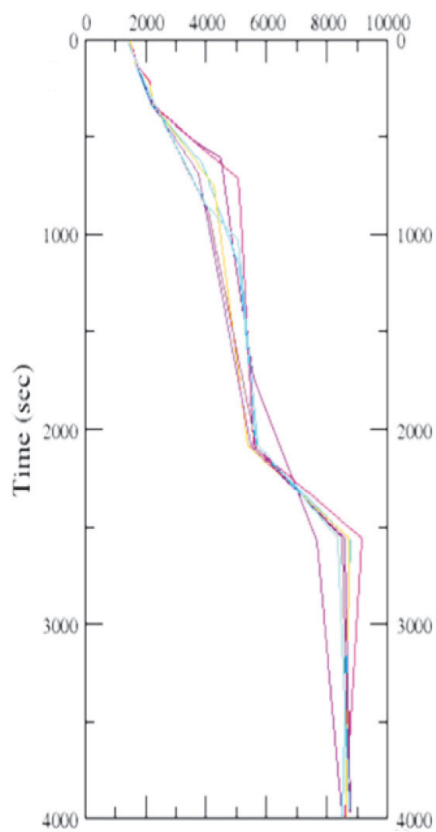


Рис. 12. Временные разрезы для канала гидрофона на профиле 1 (а) и профиле 2 (б) и интервальная скорость суммирования для профиля 1 (в)

Обсуждение (Discussion)

Работа по созданию промышленного образца системы донных станций гирляндной постановки на дно для сейсмических работ в транзитной зоне была выполнена с выявлением следующих технологических недостатков:

1. Низкое качество монтажа станций и калибровки гидрофонов. Необходимо предусмотреть программное изменение усиления предварительного усилителя гидрофона.
2. Часы правильно синхронизируются, показывая верное время, но 5 % из них показали превышение пределов допуска, записанного в ТЗ комплекса «КРАБ».
3. Имеется постоянная дополнительная задержка записи сейсмических данных в память регистратора около 50 мс во всех станциях комплекса «КРАБ», которую надо учитывать при обработке данных.
4. Коэффициент усиления гидрофонов выбран неправильно. Необходимо уменьшить аналоговый коэффициент усиления гидрофона в 20 раз. Этот вывод подтверждается по результатам работы всех испытаний с сейсмическим источником.
5. При надлежащем использовании ручной технологии постановки СДС удастся поставить станции на дно с допустимым уклоном станции от горизонтали на ровном дне. При постановке станций с 50-метровым интервалом и с 25-метровым интервалом удастся получить 100 % качественных данных на всех компонентах геофона на всех поставленных станциях. Измерители наклонов (угол измерения крена и дифферента) показывают хорошую корреляцию с проверкой качества данных на вертикальных и горизонтальных геофонах.
6. Ограниченная память для хранения данных компаса и наклономеров не позволяет надежно регистрировать их показания. Огромное количество неверных показаний необходимо как-то фильтровать или на уровне сбора данных, или на этапе обработки с помощью дополнительного материального обеспечения. Необходимо увеличить память для сбора данных азимута, крена и дифферента станций.
7. Получен временной разрез на профилях из двадцати и девятнадцати станций с маленьким сейсмическим источником — пушкой объемом 1,2 л. Помимо поверхностных границ получены и более глубинные изображения среды, до 3,3 с двойного времени пробега, проведена оценка скоростного разреза.
8. Разъем СДС для зарядки станций и обмена данными требует существенной доработки.
9. Спускоподъемное устройство должно быть сконструировано на гидравлическом приводе.
10. Программное обеспечение комплекса требует отладки и доработки.

Выводы (Conclusion)

1. Впервые в России за последние 30 лет разработано и изготовлено сейсмическое оборудование для транзитных зон. Технические характеристики оборудования находятся на уровне мировых образцов. Разработана методика тестирования комплекса, позволившая выявить недостатки аппаратуры. Второй этап натурных испытаний показал, что комплекс работоспособен и способен обеспечить получение качественного сейсмического материала, однако необходимы серьезные доработки для вывода комплекса «КРАБ» на промышленные работы.

2. Система «КРАБ» является копией буксируемых систем постановки автономных донных сейсмометров, ей присущи все недостатки этой системы, которые заключаются в применении ручного труда при постановке и подъеме СДС на борт. При этом гирляндный метод постановки СДС плохо или вообще неприменим в районах с препятствиями на дне.

3. Лучшим решением является не копирование западных систем, а разработка своих собственных, основанных на новых инновационных принципах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема 0149-2019-0012).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильинский Д. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Натурные испытания системы «КРАБ» (этап 1) / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
2. Левин И. С. Основные параметры системы наблюдений при проведении сейсморазведочных работ методом отраженных волн / И.С. Левин // Труды Кольского научного центра РАН. — 2019. — Т. 10. — № 6-1. — С. 162–167. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.022.
3. Dondurur D. Acquisition and Processing of Marine Seismic Data / D. Dondurur. — Elsevier Inc., 2018. — 606 p.
4. Monk D. J. Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques / D. J. Monk. — Society of Exploration Geophysicists, 2020. — 214 p. DOI: 10.1190/1.9781560803713.
5. Beaudoin G. Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey / G. Beaudoin, A. A. Ross // The Leading Edge. — 2007. — Vol. 26. — Is. 4. — Pp. 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.
6. Пат. 8172480 B2 США, МПК B63B21/66. Node storage, deployment and retrieval system / J. N. Thompson, J. L. Laws, L. E. Berges; заяв. и патентообл. Fairfield Industries Incorporated, Sugar Land, TX (US). — № US 2011 FO176875A1; заявл. 30.06.2008; опубл. 21.07.2011.
7. Wielandt E. Measuring seismometer nonlinearity on a shake table / E. Wielandt, M. Zumberge // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2013. — Vol. 103. — Is. 4. — Pp. 2247–2256. DOI: 10.1785/0120120325.
8. Ringler A. T. Laboratory tests of three Z-land fairfield nodal 5-Hz, three-component sensors / A. T. Ringler, R. E. Anthony, M. S. Karplus, A. A. Holland, D. C. Wilson // Seismological Research Letters. — 2018. — Vol. 89. — Is. 5. — Pp. 1601–1608. DOI: 10.1785/0220170236.
9. Матвеев И. А. Особенности проведения многокомпонентных сейсмических исследований в транзитной зоне в условиях предельного мелководья арктических морей / И. А. Матвеев, А. В. Зимовский, Д. Г. Куома, О. В. Клепиков // Вестник Пермского университета. Геология. — 2017. — Т. 16. — № 4. — С. 382–392. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.382.
10. Крутов А. Л. ООО «СИ Технолоджи» — новации, достижения, внедрение / А. Л. Крутов, И. В. Леонтьев // Нефть. Газ. Новации. — 2019. — № 9 (226). — С. 75–79.
11. Непрочнов Ю. П. Методика обработки и интерпретации записей донных сейсмографов при глубинном сейсмическом зондировании в океане / Ю. П. Непрочнов, О. Ю. Ганжа, И. А. Ильин // Океанология. — 2005. — Т. 45. — № 3. — С. 458–467.
12. Медведев С. Н. Технология обработки отраженных волн на записях донных сейсмостанций / С. Н. Медведев // Технологии сейсморазведки. — 2016. — № 2. — С. 92–99. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-2-92-99.
13. Жижикин А. А. Сравнительный анализ идеологии цифровой обработки разнообъектных малоглубинных сейсморазведочных исследований на месторождениях твердых полезных ископаемых / А. А. Жижикин // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16.; ГИ УрО РАН. — Пермь, 2018. — С. 200–203. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.54.
14. Zhu Y. A least squares method based on quaternions to derive absolute orientation of geophones with AHRS / Y. Zhu, J. Lin, F. Zhao, Z. Chen, F. Sun, H. Lv // Journal of Geophysics and Engineering. — 2018. — Vol. 15. — Is. 6. — Pp. 2614–2624. DOI: 10.1088/1742-2140/aadd2f.

REFERENCES

1. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. “Seismic survey in the transit zone. Full-scale tests of the KRAB system. Stage 1.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.2 (2020): 289–301. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-289-301.
2. Levin, Ilya Sergeevich. “The main parameters of the observation system during seismic decreasing work by the method of reflected waves.” *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* 10.6-1 (2019): 162–167. DOI:10.25702/KSC.2307-5252.2019.6.022.
3. Dondurur, Derman. *Acquisition and Processing of Marine Seismic Data*. Elsevier Inc., 2018.
4. Monk, David J. *Survey Design and Seismic Acquisition for Land, Marine, and In-between in Light of New Technology and Techniques*. Society of Exploration Geophysicists, 2020. DOI: 10.1190/1.9781560803713.
5. Beaudoin, Gerard, and Allan A. Ross. “Field design and operation of a novel deepwater, wide-azimuth node seismic survey.” *The Leading Edge* 26.4 (2007): 494–503. DOI: 10.1190/1.2723213.

6. Thompson J. N., Laws J. L., Berges L. E. US 8172480 (B2), IPC B 63 B35/04. Node storage, deployment and retrieval system. USA, assignee. Publ. 21 Jul. 2011.
7. Wielandt, Erhard, and Mark Zumberge. "Measuring seismometer nonlinearity on a shake table." *Bulletin of the Seismological Society of America* 103.4 (2013): 2247–2256. DOI: 10.1785/0120120325.
8. Ringler, Adam T., R. E. Anthony, M. S. Karplus, A. A. Holland, and D. C. Wilson. "Laboratory tests of three Z-land fairfield nodal 5-Hz, three-component sensors." *Seismological Research Letters* 89.5 (2018): 1601–1608. DOI: 10.1785/0220170236.
9. Matveev, I. A., A. V. Zimovskiy, D. G. Kuoma, and O.V. Klepikov. "Characteristics of Conducting the Multi-Component Seismic Prospecting in the Transition Zone in Conditions of Very Shallow Water of Arctic Seas." *Bulletin of Perm University. Geology* 16.4 (2017): 382–392. DOI: 10.17072/psu.geol.16.4.382.
10. Krutov, A. L., and I. V. Leontiev. "OOO SI Technology: Innovations, Achievements and Application." *Oil. Gaz. Novation* 9(226) (2019): 75–79.
11. Neprochnov, Yu. P., O. Yu. Ganja, and I. A. Ilin. "Methods for processing and interpretation of bottom seismograph records of deep seismic sounding in the ocean." *Oceanology* 45.3 (2005): 431–440.
12. Medvedev, S. N. "Reflections data processing technique for obs records." *Seismic Technologies* 2 (2016): 92–99. DOI: 10.18303/1813-4254-2016-2-92-99.
13. Zhizhikin, A. A. "Sravnitel'nyi analiz ideologii tsifrovoy obrabotki raznoob'ektnykh maloglubinnnykh seismorazvedochnykh issledovaniy na mestorozhdeniyakh tverdykh poleznykh iskopaemykh." *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: sb. nauch. tr.* Vol. 16. Perm', 2018. 200–203. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.54.
14. Zhu, Yadongyang, Jun Lin, Fa Zhao, Zubin Chen, Feng Sun, and Hao Lv. "A least squares method based on quaternions to derive absolute orientation of geophones with AHRS." *Journal of Geophysics and Engineering* 15.6 (2018): 2614–2624. DOI: 10.1088/1742-2140/aadd2f.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ильинский Дмитрий Анатольевич — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 e-mail: dilinskiy61@mail.ru

Рогинский Константин Александрович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 e-mail: roginskiy@list.ru

Ганжа Олег Юрьевич — главный специалист Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук 117997, Российская Федерация, г. Москва, Нахимовский проспект, 36 e-mail: ganzhaoy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Iilinskiy, Dmitry A. — PhD, Senior Research Scientist P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation e-mail: dilinskiy61@mail.ru

Roginskiy, Konstantin A. — PhD, Senior Research Scientist P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation e-mail: roginskiy@list.ru

Ganzha, Oleg Y. — Chief Specialist P. P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences 36, Nakhimovsky prospekt, Moscow, 117997, Russian Federation e-mail: ganzhaoy@mail.ru