

## РАЗРАБОТКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДНА ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

В. И. Каевицер, А. П. Кривцов, В. М. Разманов, И. В. Смольянинов,  
А. В. Элбакидзе, Е. Ю. Денисов

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский  
филиал

Статья поступила в редакцию 25 октября 2016 г.

**Аннотация.** Приведены результаты испытаний и практического применения малогабаритных многофункциональных гидролокационных комплексов с ЛЧМ зондирующими сигналами, разработанных в ФИРЭ им. В.А. Котельникова. Многоканальная цифровая гидролокационная система включает интерферометрический гидролокатор бокового обзора, промерный высокочастотный эхолот и низкочастотный профилограф с единым управляющим контроллером и программой регистрации, обеспечивающими синхронную регистрацию, как сигнальных, так и навигационных данных. Многофункциональные гидролокационные комплексы испытаны в двух вариантах, отличающихся диапазоном частот интерферометрических гидролокаторов бокового обзора - 250 кГц и 70 кГц.

**Ключевые слова:** интерферометрический гидролокатор бокового обзора, линейная частотная модуляция, дистанционное зондирование, эхолот, профилограф.

**Abstract.** The article describes the results of testing and practical application of small-sized multifunction sonar system with a chirp sounding signals developed in the Kotel'nikov Institute of Radio-engineering and Electronics of Russian Academy of Sciences, Fryazino branch. Multi-channel digital sonar system includes an interferometric side-scan sonar, high-frequency echo sounder and low-frequency profiler with common controller and registration program, providing simultaneous registration, both the signal and navigation data. Multifunction hydroacoustic systems

were tested in two variants, differing in the frequency range of interferometric side-scan sonar - 250 kHz and 70 kHz.

**Key words:** interferometric side-scan sonar, linear frequency modulation, remote sounding, echo sounder, profiler.

## Введение

При проведении изыскательских работ в шельфовой зоне Арктических морей, в том числе под прокладку волоконного оптического кабеля, требуются данные о рельефе дна, структуре донных отложений и объектов, которые могут помешать прокладке и сохранности кабеля связи. Для Арктических морей эти исследования связаны с дополнительными сложностями, связанными с проявлениями ледовых донных экзараций и необходимостью проводить часть работ в ледовых условиях [1,2]. Технология изыскательских работ под прокладку волоконного оптического кабеля в ледовых условиях была опробована при выполнении проекта «Поларнет» и оказалась очень затратной, в связи с необходимостью привлечения ледокольных судов и создания надежной защиты акустических датчиков. Успешное проведение исследований по этому проекту было во многом обеспечено гидроакустическими средствами дистанционного зондирования дна, разработанными в ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН [3]. Проявления глобального потепления в Арктике в последние годы привело к существенному улучшению ледовой обстановки и возможности проведения гидрографических работ с существенно меньшими затратами. Потребовалось создание отечественных гидролокационных систем для оборудования исследовательских судов. К таким системам можно отнести автономный мобильный многофункциональный комплекс «Корвет-ММК», но он предназначен для решения узкоспециализированных задач [4,5], и гидролокационный комплекс трех координатного картирования дна [6].

С учетом имеющегося опыта и прогресса вычислительных средств [5-11], в ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН были разработаны и испытаны многофункциональные гидролокационные комплексы с линейной частотной

модуляцией (ЛЧМ) зондирующих сигналов и цифровой когерентной обработкой эхо-сигналов, обеспечивающие более высокий энергетический потенциал и помехозащищенность систем дистанционного зондирования морского дна [4-7]. Многофункциональный гидролокационный комплекс с интерферометрическим гидролокатором бокового обзора (ИГБО) диапазона частот 70 кГц разработан для проведения изысканий в шельфовой зоне, в том числе Арктических морей на глубинах от 10 до 1000 м, а диапазона 250 кГц – на глубинах 0-100 м.

При проведении работ с использованием маломерных судов важным элементом является компактность и высокая интеграция систем измерительного комплекса и минимальное число обслуживающего персонала. Опыт создания и практического использования гидролокационных систем дистанционного зондирования морского дна - ИГБО, эхолотов, профилографов [7-13] показал, что возникает проблема электрической и акустической совместимости составных частей комплекса, связанная с длительными зондирующими посылками и их высокой энергетикой. В разработанных многофункциональных гидролокационных комплексах, совмещающих в себе интерферометрический гидролокатор бокового обзора, промерный высокочастотный эхолот и низкочастотный профилограф проблема решается синхронизацией излучения и приема всех приборов единым управляющим контроллером и одной регистрирующей вычислительной машиной.

### **Описание аппаратуры**

Два многофункциональных гидролокационных комплекса работают по одному принципу и отличаются только рабочей частотой ИГБО. Для совместимости всех устройств, входящих в комплекс, обеспечивается одновременность излучения зондирующих ЛЧМ импульсов, что снижает влияние приборов друг на друга. Опыт практического использования гидролокационного комплекса на основе синтезатора ЛЧМ сигнала с использованием встроенных в микропроцессоры таймеров и микросхемы

флеш-памяти для хранения формы сигнала [14], показал неустойчивость работы такой системы. Для устранения этого недостатка был разработан новый синтезатор на ПЛИС, состоящий из интерфейса I2C, памяти параметров, таймеров для формирования времени излучения, регистрации и паузы, формирователя частоты гетеродина, сигналов управления АЦП и формирователя ЛЧМ сигнала. Синтезатор подключен к соответствующему интерфейсу микропроцессора I2C. Особенность синтезатора в том, что по окончании интервала оцифровки производится сброс счетчиков таймеров дискретизации и гетеродинов, что обеспечивает когерентность их фазы на последовательных интервалах измерений. Связь микропроцессора и регистрирующей ЭВМ осуществляется по интерфейсу Ethernet или RS485 [15]. Таким образом, от микропроцессора требуется только интерфейс I2C и SPI(PCM, I2S) [12], имеющийся у большинства микропроцессоров и готовых мини-модулей зарубежного и отечественного производства. Это снижает зависимость разработок от времени жизни тех или иных покупных комплектующих.

Разработанное программное обеспечение комплекса позволяет контролировать качество съемки всех устройств на экране ПЭВМ в реальном времени, производить архивирование информации для дальнейшей камеральной обработки.

### **Испытания многофункциональных гидролокационных комплексов**

Гидролокационный комплекс, разработанный на основе синтезатора ЛЧМ посылок и тактовых сигналов и состоящий из ИГБО, с рабочей частотой 240 кГц, профилографа, с диапазоном частот 4.5 – 9 кГц, эхолота с рабочей частотой 200 кГц, был проверен при обследовании участка дна с подводными продуктопроводами в Финском заливе Балтийского моря. Блок схема аппаратуры комплекса с внешними датчиками навигационной информации приведена на рисунке 1.



Рисунок 1. Блок-схема многофункционального гидролокационного комплекса.

На рисунке 1 внешние навигационные датчики и ЭВМ вынесены за штриховую линию. В качестве навигационных датчиков использовались:

1. Приемник спутниковой навигации C-NAV3050 [16].
2. Датчик крена, дифферента, вертикальных перемещений и курса Octans-IV [17].
3. Измеритель скорости звука SVP-C.

Рассмотрим некоторые результаты испытаний разработанного многофункционального комплекса и программного обеспечения реального времени с ИГБО диапазона 250 кГц, установленного на гидрографическом катере «Кузьмич» На рисунке 2 приведено акустическое изображение и интерферограмма, полученные при съемке дна в районе подводных трубопроводов Финском заливе. Акустические изображения правого и левого борта отличаются по яркости, что связано с программными установками при отображении, а не уровнями эхосигналов.

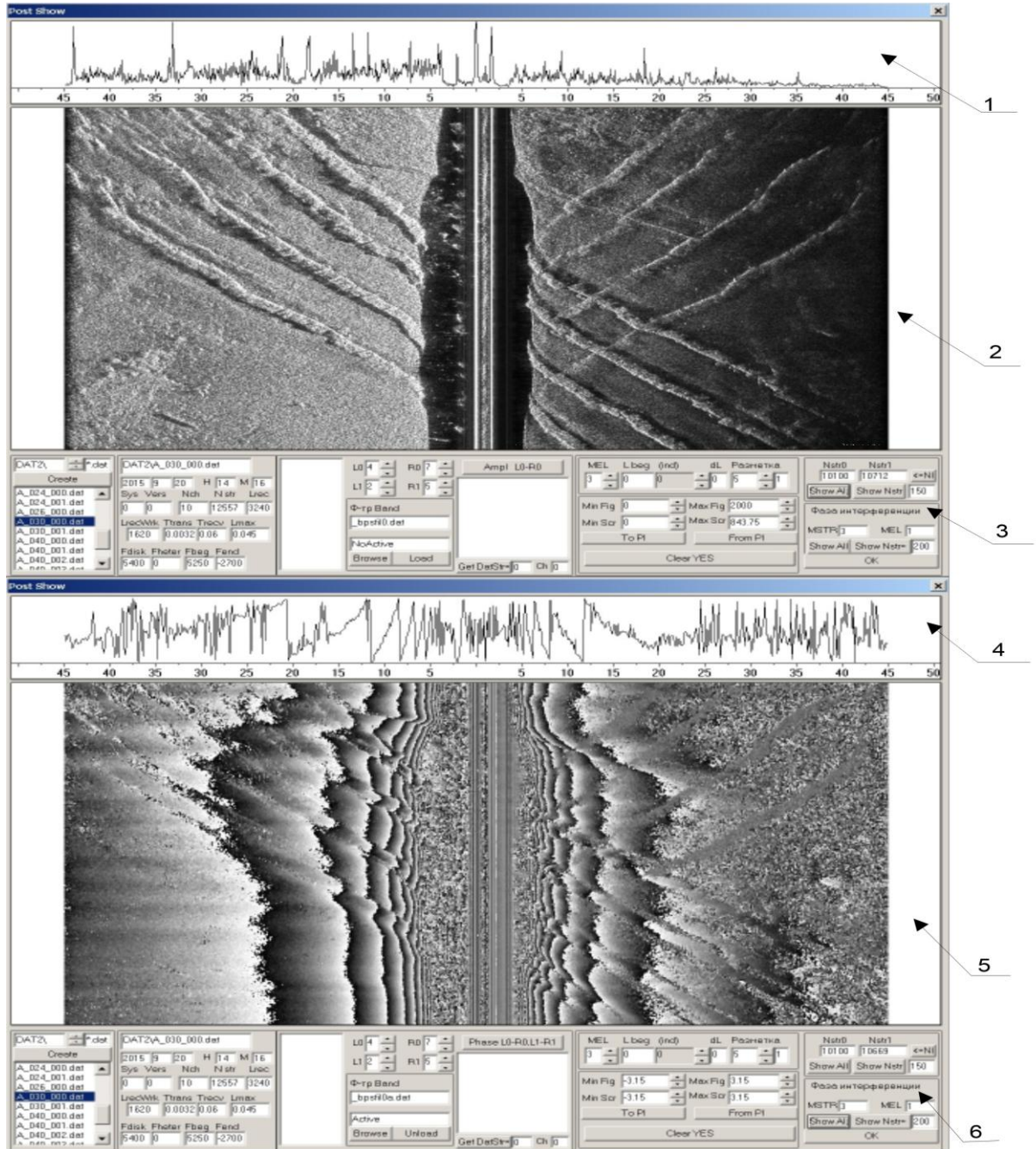


Рисунок 2. Блок просмотра данных интерферометрического ГБО. 1- амплитуда эхосигнала в функции дальности в текущей строке изображения, 2 – гидролокационное изображение дна, 3 – формуляр режима бокового обзора, 4 - график разности фаз эхосигналов в каналах интерферометра в текущей строке, 5 – изображение разности фаз эхосигналов в каналах интерферометра, 6 – формуляр режима интерферометра.

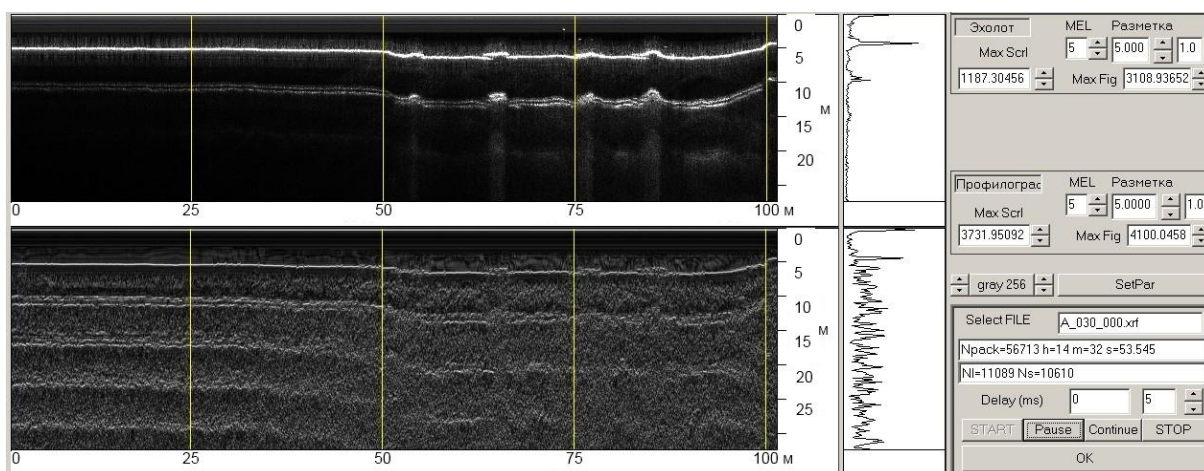


Рисунок 3. Блок просмотра данных промерного эхолота (сверху) и профилографа (снизу).

Отметим, что высокая энергетика комплекса приводит к тому, что особенно на малых глубинах эхосигналы одного борта принимаются и антеннами другого борта по боковым и тыльным лепесткам диаграммы направленности. На акустическом изображении это проявилось наложением обоих изображений. Данный эффект естественно снижает и качество интерферометрических данных, что приводит к ошибкам вычислений. Методы устранения этого эффекта известны и заключаются в экранировании антенн от тыльного излучения и разнесении частотных диапазонов ИГБО правого и левого борта.

Рисунок 3 отображает данные измерений глубин на том же участке, полученные промерным эхолотом и профилографом. Отметим, что на профилограмме под линией дна можно выделить объекты в форме парабол с вершинами, заглубленными на 3-4 м. Это могут быть отражения от трубопроводов, «размытые» широкой диаграммой направленности антенны профилографа. Такие изображения показывают возможности комплекса для выделения заиленных объектов.

Гидролокационный комплекс, состоящий из ИГБО, с рабочей частотой 70 кГц, с диапазоном частот 4.5 – 9 кГц, эхолота, с рабочей частотой 200 кГц, был проверен при инженерных изысканиях в Баренцевом море под прокладку волоконного оптического кабеля при глубинах от 10 до 300 метров. Блок схема

аппаратуры комплекса аналогична блок схеме приведенной на рисунке 1. Многофункциональный гидролокационный комплекс был установлен на борту научно исследовательского судна «Петроградский». Измерения проводились в июне 2016 года. Для проведения исследований было разработано программное обеспечение для камеральной обработки архивированной информации с целью получения площадной картографической информации в полосе съемки и построения цифровых карт глубин, акустических изображений и структуры донных отложений, необходимых при проектировании ВОЛС.

На рисунке 4 показаны примеры камеральной обработки данных полученных с помощью многофункционального гидролокационного комплекса в Баренцевом море.

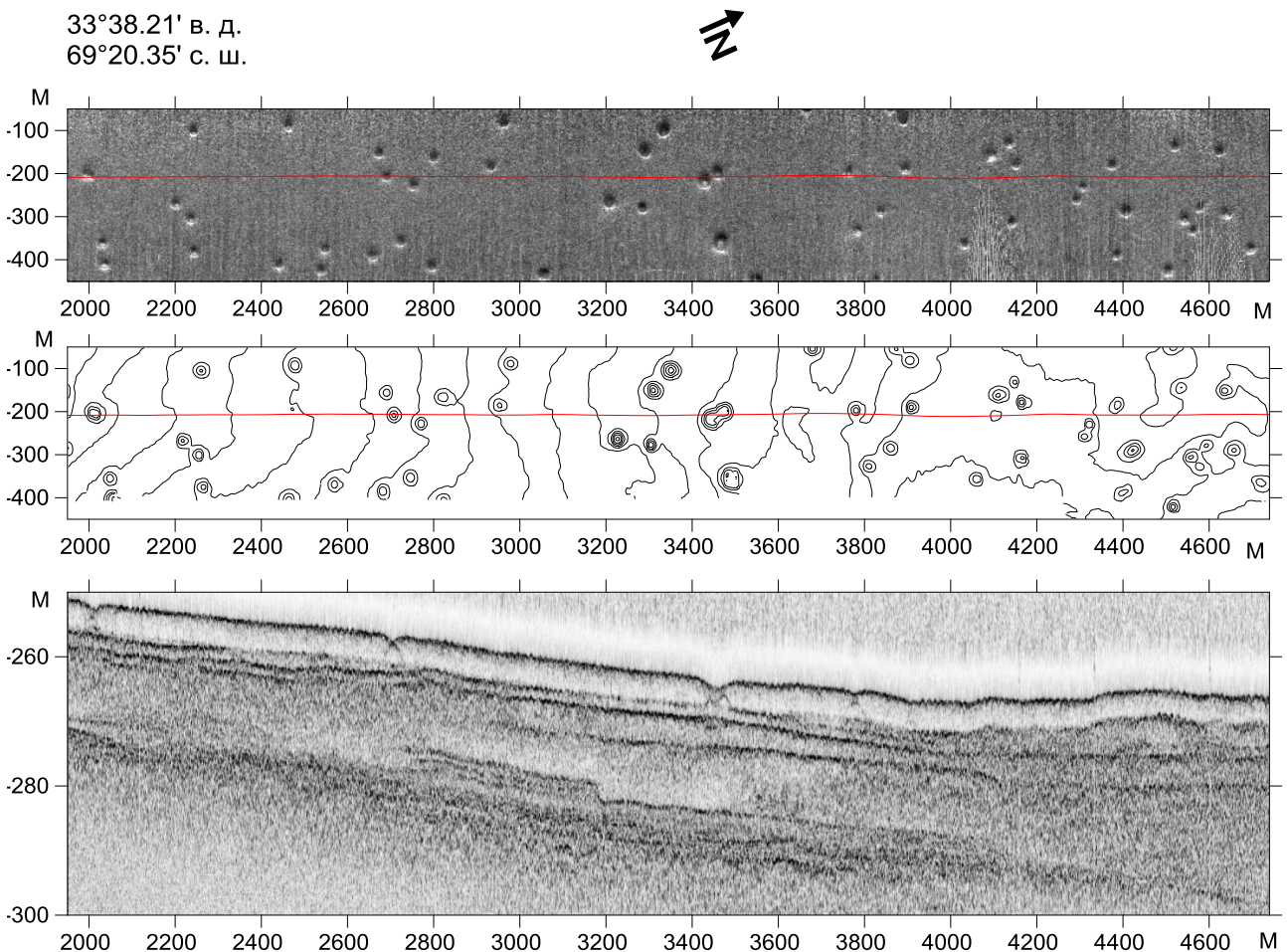


Рисунок 4. Результаты камеральной обработки данных полученных с помощью многофункционального гидролокационного комплекса.



Рисунок 4 представляет собой фрагмент участка исследуемого морского дна, представленный в относительной системе координат. На рисунке 4, в верхней части приведено гидролокационное изображение поверхности морского дна, в средней части рельеф этого участка морского дна, построенный по данным ИГБО, с использованием программы вычисления глубин [18], в нижней части приведен профиль донных отложений для участка морского дна, полученный по данным профилирования. На профиле донных отложений по оси ординат отложена глубина. В правом верхнем углу рисунка 4 приведены географические координаты левого верхнего угла карт гидролокационного изображения и рельефа морского дна. На картах гидролокационного изображения и рельефа морского дна красной линией нанесена траектория движения судна, которая соответствует проекции на дно линии профилирования.

На участке морского дна, приведенного на рисунке 4, преобладает мягкий грунт со слабым коэффициентом отражения и относительно малыми изменениями рельефа. На рисунке 5 приведены результаты обработки данных полученных для участка морского дна с сильным изменением рельефа дна и выходом на поверхность твердых грунтов.

Структура рисунка 5 аналогична рисунку 4.

## **Выводы**

Полученные результаты исследований показали перспективность применения разработанного комплекса и программного обеспечения для решения широкого круга научных и технологических задач по изучению структуры морского дна в шельфовой зоне морей, в том числе и Арктических.

Авторы благодарят руководство ООО «Северо-западное гидрографическое предприятие», г. Санкт-Петербург, за предоставленные для проведения испытаний исследовательские суда и навигационное оборудование.

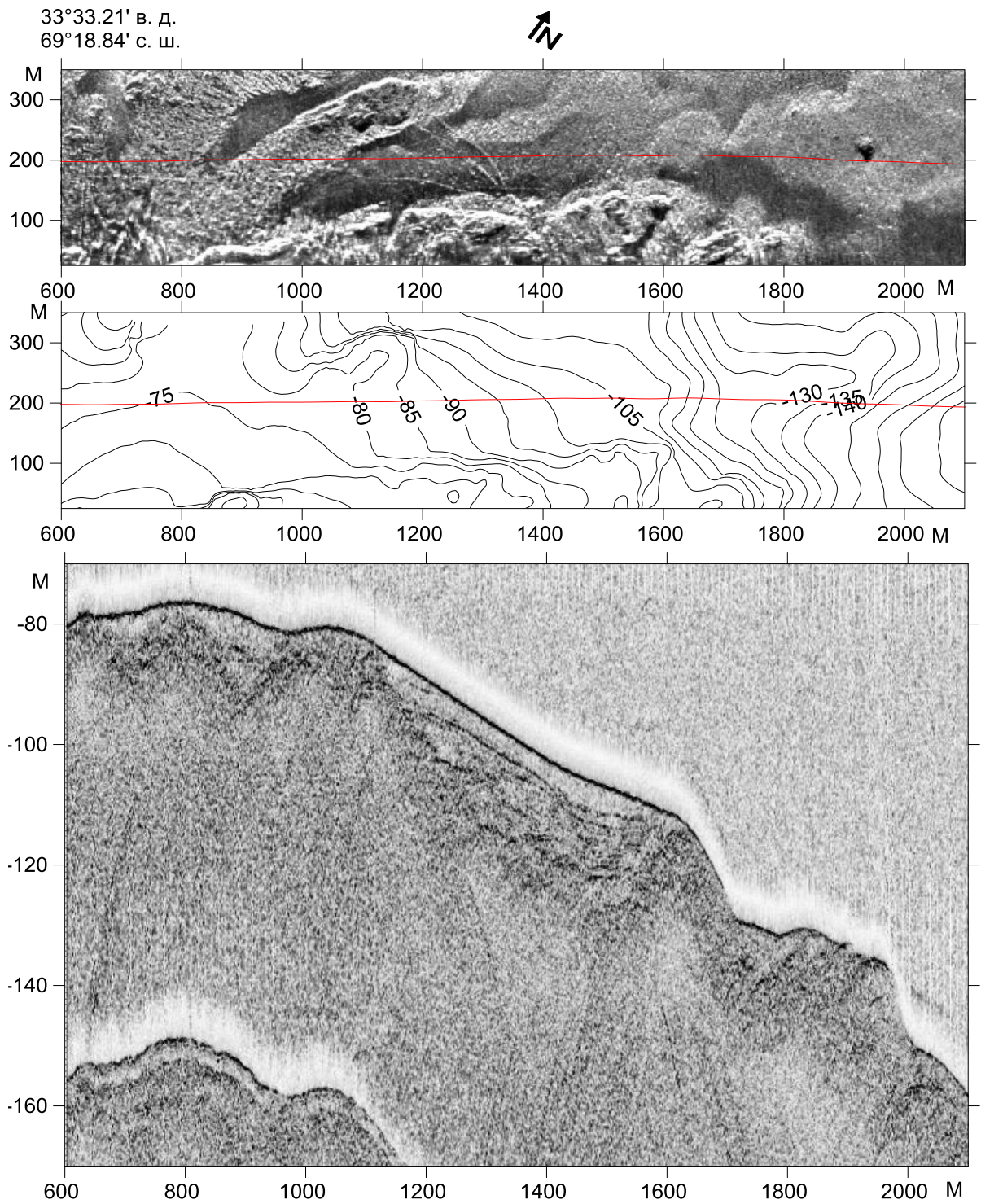


Рисунок 5. Результаты обработки данных полученных с помощью многофункционального гидролокационного комплекса для участка морского дна с сильным изменением рельефа дна

## Литература

1. Каевицер В.И., Малов О.В., Раскатов В.Н. Опыт проектирования и изысканий в Арктике // Вестник связи, - 2009, - №10 – С. 79-80.
2. Каевицер В.И., Малов О.В., Раскатов В.Н. Опыт проектирования и изысканий в Арктике // Вестник связи, - 2009, - №11 – С. 45-50.
3. Каевицер В.И., Разманов В.М. Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами // УФН, - 2009, - Т. 179, № 2 – С. 218-224.
4. Ананов О.А., Войтов А.А. Мобильный многофункциональный комплекс «Корвет-ММК» // В сборнике труды XI Всероссийской конференции ГА-2012, - Санкт-Петербург, «Наука», - 2012, - С. 181 – 182.
5. Ананов О.А., Войтов А.А. Прецизионный мониторинг акваторий с использованием многоцелевого мобильного комплекса обследования донной обстановки // В сборнике труды XII Всероссийской конференции ГА-2014, - Санкт-Петербург, «Нестор-История», - 2014, - С. 11 – 15.
6. Каевицер В.И., Римский-Корсаков Н.А., Смольянинов И.В., Разманов В.М., Кривцов А.П. Возможные проявления подводных грязевых вулканов по результатам гидролокационных исследований в акватории Таманского полуострова // Океанология, - 2016, Т. 56, №5, - С. 784-790.
7. Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А. Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // Радиотехника, - 2008, - № 8, - С. 35-42.
8. Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Акустические исследования морского дна с использованием сигналов с линейной частотной модуляцией // Известия ЮФУ, – 2013, - № 9, – С. 81-85.
9. Долотов С.А., Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В. Применение интерферометрического ГБО с ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ, – 2004, - №5, – С. 268-273.
10. Долотов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Саворский А.В. Применение низкочастотного эхолота-профилографа с

- многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ, – 2004, - №5, – С. 273-279.
11. Каевицер В.И., Разманов В. М., Элбакидзе А. В., Смольянинов И. В. Некоторые результаты исследования характеристик акустических сигналов низкочастотного ЛЧМ профилографа // Известия ЮФУ, – 2009, - №6, – С. 115–123.
12. Долотов С.А., Каевицер В.И., Смольянинов И.В. Точность определения угла прихода эхосигналов гидролокационным комплексом бокового обзора // Навигация и гидрография, – 1996, - №3, – С. 100-103.
13. Долотов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М. Об одной особенности съемки рельефа дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Акустический журнал, – 1996, - Т. 43, № 4.
14. Разманов В.М., Долотов С.А., Смольянинов И.В. Анализ деталей рельефа дна фазовым ГБО АГКПС-200 // Геология морей и океанов: XIII Международная школа морской геологии, Тезисы докладов, – Москва, 1999, – Т2.
15. Денисов Е.Ю., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Гидролокационные системы с когерентным формированием ЛЧМ зондирующих импульсов и регистрацией эхо сигналов // Труды XI Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики», - Санкт-Петербург, - 2014, - С. 356-358.
16. C-Nav [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.cnavgNSS.com/cnav3050> (дата обращения 20.10.2016).
17. iXblue [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.ixblue.com/products/octans> (дата обращения 20.10.2016).
18. Кривцов А.П. «Программа вычисления глубин и построения рельефа дна для интерферометрического гидролокатора бокового обзора». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015610922.