

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА, СУДОВОЖДЕНИЕ

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624

SEISMIC SURVEY IN TRANSIT ZONE. KRAB SYSTEM FULL-SCALE TESTS (STAGE 3)

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

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

Full-scale tests of KRAB-400 seismic complex in summer 2017 have shown up a fair amount of hardware flaws. List of deficiencies and instructional guidelines contributed to rectification of all issues found within a short timeframe and to the development of a hardware system for full-scale pilot tests which were carried out at the test polygon in Pechora Sea nearby Prirazlomnaya platform. This is a standard area 30–35 m in depth well suited for seismic studies in transition zone with flat sea bottom covered with sediments. The key goal includes testing the KRAB seismic bottom stations during 2D seismic profiling as per the CDP method along with OBX750E Geospace sea-bed nodes, USA. The obtained seismic data are duly processed thus evidencing equipment service ability in real operation conditions. Good correlation of results for both types of equipment is demonstrated by independently plotted seismic sections. Due to geophones of lower frequency the KRAB results for vertical channels turn out to be even better in terms of transmission depth. The developed complex has shown the possibility to handle structural and geological tasks successfully. Substantially the complex of seismic bottom stations KRAB-400 ensures collection of seismic data as per good international counterparts. However, the reject rate of field data has achieved abnormally high 20.5 %. This reject rate is associated with the low quality of technological assembly, which is a disadvantage of domestic production. It is summarized that Russia has a sufficient number of qualified personnel for the production of high-tech products and solving the problems of import outstripping rather than import substitution.

Keywords: transition zone, import substitution, seismic survey, autonomous bottom nodes, pilot tests, reflected waves method, common depth point, 3-C geophone, hydrophone, digital compass-inclinometer, nodes cable deployment, time section, converted waves

For citation:

Roginskiy, Konstantin A., Dmitry A. Ilinskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Seismic survey in transit zone. Krab system full-scale tests (Stage 3)." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.5 (2021): 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.

УДК 550.834.08

СЕЙСМОРАЗВЕДКА В ТРАНЗИТНОЙ ЗОНЕ. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМЫ «КРАБ-400» (ЭТАП 3)

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

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

В статье представлены результаты опытно-промышленных испытаний системы «КРАБ-400», которые явились третьим этапом проверки работоспособности системы. Предыдущие два этапа, представляющие собой натурные испытания, были проведены летом 2017 г. Натурные испытания выявили большое количество недостатков аппаратуры, однако «Дефектная ведомость» и «Методические рекомендации» позволили в короткий срок устранить выявленные недостатки и сформировать комплект оборудования для проведения полномасштабных опытно-промышленных испытаний. Для проведения третьего этапа испытаний был выбран полигон в Печорском море в районе платформы Приразломная с глубинами моря 30–35 м, представляющий типичный район для проведения сейсмической работ

в транзитной зоне с ровным дном, покрытым осадками. Основная задача испытаний состояла в тестировании сейсмических донных станций КРАБ в процессе отработки 2-Д сейсмического профиля по методу отраженных волн общей глубинной точки совместно с донными нодами OBX750E Geospace США. На основе полученных результатов была проведена обработка, которая показала работоспособность оборудования в промышленных условиях. Независимо построенные временные разрезы по сейсмическим данным, полученным для обоих типов оборудования, показали хорошую корреляцию результатов. Отмечается, что результат, полученный для вертикальных каналов комплекса «КРАБ-400», показал лучшую глубинность, чем данные, полученные с нодами OBX750E, в связи с использованием более низкочастотных геофонов. Исследована возможность решения структурных и геологических задач с использованием разработанного комплекса. Сделан вывод о том, что в целом комплекс сейсмических донных станций «КРАБ-400» обеспечил сбор сейсмической информации на уровне лучших зарубежных аналогов, однако объем брака полевого материала составил 20,5 %, что является недопустимо высоким уровнем. Отмечается, что брак связан с низким качеством технологической сборки, что является недостатком отечественного производства. В исследовании акцентировано внимание на том, что Россия обладает достаточным количеством квалифицированных кадров для выпуска высокотехнологичной продукции и решения задач не импортозамещения, а импортоопережения.

Ключевые слова: транзитная зона, импортозамещение, сейсморазведка, автономные донные ноды, опытно-промышленные испытания, метод отраженных волн, общая глубинная точка, 3-С геофон, гидрофон, цифровой компас-инклинометр, тросовая постановка нодов, временной разрез, обменные волны.

Для цитирования:

Рогинский К. А. Сейсморазведка в транзитной зоне. Опытные-промышленные испытания системы «КРАБ-400» (этап 3) / К. А. Рогинский, Д. А. Ильинский, О. Ю. Ганжа // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 5. — С. 611–624. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-5-611-624.

Введение (Introduction)

Натурные испытания системы «КРАБ-400», проведенные в два этапа летом 2017 г., выявили большое количество недостатков аппаратуры, которые необходимо было устранить до проведения опытно-промышленных сравнительных испытаний [1], [2]. Дефекты в основном были связаны с недостаточно проработанной технологией калибровки приборов. Следует особо отметить, что конструкция спуско-подъемного устройства была признана не соответствующей требованиям техники безопасности для проведения работ в морских условиях. «Дефектная ведомость» и «Методические рекомендации», выработанные в результате натурных испытаний, позволили в короткий срок устранить выявленные недостатки и сформировать комплекс оборудования для проведения полномасштабных опытно-промышленных испытаний, которые были проведены осенью 2017 г. с использованием технической помощи и морских судов компании МАГЭ (<https://mage.ru/ru/>).

Для проведения опытно-промышленных испытаний был выбран полигон в Печорском море в районе платформы Приразломная (рис. 1) с глубинами моря 30–35 м, представляющий собой типичный район для проведения сейсмических работ в транзитной зоне [3]. В отличие от полигона натурных испытаний, проведенных на Черном море, на дне которого встречались скальные выходы, дно нового полигона покрыто ровным слоем осадков. Основной задачей испытаний являлось тестирование сейсмических донных станций (СДС) «КРАБ-400» в процессе отработки 2-Д сейсмического профиля по методу отраженных волн общей глубинной точки (МОВ-ОГТ) совместно с донными нодами OBX750E Geospace [4] (<https://www.geospace.com/seabed-ocean-bottom-recorders/>). До проведения морских работ на комплексе СДС «КРАБ-400» были проведены дополнительные лабораторные испытания на борту судна для проверки готовности к морским работам.

На основе полученных сейсмических данных была проведена обработка, целью которой являлась оценка степени работоспособности оборудования в промышленных условиях и возможности решения структурных и геологических задач с его использованием. Независимо построенные временные разрезы по сейсмическим данным, полученным для обоих типов оборудования, показали хорошую корреляцию результатов. Для вертикальных каналов результат, полученный для комплекса СДС «КРАБ-400», показал лучшую глубинность в связи с использованием более низкочастотных геофонов.

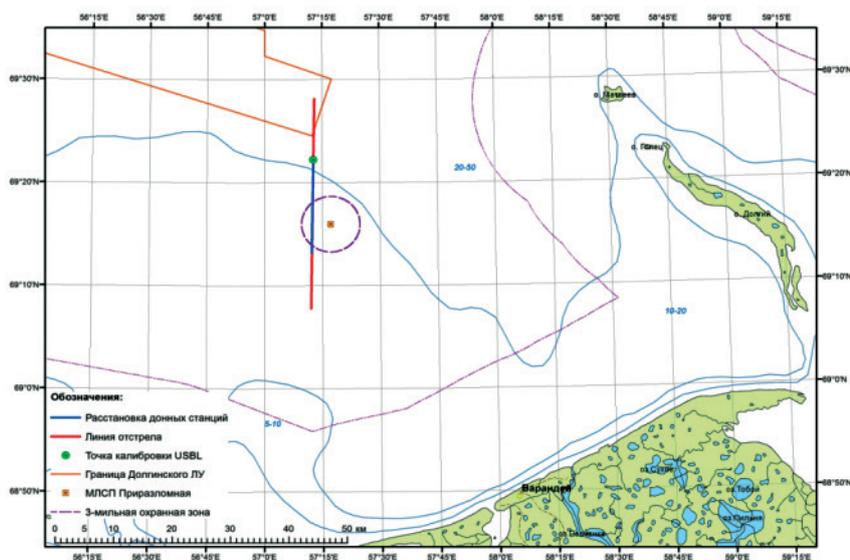


Рис. 1. Карта района проведения опытно-промышленных испытаний

В целом комплекс СДС «КРАБ-400» обеспечил сбор сейсмической информации на уровне зарубежных аналогов. Однако вопрос качества технологической сборки нуждается в дополнительной тщательной проработке для выпуска оборудования, соответствующего современным технологическим требованиям полевых сейсмических работ.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Подготовка к морским испытаниям. На судно-раскладчик «Акварин» ОАО «МАГЭ» (рис. 2) был доставлен и установлен на кормовой палубе стандартный морской контейнер с размещенным в нем СДС «КРАБ-400», одновременно являющийся мобильной лабораторией (рис. 3, а). Рядом был установлен 10-футовый контейнер, в котором находилась лаборатория донных станций Geospace (рис. 3, б).



Рис. 2. Судно-раскладчик «Акварин»

Функциональное различие контейнерных лабораторий состоит в том, что контейнер со станциями Geospace используется исключительно для обслуживания ограниченного количества донных

станций, которые при этом транспортируются отдельно. Мобильная лаборатория комплекса СДС «КРАБ-400» позволяет выполнять полный цикл работ, включая транспортировку станций, зарядку, настройку и скачивание записанной нодами информации в результате проведенных морских сейсмических работ.

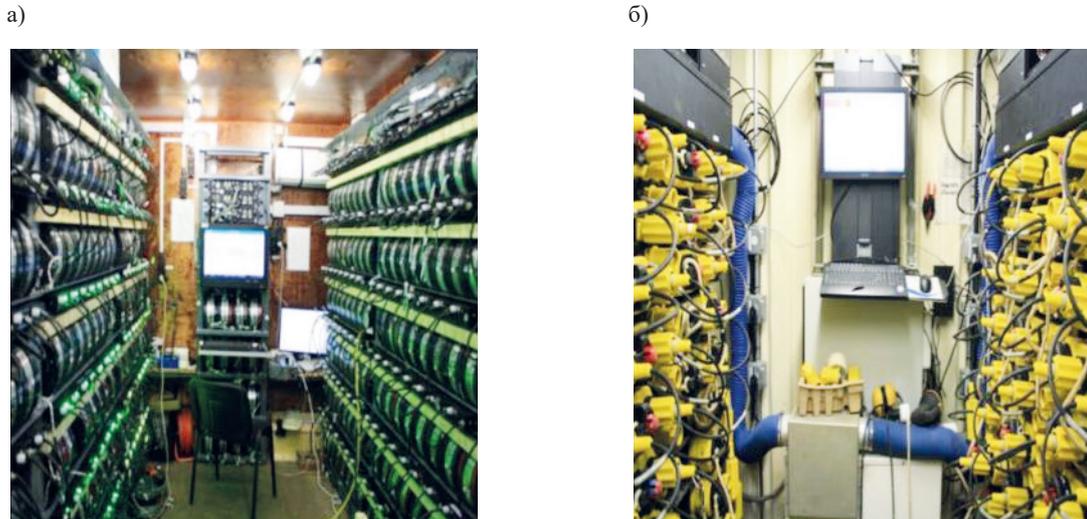


Рис. 3. Контейнер-лаборатория:
а — лаборатория «КРАБ-400»; б — контейнер-лаборатория Geospace

Несмотря на внешнее различие донных станций (рис. 4), их технические характеристики близки друг к другу (табл. 1). Основное отличие состоит в характеристиках геофонов. В донных станциях OBX Geospace установлены GS-ONE 3-С геофоны (<http://geospace-ufa.ru/catalog/geofony/gson-one.html>), не требующие горизонтальной установки корпуса станции и имеющие диапазон регистрируемых частот 15–160 Гц.

В системе СДС «КРАБ-400» установлены 3-С геофоны с частотными характеристиками 10–250 Гц, требующие установку на дне с отклонением от вертикали не более 20° [1]. Кроме принципиально различных геофонов, к преимуществам системы «КРАБ» относится возможность осуществления контроля работы полного комплекта СДС «КРАБ-400», которые находятся в контейнере-лаборатории. Остальные параметры находятся в пределах промышленных стандартов подобной аппаратуры зарубежных производителей.

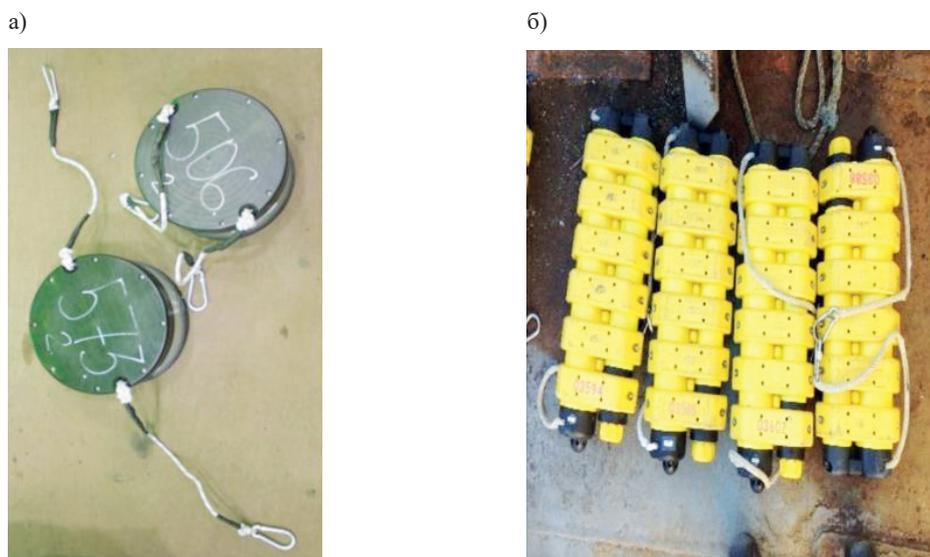


Рис. 4. Автономные донные станции:
а — СДС «КРАБ-400»; б — СДС OBX Geospace

Таблица 1

Технические характеристики СДС «КРАБ-400» и OBX Geospace

Технические характеристики и элементы узлов	OBX Geospace	СДС «КРАБ-400»
Заявленная максимальная глубина погружения	750 м	500 м
Гидрофон	MP 18BH-1000 Чувствительность 4 В/бар Частота 5 Гц – 1кГц	ГС-10 (АО НИИ «ЭЛПА») Чувствительность 25 В /бар Частота 2 Гц – 1,6 кГц
Геофоны	GS-One Чувствительность 79 В/м/с Частота 15–160 Гц	GS-30СТ (верт.), GS-20GX (гор.) Чувствительность 27,5 В/м/с Частота 10–250 Гц
Инclinометр	+	+
Цифровой компас	–	+
Максимальное время записи	40 сут	45 сут
Шаг дискретизации	4; 2; 1; ½; ¼;	4; 2; 1; ½; ¼;
Регулировка усиления сигнала	+	+
Датчик давления	+	+
Возможность оперативного контроля	–	+
Вес	11,85 кг	16 кг
Размер	521 × 208 × 108 мм	Д 300 × 200 мм
Максимальная рабочая глубина	750 м	500 м

На борту судна в рамках подготовки комплекса «КРАБ-400», в дополнение к морским испытаниям, была выполнена общая проверка работоспособности оборудования и тестирование каналов донных станций. 400 СДС, находящиеся на стеллажах контейнера-лаборатории, были запрограммированы на сбор данных с планируемыми параметрами: частота сбора данных — 500 Гц (период дискретизации — 2 мс), коэффициенты усиления каналов: геофонов — 4, гидрофона — 1, период сбора данных компасом-инclinометром — 15 мин. На основе результатов тестовых измерений был выполнен сравнительный анализ записей на каналах станций, который позволил выявить существенные недостатки ряда СДС, а именно:

- обратную полярность датчика — 15 СДС;
- слабый сигнал датчика — 3 СДС;
- отсутствие сигнала датчика — 16 СДС.

Далее был проведен тест донных станций на герметичность, который заключался в откачивании воздуха из донных станций при помощи вакуумного насоса до давления ниже 0,1 атм., выдержки их в течение суток и повторном измерении давления внутри станций. Данный тест позволил установить нарушение герметичности 63 СДС.

На основе полученных результатов анализа всех тестов было принято решение о сокращении числа донных станций, участвующих в расстановке на опытно-промышленных испытаниях, с 400 до 337. Таким образом, процент брака еще до постановки СДС составил почти 16 %.

Отработка профиля 2Д МОВ-ОГТ. Цель отработки профиля 2Д МОВ-ОГТ состояла в сравнительных испытаниях системы «КРАБ» с зарубежной промышленной системой OBX Geospace. Перед постановкой донных станций обеих систем на профиль при помощи управляющего программного обеспечения было выполнено программирование СДС с параметрами, указанными ранее для подготовительного теста.

Опытные работы проводились в ноябре 2017 г. на исследовательском судне «Акварин». Работы заключались в постановке донных станций на дно акватории по профилю длиной 16,8 км, возбуждении сейсмического сигнала, подъеме оборудования со дна и считывании сейсмических данных из памяти регистраторов. Опытный профиль находился в 3 км к западу от морской ледостойкой стационарной платформы (МЛСП) «Приразломная» (см. рис. 1). Глубина моря на профиле проведения испытаний составляла 30–35 м. Сейсмические данные были получены по методике возбуждения сейсмического сигнала вдоль неподвижной линии приемной расстановки донных регистраторов (2Д МОВ-ОГТ) двумя различными системами регистрации (рис. 5): четырехкомпонентными автономными донными сейсмическими станциями системы «КРАБ-400» и автономной донными станциями OBX Geospace.

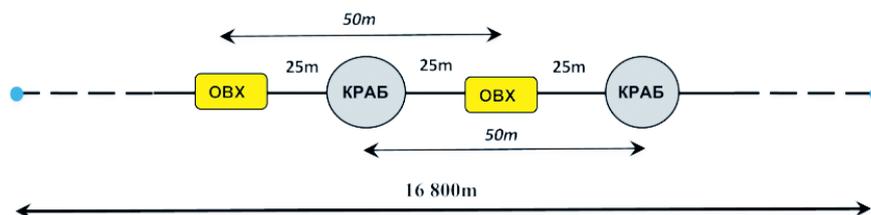


Рис. 5. Схема постановки СДС

Методика работ заключалась в отработке 2D-профиля комбинированной центрально-симметричной системой наблюдения с переходом во фланговую на краях. На рис. 5 приведена последовательность подсоединения станций к несущему тросу. Таким образом, получилась одновременная расстановка станций двух систем с образованием двух независимых систем наблюдений с шагом пункта приема 50 м и одинаковыми условиями приема сейсмических сигналов. Отстрел приемной расстановки производился групповым пневматическим источником с шагом в 25 м. Сейсмическая запись была получена с параметрами регистрации, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Параметры регистрации сигнала

№ п/п.	Параметры	Характеристики
1	Система наблюдений	Комбинированная центрально-фланговая
2	Кратность ОСТ	644
3	Шаг ПВ	25 м
4	Шаг ПП	50 м
5	Минимальное удаление ПВ–ПП	50 м
6	Максимальное удаление ПВ–ПП	27 400 м
7	Количество активных каналов	337 H, X, Y, Z
8	Параметры источников сигнала	Bolt 1900 LLX: четыре линии, общий объем 3580 куб. дюйм Pulse Gun: две линии, общий объем 967 куб. дюйм Общий объем источников 4547 куб. дюйм (74,5 л) Рабочее давление 2000 psi
9	Глубина буксировки пневмоисточников	(7 ± 0,5) м
10	Шаг дискретизации	2 мс
11	Длина записи	10 с
12	Формат записи	Seg-D Seg-Y

Через 25 м на несущем синтетическом тросе завязывались две петли для подсоединения донной станции. Способ подсоединения одинаков как для СДС «КРАБ-400», так и для ОВХ Geospace (см. рис. 4) — через отвязки 1 м с карабином. Трос на барабане устанавливался на кормовой палубе. По левой стороне палубы раскладывались СДС «КРАБ-400», а по правой ОВХ Geospace. Судно на профиле двигалось с минимально возможной скоростью, обеспечивающей управляемость судна 4 уз. Постановка станций осуществлялась в ручном режиме. По сигналу навигатора при достижении судном очередной точки постановки станция сбрасывалась в воду вместе с бухтой троса длиной 25 м. Эта бухта готовилась на палубе в процессе движения между точками сброса и ее нужно было подготовить не более чем за 12 с. В течение этого же периода времени должна быть подсоединена очередная станция. Каждые 250 м к тросу крепился пингер-ответчик фирмы Sonardyne (<https://www.sonardyne.com>), используемый для локации точного положения линии приемников на дне. На палубе было занято одиннадцать человек, от слаженной работы которых зависело качество постановки всего профиля (рис. 6). Общее время постановки составило 2,5 ч. Постановка всех станций была выполнена успешно.



Рис. 6. Работа по постановке станций на палубе судна-раскладчика

По окончании процесса постановки станций был выполнен отстрел профиля пневмоисточником в соответствии со схемой (см. рис. 1) и параметрами источника, указанными в табл. 2. Поскольку при постановке станций не использовались концевые буи, подъем станций начался с траления кошками несущего троса, что возможно только для небольших глубин порядка нескольких десятков метров. Процесс траления занял 3 ч. Подъем осуществлялся путем *выбирания* несущего троса с помощью гидравлического шпиля в процессе движения судна вдоль профиля. После подъема донных станций на палубу выполнялись работы по опреснению и просушке станций. СДС были размещены в кластерах контейнера-лаборатории, сейсмическая запись остановлена, данные считаны и проанализированы. Причем данные были считаны одним непрерывным интервалом, с началом в момент времени, предшествующим первому возбуждению в отстреле и концом в момент времени, на несколько минут позже, чем время последнего возбуждения в последнем отстреле. Непрерывная запись была преобразована в формат SEG-Y [5]. [6] согласно полученным с судна-источника данным журнала точного времени возбуждения сигнала.

Анализ количества данных, записанных донными станциями, показал, что 318 СДС имеют качественную сейсмическую запись. Данные 19 СДС были забракованы ввиду следующих причин: внутренний сбой, попадание воды внутрь корпуса, сбой внутренних часов, отсутствие записи на отдельных каналах. Таким образом, процент брака составил 5,6 %. Допустимый брак при проведении промышленных работ составляет 2 %. Общий процент брака от поставленных СДС «КРАБ-400» составил 20,5 %, что является недопустимо высоким показателем для промышленных работ.

Определение положения станций на дне. После постановки было выполнено определение местоположения (пингировка) станций на дне при помощи пингеровой системы фирмы Sonardyne [7]. Результаты расчета величин отклонения станций на дне от точек реплота показаны на рис. 7 в виде гистограмм [8]. Де-факто существуют промышленные стандарты отклонений пункта приема на дне (положения станции) от реплота. Вдоль линии профиля отклонения не должны превышать половину расстояния между приемниками (в данном случае 25 м), а вкрест от линии профиля — не более 25 м. Как видно из гистограмм, отклонения вдоль линии профиля не превышают допустимый предел, равный 25 м, тогда как в поперечном направлении существенное количество станций превышает его вследствие отсутствия механизации и автоматизации процесса постановки станций при гирляндном принципе работы с донными нодами.

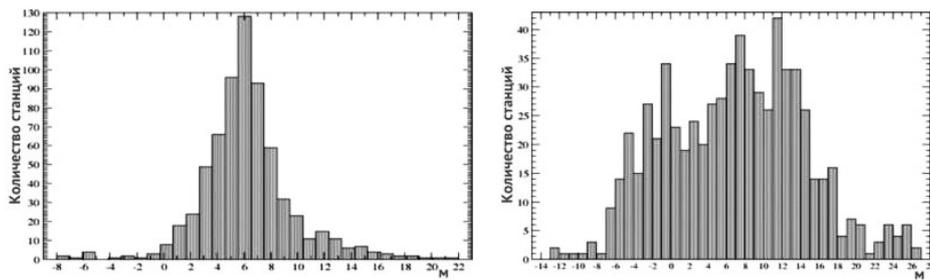


Рис. 7. Гистограммы распределения отклонений положения станций на дне от реплота:
а — вдоль линии профиля; б — вкрест линии профиля

Обработка сейсмических данных и их анализ. В результате предварительного анализа обработки первичных данных была получена информация 636 станций, по 318 донных модулей от каждого производителя. К полученным сейсмическим данным была применена цифровая обработка в четырехкомпонентной модификации [9]–[12]. Обработка сейсмических данных выполнялась программными продуктами Focus 5.1 (Paradigm, <https://www.pdgm.com/>) и PROMAX v.5000.8.3 (Landmark Corp, <https://www.landmark.solutions/SeisSpace-ProMAX/>).

Сейсмические данные были загружены в обрабатывающую систему в количестве 636 сейсмограмм ОПП по четырем компонентам регистрации — ортогонально направленной тройке геофонов и гидрофона. Данные прошли экспресс-обработку и полевой контроль качества. Сейсмограммы загружались в программу обработки в формате SEG-D и SEG-Y. Цифровая обработка выполнялась на основе данных каждой из систем регистрации OBX Geospace и СДС «КРАБ-400» отдельно.

На рис. 8 показан пример трехкомпонентных сейсмограмм общей точки излучения для геофонов двух соседних донных станций разных систем.

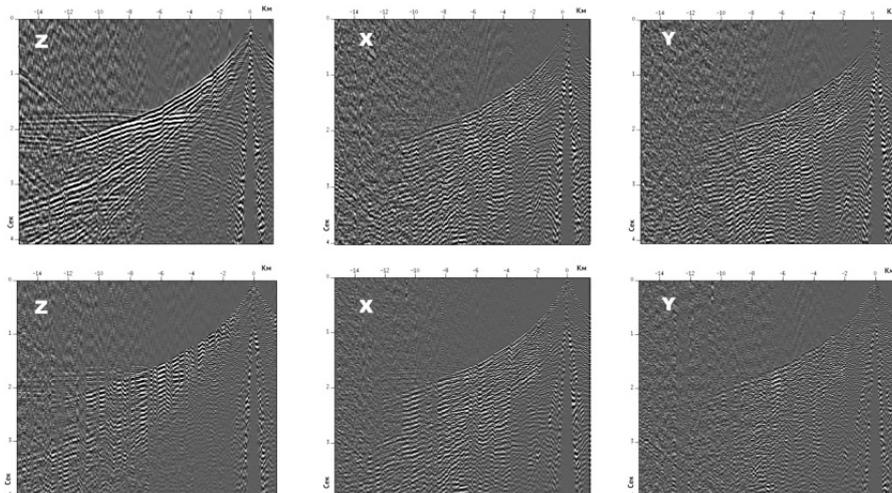


Рис. 8. Сравнение сейсмограмм общей точки излучения для геофонов:
а — «КРАБ-400»; б — OBX Geospace

В каждом окне горизонтальная ось показывает расстояние источник-приемник (offset) в километрах. Вертикальная ось показывает редуцированное время в секундах: $T_{\text{red}} = T - \text{offset}/V_{\text{red}}$. Скорость редукиции $V_{\text{red}} = 6$ км/с. Для горизонтальных каналов X , Y качество данных одинаково сопоставимо. Однако для вертикальной компоненты качество записи для системы «КРАБ-400» существенно выше: лучше прием на больших удалениях и более ясные докритические отражения. Вероятно, это связано с тем, что геофоны в СДС «КРАБ-400» являются пространственно ориентированными, а ОВХ Geospace — всенаправленными и каплинг СДС лучше из-за большего веса станции.

Подбор параметров оптимального графа обработки. На первом этапе предварительной обработки сейсмической записи до суммирования запись очищалась от регулярных волн-помех, повышая соотношение сигнал-помеха по разрезу, и производилось подавление кратных волн. Все процедуры выполнялись с сохранением разрешенности сейсмической записи и динамики отражений. Определялся кинематический закон для регулярной выборки ОГТ по профилю. После применения процедур очистки сейсмической записи проводилась первая итерация подбора скоростей с шагом 120 м.

На втором этапе обработки по суммированному разрезу производилось подавление остаточного шума: подавление частично-кратных отражений и ликвидация многофазности методами пространственно-частотной деконволюции и пространственно-временной фильтрации.

Параметры рабочих процедур графа обработки выбирались по результатам тестирования. Подбор параметров обработки выполнялся по следующим критериям:

- подавление случайного шума на сейсмических записях;
- подавление регулярных волн-помех как технологического (шумы от источника, от буровой платформы), так и природного происхождения, обусловленное геологическим строением (кратные отраженные, дифрагированные, преломленные волны);
- повышение отношения сигнал / помеха для всего диапазона времени регистрации;
- повышение разрешенности записи, выравнивание динамического диапазона.

Результаты обработки. На финальных временных разрезах регистрации продольных отраженных волн (рис. 9 и 10) наблюдается устойчивая корреляция основных отражающих горизонтов до 3,5–3,7 с. Динамика амплитуд сохранена. Разрезы, построенные по данным гидрофонов и геофонов, характеризуются спектральным диапазоном полезных частот 32–42 Гц с граничными частотами в эффективном полезном спектре 8–40 Гц для гидрофона и 8–50 Гц для вертикального геофона. Верхняя часть разреза осложнена короткопериодными статическими аномалиями, осложняющими прохождение отраженных волн. Компонента гидрофона СДС «КРАБ-400» преимущественно отличается частотным составом в диапазоне частот 8–15 Гц, что позволяет выделить отдельные события на разрезе. Полоса частот 15–30 Гц для СДС «КРАБ-400», в отличие от ОВХ Geospace, имеет менее регулярный характер.

Поскольку рабочая часть эксперимента проходила в режиме тестирования предусиления станций СДС «КРАБ-400» для компоненты гидрофона, в записи присутствовало переполнение динамического диапазона амплитуд до 500–600 мс, что привело к снижению энергии спектра на частотах 40–50 Гц. Однако спектр полезного сигнала для станций обоих производителей имеет равные верхние и нижние частоты. Вертикальная компонента СДС «КРАБ-400» имеет эффективный спектр с частотами 40–50 Гц, что на 10–15 Гц превосходит спектр станций ОВХ. Это обеспечивает хорошую корреляцию высокоамплитудных отражений на временном интервале с начала регистрации до структурного свода в период времени, равный 1,9 с. Высокое разрешение сейсмической записи отмечается как во временном интервале разреза 0–500 мс, так и на интервале антиклинальной ловушки (2–2,4 с).

Данные по вертикальному геофону донных станций СДС «КРАБ-400» при сравнении финишных временных разрезов отличаются лучшей разрешающей способностью сигнала, связанного с большим частотным диапазоном особенно в низкочастотной области. Контроль расчетных углов наклона приемников СДС и ОВХ показал правильную работу инклинометров обеих станций, подтвердив наличие отклонений вертикального геофона не более 3 град. от оси, направленной

противоположно силе тяжести. На финальных временных разрезах, по данным обменных волн, зарегистрированным обеими системами (рис. 11), прослеживаются основные целевые горизонты. В интервале 2,5–4 с наблюдается понижение коэффициента «гамма» V_p/V_s (рис. 12) [13].

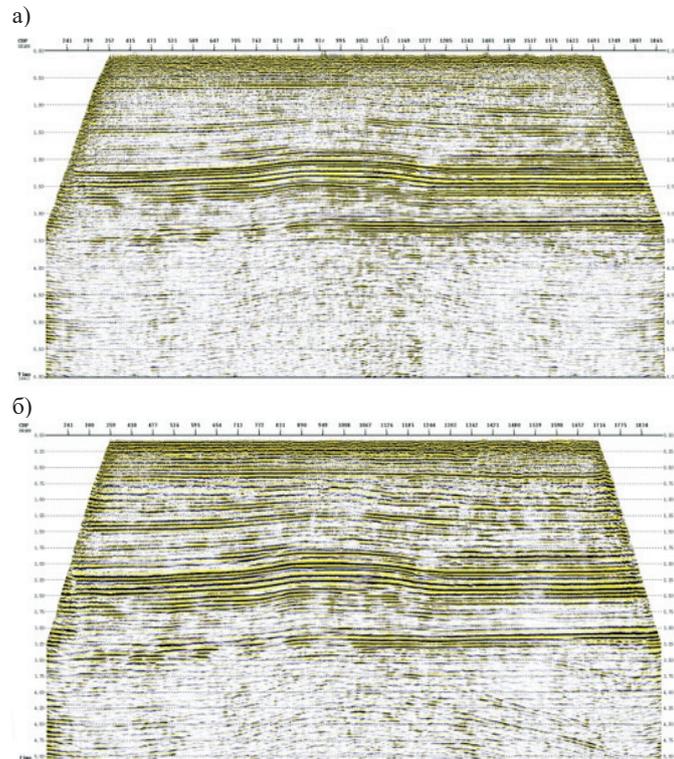


Рис. 9. Временной разрез. Миграция после суммирования по компоненте H :
 а — СДС «КРАБ-400»; б — ОВХ Geospace

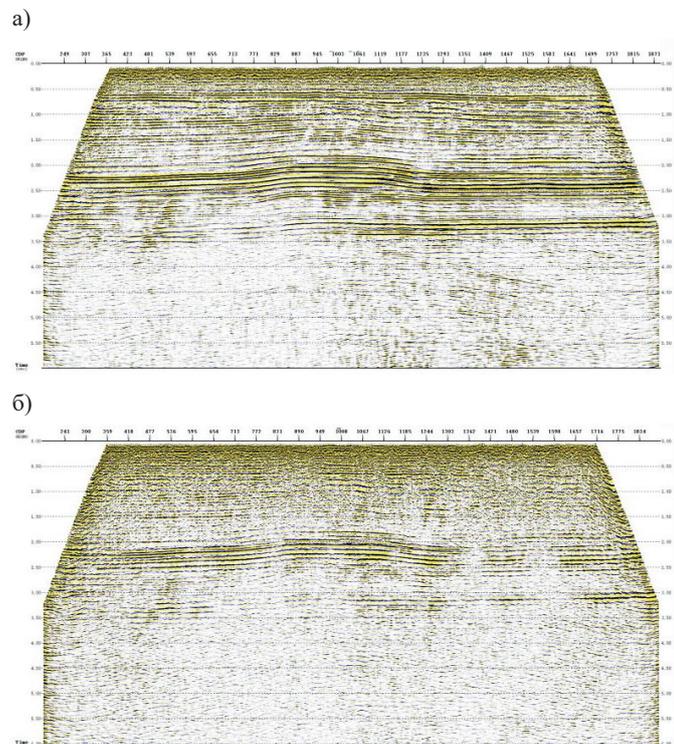


Рис. 10. Временной разрез. Миграция-после суммирования по компоненте Z :
 а — СДС «КРАБ-400»; б — ОВХ Geospace

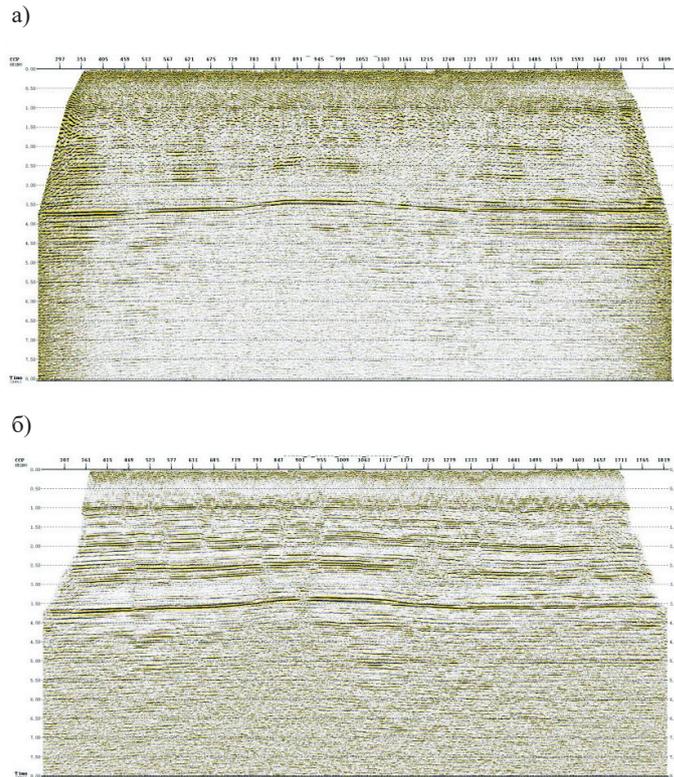


Рис. 11. Временной разрез обменных отраженных волн:
 а — СДС «КРАБ-400»; б — ОВХ Geospace

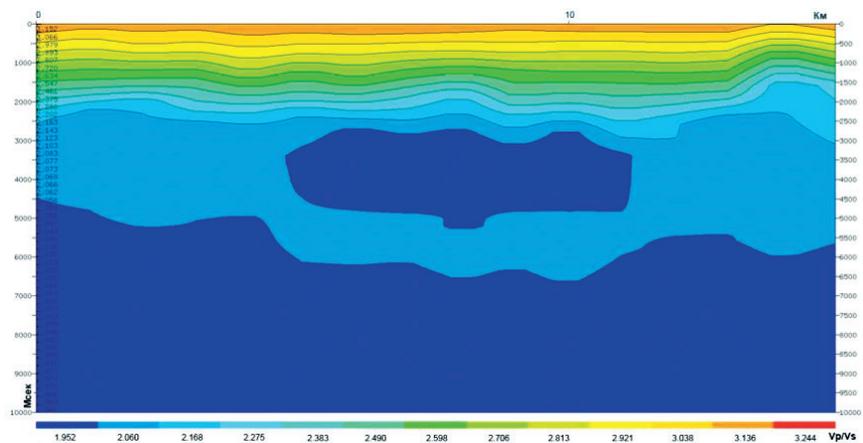


Рис. 12. Модельный разрез отношений V_p/V_s по профилю

Разрезы обменных волн имеют близкие амплитудно-частотные характеристики сигнала. Спектры на временных разрезах по обменным волнам ОВХ и СДС также имеют схожие характеристики. Доминантные частоты сигнала расположены на уровне 10–18 Гц, ширина спектра в среднем составляет 30 Гц. В верхней части разреза обменных волн СДС целевые горизонты прослеживаются фрагментарно. Станции ОВХ Geospace и станции СДС «КРАБ-400» перед началом обработки были ориентированы на источники, поэтому видимая на СДС разфокусировка энергии отражений не может быть связана с недокомпенсацией поляризации обменной волны. Для СДС в процессе морских работ были зафиксированы азимуты положения на дне. В ходе обработки углы поворота X , Y -компонент станций были вычислены, и истинные азимуты не отличались от данных компасов более чем на 5 град.

Выводы (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведенные совместные опытно-промышленные морские испытания систем сбора сейсмических данных СДС «КРАБ-400» и ОВХ Geospace, позволили сравнить качество сейсмических данных. Следует отметить, что морские испытания и последующая обработка данных показала широкий спектр задач, решение которых обеспечивает СДС «КРАБ-400». Однородность полученного материала по спектральному составу, а также идентичность приемников станций ОВХ и СДС позволяют судить о возможности совместного использования опытных станций и систем регистрации со схожими характеристиками в будущем.

2. Четырехкомпонентная регистрация донных станций СДС «КРАБ-400» позволяет не только решать стандартные структурные задачи сейсморазведки, но и получать высококачественные данные для определения коллекторских свойств резервуара, в полной мере применяя технологии многоволновой обработки сейсмических данных.

3. Существенным препятствием для внедрения системы «КРАБ-400» в практику производственных сейсмических работ в транзитных зонах является недостаточно проработанная технология производства и заводских лабораторных испытаний выпускаемой продукции. Объем брака станций достигает 20,5 %. Известно, что между этапом разработки оборудования и изготовления опытного образца и этапом внедрения его в промышленность происходит не менее важный этап создания технологического режима производства, который требует не меньших материальных затрат, чем этап разработки. Без этого высокотехнологическая продукция не будет работоспособной.

4. Разработанная система «КРАБ-400» показывает, что Россия обладает достаточным количеством квалифицированных кадров — ученых, инженеров и пользователей высокотехнологической продукции. Целесообразно направить этот потенциал на создание новой отечественной технологии, которая явилась бы не импортозамещением, а импортоопережением, поскольку для этого имеются все необходимые предпосылки [14]–[17].

Благодарности (Acknowledgements)

Авторы выражают благодарность ОАО «МАГЭ» за кооперацию при проведении опытно-промышленных испытаний системы «КРАБ-400» и особенно отмечают высококвалифицированную обработку сейсмического материала, выполненную ее сотрудниками А. В. Зимовским и И. А. Матвеевым.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема 0128–2021–0011).

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. 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.

3. Ampilov Y. P. Broadband marine seismic acquisition technologies: Challenges and opportunities / Y. P. Ampilov, M. L. Vladov, M. Y. Tokarev // Seismic Instruments. — 2019. — Vol. 55. — Is. 4. — Pp. 388–403. DOI: 10.3103/S0747923919040030.

4. 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.

5. Barry K. M. Recommended standards for digital tape formats / K. M. Barry, D. A. Cavers, C. W. Kneale // *Geophysics*.— 1975.— Vol. 40.— Is. 2.— Pp. 344–352. DOI: 10.1190/1.1440530.
6. SEG-Y_r2.0: SEG-Y revision 2.0 Data Exchange format / R. Hagelund, S. A. Levin (eds.). Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2017.— 147 p.
7. Ma S. Research on acoustic positioning system in the process of AUV recovery / S. Ma, G. Liu, D. Yang, Y. Wang // *The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*.— IEEE, 2012.— Pp. 447–451.
8. Фалин Г. И. О гистограмме и её свойствах / Г. И. Фалин, А. И. Фалин // *Математика в школе*.— 2021.— № 2.— С. 38–55.
9. Горбачев С. В. О применении моделирования волновых полей для проектирования многоволновых сейсмических работ и подбора параметров графа обработки / С. В. Горбачев, Е. И. Петров, А. А. Тихонов // *Технологии сейсморазведки*.— 2007.— № 1.
10. Коротков И. П. Особенности обработки данных многоволновой сейсморазведки / И. П. Коротков, В. М. Кузнецов, Г. А. Шехтман, А. В. Череповский // *Технологии сейсморазведки*.— 2014.— № 2.— С. 51–69.
11. Aleshkin M. V. Analysis of Optimization 2D3C Observation Systems of Multicomponent Seismic Data / M. V. Aleshkin, N. A. Stepanov, G. A. Kazanin, V. V. Lantsev, S. O. Bazilevich, A. P. Zhukov, I. P. Korotkov // *Marine Technologies* 2019.— European Association of Geoscientists & Engineers, 2019.— Vol. 2019.— Is. 1.— Pp. 1–6. DOI: 10.3997/2214-4609.201901801.
12. Сысоев А. П. Параметрический способ учета неоднородности верхней части разреза при обработке данных могот / А. П. Сысоев, Г. Д. Горелик // *Геология и геофизика*.— 2017.— Т. 58.— № 6.— С. 948–954.
13. Granli J. R. Imaging through gas-filled sediments using marine shear-wave data / J. R. Granli, B. Arntsen, A. Sollid, E. Hilde // *Geophysics*.— 1999.— Vol. 64.— Is. 3.— Pp. 668–677. DOI: 10.1190/1.1444576.
14. Ильинский Д. А. О создании цифровых донных сейсмических станций нового поколения: настоящее и взгляд в будущее / Д. А. Ильинский, А. А. Гинзбург, В. В. Воронин, О. Ю. Ганжа, А. Б. Манукин, К. А. Рогинский // *Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геокриология*.— 2019.— № 2.— С. 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.
15. Ilinskiy D. Ocean Bottom Seismometers technology: current state and future outlook / D. Ilinskiy, O. Ganzha // *EGU General Assembly Conference Abstracts*.— 2016.— Pp. EPSC2016–8500.
16. Ilinskiy D. A. Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation / D. A. Ilinskiy, O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, K. A. Roginskiy // *Marine Technologies* 2019.— European Association of Geoscientists & Engineers, 2019.— Vol. 2019.— Pp. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.
17. Ильинский Д. А. Геофизические технологии для изучения процессов образования глубинной нефти / Д. А. Ильинский, К. А. Рогинский, О. Ю. Ганжа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*.— 2018.— Т. 10.— № 5.— С. 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

REFERENCES

1. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. “Seismic survey in the transit zone. Fullscale 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. 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.
3. Ampilov, Yu P., M. L. Vladov, and M. Yu Tokarev. “Broadband marine seismic acquisition technologies: Challenges and opportunities.” *Seismic Instruments* 55.4 (2019): 388–403. DOI: 10.3103/S0747923919040030.
4. 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.
5. Barry, K. M., D. A. Cavers, and C. W. Kneale. “Recommended standards for digital tape formats.” *Geophysics* 40.2 (1975): 344–352. DOI: 10.1190/1.1440530.
6. Hagelund, Rune, and Stewart A. Levin, eds. *SEG-Y_r2.0: SEG-Y revision 2.0 Data Exchange format*. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2017.
7. Ma, Shiguo, Guangliang Liu, Dong Yang, and Yali Wang. “Research on acoustic positioning system in the process of AUV recovery.” *The 2012 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*. IEEE, 2012. 447–451.

8. Falin, G. I., and A. I. Falin. "About the histogram and its properties." *Matematika v shkole* 2 (2021): 38–55.
9. Gorbachev, S. V., E. I. Petrov, and A. A. Tikhonov. "O primeneniі modelirovaniya volnovykh polei dlya proektirovaniya mnogovolnovykh seismicheskikh rabot i podbora parametrov grafa obrabotki." *Tekhnologii seismorazvedki* 1 (2007).
10. Korotkov, I. P., V. M. Kuznetsov, G. A. Shekhtman, and A. V. Cherepovski. "The features of multi-component data processing." *Tekhnologii seismorazvedki* 2 (2014): 51–69.
11. Aleshkin, M. V., N. A. Stepanov, G. A. Kazanin, V. V. Lantsev, S. O. Bazilevich, A. P. Zhukov, and I. P. Korotkov. "Analysis of Optimization 2D3C Observation Systems of Multicomponent Seismic Data." *Marine Technologies 2019*. Vol. 2019. No. 1. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. DOI: 10.3997/2214-4609.201901801.
12. Sysoev, A. P., and G. D. Gorelik. "Parametricheskii sposob ucheta neodnorodnosti verkhnei chasti razreza pri obrabotke dannykh mogt." *Geologiya i geofizika* 58.6 (2017): 948–954.
13. Granli, John R., Børge Arntsen, Anders Sollid, and Eilert Hilde. "Imaging through gas-filled sediments using marine shear-wave data." *Geophysics* 64.3 (1999): 668–677. DOI: 10.1190/1.1444576.
14. Il'inskiy, D. A., A. A. Ginzburg, V. V. Voronin, O. Yu. Ganzha, A. B. Manukin, and K. A. Roginskiy. "Towards a design of new generation digital seismic seabed seismographs — current state and future outlook." *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* 2 (2019): 87–101. DOI: 10.31857/S0869-78092019287-101.
15. Ilinskiy, Dmitry, and Oleg Ganzha. "Ocean Bottom Seismometers technology: current state and future outlook." *EGU General Assembly Conference Abstracts*. 2016.
16. Ilinskiy, D. A., O. Y. Ganzha, A. I. Elnikov, and K. A. Roginskiy. "Self-Popup Node Surveying Features and Application to Arctic Shelf Investigation." *Marine Technologies 2019*. Vol. 2019. European Association of Geoscientists & Engineers, 2019. 1–10. DOI: 10.3997/2214-4609.201901820.
17. Ilinskiy, Dmitry A., Konstantin A. Roginskiy, and Oleg Y. Ganzha. "Geophysical technologies for study of deep oil genesis." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.5 (2018): 936–950. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-936-950.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

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, д. 36
e-mail: roginskiy@list.ru

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, д. 36
e-mail: dilinskiy61@mail.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, д. 36
e-mail: ganzhaoy@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Ilinskiy, 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

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

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2021 г.
Received: September 21, 2021.