POLISH HYPERBARIC RESEARCH 1(62)2018
Journal of Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society
Faculty of Mechanical and Electrical Engineering of the Polish Naval Academy

THE INVENTION AND DEVELOPING OF MULTIBEAM ECHOSOUNDER TECHNOLOGY

POWSTANIE I ROZWÓJ TECHNOLOGII ECHOSONDY WIELOWIĄZKOWEJ

СОЗДАНИЕ И РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОЛУЧЕВОГО ЭХОЛОТА

ENTSTEHUNG UND ENTWICKLUNG DER MEHRSTRAHL-ECHOLOT-TECHNOLOGIE

APARICIÓN Y DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE ECOSONDAS MULTIHAZ

Artur Grządziel, Mariusz Wąż

Navigation and Naval Weapons Faculty, Polish Naval Akademy, Gdynia, Poland
Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego, Akademia Marynarki Wojennej, Gdynia

STRESZCZENIA / ABSTRACTS

When a man has mastered the ability to travel by sea, he began to wonder what is the depth clearance under the keel and how to measure the depth. Initially, only coastal shipping was practiced. Cargo ship sailing, fishery, underwater scientific research, recreational diving as well as resource exploration and operation of submarine cables and pipelines laying were developing dynamically in this part of the continental shelf. That is why accurate bathymetric information was of great importance to masters, scientists, fishermen, ship-owners and all seafarers.
Cartographic compilation of even a primitive nautical chart was a huge challenge. It was a painstaking process and required, first and foremost, a large amount of data, which was primarily obtained through not efficient measurements. As technology progresses, new techniques and methods of ocean exploration have developed. The technology, systems, devices and instruments of underwater exploration have gone through a long way of change, modernization and improvements, ultimately creating the potential for a bottom surface visualization as three-dimensional spatial models. A significant role has been played by multibeam echosounder which revolutionized the hydrographic surveys and proved to be efficient means of hydrographic and oceanographic surveys.
Keywords: leadline, sounding machine, acoustic sounder, multibeam echosounder.

Kiedy człowiek opanował umiejętność podróżowania drogą morską, zaczął się zastanawiać, jaka jest głębokość pod stępką i jak ją zmierzyć. Początkowo uprawiano jedynie żeglugę przybrzeżną. W tej części szelfu kontynentalnego dynamicznie rozwijała się żegluga statków handlowych, rybołówstwo, podwodne badania naukowe, nurkowanie rekreacyjne, eksploracja zasobów mineralnych, technologie układania kabli podmorskich i rurociągów. Rozwój tych gałęzi spowodował, że dokładna informacja batymetryczna odgrywała istotne znacznie dla kapitanów, armatorów, marynarzy, naukowców i rybaków.
Opracowanie kartograficzne prymitywnej mapy morskiej było ogromnym wyzwaniem. Był to żmudny proces, wymagający przede wszystkim dużej ilości danych, które pozyskiwane były mało wydajnymi metodami pomiarowymi. Wraz z rozwojem technologii pojawiały się nowe techniki i metody eksploracji oceanów. Technologia, systemy, urządzenia i przyrządy do podwodnej eksploracji przeszły długą drogę zmian, modernizacji i ulepszeń, stwarzając ostatecznie ogromne możliwości wizualizacji powierzchni dna jako trójwymiarowych modeli przestrzennych. Ważną rolę w tych przemianach odegrała echosonda wielowiązkowa MBES (ang. Multibeam Echosounder), która zrewolucjonizowała badania hydrograficzne. Urządzenia MBES okazały się skutecznym środkiem badań zarówno hydrograficznych jak i oceanograficznych.
Słowa kluczowe: sonda ręczna, sonda mechaniczna, echosonda, sonda wielowiązkowa.

ARTICLE INFO

PolHypRes 2018 Vol. 62 Issue 1 pp. 33 - 42
ISSN: 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535
DOI: 10.2478/phr-2018-0002
Pages: 9, figures: 3, tables: 0
page www of the periodical: www.phr.net.pl

Publisher
Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

Typ artykułu: przeglądowy
Rewiev article

Termin nadesłania: 10.11.2017 r.
Termin zatwierdzenia do druku: 28.12.2017 r.

Когда человек освоил навык путешествия морским путем, он начал задумываться, какова глубина под килем и как ее измерить. Первоначально занимались только прибрежным кораблеплаванием. В этой части континентального шельфа динамично развивалось плавание торговых суден, рыболовство, подводные научные исследования, рекреационный дайвинг, изучение минеральных ископаемых, технологии прокладывания подводных морских кабелей и трубопроводов. Развитие этих отраслей привело к тому, что точная батиметрическая информация имела большое значение для капитанов, судовладельцев, моряков, ученых и рыбаков.
Картографическая разработка примитивной морской карты была сложной задачей. Это трудоемкий процесс, требующий большого количества данных, которые получали низкоэффективными измерительными методами. С развитием технологии появились новые техники и методики изучения океанов. Технология, системы, устройства и приборы для подводного изучения прошли длительный путь изменений, модернизации и совершенствования, создавая в результате возможности визуализации поверхности дна в виде трехмерных пространственных моделей. Большую роль в этих переменах сыграл многолучевой эхолот MBES (ang. Multibeam Echosounder), который революционизировал гидрографические исследования. Приборы MBES оказались эффективным средством как гидрографических, так и океанографических исследований.
Ключевые слова: ручной лот, механический лот, эхолот, многолучевой эхолот.

Als der Mensch die Fähigkeit beherrschte, auf dem Seeweg zu reisen, begann er sich zu fragen, was eigentlich die Tiefe unter dem Kiel ist und wie man diese misst. Zu Anfang wurde nur Küstenschifffahrt praktiziert. In diesem kontinentalen Teil des Festlandsockels entwickelten sich die Schifffahrt mit Handelsschiffen, die Fischerei, wissenschaftliche Unterwasserforschung, Sporttauchen, die Erkundung von Bodenschätzen, Technologien zur Verlegung von Seekabeln und Pipelines recht dynamisch. Die Entwicklung dieser Zweige führte dazu, dass genaue bathymetrische Informationen für Kapitäne, Reeder, Seeleute, Wissenschaftler und Fischer eine wichtige Rolle zu spielen begannen. Die kartografische Bearbeitung einer selbst primitiven Meereskarte war eine große Herausforderung. Es war ein mühsamer Prozess, der in erster Linie eine große Menge an Daten erforderte, die jedoch nur anhand ineffizienter Messverfahren gewonnen werden konnten. Mit der Entwicklung der Technologie erschienen neue Techniken und Methoden der Ozeanforschung. Technologien, Systeme, Geräte und Instrumente für die Unterwassererforschung haben durch Veränderungen, Modernisierungen und Verbesserungen einen langen Weg zurückgelegt und schließlich große Möglichkeiten geschaffen, die Oberfläche des Bodens als dreidimensionale räumliche Modelle zu visualisieren. Eine wichtige Rolle bei diesen Transformationen spielte das Multidirektionale Echolot MBES (Multibeam Echolot), das die hydrographische Forschung revolutionierte. MBES-Geräte erwiesen sich als effektives Mittel sowohl für die hydrographische als auch für die ozeanographische Forschung.
Schlüsselwörter: Handsonde, mechanische Sonde, Echolot, Mehrstrahlsonde.

Cuando el hombre consiguió dominar los viajes marítimos, comenzó a preguntarse cuál era la profundidad bajo la quilla y cómo medirla. Al principio sólo se desarrolló el transporte marítimo de cabotaje. En esta parte de la plataforma continental la marina mercante, la pesca, la investigación científica subacuática, el buceo recreativo, la exploración de recursos minerales, las tecnologías de tendido de cables y tuberías submarinas experimentaron un rápido desarrollo. El desarrollo de estas actividades trajo consigo la necesidad de contar con una información batimétrica precisa por parte de los capitanes, armadores, marinos, científicos y pescadores
El desarrollo cartográfico de las primitivas cartas marinas fue un gran desafío. Fue un proceso arduo, que requirió sobre todo de una gran cantidad de datos, que se obtuvieron con unos métodos de medición poco eficaces. Con el desarrollo tecnológico, han surgido nuevas técnicas y métodos de exploración oceánica. La tecnología, los sistemas, dispositivos e instrumentos para la exploración submarina han cambiado, se han modernizado y mejorado enormemente, creando en última instancia inmensas oportunidades para visualizar la superficie del lecho marino como modelos espaciales tridimensionales. Un papel fundamental en estos cambios lo desempeñó la ecosonda multihaz MBES (ingl. Multibeam Echosounder), que revolucionó la investigación hidrográfica. Los dispositivos MBES han demostrado ser un medio eficaz de investigación hidrográfica y oceanográfica.
Palabras clave: sonda portátil, sonda mecánica, ecosonda, sonda multihaz.

WSTĘP

Dziś w pomiarach głębokości dominują akustyczne metody badawcze ze względu na ich wysoką efektywność. Wśród nich zdecydowanie największą skutecznością charakteryzują się systemy echosond wielowiązkowych MBES (ang. *Multibeam Echosounder*), zdolne do jednoczesnego pomiaru głębokości w kilkudziesięciu punktach powierzchni dna. Zaleta ta z pewnością wpłynęła na wzrost popularności tych urządzeń, szczególnie w badaniach hydrograficznych. Nieograniczony dostęp i coraz niższe koszty produkcji MBES spowodowały, że coraz częściej zastępują one klasyczne sondy jednowiązkowe.

PIERWSZE PRZYRZĄDY I URZĄDZENIA DO POMIARU GŁĘBOKOŚCI

Dążenie człowieka do odkrycia i zbadania dna oceanu dało początek nowej nauce zwanej Hydrografią, która zrodziła ponad 3700 lat temu. Metody i technika pomiarów batymetrycznych rozwijały się na przestrzeni wieków od bardzo prostych i prymitywnych do skomplikowanych i w pełni zautomatyzowanych. Pierwsze ślady świadczące o mierzeniu głębokości odnalezione zostały na malowidłach egipskich grobowców. Egipcjanie do pomiaru niewielkich głębokości (do 20 metrów) używali tyczek, drzewców i lin. Pomiary te wykonywano głównie by zapewnić bezpieczną żeglugę w niewielkiej odległości od wybrzeża.

Początkowo żeglarze mogli mierzyć głębokości tylko w akwenach płytkich, ich zainteresowanie skupiało się na lokalizowaniu niebezpieczeństw nawigacyjnych. Do tego celu wykorzystywali sondę ręczną (sondolinę) opuszczaną z burty statku. Pomiar głębokości polegał na zmierzeniu długości liny w momencie uderzenia ciężarka o dno. Ruch statku i prądy powierzchniowe powodowały niepionowe układanie się linki w toni wodnej co wpływało na dokładność pomiaru [1].

Przez następne kilkanaście wieków niewiele się zmieniło. W XII wieku naszej ery wprowadzono kompas magnetyczny i unowocześniono przyrządy nawigacyjne. W wieku XV po odkryciu Ameryki i opłynięciu Afryki sonda ręczna wciąż pozostawała podstawowym urządzeniem pomiarowym. W 1490 roku Leonardo da Vinci stwierdził, że dźwięk rozchodzi się nie tylko w powietrzu ale również pod wodą [2]. Opisał on również, w jaki sposób za pomocą tuby można słuchać szumów pochodzących od odległych statków. Przez kolejne 200 lat technika wykonywania pomiarów batymetrycznych nie uległa radykalnym zmianom.

W 1773 roku kapitan Constantine John Phipps opuścił na Morzu Norweskim z pokładu H.M.S *Racehorse* linę z obciążeniem 68 kg. Zmierzył on głębokość morza równą 1249 metrów [3]. W 1840 roku Sir James Clark Ross wykonał pierwszy głębokowodny pomiar na południowym Atlantyku rejestrując głębokość 4434 metrów. Około 1850 roku oficer amerykańskiej marynarki wojennej kapitan Matthew Fontaine Maury stworzył pierwszy planszet batymetryczny północnego basenu Oceanu Atlantyckiego. Niestety planszet ten zawierał liczne błędy i nie odzwierciedlał rzeczywistej rzeźby dna.

Od końca XIX wieku do początków XX wieku swoją świetność przeżywały sondy mechaniczne [4].

INTRODUCTION

Today acoustical research methods are used in depth measurements because of their high efficiency. Among those most effective are characterized by MBES (Multi-beam Echo Sounder), capable of simultaneous depth measurement in several dozen points of the bottom surface. This advantage has certainly increased the popularity of these devices, especially in hydrographic survey. Unrestricted access and ever-lower cost of MBES production have led them to increasingly replace classic single-beam sounders.

FIRST DEPTH MEASURING INSTRUMENTS AND DEVICES

The pursuit of man to discover and explore the bottom of the ocean gave birth to a new science called Hydrography, which was born more than 3700 years ago. The methods and techniques of bathymetric measurements have evolved over the centuries from very simple and primitive to complex and fully automatic ones. The first traces of the depth measurement were found in the paintings of the Egyptian tombs. The Egyptians used to measure the depths (up to 20 meters) using poles, spades and ropes. These measurements were mainly made to provide safe navigation a short distance from the coast.

Initially, sailors were able to measure depths only in shallow waters, their interest focused on locating navigational dangers. For this purpose, they used a hand-held sounder (leadline), which was lowered from the side of the ship. Depth measurement consisted of measuring the length of the rope at the moment the weight hit the bottom. Movement of the vessel and surface currents caused unconfirmed alignment of the line in the water table, which affected the accuracy of the measurement [1].

For the next dozen or so centuries little changed. In the twelfth century AD, a magnetic compass was introduced and navigational equipment upgraded. In the 15th century after the discovery of America and Africa, the hand-held sounder remained the primary measuring device. In 1490 Leonardo da Vinci stated that sound spreads not only in the air but also under the water [2]. He also described how to hear the noise from distant ships using a tube. For another 200 years, the technique of bathymetric measurements did not change radically.

In 1773 Captain Constantine John Phipps released a rope with a load of 68 kg from the deck of H.M.S *Racehorse* in the Norwegian Sea. He measured the depth of the sea at exactly 1249 meters [3]. In 1840 Sir James Clark Ross made the first deepwater measurement in the South Atlantic recording a depth of 4434 meters. Around 1850, American naval officer Captain Matthew Fontaine Maury created the first bathymetric chart of the North Atlantic basin. Unfortunately, this chart contained numerous errors and did not reflect the actual shape of the sea bottom.

From the late nineteenth century to the early 20th century mechanical sounders were experiencing their splendour [4]. In 1872, Sir William Thomson (later Lord Kelvin) constructed a primitive mechanical sounder built of steel wire wound on a drum. The first attempts he made were on a private yacht called „Lalla Rookh".

W 1872 roku Sir William Thomson (później Lord Kelvin) skonstruował prymitywną sondę mechaniczną zbudowaną z linki stalowej nawiniętej na bęben. Pierwsze próby wykonał on na prywatnym jachcie „Lalla Rookh". Sondy mechaniczne rozwijały się od stosunkowo prostych do skomplikowanych, obsługiwanych przez kilku operatorów. Wśród tych najbardziej znanych wymienia się sondy Lucasa, Sigsbee, Lietza, Tannera czy Kelvina (rys. 1).

Mechanical sounders have evolved from relatively simple to complex, operated by several operators. Among the most famous are the Lucas, Sigsbee, Lietz, Tanner and Kelvin sounders (Fig.1).

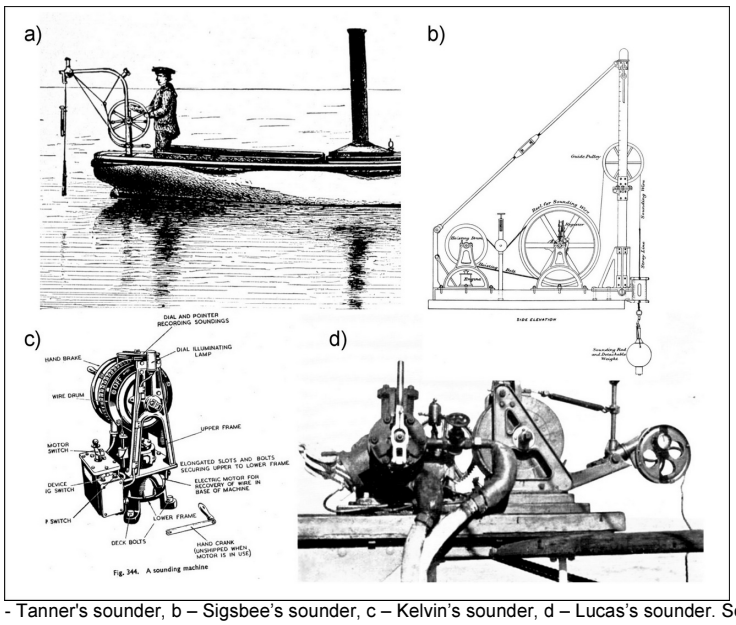

Fig. 1. Mechanical sounding devices (a - Tanner's sounder, b – Sigsbee's sounder, c – Kelvin's sounder, d – Lucas's sounder. Source: [5, 6, 7, 8].

Rys. 1. Sondy mechaniczne Tannera (a), Sigsbee (b), Kelvina (c) i Lucasa (d) [5, 6, 7, 8].

POCZĄTKI ECHOSONDOWANIA

Prawdopodobnie pierwszy pomiar pod powierzchnią wody z wykorzystaniem fal akustycznych przeprowadzono w 1826 roku. Szwedzki fizyk Daniel Colladon i francuski matematyk Charles Strum zmierzyli z zaskakująco wysoką dokładnością prędkość dźwięku w Jeziorze Genewa. Uzyskali oni wartość równą 1435 m/s. Po wybuchu I wojny światowej zwiększyło się tempo pracy nad budową systemów sonarowych.

Pierwsze pomysły i patenty na sonar aktywny pojawiły się w 1912 roku po tragedii Titanica. W tym roku angielski meteorolog Lewis Richardson [9] opatentował pomysł na urządzenie sonarowe. Podobny patent uzyskał rok później niemiecki fizyk Alexander Behm [2]. Pierwszy eksperymentalny system powstał w 1912 roku. Zbudował go kanadyjski fizyk Reginald Fessenden pracujący dla amerykańskiej firmy Submarine Signal Company [10]. W 1914 roku wykonano próby morskie z pokładu kutra *Miami* należącego do straży przybrzeżnej Stanów Zjednoczonych. Oscylator Fessendena został użyty do komunikacji z zanurzonym okrętem podwodnym, określenia głębokości morza i wykrycia góry lodowej.

W czasie I wojny światowej systemy sonarowe znalazły liczne zastosowania w działaniach wojennych. Już w 1915 roku rosyjski inżynier Constantin Chilowsky i francuski fizyk Paul Langevin zaprojektowali urządzenie nadawczo-odbiorcze wykorzystujące zjawisko piezoelektryczności kryształków kwarcu. Rok późnej uzyskali oni echo z głębokości 200 metrów.

BEGINNINGS OF ECHO SOUNDING

Probably the first measurement under the water surface using acoustic waves was conducted in 1826. Swedish physicist Daniel Colladon and French mathematician Charles Strum measured surprisingly with high precision, the speed of sound in Lake Geneva. They obtained a value of 1435 m/s. After the outbreak of World War I, the pace of work on the construction of sonar systems increased.

The first active sonar ideas and patents appeared in 1912 after the Titanic tragedy. In that year the English meteorologist Lewis Richardson [9] patented the idea of a sonar device. A similar patent was obtained a year later by German physicist Alexander Behm [2]. The first experimental system was created in 1912. It was built by Canadian physicist Reginald Fessenden working for the American company Submarine Signal Company [10]. In 1914 sea trials were made from the deck of the *Miami* Coast Guard of the United States. Fessenden's oscillator was used to communicate with a submerged submarine, to determine the depth of the sea and to detect the iceberg.

During the First World War, sonar systems found numerous uses in warfare. As early as 1915, Russian engineer Constantin Chilowsky and French physicist Paul Langevin designed a transceiver based on piezoelectric crystal quartz. A year later they received an echo from a depth of 200 meters.

In 1917 Langevin built a quartz piezoelectric sounder working at 150 kHz. The design of the sonar

W 1917 roku Langevin zbudował kwarcowy, piezoelektryczny sonar pracujący na częstotliwości 150 kHz. Konstrukcja sonaru okazała się niepraktyczna ze względu na rozmiary kwarcu i zbyt wysokie napięcie pracy. Ostatecznie Langevin zaprojektował sonar działający na częstotliwości 40 kHz a testy przeprowadzone w lutym 1918 roku potwierdziły skuteczność w wykrywaniu okrętów podwodnych [9].

W tym czasie również brytyjscy naukowcy pracowali nad tajnym eksperymentem dotyczącym poszukiwania i wykrywania okrętów podwodnych. Angielskie badania z sonarem pod kierownictwem Roberta Boyle'a rozpoczęto w 1916 roku. Prowadzony przez niego zespół naukowców bazując częściowo na wcześniejszych francuskich eksperymentach zbudował pierwszy praktyczny sonar już w połowie 1917 roku.

Wszystkie prace zespołu Boyle'a otoczone były najwyższą klauzulą tajności. W 1919 r. Francuzi wykonali pomiary batymetryczne metodą akustyczną na głębokości 60 metrów z prędkością 10 węzłów. W 1922 r. zbadali oni miejsce położenia kabla podwodnego z Marsylli do Philippeville w Algierii. Pomiary te niektórzy uważają za pierwszy praktyczny sondaż hydroakustyczny. W latach 1925 i 1927 na pokładzie statku RV *Meteor* niemiecka ekspedycja przeprowadziła pierwsze, wielkoskalowe pomiary batymetryczne z użyciem echosondy jednowiązkowej.

Pod koniec lat trzydziestych ubiegłego stulecia pojawiła się pierwsza generacja echosond z przetwornikami magnetostrykcyjnymi. Echosondy pionowe należały do urządzeń obowiązkowego wyposażenia okrętów wojennych w II wojnie światowej. W okresie tym rozwijała się błyskawicznie technologia pomiarów sonarowych a postęp możliwy był dzięki rosnącej mocy obliczeniowej komputerów oraz wykorzystaniu metod cyfrowego przetwarzania sygnału [11].

Do okresu II wojny światowej zdecydowana większość pomiarów głębokości wykonywana była przy użyciu sondy ręcznej (tzw. ołowianki). Rozwój technik pomiarowych spowodował, że coraz bardziej dostępne stały się klasyczne echosondy hydrograficzne, co pozytywnie wpływało na ilość danych hydrograficznych, dokładność map morskich oraz bezpieczeństwo żeglugi [12]. W latach pięćdziesiątych udoskonalono technologię produkcji przetworników oraz zwiększono dokładność pomiaru czasu przebiegu sygnału akustycznego. Pojawiły się precyzyjne sondy i rejestratory głębokości PDR (ang. *precision depth sounders and recorder*) z wiązkami o szerokości 30º-60º [13].

Urządzenia PDR umożliwiały wykrycie jedynie wielkoskalowej rzeźby dna. W celu uzyskania wyższej rozdzielczości podjęto próby zmniejszenia szerokości wiązki nadawczej, co dało początek echosondom z wąską wiązką 2º-5º i mechaniczną stabilizacją przechyłów bocznych. Systemy te stały się w pełni operacyjne wraz z wynalezieniem i wprowadzeniem w latach sześćdziesiątych techniki elektronicznej stabilizacji wiązek.

WYNALEZIENIE SONDY WIELOWIĄZKOWEJ

Pierwsze modele echosond wielowiązkowych, jako tajny projekt marynarki wojennej pojawiły się już w latach sześćdziesiątych XX wieku [14].

proved to be impractical due to the size of the quartz and too high operating voltage. Ultimately, Langevin designed a sounder operating at 40 kHz and tests conducted in February 1918 confirmed the effectiveness of the submarines detection [9].

During this time, British scientists also worked on a secret experiment on the search and detection of submarines. English research with sonar under Robert Boyle began in 1916. His team of researchers, based partly on earlier French experiments, built the first practical sonar in mid-1917.

All of Boyle's teams' work was bound by the highest security classification. In 1919 the French made bathymetric measurements at a depth of 60 meters at a speed of 10 knots. In 1922 they investigated the location of the submarine cable from Marseille to Philippeville in Algeria. These measurements are considered by some to be the first practical hydro acoustic survey. In the years 1925 and 1927, on board the RV *Meteor*, the German expedition carried out the first large-scale bathymetric measurements using a single-beam echosounder (SBES).

At the end of the thirties of the last century, the first generation of echo sounders with magnetostrictive transducers appeared and were part of the equipment required for warships in World War II. During this period, sonar technology was rapidly developed and progress was made possible by the increasing computing power of computers and the use of digital signal processing [11].

Until World War II, the vast majority of depth measurements were made using a hand-held sounder (so-called leadline). The development of measurement techniques has made the classic hydrographic echosounders more and more popular, which has contributed to the amount of survey data, the accuracy of sea charts and the safety of navigation [12]. In the 1950s, the transducer manufacturing technology was improved and the acoustic signal time accuracy was increased. Accurate sounders and precision depth sounders and recorder (PDR) appeared with the beam width of 30º-60º [13].

These systems became fully operational with the invention and introduction of electronic beam stabilization in the 1960s.

THE INVENTION OF THE MULTI-BEAM ECHOSOUNDER

The first models of multi-beam echosounder, as a secret navy project, appeared in the 1960s [14]. General Instruments Corporation patented the depth measurement technique with not a single but several narrow beams. That's how the Sonar Array Sounding System was created (SASS) [2]. On the commercial market, this echo beam was only available in the late 1970s [15].

The oceanographer Morris Glenn presented the first information and data about multi-beam echosounder in [16]. Glenn has characterized the Multi-Beam Array Sonar Survey System. This system was operated then by the US Naval Oceanographic Office and at that time it was a revolutionary solution. The sounder has 16 acoustic beams formed in an angular sector of 90° with the ability to measure 60 depth values in one pulse. The SASS system was originally installed on an Australian *Cook* research vessel.

The need for full survey data coverage forced

Przedsiębiorstwo General Instruments Corporation opatentowało technikę pomiaru głębokości za pomocą nie jednej lecz kilku wąskich wiązek akustycznych. Tak powstał system o nazwie Sonar Array Sounding System (ang. SASS) [2]. Na rynku komercyjnym echosonda ta dostępna była dopiero pod koniec lat siedemdziesiątych [15].

Pierwsze informacje i dane o echosondzie wielowiązkowej oceanograf Morris Glenn zaprezentował w [16]. Glenn scharakteryzował system wielowiązkowy o nazwie Multi-Beam Array Sonar Survey System. System ten był eksploatowany wówczas przez Biuro Oceanograficzne Marynarki Wojennej Stanów Zjednoczonych (US Naval Oceanographic Office) i na ówczesne czasy stanowił rewolucyjne rozwiązanie. Echosonda dysponowała 16 wiązkami akustycznymi formowanymi w sektorze kątowym 90º z możliwością pomiaru 60 wartości głębokości w jednym impulsie. System SASS pierwotnie został zainstalowany na australijskim statku badawczym *Cook*.

Potrzeba pełnego pokrycia pomiarami akwenu zmuszała badaczy do stosowania nowych technik pomiarowych. Naukowcy byli zainteresowani nie tylko głębokościami pod kadłubem statku ale także w pewnej odległości bocznej od niego. Stąd opracowano koncepcję wykonywania pomiarów na równoległych liniach profilowych a pojedyncze przetworniki echosond jednowiązkowych zamontowano na długim wysięgniku [17].

Sposób ten używany był głównie w badaniach dna jezior a na otwartym morzu, przy niewielkim falowaniu był całkowicie niepraktyczny. Podobny sposób pomiaru głębokości z wykorzystaniem pływaków holowanych został opisany w [18]. Bardziej zaawansowana metoda równoległego sondowania została przedstawiona w [19].

W latach sześćdziesiątych Szwedzki Departament Hydrograficzny opracował nową metodę pomiarów hydrograficznych. Zamiast jednego statku sformowano szyk kilku jednostek nawigujących i mierzących głębokości wzdłuż równoległych linii pomiarowych. Szyk składał się z jednostki-matki, której pozycja określana była przez stacje brzegowe oraz łodzi towarzyszących pozycjonowanych ze statku-matki.

Pierwsza echosonda wielowiązkowa przeznaczona do pomiarów na akwenach płytkowodnych została scharakteryzowana w [20].

System o nazwie *Bo'sun* Multi-Beam Sonar System i powstał w odpowiedzi na zwiększoną liczbę supertankowców podróżujących przez płytkie kanały, cieśniny i akweny portowe. System pomiarowy tworzyły przetwornik, katamaran, konsola, rejestrator danych, kompas cyfrowy, taśma magnetyczna, czujniki przechyłów wzdłużnych i poprzecznych. Echosonda formowała 21 wiązek akustycznych w sektorze kątowym 105º co zapewniało pokrycie pomiarami w pasie o szerokości równej 2.6 razy średnia głębokość. Częstotliwość operacyjna sygnału akustycznego wynosiła 36 kHz a maksymalna głębokość jaką można było zmierzyć sięgała 800 m. Czujniki przechyłów poprzecznych i wzdłużnych oraz przetwornik zainstalowano na katamaranie, w celu uniknięcia konieczności instalacji na stałe w kadłubie statku (rys. 2). Jedną z niedoskonałości echosondy był brak wystarczającej mocy obliczeniowej. Dane pomiarowe były rejestrowane na taśmach magnetycznych w formacie kompatybilnym ze stacjami komputerowymi.

researchers to use new measurement techniques. Scientists were interested not only in the depths beneath the ship's hull but also some distance from it. Hence, the concept of measuring on parallel profile lines was developed, and single-beam echosounder transducers were mounted on a long boom [17].

This method was mainly used in the study of the bottom of the lake and in the open sea; but with a slight undulation it was completely impractical. A similar method of depth measurement using towed echosounders is described in [18]. A more advanced parallel sounding method is presented in [19].

In the 1960s, the Swedish Hydrographic Department developed a new hydrographic method. Instead of one unit, an array of several vessels measuring depths along parallel survey lines was formed. The array consisted of a mother-unit whose position was determined by the shore stations and accompanying boats positioned from the mother ship.

The first multi-beam echosounder (MBES) designed for measurements on shallow waters has been characterized in [20].

The system, called *Bo'sun* Multi-Beam Sonar System, was created in response to the increased number of super-tankers travelling through shallow channels, straits and port waters. The measuring system was a transducer, catamaran, console, data recorder, digital compass, magnetic tape, pitch and roll sensors. The sounder created 21 acoustic beams in the 105º angular sector, providing coverage of 2.6 times the water depth. The operating frequency was 36 kHz and the maximum depth that could be measured was 800 m. Pitch and roll sensors and transducers were installed on the catamaran (figure 2). One of the failures of the echosounder was the lack of sufficient computing power. Measurement data was recorded on magnetic tapes in a format compatible with computer stations. Experiments gathered in the first sea trials with the use of the Bo'sun echo sounder was presented by McCaffrey in [21].

Doświadczenia zebrane podczas pierwszych testów morskich z użyciem echsondy *Bo'sun* przedstawił McCaffrey w [21].

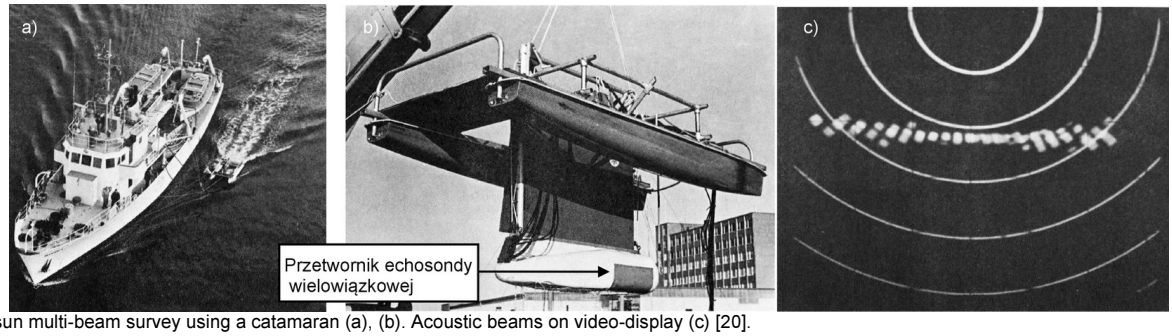

Fig. 2 Bo'sun multi-beam survey using a catamaran (a), (b). Acoustic beams on video-display (c) [20].

Rys. 2 Pomiary systemem wielowiązkowym Bo'sun z użyciem katamaranu (a), (b). Zobrazowanie wiązek na video-wyświetlaczu (c) [20].

Na początku lat siedemdziesiątych w sektorze publicznym pojawiły się echosondy wielowiązkowe przeznaczone do pomiarów głębokowodnych. Pierwszym takim systemem skonstruowanym przez General Instrument Corporation (ang. GIC) była echosonda *Sea Beam*, którą testowano w 1977 roku na pokładzie statku *Jean Charcot* (rys. 3). Opis techniczny echosondy przedstawiono w [22]. Echosonda formowała 16 wiązek tworzących wachlarz o szerokości kątowej około 90º [8]. Częstotliwość sygnału akustycznego wynosiła 12 kHz.

W tym czasie intensywnie pracowano nad techniką elektronicznego sterowania wiązkami, algorytmami detekcji dna, trajektorią przebiegu sygnału akustycznego. Sporym osiągnięciem technologicznym było wprowadzenie systemu GPS (ang. Global Positioning System), który zapewniał określanie pozycji z dokładnością kilku metrów.

In the early 1970s, deep-water multi-beam echosounders appeared in the public sector. The first such system constructed by General Instrument Corporation (GIC) was the *Sea Beam* echosounder, which was tested in 1977 aboard the ship *Jean Charcot* (fig. 3). The technical description of the echosounder is shown in [22]. The echosounder generated 16 beams forming an angle of about 90° [8]. The acoustic signal frequency was 12 kHz.

During this time intensive work was done on electronic beam steering, bottom detection algorithms and the acoustic ray trajectory. The introduction of a GPS system (Global Positioning System) was a great achievement, which provided the positioning accuracy of a few meters.

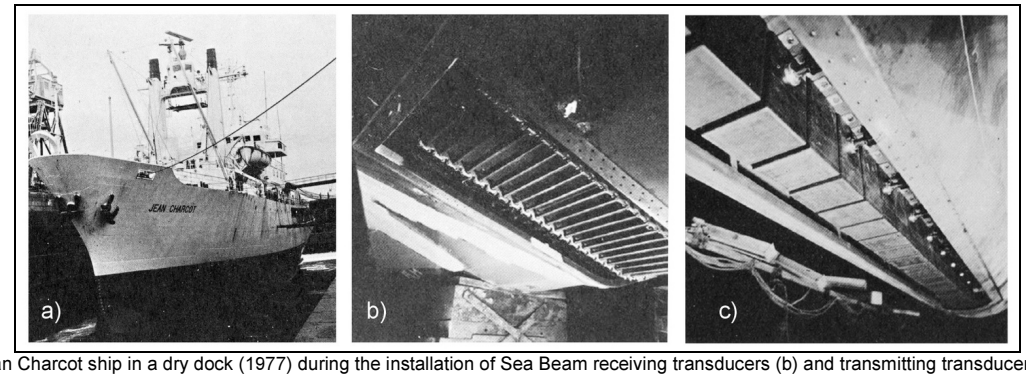

Fig. 3 Jean Charcot ship in a dry dock (1977) during the installation of Sea Beam receiving transducers (b) and transmitting transducers (c) [22].

Rys. 3 Statek *Jean Charcot* w suchym doku w Breście (1977 r.) podczas montażu przetworników odbiorczych Sea Beam (b) i nadawczych (c) [22].

W 1981 roku pierwszy statek niemiecki badawczy *Sonne* został wyposażony w system *Sea Beam*. Rok później zbudowano nową niemiecką jednostkę badawczą *Polarstern* przeznaczoną do wykonywania badania w nieznanych regionach polarnych świata. W tym celu *Polarstern* został wyposażony w echosondę *Sea Beam* zdolną do pomiaru głębokości 12 000 metrów.

W latach 1984-1986 przedsiębiorstwo Krupp Atlas Elektronik w Bremen stworzyło nowy batymetryczny system pomiarowy *Hydrosweep* wykorzystywany na akwenach głębokowodnych. Echosonda wielowiązkowa *Hydrosweep* zainstalowana

In 1981, the first German research vessel *Sonne* was equipped with the *Sea Beam* system. A year later a new German *Polarstern* research unit was built to perform research in unknown polar regions of the world. For this purpose *Polarstern* was equipped with a *Sea Beam* sonar capable of measuring depths of 12,000 meters.

Between1984-1986, Krupp Atlas Elektronik in Bremen created the new *Hydrosweep* bathymetric measurement system for use in deep water. The *Hydrosweep* multi-beam echosounder was initially installed on the new German research vessel called

została początkowo na nowym niemieckim statku badawczym *Meteor*. *Hydrosweep* wykorzystywała 59 wiązek akustycznych pracujących w sektorze 90º mierzących głębokości w pasie dna o szerokości odpowiadającej dwóm średnim głębokościom. W 1989 roku na pokładzie statku badawczego *Polarstern* zainstalowano nowy system *Hydrosweep* posiadający zabezpieczenia przeciwlodowe, ochraniające aktywne elementy głowic pomiarowych. W 1993 i 1994 roku system zmodernizowano uzyskując wachlarz wiązek, z regulowanym sektorem roboczym 90º/120º uzależnionym od głębokości akwenu.

Dzisiejsze systemy zdecydowanie różnią się od tych prototypowych systemów *SASS* i *Sea Beam*. Od lat dziewięćdziesiątych obserwujemy wzrost liczby sprzedanych systemów wielowiązkowych, szczególnie tych dedykowanych na akweny płytkowodne. Technologia echosondy wielowiązkowej jest systematycznie udoskonalana.

Prace rozwojowe obejmują między innymi czujniki przechyłów statku, zwiększenie mocy obliczeniowej komputerów oraz doskonalenie metod wizualizacji danych batymetrycznych. Pojawiają się echosondy pracujące z wyższą częstotliwością sygnału, cechujące się bardzo wąskimi wiązkami np. 0,4º x 0,7º (Kongsberg EM 2040) czy 0,5º x 1º (Teledyne RESON SeaBat 7125).

Od 1990 lat echosondy wielowiązkowe były powszechnie wykorzystywane w badaniach geologicznych i oceanograficznych, w przemyśle wydobywczym oraz operacjach układania kabli i rurociągów podwodnych. Wraz ze spadkiem cen jednostkowych komponentów echosondy wielowiązkowej znacząco wzrosła liczba sprzedanych modeli.

Współczesne systemy wielowiązkowe dostępne są w wersji mobilnej, co pozwala na montaż na małych kutrach i motorówkach portowych oraz autonomicznych pojazdach podwodnych. Systemy te pracują z modulacją częstotliwości, mogą wykorzystywać opcję *dual swath* zapewniającą większą gęstość danych w kierunku ruchu przy większej prędkości sondażowej, mają pełną stabilizację przechyłów wzdłużnych, bocznych i zmian kierunku. Technologia *chirp* umożliwiła zwiększenie zasięgu działania echosondy i rozdzielczości pomiaru, a długości impulsu uległy skróceniu do 25 mikrosekund.

PODSUMOWANIE

Echosondy wielowiązkowe od ponad czterdziestu lat wykorzystywane są w badaniach dna na potrzeby kartografii morskiej, bezpieczeństwa żeglugi, wsparcia działań marynarki wojennej czy rozwoju nauki. Wraz z poprawą rozdzielczości i zdolności pomiarowych tych systemów pojawiły się nowe obszary, w których urządzenia MBES stanowią nieocenioną pomoc.

Wśród nich wymienić należy poszukiwanie i wydobywanie naturalnych złóż, rybołówstwo, inżynieria morska czy archeologia podwodna. Dziś w zależności od przeznaczenia produkowane są echosondy wielowiązkowe niskiej częstotliwości (12 kHz – 50 kHz), średniej częstotliwości (70 kHz-150 kHz) oraz wysokiej częstotliwości (powyżej 200 kHz). Największe głębie naszej planety (>11000 m) badane są za pomocą echosond z przetwornikami o długości 8 metrów i częstotliwości 12 kHz. Są to ciężkie przetworniki instalowane zasadniczo na dużych, oceanicznych statkach

Meteor. In 1989, a new *Hydrosweep* system with anti-ice protection was installed on board the *Polarstern* research vessel, protecting the active elements of the sonar heads. In 1993 and 1994, the system was upgraded andadjustable swath angle of 90º / 120º was achieved.

Today's systems are definitely different from the prototype *SASS* and *Sea Beam* systems. Since the nineties we have seen an increase in the number of multi-beam systems sold, especially those dedicated to shallow water. The multi-beam sonar technology is systematically enhanced.

Development work includes, among other things, ship pitch sensors, increased computing power and improved visualization methods for bathymetric data. There are echosounders working at higher signal frequencies, with very narrow beams, e.g. 0,4º x 0,7º (Kongsberg EM 2040) or 0,5º x 1º (Teledyne RESON SeaBat 7125).

Since 1990, multi-beam echoes have been used extensively in geological and oceanographic studies, in the extractive industry and cable and submarine pipeline operations. With the drop in unit price of multi-beam echosounder components, the number of models sold has increased significantly.

Modern multi-beam systems are available in the mobile version, which allows for assembly on small boats and motorboats as well as autonomous underwater vessels. These systems work with frequency modulation, they can use the *dual swath* option to provide longitudinal higher data density at higher survey speed, have full pitch, roll and yaw stabilization. *Chirp* technology has enabled the sonar range and measurement resolution to increase, and the pulse length has been reduced to 25 microseconds.

SUMMARY

Multi-beam echosounders has been used for more than forty years in hydrographic survey for marine cartography, shipping safety, navy support, and science development. With the improved resolution and measurement capabilities of these systems, new areas have emerged, where MBES devices are an invaluable aid.

These include the exploration and extraction of natural resources, fisheries, maritime engineering or underwater archaeology. Today, depending on the designation, low frequency MBES (12 kHz - 50 kHz); medium frequency MBES (70 kHz-150 kHz) and high frequencies MBES (above 200 kHz) are produced. The deepest depths of our planet (> 11000 m) are tested by an echosounder with 8 m and 12 kHz transducers. These are heavy transducers installed on essentially large ocean research vessels.

Within the limits of the continental shelf, to the depth of 200 meters, multi-beam echosounders were the largest applications operating in the 70 kHz-200 kHz band. In shallow and very shallow waters (up to a few meters deep), the systems that use signals of 300 kHz to 400 kHz are most effective. These small-size echosounders can be installed on remotely operated vehicle (ROV) and autonomous underwater vehicle (AUV).

Currently, the commercial market offers multi-frequency MBES which are able to operate on different ranges [23]. In these systems, the nominal frequencies of acoustic signals are most commonly used at 200 kHz, 300

badawczych.

W granicach szelfu kontynentalnego, do głębokości 200 metrów największe zastosowanie znalazły echosondy wielowiązkowe pracujące w paśmie 70 kHz-200 kHz. Na akwenach płytkowodnych i wodach bardzo płytkich (do kilku metrów głębokości) najskuteczniejsze są systemy wykorzystujące sygnały o częstotliwościach 300 kHz-400 kHz. Echosondy te dzięki niewielkim gabarytom mogą być instalowane na pojazdach podwodnych ROV i AUV.

Obecnie rynek komercyjny oferuje sondy MBES wieloczęstotliwościowe (ang. *multi-frequency*) zdolne do pracy na różnych zasięgach [23]. W systemach tych najczęściej stosowane są nominalne częstotliwości sygnałów akustycznych 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz (450 kHz). Spotkać również można modele sond wielowiązkowych operujące z częstotliwościami 700 kHz.

kHz, 400 kHz (450 kHz). One can also find models operating at 700 kHz frequencies. The great utility of the multibeam echosounder is that it provides both bathymetric and acoustic data in a swath image format over a large area of the seafloor in a relatively short period of time. The major advantages over the single-beam echo sounding techniques are that they provide more than a hundred of depth measurements in one pulse and as a result 100% survey coverage can be achieved.

REFERENCES

1. Vilming S., The Development of the Multibeam Echosounder: A Historical Account, The Journal of the Acoustical Society of America 103(5), January 1998 s. 1637;
2. M. Jacops, Analyses of high resolution bathymetric data in the Eltanin impact area, Master thesis, Bremerhaven, January 2002, s. 17, [on-line] http://epic.awi.de/22883/1/Jac2002j.pdf (dostęp 25.10.2015);
3. Grządziel A., Pomiary batymetryczne – dawniej i dziś, Przegląd Morski nr 4, Gdynia 2004;
4. Grządziel A., Echosonda jednowiązkowa w pomiarach hydrograficznych, Przegląd Morski nr 4, DMW Gdynia, 2006.
5. NOAA's Historic Coast & Geodetic Survey (C&GS) Collection, NOAA Central Library, [on-line], http://www.photolib.noaa.gov/htmls/theb0914.htm, (dostęp 15.05.2017);
6. Littlehales G.W., How the Sea is Sounded, Popular Science Monthly, Vol. 44, January 1894, [on-line];
7. https://en.wikisource.org/wiki/Popular_Science_Monthly/Volume_44/January_1894/How_the_Sea_Is_Sounded, (dostęp 15.11.2017);
8. www.submerged.co.uk/kelvins-machine.php [on-line, dostęp 19.09.2016];
9. Cpt. Field A. M., Report on the Suitability and Capabilities of Palmyra and Fanning Islands as Submarine Cable Stations, Hydrographic Department, London: December 1897, [on-line], http://atlantic-cable.com/Cables/1902PacificGB/, (dostęp 14.12.2016);
10. Hartcup G., The war of invention: scientific developments, 1914-18. London: Brassey's Defence Publishers, 1988;
11. Swerpel S., Mowa Oceanu, „Wiedza i Życie" 8 (968), sierpień 2015, s. 34-37;
12. Ranade G., Impact of bathymetric system advances on hydrography, National Institute of Oceanography, Impact of Technology in the Field of Hydrography and Maximising Returns for Maritime Safety and Nation Building, National Seminar 21-22 June 2007, Goa, 88-96p, [on-line] http://drs.nio.org/drs/bitstream/handle/2264/696/Impact_Technnol_Proc_21-22_Jun_2007_Goa.pdf?sequence=2&isAllowed=y (dostęp: 27.10.2015);
13. Mayer L.A., Paton M., Gee L., Gardner S.V., Ware C., Interactive 3-D visualization: a tool for seafloor navigation, exploration and engineering, in OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, vol.2, 2000, pp.913-9192;
14. Moustier Ch.d., State of the art in swath bathymetry survey systems, International Hydrographic Review, Monaco, LXV(2), July 1988, pp. 25-54;
15. IMCA, Guidelines for the Multibeam Echosounders for Offshore Surveys, S 003 Rev. 2, July 2015;
16. Nair R.R., Chakraborty B., Study of multibeam techniques for bathymetry and seabottom backscatter applications, Journal of Marine and Atmospheric Research, Vol.1, 1997, pp. 17-24;
17. Morris G.F., Introducing an Operational Multi-Beam Array Sonar, International Hydrographic Review 47 (1), Vol. XLVII, No. 1, Monaco, 1970, pp. 35-39;
18. Fahrentholz S., Systeme D'echographes Pour Leves De Chenaux, International Hydrographic Review, Vol. XL, No. 1, Monaco, 1963, pp. 28-27;
19. Engelmann I., Towed Echosounders for Parallel Sounding, International Hydrographic Review 44(2), Vol. XLIV, No. 2, Monaco, 1967, pp. 7-10;
20. Stenborg E., The Swedish Parallel Sounding Method State of the Art, International Hydrographic Review 64 (1), Vol. LXIV, No. 1, Monaco, 1987, pp. 7-14;
21. Burke R., Robson J., An Evaluation of the BO'SUN Multi-Beam Sonar System, International Hydrographic Review 52 (2), Vol. LII, No. 2, Monaco, 1975, pp.53-69;
22. McCaffrey E.K., A Review of the Bathymetric Swath Survey System, International Hydrographic Review 58 (1), Vol. LVIII, No. 1, Monaco, 1981, pp. 19-27;
23. Renard V., Allenou J.P., Sea Beam Multi-Beam Echo-Sounding in "Jean Charcot" - Description, Evaluation and First Results, International Hydrographic Review 56 (1), Vol. LVI, No. 1, Monaco, 1979, pp. 35-67;
24. Lurton X., Modelling of the sound field radiated by multibeam echosounders for acoustical impact assessment, Applied Acoustics, Volume 101, 1 January 2016, pp. 201-221, ISSN 0003-682X, http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2015.07.012.

mgr Artur Grządziel
Akademia Marynarki Wojennej w Gdyni
Wydział Nawigacji i Uzbrojenia Okrętowego
81-127 Gdynia
ul. Śmidowicza 69
e-mail: a.grzadziel@amw.gdynia.pl