
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 681.883:534.2

© А. П. Волощенко, П. П. Пивнев, 2024

**ОСОБЕННОСТИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОФИЛОГРАФА
В ПОДВОДНОЙ АРХЕОЛОГИИ**

В статье обсуждаются вопросы применения гидроакустической аппаратуры для решения задач подводной археологии. В частности, рассмотрены задачи дистанционного обнаружения и идентификации объектов культурного наследия, скрытых осадочными породами. Обозначенные задачи решаются посредством параметрического профилографа. Изложены основные принципы работы акустического профилографа. Приведены различия линейного и параметрического профилографов. Объяснены принципы и особенности работы параметрического профилографа. Обсуждаются результаты гидроакустического профилирования места раскопок затопленной хазарской крепости Саркел. Изложены методики и условия проведения исследования. Приведены параметры используемой аппаратуры. Представлены полученные профилограммы. Проведены анализ и интерпретация результатов профилирования. Выполнено сопоставление характерных особенностей рельефа дна и объектов культурного наследия, обнаруженных в процессе гидроакустического обследования, и данных археологических раскопок. В результате был найден район, полностью соответствующий описанию места раскопок. Соответствие подтверждалось как наличием характерных особенностей рельефа, так и следами раскопок. Также были обнаружены и идентифицированы рвы, окружавшие крепость, и остатки кирпичных строений. Рвы были полностью засыпаны смесью песка и ила, поэтому их обнаружение стало возможно только при помощи параметрического профилографа.

Кл. сл.: параметрический профилограф, профилограмма, речные отложения, структура дна, подводная археология, Саркел

ВВЕДЕНИЕ

Основными гидроакустическими инструментами для поиска объектов культурного наследия в подводной археологии являются эхолот, гидролокатор бокового обзора и многолучевой эхолот. С их помощью возможно не только обнаружить археологические памятники и получить их акустическое изображение, но и создать трехмерную карту области поиска. Более того, совместное использование гидроакустических приборов и спутниковых систем навигации позволяет получать трехмерные карты, каждая точка которых обладает географическими координатами [1–3]. В то же время в подводной археологии не редки случаи, когда археологические памятники частично или полностью скрыты осадочными породами. Тогда применение упомянутых выше линейных систем зондирования дна становится неэффективным. Возникшую проблему можно решить, если во время археологической разведки вместе с линейными системами дистанционного зондирования дна использовать акустический профилограф [1–12].

**АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ
ИССЛЕДОВАНИЯ****Теоретическое обоснование
примененной аппаратуры**

Принцип работы профилографа во многом аналогичен принципу работы эхолота. Антенна профилографа излучает акустический импульс вертикально вниз в сторону дна и принимает отраженный обратно сигнал. Отличие заключается в том, что у эхолота отраженный сигнал содержит информацию только о рельефе дна. У профилографа отраженный сигнал содержит информацию как о рельефе дна, так и структуре грунта под дном. От отношения акустических сопротивлений соприкасающихся сред зависит, какая часть энергии поглотится, а какая вернется к антенне. Глубина проникновения акустического сигнала в донный грунт определяется как свойствами самого сигнала, так и геологическими характеристиками грунта. В крупнозернистые отложения (пески и гравий) сигнал труднее проникает, чем в мелкозернистые отложения (илы и глины). Форма объектов,

уклон дна и поддонных слоев тоже влияют на отражающую способность [1–6].

Сравнивать параметры профилографов и линейных систем зондирования дна не совсем корректно, т.к. эти приборы решают разные задачи. Но все же по разрешающей способности линейные профилографы значительно уступают многим гидроакустическим системам, применяемым в подводной археологии. Некоторые авторы даже ставят под сомнение целесообразность применения профилографов для поиска объектов культурного наследия [1]. Низкая разрешающая способность обусловлена физическими свойствами используемых частот. Высокие частоты дают лучшее разрешение, но могут проникать в дно лишь на небольшое расстояние, и наоборот, низкие частоты проникают глубже, но дают худшее разрешение. Еще один фактор, зависящий от частоты, — это размер антенны линейного профилографа. Чем ниже частота, тем больше антенна. Это обстоятельство существенно осложняет применение линейных профилографов на маломерных судах на мелководье. Использование параметрических профилографов позволяет уменьшить влияние описанных выше проблем.

Различия линейного и параметрического профилографов состоят в следующем. Линейные профилографы в основном работают на одном или двух дискретных сигналах низкой частоты. Эти сигналы излучает антенна профилографа, и именно их свойства определяют разрешающую способность прибора. У параметрического профилографа антенна излучает не менее двух сигналов высокой частоты (сигналы накачки). Далее в воде происходит нелинейное взаимодействие сигналов накачки. В результате чего в среде формируется разностный сигнал низкой частоты. Именно от его свойств зависит глубина проникновения акустической волны в поддонный грунт и разрешающая способность прибора. Такой способ получения зондирующего импульса позволяет формировать сложные широкополосные сигналы. Более того, у акустического поля сигнала разностной частоты отсутствуют боковые лепестки. А ширина главного лепестка на всех разностных частотах равна ширине главного лепестка частот накачки. Эти факторы в совокупности с обработкой принятого сложного отраженного сигнала делают возможным сохранить приемлемую разрешающую способность профилографа. Также антенна параметрического профилографа излучает только высокочастотный сигнал, поэтому не требуется делать размер ее активной поверхности большим [13, 14].

Объект исследования и методика

В сентябре 2022 г. исследовательская группа, состоящая из преподавателей и студентов ФГАОУ

ВО "Южный федеральный университет", а также сотрудников ООО "НЕЛАКС", по заказу АНО "Подводное Археологическое Общество" провела археологическую разведку места раскопок Левобережного Цимлянского городища (Саркел – Белая Вежа). Для разведки применялись гидролокатор бокового обзора и параметрический профилограф. В ходе работ было проведено исследование части акватории Цимлянского водохранилища в районе г. Цимлянск Ростовской области. Цель экспедиции состояла в изучении характера дна водохранилища, получении батиметрических данных, составлении гидроакустической мозаики дна, выявлении объектов естественного и искусственного происхождения, расположенных как на поверхности дна, так и под ним [15, 16].

Крепость Саркел на Нижнем Дону была важнейшим компонентом инфраструктуры Хазарского каганата. Она была построена хазарами при помощи византийских инженеров в 830-х гг. Основной вклад в исследование Саркела внес М.И. Артамонов. Именно он на основании археологических раскопок в 1934–1936, 1949–1951 гг. локализовал крепость Саркел на месте Левобережного Цимлянского городища. Во время экспедиций М.И. Артамонова была раскопана большая часть крепости и получено колоссальное количество предметов культурного наследия прошлого. В дальнейшем место раскопок было затоплено во время строительства Цимлянского водохранилища [17–20].

К сожалению, у археологического памятника не были определены точные географические координаты. Поэтому после затопления крепость Саркел оказалась снова "потерянной". И все же сохранились схематичный план крепости (рис. 1), текстовые описания и фотографии, содержащие характерные особенности района раскопок [15, 17–20]. С момента затопления прошло относительно мало времени, поэтому эти особенности должны хорошо сохраниться. Этот факт существенно упрощает поиск места раскопок и идентификацию археологического памятника.

Для поиска объектов, расположенных под дном, использовался отечественный параметрический профилограф производства предприятия ООО "НЕЛАКС". Профилограф с рабочими частотами от 7 до 21 кГц позволяет осуществить обследование толщи морского грунта на глубину до 30 м с разрешающей способностью по слоям до 10 см. Аппаратура размещалась на маломерном судне (тримаран). Антенна профилографа крепилась на штангу по левому борту на глубину 1 м и ориентировалась параллельно дну. Навигация и последующая привязка обнаруженных объектов к координатам осуществлялись с помощью двух GPS-антенн, расположенных на штангах по обоим бортам судна.

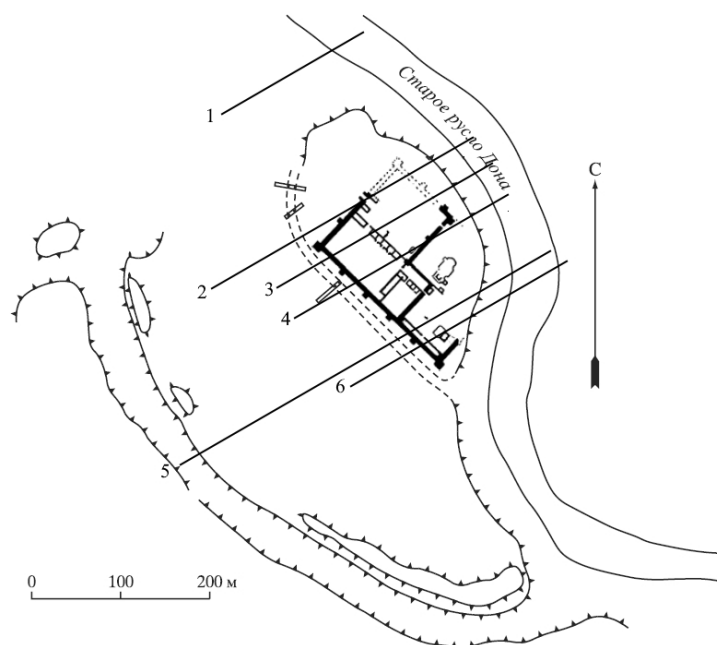


Рис. 1. Схематичный план крепости Саркел [20].

1, 2, 3, 4, 5, 6 — прямолинейные траектории (галсы) движения измерительного судна

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 показан схематичный план крепости с нанесенными на него траекториями движения судна (галсами). Профилограммы, полученные в результате движения судна по галсам, представлены ниже. Проанализируем данные профилирования и сопоставим их с описанием местности расположения Саркела. Согласно работам [15, 17–20], Саркелское городище находилось на невысоком мысу коренного берега реки, образывавшей здесь небольшую излучину. Этот мыс был отрезан от прилегающей части берега широким и глубоким рвом. Конец мыса был отделен

вторым рвом, за которым и помещалась кирпичная крепость.

На рис. 2 представлена профилограмма с типичными рельефом дна и поддонной структурой Цимлянского водохранилища. Глубина меняется плавно, резкие перепады отсутствуют. На рисунке четко видны верхние границы двух слоев. По характеру отражения можно предположить, что верхний слой — это преимущественно песок, а нижний слой — это глина или чернозем. В правой части рисунка расположена низина, дно которой засыпано илом. Совокупный анализ всех галсов позволяет предположить, что низина является старым руслом реки Дон.

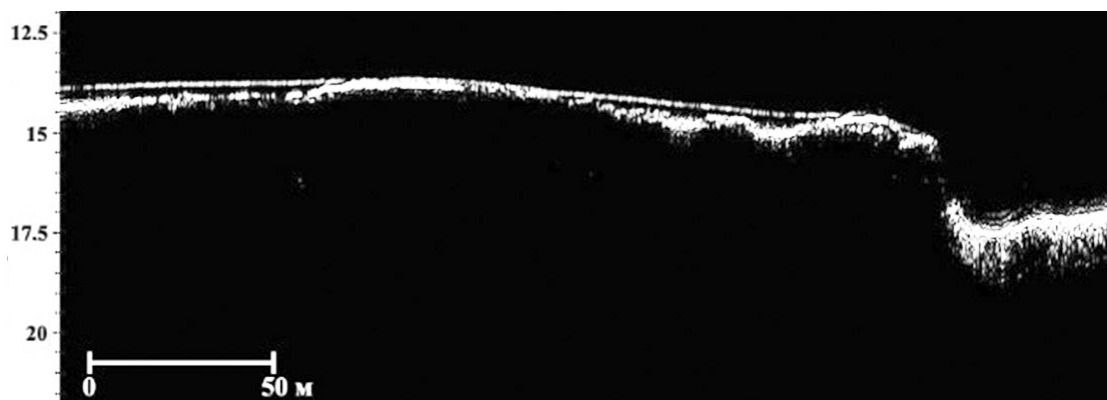


Рис. 2. Профилограмма галса 1

На профилограмме галса 2 (Приложение, рис. П) присутствует область с резкими перепадами рельефа дна. Четкое разделение слоев в ней отсутствует, т.к. она засыпана смесью песка и ила. Аналогичная картина наблюдается на рис. 3. На профилограмме видны холмы высотой около 3.5 м. Низменности между холмами покрыты слоем ила. Такой характер рельефа дна можно объяснить

результатом антропогенного воздействия, а именно раскопками крепости Саркел.

На рис. 4 цифрой 1 обозначен фрагмент кирпичной стены крепости. Видимая прибором высота стены около 2 м. Большая часть стены как сверху, так и по бокам засыпана песком. Поэтому визуально она выглядит как песчаный холм высотой около 0.5 м над уровнем дна.

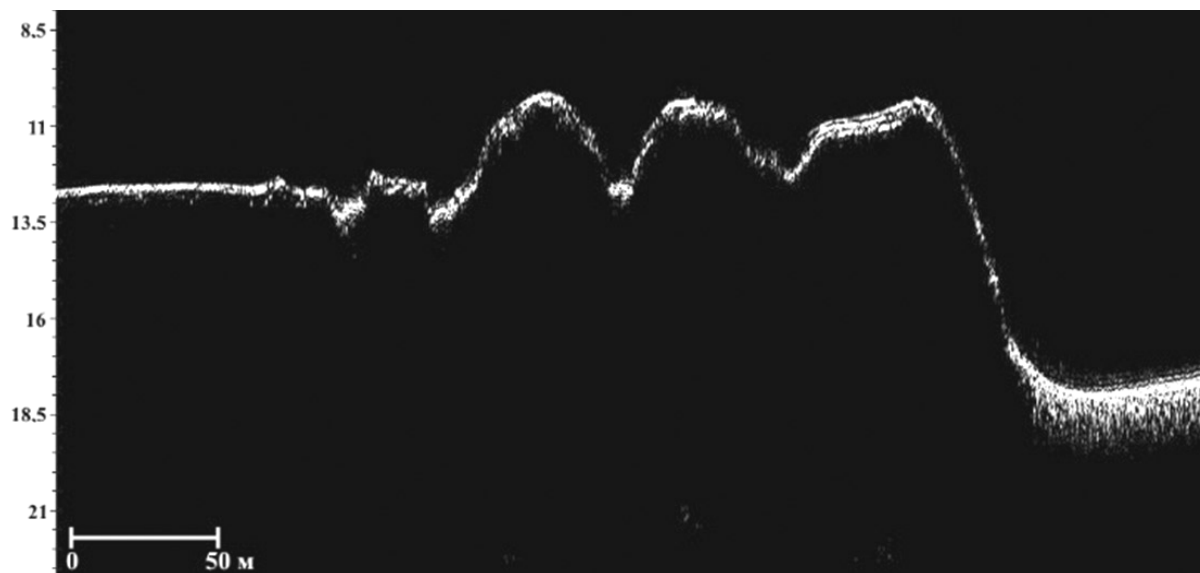


Рис. 3. Профилограмма галса 3

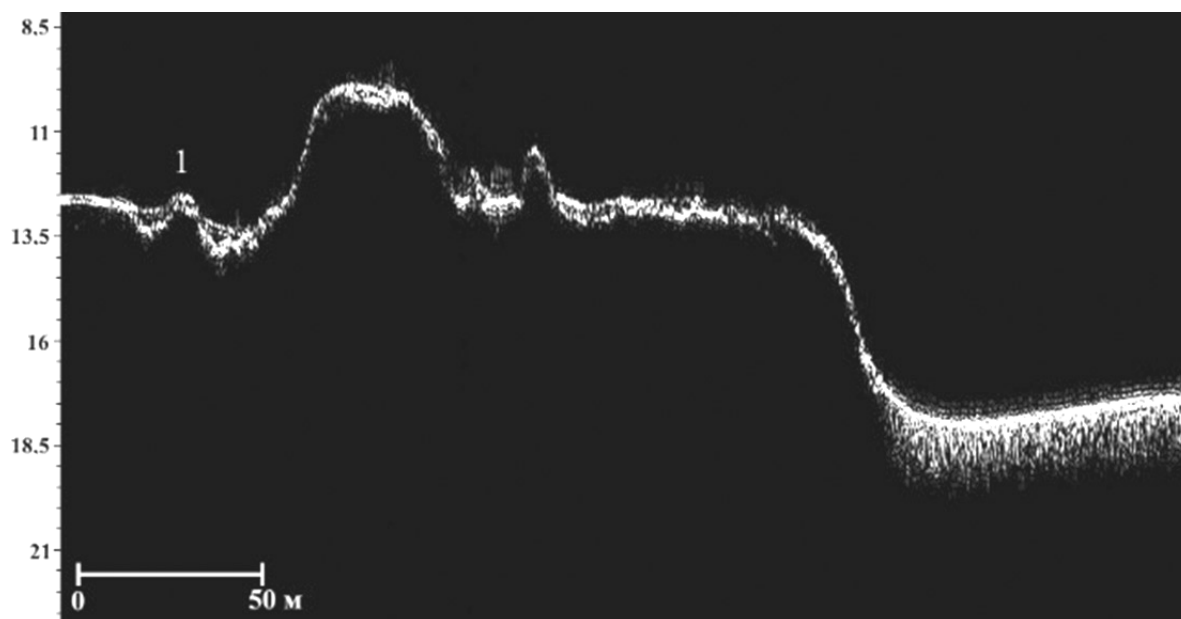


Рис. 4. Профилограмма галса 4

В левой и правой частях рис. 5 присутствуют низменности. Как уже отмечалось выше, правая низина представляет собой старое русло реки Дон. Левая низина является большим рвом, отрезавшим мыс, на котором была расположена крепость, от прилегающей части берега. Особый интерес представляет область, отмеченная на рисунке цифрой 2. В области аномалии видны границы трех слоев. Первые два слоя почти сливаются друг с другом и являются слоем чернозема или глины, который засыпан песком. Под ними находится слой мягкого грунта типа ил. Можно предположить, что аномалия является частью малого оборонительного рва. Но в то же время область 2 сильно удалена от кирпичной части крепости

и, судя по окружающему рельефу, раскопкам не подвергалась.

На рис. 6 цифрой 3 обозначена аномалия, схожая с аномалией 2 на рис. 5. Однако аномалия 3 лежит в области района раскопок и ее местонахождение соответствует расположению малого рва. Еще одна область, представляющая особый интерес, обозначена на рис. 6 цифрой 4. В области 4 расположена яма глубиной около 2 м. Дно ямы засыпано илом. В яме находятся два вытянутых вверх и параллельных друг другу объекта. Место расположения объектов и их форма говорят об их искусственном происхождении. В результате сопоставления данных профилирования, гидролокационной съемки, водолазного обследования

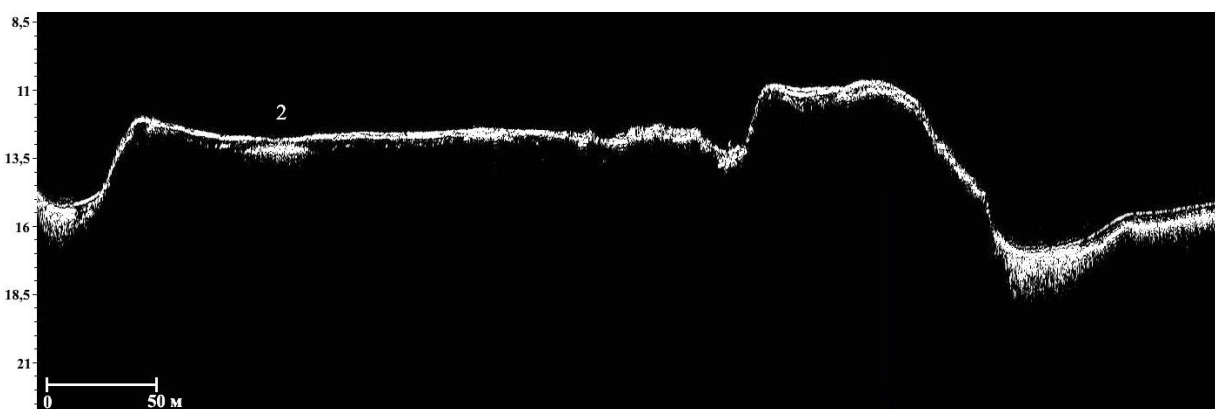


Рис. 5. Профилограмма галса 5

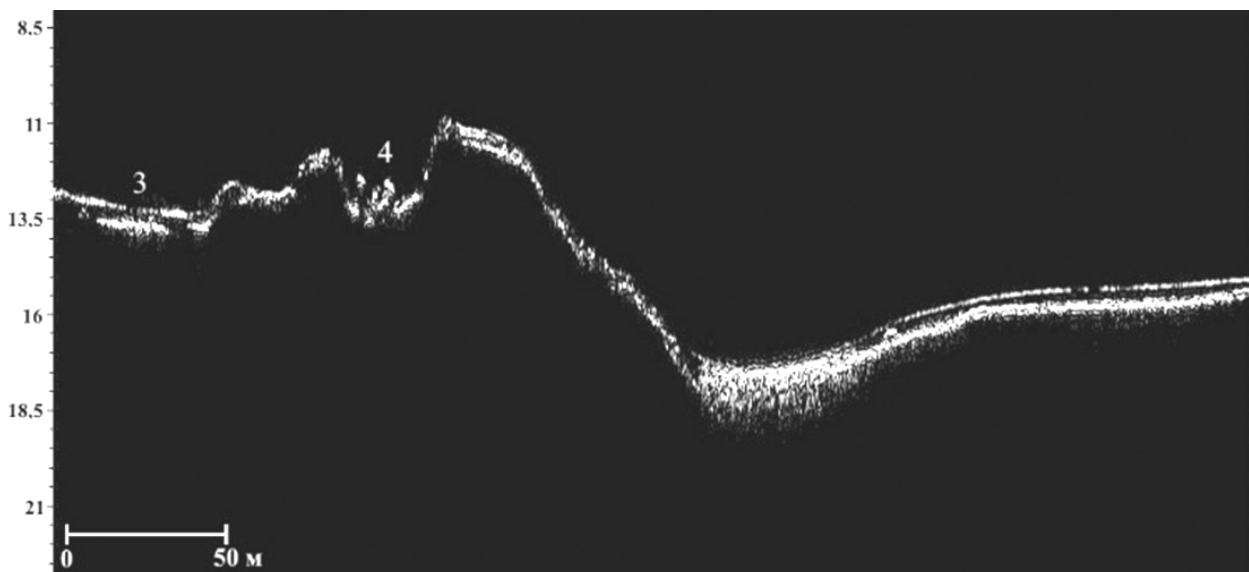


Рис. 6. Профилограмма галса 6

и аэрофотосъемки 50-х гг. [15, 17–20] было выдвинуто предположение, что объекты являются описанными в археологических отчетах остатками здания [19].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты на рис. 2–6 и в Приложении не являются полностью исчерпывающими и самостоятельными. Они составляют только определенную

часть от всего объема работ по комплексному дистанционному обследованию объекта культурного наследия. Однако изложенные выше результаты профилирования и их анализ убедительно доказывают необходимость использования параметрического профилографа в подводной археологии при проведении разведки местности. Параметрический профилограф способен обнаружить объекты под дном и дать представление о геологическом строении верхних слоев района.

ПРИЛОЖЕНИЕ

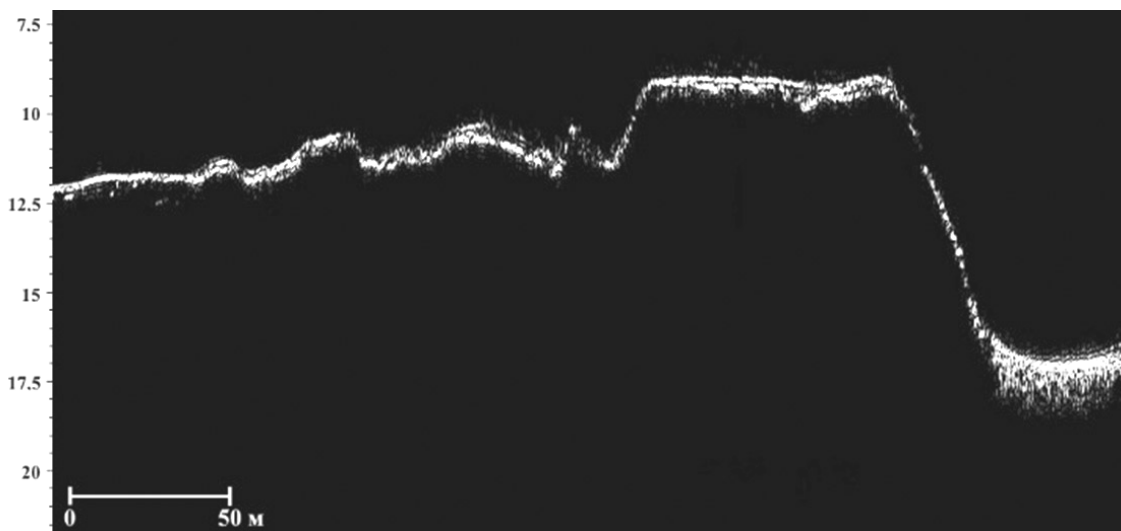


Рис. 2. Профилограмма галса 2

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Green J. Maritime archaeology: A technical handbook. 2nd ed. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004. 430 p.
2. Catsambis A., Ford B., Hamilton D. The Oxford handbook of maritime archaeology. New York: Oxford University Press, 2011. 1203 p.
3. Bowens A. Underwater archaeology: The NAS guide to principles and practice. 2nd ed. Singapore: Nautical Archaeology Society, Black-well Publishing, 2009. 226 p.
4. Quinn R., Bull J.M., Dix J.K. Imaging wooden artefacts using Chirp sources // Archaeological Prospection. 1997. Vol. 4, iss. 1. P. 25–35. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0763(199703)4:1<25::AID-ARP66>3.0.CO;2-U
5. Plets R., Dix J., Bastos A., Best A. Characterization of buried inundated peat on seismic (Chirp) data, inferred from core information // Archaeological Prospection. 2007. Vol. 14. P. 1–12. DOI: 10.1002/arp.318
6. Papatheodorou G., Geraga M., Ferentinos G. The Navarino Naval Battle Site, Greece—an integrated remote-sensing survey and a rational management approach // International Journal of Nautical Archaeology. 2005. Vol. 34, iss. 1. P. 95–109. DOI: 10.1111/j.1095-9270.2005.00047.x
7. Каевичер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В. Параметрический эхолот-профилограф с линейной частотной модуляцией зондирующего сигнала // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 11. (9 с.). DOI: 10.30898/1684-1719.2021.11.11
8. Денисов Е.Ю. Формирование зондирующего сигнала в параметрическом профилографе с линейной частотной модуляцией // Нелинейный мир. 2013. Т. 11, № 3. С. 132–133.
9. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Дюжова К.В., Сушко К.С., Титов В.В. Результаты комплексных исследований голоценовых отложений Таганрогского залива Азовского моря // Наука Юга России. 2017. Т. 13, № 4. С. 43–59. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-43-59
10. Глазунов В.В., Букатов А.А., Панченко В.В., Ефимова Н.Н. Применение донной электротомографии для повышения информативности морских геофизических исследований подводных археологических памятников // Вестник Камчатской региональной ассоциации "Учебно-научный центр". Серия: Науки о Земле. 2022. № 4 (56). С. 5–18. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-4-56-5-18

11. Бреховских А.Л., Гринберг О.В., Евсенко Е.И., Клюев М.С., Ольховский С.В., Ракитин И.Я., Сажнева А.Э., Шрейдер А.А., Шрейдер Ал.А. Разработка основ технологии исследования объектов культурного наследия, погребенных в донных неуплотненных осадках, методом параметрического профилографа с использованием данных спутниковой навигации // Океанологические исследования. 2018. Т. 46, № 2. С. 5–14. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).1
12. Шматков А.А., Ольховский С.В., Верхняцкий А.А. Трехмерная съемка параметрическим профилографом при изучении Фанагории // Труды Международной геолого-геофизической конференции "ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии". 2018. С. 766–769. URL: <https://elibrary.ru/xmuaiih>
13. Волощенко А.П. Применение параметрического профилографа для исследования тонкой структуры морского дна // Научное приборостроение. 2021. Т. 31, № 1. С. 84–95. DOI: 10.18358/np-31-1-i8495
14. Волощенко А.П., Пивнев П.П., Солдатов Г.В. Исследование особенностей ландшафта шельфа Черного моря гидроакустическими средствами // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2019. № 3. С. 15–21. DOI: 10.17308/geo.2019.3/2319
15. Хохлов С.А., Иванов С.В., Бардашов М.Н., Ткаченко Ю.Г., Пивнев П.П. Подводные археологические исследования крепости Саркел – Белая Вежа, затопленной в Цимлянском водохранилище // Труды XI Международной научно-практической конференции "Морские исследования и образование" (MARESEDU-2022). 2022. С. 382–387.
16. Волощенко А.П. Применение гидроакустических приборов в подводной археологии в прибрежных зонах акваторий // Сборник трудов XIV Всероссийской школы-семинара молодых ученых, аспирантов, студентов и школьников "Исследования и творческие проекты для развития и освоения проблемных и прибрежно-шельфовых зон юга России". 2023. С. 124–130. URL: <https://hub.sfedu.ru/storage/1/1319324/407856b7-f3fd-415e-b6c3-f262584a059d/>
17. Артамонов М.И. История хазар. Л.: Изд-во Гос. Эрмитажа, 1962. 302 с.
18. Плетнева С.А. Древнерусский город в кочевой степи. Историко-стратиграфическое исследование. Воронеж: ВГУ, 2006. 392 с.
19. Раппопорт П.А. Крепостные сооружения Саркела // Материалы и исследования по археологии СССР. 1959. № 75. С. 9–39.
20. Афанасьев Г.Е. Кто же в действительности построил Левобережное Цимлянское городище? // Российская археология. 2011. № 3. С. 108–119. URL: http://www.ra.iran.ru/?page_id=3366&lang=ru

Южный федеральный университет, Таганрог

Контакты: Волощенко Александр Петрович,
arvoloshhenko@sfedu.ru

Материал поступил в редакцию 25.03.2024

FEATURES AND RESULTS OF USING PARAMETRIC PROFILOGRAPH IN UNDERWATER ARCHEOLOGY

A. P. Voloshchenko, P. P. Pivnev

Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation

The article discusses the use of hydroacoustic equipment to solve problems in underwater archeology. In particular, the problems of remote detection and identification of cultural heritage objects hidden by sediments are considered. The indicated problems are solved using a parametric profilograph. The basic principles of the operation of an acoustic profilograph are outlined. The differences between linear and parametric profilographs are given. The principles and features of the operation of a parametric profilograph are explained. The results of hydroacoustic profiling of the excavation site of the flooded Khazar fortress Sarkel are discussed. The methods and conditions for conducting the study are outlined. The parameters of the equipment used are given. The obtained profilograms are presented. Analysis and interpretation of the profiling results were carried out. Characteristic features of the bottom topography and cultural heritage objects discovered during the hydroacoustic survey and archaeological excavation data were compared. As a result, an area that fully corresponded to the description of the excavation site was found. The correspondence was confirmed both by the presence of characteristic features of the relief and by traces of excavations. The ditches surrounding the fortress and the remains of brick buildings were also discovered and identified. The ditches were completely covered with a mixture of sand and silt, so their detection became possible only with the help of a parametric profilograph.

Keywords: parametric profilograph, profilogram, river sediments, bottom structure, underwater archeology, Sarkel

REFERENCES

- Green J. *Maritime archaeology: A technical handbook. 2nd ed.* San Diego, Elsevier Academic Press, 2004. 430 p.
- Catsambis A., Ford B., Hamilton D. *The Oxford handbook of maritime archaeology.* New York, Oxford University Press, 2011. 1203 p.
- Bowens A. *Underwater archaeology: The NAS guide to principles and practice. 2nd ed.* Singapore: Nautical Archaeology Society, Blackwell Publishing, 2009. 226 p. DOI: 10.1002/9781444302875
- Quinn R., Bull J.M., Dix J.K. Imaging wooden artefacts using Chirp sources. *Archaeological Prospection*, 1997, vol. 4, iss. 1, pp. 25–35. DOI: 10.1002/(SICI)1099-0763(199703)4:1<25::AID-ARP66>3.0.CO;2-U
- Plets R., Dix J., Bastos A., Best A. Characterization of buried inundated peat on seismic (Chirp) data, inferred from core information. *Archaeological Prospection*, 2007, vol. 14, iss. 4, pp. 1–12. DOI: 10.1002/arp.318
- Papatheodorou G., Geraga M., Ferentinos G. The Navarino Naval Battle Site, Greece—an integrated remote-sensing survey and a rational management approach. *International Journal of Nautical Archaeology*, 2005, vol. 34, iss. 1, pp. 95–109. DOI: 10.1111/j.1095-9270.2005.00047.x
- Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Smolyaninov I.V., Elbakidze A.V. [Parametric profiler using a linearly frequency modulated signal]. *Zhurnal Radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2021, no. 11, (9 p.). DOI: 10.30898/1684-1719.2021.11.11 (In Russ.).
- Denisov E.Yu. [Waveshaping of parametric profilograph with linear frequency modulation]. *Nelineinyi mir* [Nonlinear world], 2013, vol. 11, no. 2, pp. 132–133. (In Russ.).
- Matishov G.G., Pol'shin V.V., Dyuzhova K.V., Sushko K.S., Titov V.V. [Results of integrated researches of the Taganrog bay of the Sea of Azov holocene deposits]. *Nauka Yuga Rossii* [Science in the South of Russia], 2017, vol. 13, no. 4, pp. 43–59. DOI: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-43-59 (In Russ.).
- Glazunov V.V., Bukatov A.A., Panchenko V.V., Efimova N.N. [Application of bottom electrotomography for increasing the informativity of marine geophysical investigations of underwater archaeological sites]. *Vestnik Kamchatskoy regional'noy assotsiatsii «Uchebno-nauchnyy tsentr»*. *Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin of Kamchatka Regional Association "Educational-Scientific Center". Earth Sciences], 2022, no. 4 (56), pp. 5–18. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-4-56-5-18 (In Russ.).
- Brekhovskikh A.L., Greenberg O.V., Evsenko E.I., Klyuev M.S., Ol'khovskiy S.V., Rakitin I.Ya., Sazhneva A.E., Shreider A.A., Shreider A.I.A. [Development of the basics of technology for studying objects of cultural heritage buried in bottom unconsolidated sediments by the method of parametric profilography using satellite navigation data]. *Okeanologicheskie issledovaniya* [Journal of Oceanological Research], 2018, vol. 46, no. 2, pp. 5–14. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2018.46(2).1 (In Russ.).
- Shmatkov A.A., Olkhovskiy S.V., Verkhnyatskiy A.A. [Three-dimensional surveying with a parametric profiler during the study of Phanagoria]. *Trudy Mezhdunarodnoi geologo-geofizicheskoi konferentsii "GeoEvraziya 2018. Sovremennye metody izucheniya i osvoeniya nedr Evrazii"* [Proc. International Geological and Geophysical Conference "GeoEurasia 2018. Modern Methods of Study and

- Development of Eurasian Subsoil"], 2018, pp. 766–769. (In Russ.).
13. Voloshchenko A.P. [Application of a parametric profilograph to study the fine structure of the seabed]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2021, vol. 31, no. 1, pp. 84–95. DOI: 10.18358/np-31-1-i8495 (In Russ.).
 14. Voloshchenko A.P., Pivnev P.P., Soldatov G.V. [Investigation of the landscape features of the shelf of the Black Sea by hydroacoustic means]. *Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: geography. Geoecology], 2019, no. 3, pp. 15–21. DOI: 10.17308/geo.2019.3/2319 (In Russ.).
 15. Khokhlov S.A., Ivanov S.V., Bardashov M.N., Tkachenko Y.G., Pivnev P.P. [Underwater archaeological research of the fortress Sarkel – Belaya Vezha, submerged in the Tsimlyansk reservoir]. *Trudy XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskie issledovaniya i obrazovanie" (MARESEDU-2022)* [Proc. XI International Scientific and Practical Conference "Marine Research and Education" (MARESEDU-2022)], 2022, pp. 382–387. (In Russ.).
 16. Voloshchenko A.P. [Application of hydroacoustic instruments in underwater archaeology in coastal areas of water areas]. *Sbornik trudov XIV Vserossiiskoi shkoly-seminara molodykh uchenykh, aspirantov, studentov i shkol'nikov "Issledovaniya i tvorcheskije proekty dlya razvitiya i osvoeniya problemnykh i pribrezhno-shel'fovyykh zon yuga Rossii"* [Proc. XIV All-Russian school-seminar of young scientists, postgraduates, students and schoolchildren "Research and creative projects for the development and exploration of problem and coastal-shelf zones of southern Russia"], 2023, pp. 124–130. (In Russ.).
 17. Artamonov M.I. *Istoriya khazar* [History of the Khazars]. Leningrad, State Hermitage Publ., 1962. 302 p. (In Russ.).
 18. Pletneva S.A. *Drevnerusskii gorod v kochevoi stepi. Istoriiko-stratigraficheskoe issledovanie* [Old Russian town in nomadic steppe. Historical and stratigraphic research]. Voronezh, VSU Publ., 2006. 392 p. (In Russ.).
 19. Rappoport P.A. [Fortress buildings of Sarkel]. *Materialy i issledovaniya po arkheologii SSSR* [Materials and Studies on the Archaeology of the USSR], 1959, no. 75, pp. 9–39. (In Russ.).
 20. Afanasyev G.E. [Who built the fortress of Levoberezhnoye Tsimlyanskoye?]. *Rossiiskaya arkheologiya* [Russian archaeology], 2011, no. 3, pp. 108–119. URL: http://www.ra.iran.ru/?page_id=3366&lang=ru (In Russ.).

Contacts: *Voloshchenko Alexander Petrovich*,
 apvoloshhenko@sfedu.ru

Article received by the editorial office on 25.03.2024

INTRODUCTION

The main hydroacoustic instruments for searching for objects of cultural heritage in underwater archeology are the echo sounder, side-scan sonar, and multi-beam echo sounder. With their help, it is possible not only to detect archaeological sites and obtain their acoustic image, but also to create a three-dimensional map of the search area. Moreover, the joint use of hydroacoustic instruments and satellite navigation systems makes it possible to obtain three-dimensional maps, each point of which has geographic coordinates [1–3]. In underwater archeology, cases are not uncommon when archaeological sites are partially or completely hidden by sediments. Then the use of the above-mentioned linear bottom sounding systems becomes ineffective. The problem that has arisen can be solved if, during archaeological exploration, linear bottom remote sensing systems are used together with an acoustic profiler [1–12].

RESEARCH EQUIPMENT AND METHODS

Theoretical background for equipment application

The principle of operation of a profiler is in many ways similar to that of an echo sounder. The profiler antenna emits an acoustic pulse vertically down towards the bottom and receives the signal reflected back. The difference is that the echo sounder's reflected signal contains information only about the bottom topography. In a profiler, the reflected signal contains information both about the bottom topography and the structure of the soil under the bottom. The ratio of the acoustic resistances of the contacting media determines which part of the energy will be absorbed and which will return to the antenna. The depth of penetration of an acoustic signal into the bottom soil is determined both by the properties of the signal itself and by the geological characteristics of the soil. It is more difficult for the signal to penetrate into coarse-grained sediments (sands and gravels) than into fine-grained sediments (silts and clays). The shape of objects, the slope of the bottom and subbottom layers also affect reflectivity [1–6].

It is not entirely correct to compare the parameters of profilers and linear bottom sounding systems, because these devices solve different problems. But still, the resolution of linear profilers is significantly inferior to that of many hydroacoustic systems used in underwater archeology. Some authors even question the advisability of using profilers to search for cultural heritage objects [1]. Low resolution is due to the physical properties of the frequencies used. High frequencies give better resolution, but can penetrate the bottom only a short distance, and vice versa, low fre-

quencies penetrate deeper, but give worse resolution. Another frequency-dependent factor is the size of the line profiler antenna. The lower the frequency, the larger the antenna. This circumstance significantly complicates the use of linear profilers on small vessels in shallow waters. The use of parametric profile graphs allows us to reduce the impact of the problems described above.

The differences between linear and parametric profilers are as follows. Linear profilers mainly operate on one or two discrete low-frequency signals. These signals are emitted by the profiling antenna, and it is their properties that determine the resolution of the device. In a parametric profiler, the antenna emits at least two high-frequency signals (pump signals). Next, a nonlinear interaction of pumping signals occurs in water. As a result, a low-frequency difference signal is formed in the medium. The depth of penetration of the acoustic wave into the subbottom soil and the resolution of the device depend on its properties. This method of receiving a probing pulse makes it possible to generate complex broadband signals. Moreover, the acoustic field of the difference frequency signal has no side lobes. And the width of the main lobe at all difference frequencies is equal to the width of the main lobe of the pump frequencies. These factors, combined with the processing of the received complex reflected signal, make it possible to maintain an acceptable resolution of the profiler. Also, the antenna of a parametric profiler emits only a high-frequency signal, so there is no need to make the size of its active surface large [13, 14].

Object of study and methodology

In September 2022, a research group consisting of teachers and students of Southern Federal University (Russia) as well as employees of NELAX LLC, commissioned by the Underwater Archaeological Society ANO, conducted an archaeological exploration of the Levoberezhny excavation site Tsimlyansky settlement (Sarkel - Belaya Vezha). A side-scan sonar and a parametric profiler were used for reconnaissance. During the work, a study of part of the water area of the Tsimlyansk Reservoir was carried out in the area of Tsimlyansk, Rostov region. The purpose of the expedition was to study the nature of the bottom of the reservoir, obtain bathymetric data, compile a hydroacoustic mosaic of the bottom, and identify objects of natural and artificial origin located both on the surface of the bottom and below it [15, 16].

The Sarkel fortress on the Lower Don was the most important component of the infrastructure of the Khazar Kaganate. It was built by the Khazars with the help of Byzantine engineers in the 830s. The main contribution to Sarkel's research was made by M.I. Artamonov. On the basis of archaeological excavations in 1934–1936, 1949–1951, he localized the Sar-

kel fortress on the site of the Left Bank Tsimlyansky settlement. During the expeditions of M.I. Artamonov, most of the fortress was excavated, and a colossal amount of cultural heritage from the past was obtained. Subsequently, the excavation site was flooded during the construction of the Tsimlyansk reservoir [17–20].

Unfortunately, the exact geographical coordinates of the archaeological site were not determined. Therefore, after the flooding, the Sarkel fortress was again "lost". And yet, a schematic plan of the fortress (Fig. 1), text descriptions, and photographs containing characteristic features of the excavation area have been preserved [15, 17–20]. Relatively little time has passed since the sinking, so these features should be well preserved. This fact greatly simplifies the search for an excavation area and the identification of an archaeological site.

Fig. 1. Schematic plan of the Sarkel fortress [20].
1, 2, 3, 4, 5, 6 — straight trajectories (tacks) of movement of the measuring vessel

To search for objects located under the bottom, a domestic parametric profiler produced by NELAX LLC was used. A profiler with operating frequencies from 7 to 21 kHz makes it possible to survey the thickness of sea soil to a depth of up to 30 m with a layer resolution of up to 10 cm. The equipment was placed on a small vessel (trimaran). The profilograph's antenna was attached to the rod on the left side to a depth of 1 m and was oriented parallel to the bottom. Navigation and subsequent linking of detected objects to coordinates were obtained using two GPS antennas located on rods on both sides of the vessel.

DISCUSSION OF THE RESULTS OBTAINED

Fig. 1 shows a schematic plan of the fortress with the vessel's movement trajectories (tacks) marked on it. Profilograms obtained due to the movement of the vessel along the tacks is shown in Figs. 2–6, II. Below, we analyze the profiling data and compare it with the description of the area where Sarkel is located. According to works [15, 17–20], the Sarkel settlement was located on a low cape of the main bank of the river, which formed a small bend here. This cape was cut off from the adjacent part of the coast by a wide and deep ditch. The end of the cape was separated by a second ditch, behind which the brick fortress was located.

Fig. 2. Profilogram of tack 1

Fig. 2 shows a profilogram with typical bottom topography and subbottom structure of the Tsimlyansk reservoir. The depth changes smoothly, there are no sharp changes. The figure clearly shows the upper boundaries of the two layers. Based on the nature of the reflection, it can be assumed that the top layer is predominantly sand, and the bottom layer is clay or black soil. On the right side of the picture, there is a lowland, the bottom of which is covered with silt. A combined analysis of all tacks suggests that the lowland is the old bed of the Don River.

On the profilogram of tack 2 (Appendix, Fig. II) there is an area with sharp changes in the bottom topography. There is no clear separation of layers in it, because it is covered with a mixture of sand and silt. A similar picture is observed in Fig. 3. The profilogram shows hills about 3.5 m high. The lowlands between the hills are covered with a layer of silt. This nature of the bottom topography can be explained as the result of anthropogenic impact, namely the excavations of the Sarkel fortress.

Fig. 3. Profilogram of tack 3

In Fig. 4, the number 1 indicates a fragment of the brick wall of the fortress. The height of the wall visible with the device is about 2 m. Most of the wall, both on top and on the sides, is covered with sand. Therefore, visually it looks like a sandy hill about 0.5 m high above the bottom.

Fig. 4. Profilogram of tack 4

In the left and right parts of Fig. 5, lowlands are present. As noted above, the right lowland is the old bed of the Don River. The left lowland was a large ditch that cut off the cape on which the fortress was located from the adjacent part of the coast. Of particular interest is the area marked 2 in the figure. In the anomaly area, the boundaries of three layers are visible. The first two layers almost merge with each other and are a layer of black soil or clay, which is covered with sand. There is a layer of soft dirt, possibly silt, underneath them. It can be assumed that the anomaly is part of a small defensive ditch. But area 2 is very far from the brick part of the fortress, and, judging by the surrounding topography, it has not been excavated.

Fig. 5. Profilogram of tack 5

In Fig. 6, number 3 indicates an anomaly similar to anomaly 2 in Fig. 5. However, anomaly 3 lies in the area of the excavation area, and its location corresponds to the location of the small ditch. Another area of particular interest is indicated in Fig. 6 with the number 4. In area 4, there is a pit about 2 m deep. The bottom of the pit is covered with silt. In the pit, there are two objects extended upward and parallel to each other. The location of objects and their shape indicate their artificial origin. As a result of the comparison of profiling data, sonar survey, diving survey, and aerial photographs from the 50s [15, 17–20], it was suggested that the objects are the remains of building described in archaeological reports [19].

Fig. 6. Profilogram of tack 6

CONCLUSIONS

Results in Figs. 2–6 and in the Appendix are not completely exhaustive and self-sufficient. They constitute only a certain part of the total volume of work on a comprehensive remote survey of a cultural heritage site. However, the profiling results presented above and their analysis convincingly prove the need to use a parametric profiler in underwater archaeology when conducting terrain reconnaissance. A parametric profiler is capable of detecting objects under the bottom and giving an idea of the geological structure of the upper layers of the area.

APPENDIX

Fig. II. Profilogram of tack 2