

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087

SPECIAL NAVIGATIONAL SUPPORT AND ACCURACY OF BATHYMETRIC SURVEYS FOR DEEP-SEA MARINE GEOLOGICAL INVESTIGATIONS

Yu. G. Firsov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

The current situation regarding the technical and methodical possibilities for sea bottom relief surveys aimed to support marine exploration work for hard-rock deposits investigations is examined in the study. The objective of this research is to analyse the accuracy of seafloor digital terrain models, created using modern technologies for deep sea bathymetric investigations with a multibeam echosounder. The alternatives of installing a multibeam echosounder on board of a scientific research vessel and underwater vehicles are discussed. A short historical retrospective overview of deep water seafloor relief investigations is presented. The new era for deep water precise bathymetric investigations came at the end of 20th century with the advent of the GPS system, multibeam echosounders, GIS and unmanned underwater vehicles. Marine exploration for prospecting deep-sea polymetallic sulfides produces the most strict requirements for their navigational support and bathymetric investigation accuracy. Special navigational support tasks and bathymetric surveys for deep-sea polymetallic sulfides study are discussed. The results of detailed sea bottom relief surveys using multibeam echosounders installed on remotely operated vehicles and autonomous operated vehicles are provided. New innovative technology using the acoustic navigation system with a long base line (Ramses) tightly coupled with an iXblue inertial navigation system (PHINS) on an Autonomous Underwater Vehicle is discussed. Such a system named "Sparse LBL system" reduces the number of transponders compared to other LBL systems. The information and recommendations on navigational support and detailed bathymetric surveys for marine geological investigations which can be useful for the Russian practice of deep-sea polymetallic sulfides investigations are also offered in the study.

Keywords: navigation support for the deep sea survey, bathymetric survey, multibeam echosounder, marine exploration work for hard-rock deposits, remotely operated vehicle, autonomous operated vehicle, technology and quality of sea floor investigations, deep-sea polymetallic sulfides.

For citation:

Firsov, Yury G. "Special navigational support and accuracy of bathymetric surveys for deep-sea marine geological investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.

УДК 910.27

СПЕЦИАЛЬНОЕ НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ТОЧНОСТЬ БАТИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГЛУБОКОВОДНЫХ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ РАБОТ

Ю. Г. Фирсов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе рассматриваются текущее состояние технологических и методических возможностей детального изучения подводного рельефа в целях обеспечения глубоководных морских геолого-разведочных работ. Задачами исследования является анализ точности создания цифровых моделей рельефа с использованием современных технологий съемки на больших глубинах с помощью многолучевых эхолотов. Рассматриваются варианты съемки рельефа дна при установке многолучевых эхолотов на надводном судне, а также на подводных аппаратах. Основным методом решения задач является анализ опубликованной информации по технологиям съемки рельефа на больших глубинах в целях обеспечения глубоководных мор-

ских геолого-разведочных работ. Кратко рассматривается историческая ретроспектива батиметрического изучения Мирового океана. Отмечается, что только во второй половине XX в. начали применять средства и методы для точного изучения подводного рельефа с поверхности моря. В этот период появились новые задачи, потребовавшие детального изучения рельефа дна на больших глубинах, связанные с первыми попытками проведения геологоразведочных работ на твердые полезные ископаемые дна Мирового океана. В 60–80 гг. XX в. проведение таких работ было существенно ограничено возможностями навигационного и батиметрического обеспечения и ситуация изменилась только в 90-х гг. XX в. с появлением глобальных навигационных спутниковых систем, многолучевых эхолотов, геоинформационных технологий, а также подводных роботов. В качестве примера наиболее строгих требований к навигационному и батиметрическому обеспечению приводятся морские геологоразведочные работы на глубоководные полиметаллические сульфиды, приуроченные к срединным океаническим хребтам и переходным зонам. Приведены точностные параметры съемки рельефа с поверхности моря, а также при использовании телеуправляемых необитаемых и автономных подводных аппаратов. На основе зарубежного опыта рассмотрены преимущества и недостатки проведения батиметрической съемки с использованием многолучевых эхолотов, устанавливаемых на телеуправляемых необитаемых подводных аппаратах и автономных необитаемых подводных аппаратах. Рассматривается инновационная технология использования подводной навигации с длинной базой при условии размещения на автономном необитаемом подводном аппарате интеллектуальной акустической системы RAMSES, интегрированной с инерциальной навигационной системой PHINS фирмы IxBlue с размещением на морском дне только одного специального маяка-ответчика CONOPUS. Даны рекомендации по использованию технологий навигационного обеспечения и детальной батиметрической съемки в целях проведения геологоразведочных работ на глубоководные полиметаллические сульфиды, которые могут быть полезны для российской практики проведения подобных работ.

Ключевые слова: навигационное обеспечение съемки рельефа дна, многолучевые эхолоты, морские геологоразведочные работы, твердые полезные ископаемые, телеуправляемые необитаемые подводные аппараты, автономные необитаемые подводные аппараты глубоководные полиметаллические сульфиды.

Для цитирования:

Фирсов Ю. Г. Специальное навигационное обеспечение и точность батиметрической съемки для решения задач глубоководных геологоразведочных работ / Ю. Г. Фирсов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1070–1087. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1070-1087.

Введение (Introduction)

Более 70,8 % поверхности Земного шара покрыто водной и скрыто от визуальных наблюдений, описаний и измерений. Рельеф дна отдельных глубоководных районов Мирового океана до сих пор остается мало изученным. На рубеже XVII и XVIII вв. сформировалась прикладная наука «гидрография», которую в первую очередь интересовали вопросы картирования береговой линии, прибрежного рельефа и главным образом навигационных опасностей, т. е. информация, необходимая для обеспечения безопасности мореплавания. Согласно базовому определению: «Морская гидрографии — наука, изучающая рельеф и грунт морского дна в интересах мореплавания и использования природных ресурсов»¹. Изучение ресурсов Мирового океана стало особенно актуальным в конце XX в., решение этой задачи невозможно без детальной информации о рельефе, получаемой в результате батиметрической съемки. Батиметрия — существенная составная часть гидрографии — связана с наиболее детальным познанием подводного микрорельефа.

Исторически наметились два основных направления в изучении рельефа Мирового океана: гидрографическое и океанографическое. Оба из них занимаются изучением одного и того же объекта — рельефа дна, но имеют различные цели, решают разные задачи, используют особые методы работ и способы обобщения данных.

Главной особенностью подводного рельефа является сложность строения и многообразие форм и поверхностей, во многом отличающихся от наземного рельефа обликом, происхождением, расположением в пространстве и структурными соотношениями. В рельефе дна отражено взаимодействие эндогенных и экзогенных процессов, происходящих в этих средах и состоящих в обмене

¹ ГОСТ 23634–83. Морская навигация и морская гидрография. Термины и определения. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1984. 13 с.

веществом и энергией [1], [2]. Данные о глубинах и формах рельефа дна явились опорными при интерпретации геолого-геофизических полей и многих океанологических параметров.

Современные исследования подводного рельефа связаны с использованием звука для измерения глубин и реализованные в однолучевых эхолотах (ОЛЭ). В исследовательских целях ОЛЭ впервые был использован в экспедиции на немецком научно-исследовательском судне (НИС) «Метеор» (1925–1927) в Атлантическом океане. Сразу была обнаружена расчлененность Срединно-Атлантического хребта, уточнены его контуры, определены очертания Капской и Ангольской котловин и впервые выявлены подводные горы. Эхолоты-самописцы, регистрирующие непрерывный профиль дна, появились в 40-х гг. XX в. и исследования перешли на качественно новый уровень — от изучения глубин к изучению форм рельефа. Профили дна дали представление об очертаниях и расчлененности форм рельефа, позволили получить глубину любой характерной точки профиля: вершины, подошвы, перегиба склона, отразив сложность строения подводного рельефа, разнообразие форм, характер границ, выявили типы и поверхностей. Оказалось, что плоские абиссальные равнины чередуются с холмистыми поверхностями, множество гор в одиночку, группами и цепями располагаются в пределах всех структур.

Отечественная батиметрическая съемка на больших глубинах в виде океанского промера началась после Второй мировой войны и была направлена главным образом на решение задач обороны страны. Съемки рельефа дна в научных целях в составе океанографических экспедиций, выполнявшихся организациями Академии наук (АН) СССР, а позднее, в 80-е гг. XX в., Министерством геологии СССР, осуществляются и теперь экспедициями Министерства природных ресурсов Российской Федерации (РФ). Первоначально батиметрические съемки на больших глубинах выполнялись исключительно с использованием ОЛЭ с широкой диаграммой направленности (угол луча до 15°), что не позволяло получать детальную информацию о топографии океанского дна. В этот период оформился геолого-геофизический комплекс исследований, включающий съемку рельефа дна ОЛЭ, фотографирование и телесъемку дна, непрерывное сейсмическое профилирование, гравитационные и магнитометрические измерения, а также геологическое опробование [3]. Комплексная интерпретация данных позволила определить характер и направленность рельефообразующих процессов и генезис форм рельефа дна. С начала 70-х гг. XX в. спутниковые радионавигационные системы (СРНС) уже позволяли определять координаты судов на всей площади Мирового океана с точностью в несколько сотен метров, а в 90-е гг. XX в. с вводом в действие глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) GPS/ГЛОНАСС вопрос высокоточного позиционирования на поверхности моря был окончательно решен.

В 80-е гг. XX в. отечественные НИС АН начали оснащаться МЛЭ с узкими лучами. При этом детальность и производительность изучения рельефа дна на больших глубинах радикально повысилась. В течение непродолжительного периода времени было обнаружено множество форм рельефа различного облика и размера, определены характерные черты их морфологии и закономерности расположения, выявлена общая орографическая схема строения дна Мирового океана и установлен характер связи рельефа дна с основными геолого-геофизическими и другими полями океана. В этот период были завершены открытия и исследования краевых глубоководных желобов, которые начали проводиться в конце XIX в. В Мировом океане насчитывается 37 таких желобов (больше всего в Тихом океане), максимальные глубины которых определены. Подводные горы представляют одну из характерных и широко распространенных форм рельефа. Горы найдены во всех морфологических провинциях дна Мирового океана: в котловинах, на хребтах и поднятиях, где они образуют цепи и группы, а также встречаются отдельно. Площади холмистых участков дна особенно велики в Тихом океане, где выделено несколько типов холмов. На дне котловин обнаружены подводные долины, по протяженности и сложности сопоставимые с крупными речными системами суши. Все эти достижения были бы невозможны без международного сотрудничества в вопросах изучения рельефа дна, которое началось с создания Генеральной международной батиметрической карты океанов — ГЕБКО.

В XXI в. ГЕБКО стала ведущей программой международного картографирования океанского дна. В 2003 г. вышло 6-е издание карты рельефа дна Мирового океана в виде электронного Атласа ГЕБКО, которое ознаменовало переход от ручного составления батиметрических карт к цифровым моделям рельефа (ЦМР). В 2009 г. была представлена новая ЦМР с размером ячейки 30 дуговых секунд с наименованием «GEBCO-08», а в 2015 г. проект был актуализирован с наименованием «GEBCO-2014», детальное описание которого представлено в работе [4]. Батиметрическая модель «GEBCO-2019» является новой реализацией «GEBCO-14» с размером ячейки 15 дуговых секунд и включает также ряд новых региональных батиметрических моделей¹.

В настоящее время (2019 г.) ведется работа над новым проектом «GEBCO Seabed 2030», имеющим целью создать к 2030 г. детальную батиметрическую модель Мирового океана с регулярной сеткой 100 м на основе использования новых гидрографических технологий. Подробности об этом проекте можно найти на сайте².

Основная часть (Main Part)

В конце 80-х гг. XX в. с появления ГНСС, персональных компьютеров и геоинформационных технологий, а также МЛЭ, осуществляющих площадную съемку дна с НИС, картографирование подводного рельефа перешло на качественно новый уровень. МЛЭ являются составной частью аппаратно-программных комплексов, вычисляющих глубины и их координаты на дне с использованием системы гидроакустических лучей [5]. Данные обрабатываются по ходу съемки и могут быть представлены в цифровой и графической форме в масштабе реального времени. Обработка съемки и построение карт происходят непосредственно в экспедициях. Точность измерения глубин на плоском дне составляет 0,1 %, уменьшаясь на расчлененных участках до 0,25 % от глубины. В комплексе МЛЭ используется специализированное программное обеспечение для сбора, визуализации и контроля поступающих данных в реальном времени, а также постобработки данных и построения карт. Затем, на основании полученных измерений путем интерполяции отметок глубин, рассчитываются значения глубин в узлах регулярной сетки (грид). При этом формируется ЦМР, позволяющая создавать двухмерные (2D) и трехмерные (3D) виртуальные изображения рельефа дна на экране компьютера с использованием специального программного обеспечения. Судовой комплекс на базе МЛЭ позволяет в ходе экспедиции видеть изображения рельефа по полю обзора в реальном масштабе времени, а затем в результате окончательной обработки данных съемки переходить к созданию цифровых батиметрических карт.

Современные цифровые батиметрические карты создаются на основе ЦМР с использованием регулярной сетки глубин (грида). Размер ячейки регулярной сетки составляет, как правило, 0,2 % глубины [6]. Таким образом, при съемке с поверхности моря на глубинах 2000 м для получения детальной модели рельефа размер ячейки не должен превышать 40 м, что позволяет отображать поверхность с сечением 20–40 м и создавать батиметрическую карту в масштабах не крупнее 1 : 50 000. С помощью МЛЭ, установленных на НИС, было выявлено морфологическое разнообразие форм рельефа и сложное строение морфоструктур дна. Удалось обнаружить и отразить на картах формы рельефа, которые было невозможно выявить с помощью обычных ОЛЭ, а именно: скопления грязевых вулканов, крупных гряд, ячеистый характер поверхности дна. На вершинах подводных вулканов обнаружены кратеры сложных очертаний, а на их склонах — многочисленные сателлитные постройки. На дне рифтов были обнаружены кулисообразно расположенные узкие впадины и гряды, а также вулканические постройки. Наиболее сложным оказался рельеф в области пересечения рифтов и разломов, где располагаются определенные комплексы структурных форм рельефа: угловые поднятия, нодальные впадины, приразломные хребты и депрессии.

Возможности изучения малых форм рельефа и типов поверхности дна увеличились с использованием глубоководных обитаемых аппаратов (ГОО). Были выделены типы поверхностей,

¹ GEBCO 2019 Grid. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/gebco_2019/gebco_2019_info.html.

² GEBCO Seabed 2030. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://seabed2030.gebco.net>.

сформированные различными рельефообразующими факторами: вулканические образования в рифтовых долинах, подушечные, шаровые, органые, плиточные типы лавовых покровов, типы коралловых и хемогенных построек на подводных горах, различные типы поверхностей, образованные на дне котловин конкрециями и корками различного состава, бентосными организмами, движением придонных вод. Современные средства батиметрических исследований обеспечивают развитие новых направлений в изучении рельефа дна — подводного ландшафтоведения и морской экологии [7]. С использованием МЛЭ, ГБО на ГОА, а также их установкой на телеуправляемые необитаемые подводные аппараты (ТНПА) и автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) изменилась методика и организация работ. Исследования, как правило, проводят на полигонах. Работа начинается с рекогносцировочной съемки с МЛЭ, сопровождаемой геолого-геофизической съемкой с борта НИС. На основе полученных батиметрических карт масштаба 1: 50 000 намечают область, где дно обследуется с помощью МЛЭ на ТНПА, затем выбирают места визуальных наблюдений и опробований с помощью ГОА и / или ТНПА. В настоящее время очередной исторический период изучения глубоководного рельефа близится к завершению. На смену ему в ближайшие годы придет новый этап, связанный с высокоточным изучением рельефа дна в глобальном масштабе, а также детальным изучением на локальных участках дна в целях разведки и добычи глубоководных твердых полезных ископаемых (ТПИ).

Накопленные мировой наукой, в том числе отечественными геологами, знания о месторождениях минеральных ресурсов Мирового океана позволяют делать выводы об экономической и стратегической актуальности создания в настоящее время морской горнодобывающей отрасли. Ведущие страны мира, такие как Франция, Германия, Япония, КНР, Южной Кореи, Россия и другие, рассматривают доступность к минеральному сырью как важный фактор своего дальнейшего экономического развития. Увеличивающийся в мире дефицит многих видов стратегического минерального сырья, истощение запасов эксплуатируемых месторождений полезных ископаемых и резкое усложнение горно-геологических условий их добычи на континентальной суше заставляют искать нетрадиционные источники и способы добычи минерально-сырьевых ресурсов. Ресурсной базой, способной возместить в недалеком будущем дефицит минерального сырья, являются полезные ископаемые не только континентального шельфа, но и дна глубоководных районов Мирового океана.

Основными видами ТПИ Мирового океана являются: железомарганцевые конкреции (Polymetallic Nodules), кобальтоносные железомарганцевые корки (Ferromanganese Crusts), глубоководные полиметаллические сульфиды (Polymetallic Sulphides). К числу значимых ТПИ океана могут быть также отнесены океанические фосфориты и газогидраты. Последние имеют все основания быть включенными в эту группу, так как залегают в поверхностном слое донных отложений океана в виде льдоподобных твердых агрегатов и в таком виде могут быть обнаружены и подняты на поверхность. Месторождения железомарганцевых конкреций (ЖМК), как правило, приурочены практически ко всем абиссальным структурно-тектоническим зонам Мирового океана в интервале ~1–6 км [8]. Кобальтоносные железомарганцевые корки (КМК), как правило, приурочены к подводным горам вулканического происхождения (чаще всего, к гайотам). Глубина распространения КМК — 1400–1700 м. Область развития КМК приурочена к околовершинным частям склона. В случаях, если вершины подводных гор свободны от осадков, на них также возможно распространение КМК. Распространение глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) связано со срединно-океаническими хребтами (СОХ) и островными дугами на глубинах ~1,5–4,5 км [8].

Права на проведение поиска и разведки, а также добычи в международных районах морского дна предоставляются Международным органом по морскому дну ООН (International Seabed Authority — ISA), представляющим собой организацию, посредством которой государства — участники Конвенции организуют и контролируют деятельность в целях распоряжения ресурсами Района. Международный орган по морскому дну (МОМД) является автономной международной организацией, учрежденной в соответствии с «Конвенцией по морскому

праву 1982 года» Организации Объединенных Наций (ООН). Для проведения глубоководных геологоразведочных работ (ГРР) на морские руды национальная организация должна заключить контракт с МОМД на проведение поисков и разведки соответствующих полезных ископаемых, согласно установленным правилам.

В результате почти сорокалетних планомерных ГРР по поиску ТПИ Россия получила исключительные права на разведку и освоение трех видов океанических полезных ископаемых сроком на 15 лет, в следующих районах: на ЖМК в провинции Кларион-Клиппертон (Тихий океан), на ГПС на Срединно-Атлантический хребте (САХ), а также на КМК в районе Магеллановых гор (Тихий океан). Освоение минеральных ресурсов Мирового океана, создание условий для их разведки и добычи в международных районах морского дна являются одними из долгосрочных задач национальной политики, определенных следующими документами: «Морская доктрина на период до 2020 года» и «Стратегия развития морской деятельности Российской Федерации до 2030 года».

Навигационно-гидрографическое обеспечение (НГО) поиска и разведки глубоководных ТПИ является наиболее технологически сложным видом гидрографических работ, поскольку связано с необходимостью детального изучения рельефа дна и высокоточного определения положения объектов вблизи морского дна на больших глубинах. Главной особенностью НГО поиска и разведки ТПИ является необходимость комплексного использования средств ГНСС и гидроакустических навигационных систем (ГАНС) для позиционирования НИС, ТНПА, АНПА, а также ГАО. Для эффективного проведения поиска и разведки ТПИ и безопасной эксплуатации подводных аппаратов необходима детальная информация о рельефе дна. Другой особенностью НГО поиска и разведки ТПИ является локальность района работ, их сугубо научный характер и уникальность используемых средств и методов. С точки зрения технологии НГО наиболее сложными объектами для изучения рельефа дна, несомненно, являются геолого-тектонически сложные СОХ с их рифтовыми зонами, по сравнению с которыми абиссальные равнины и подводные горы (включая гайоты) имеют более простую морфологию. Исходя из этого в дальнейшем будем рассматривать именно НГО поиска и разведки ГПС на основе зарубежного и российского опыта работы в рифтовых зонах САХ.

Разведочный район, в пределах которого РФ получила исключительное право на ведение разведочных работ на ГПС, расположен в осевой зоне САХ в интервале широт: 12°48'36" и 20°54'36" с. ш. Район включает сто разведочных блоков размером 10 × 10 км и площадью, 100 км² каждый [8]. В соответствии с контрактом с МОМД, основными задачами на первом этапе (2012–2018 гг.) служило выявление первоочередных перспективных районов для проведения более детальных разведочных работ. Задачами второго этапа (2019–2023 гг.) станет выявление конкретных рудных объектов и оценка потенциальных ресурсов слагающих их руд. На третьем этапе (2024–2027 гг.) планируется разведка промышленно значимых рудных объектов с подсчетом запасов слагающих их руд, окончательным обозначением добычного района. Разведочные работы проводятся с НИС «Профессор Логачев» АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция» (ПМГРЭ). На втором этапе на НИС «Профессор Логачев» для выявления конкретных рудных объектов и оценки потенциальных ресурсов в составе НГО планируется решение следующих задач:

- площадная съемка дна с НИС с помощью МЛЭ ATLAS Hydrosweep MD/30 (320 лучей: 1×1°, с частотой акустического сигнала: 24–30 кГц)¹;
- детальная площадная съемка дна с ТНПА «Sperre SUB-fighter 30K» (Норвегия) с МЛЭ SeaBat 7125;
- позиционирование ТНПА Sperre SUB-fighter по ГАНС HiRAP-101².

Примечание. ГАНС HiRAP-101 (фирма «Kongsberg», Норвегия) в режиме работы в ультракороткой базе (УКБ) обеспечивает точностью привязки ТНПА: 0,2 % от глубины. Возможен режим работы в длинной базе (ДБ) с донными

¹ ATLAS Hydrosweep MD/30. [Электронный ресурс]. Режим доступа http://209.240.133.120/media/pdf/product_resources/74.pdf.

² ROV SUB-fighter 30K. «Sperre SUB-fighter 30K». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://sperre-as.com/portfolio/sub-fighter-30k>.

маяками-ответчиками (МО), установленными на морском дне. Детальная информация по технической оснащенности НИС «Профессор Логачев» приведена на сайте АО ПМГРЭ¹.

Указанные задачи НГО являются новыми для российской практики поиска и разведки ГПС. В этой связи целесообразно рассмотреть зарубежный опыт выполнения НГО поиска и разведки ГПС. Первые крупнообъемные пробы ГПС на САХ были подняты на поверхность в 1985 г. С тех пор на САХ различными государствами регулярно выполнялись исследовательские работы на ГПС и были обнаружены многочисленные новые гидротермальные поля. При этом на иностранных НИС для НГО использовались исключительно МЛЭ. Опыт французской компании IFREMER наглядно показал, что задачи поиска и разведки ГПС не позволяли ограничиться изучением рельефа дна рифтовых зон СОХ при использовании МЛЭ с поверхности моря. Глубина моря играет решающее значение для детальной съемки рельефа.

Французский заявочный участок на САХ с гидротермальными полями TAG, Snake Pit находится на глубинах 3200–3700 м. Расположенный южнее российский участок имеет глубины 1900–5100 м. Положение российского и французского заявочных участков на САХ представлено на рис. 1. В 2005 г. начался новый этап исследований САХ — международный проект MOMAR (Monitoring of the Mid-Atlantic Ridge), связанный с мониторингом рельефа дна на ранее найденных локальных гидротермальных полях. На этих полях, получивших названия «Menez Gwen», «Salaanha», «Rainbow» и «Lucky Strike» и расположенных на глубинах 1700–3200 м, были отработаны методы съемки и мониторинга рельефа. Задачи мониторинга предъявляют высокие требования к детальности выполнения съемки рельефа, которую невозможно было выполнить, используя МЛЭ с поверхности моря. Для обеспечения мониторинга для съемки рельефа впервые был использован МЛЭ, установленный на ТНПА (ROV — Remotely Operated Vehicle).

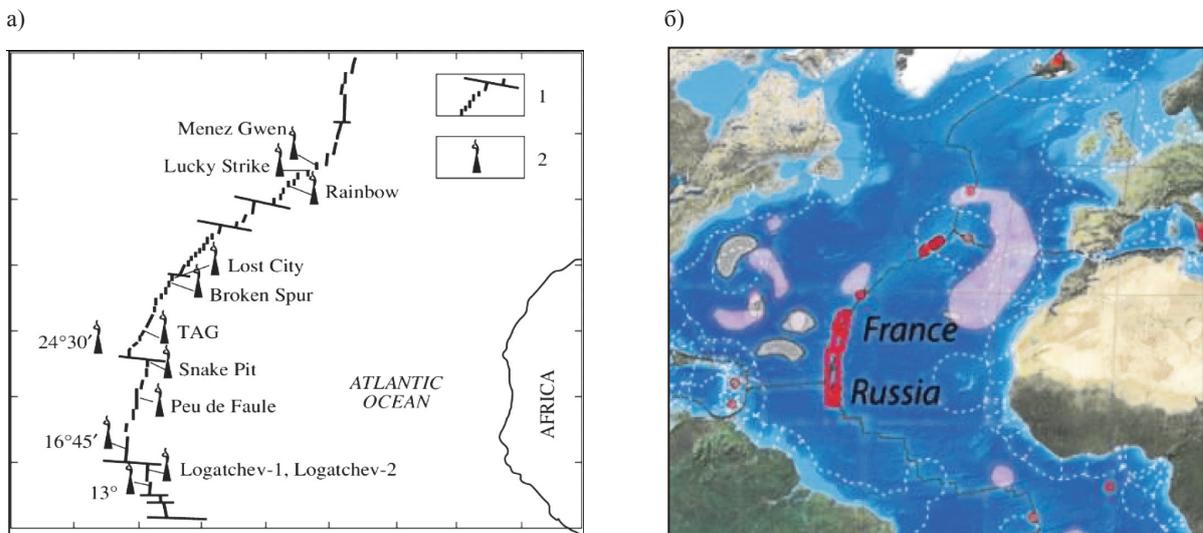


Рис. 1. Расположение российского и французского участков:
а — схема наименования участков; б — карта Срединно-Атлантического хребта

На рис. 2 приведена 3D батиметрическая модель района САХ, созданная по проекту MOMAR на основе площадной съемки с поверхности с помощью МЛЭ и врезками, демонстрирующими детальную модель рельефа по результатам съемки с ТНПА для полей: «А» (Menez Gwen), «В» (Lucky Strike), «С» (Rainbow).

Наиболее полные результаты мониторинга рельефа были опубликованы для гидротермального поля «Lucky Strike», расположенного на САХ, между параллелями 37°03 N and 37°37 N, в 40 км от Азорских островов. Положение гидротермального поля «Lucky Strike» приведено на рис. 3, а, и детальная топография рудных сульфидных построек с присвоенными им именами по результатам съемки ТНПА показана на рис. 3, б.

¹ Исследования по проблеме глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.pmge.ru/index.php?id=665&lang=RUS>.

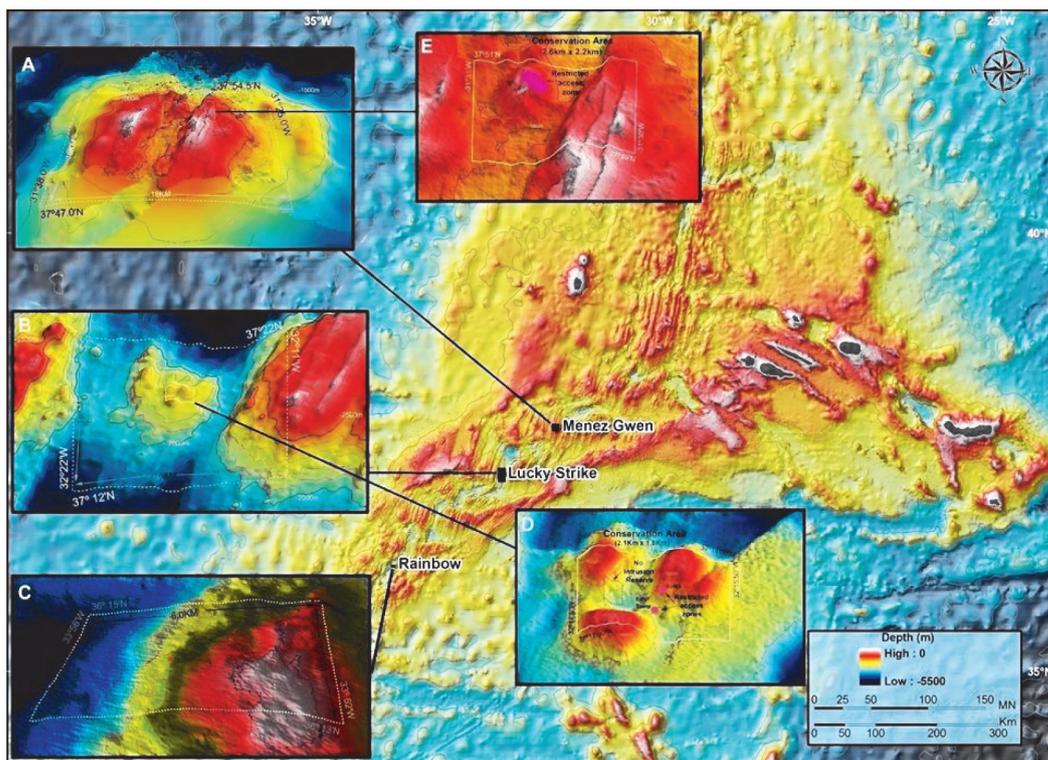


Рис. 2. Батиметрическая модель участка Срединно-Атлантического хребта, созданная по проекту MOMAR: съемки рельефа с НИС и ТНПА (гидротермальные поля: «А», «В», «С»)

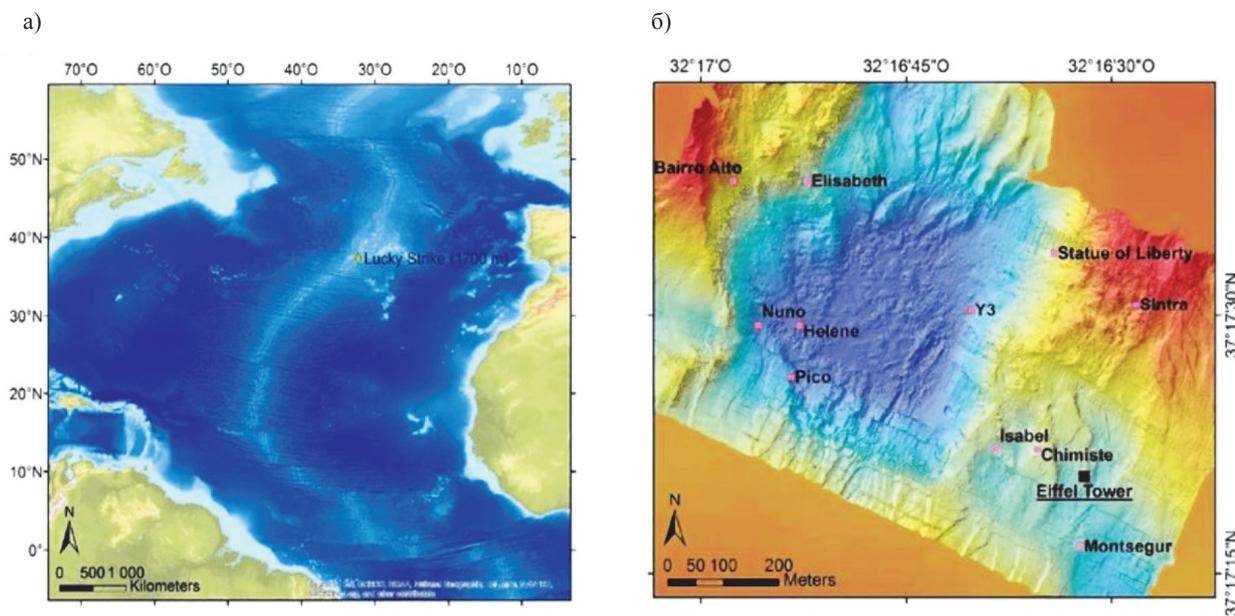


Рис. 3. Гидротермальное поле «Lucky Strike»: а — положение гидротермального поля «Lucky Strike» на САХ; б — детальная топография гидротермального поля «Lucky Strike» по результатам съемки с ТНПА

Работы выполнялись в рейсе «SERPENTINE» (2007 г.) на НИС «Pourquoi-Pas», принадлежащем французской компании по изучению Мирового океана IFREMER, оборудованном МЛЭ RESON 7150 (частоты 12/24 кГц). На ТНПА (ROV) Victor 6000 был установлен МЛЭ RESON 7125 (частота

400 кГц), используемый для детальной съемки рельефа гидротермального поля «Lucky Strike». В период рейса НИС «Pourquoi-pas» выполнил также детальную съемку на российских гидротермальных полях: «Ашадзе-1», «Ашадзе-2», «Логачев 1» и «Логачев-2» (см. рис. 1, а). Подробные сведения по научному оснащению НИС «Pourquoi-Pas» приведены на сайте компании IFREMER¹.

Глубина гидротермального поля «Lucky Strike» составляет в среднем 1700 м и при съемке МЛЭ RESON 7125 размер ячейки регулярной сетки равен 35 м (2 % от глубины). Гидротермальное поле «Lucky Strike» протяженностью до 1 км, расположенное в зоне разлома САХ (скорость спрединга до 22 мм в год), показано на батиметрической карте, представленной на рис. 4 (батиметрическая карта В). Ширина рифтовой долины составляет 10–15 км, высота бортов — до 1000 м. Расположенный на днище рифтовой долины вулкан, к которому приурочено рудное поле, имеет протяженность по оси долины 13 км, поперек долины 7 км и высоту 400 м. Батиметрический профиль (рис. 4 поперечное сечение С), представленный на рис. 4 (батиметрическая карта В — section C), наглядно представляет поперечное сечение рифтовой долины. В рамке на рис. 4 (батиметрическая карта В) представлен район детальной съемки рельефа с использованием МЛЭ RESON 7125, установленного на ТНПА «Victor 6000», который показан на рис. 5.

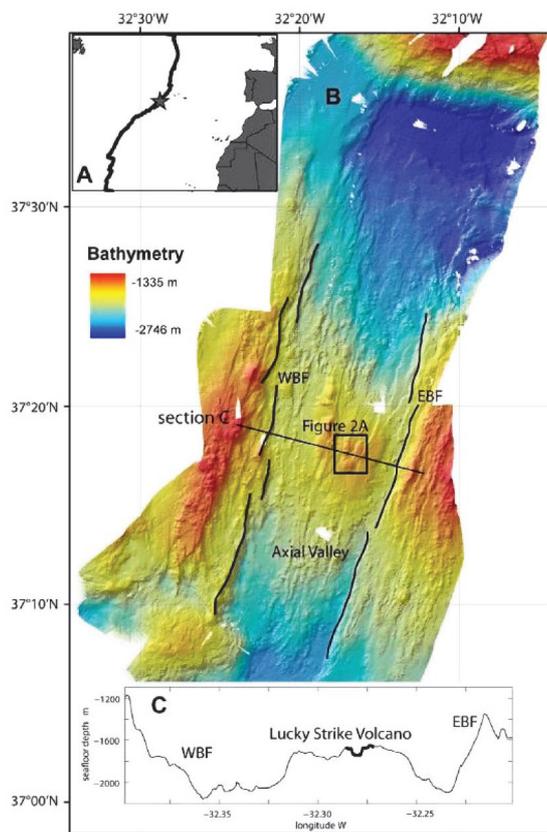


Рис. 4. Батиметрическая карта рифтовой долины САХ с гидротермальным полем «Lucky Strike»

Условные обозначения: А — обзорная карта САХ;
В — батиметрическая карта, составленная по данным площадной съемки с НИС;
С — поперечное сечение рифтовой долины

На локальном участке гидротермального поля при высоте ТНПА над дном менее 100 м обеспечивалась точность получения глубины МЛЭ RESON 7125 в среднем 0,2 % от высоты. Плановое положение ТНПА определялось относительно НИС при использовании ГАНС в режиме ультрако-

¹ French oceanographic fleet operated by Ifremer. Ships and state-of-the-art instruments to explore the oceans Pourquoi pas? [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte/Navires/Navires-hauturiers/Pourquoi-pas>. (дата обращения: 1.08.2019).

роткой базой (УКБ) с точностью 1% от глубины моря ($\approx \pm 17$ м). Для повышения точности планового положения использовался режим счисления, корректируемого по ГНСС при каждом всплытии ТНПА, которое осуществлялось с интервалом 2 ч. При этом дрейф автономной системы счисления ТНПА оценивался не более 10 м за 2 ч.

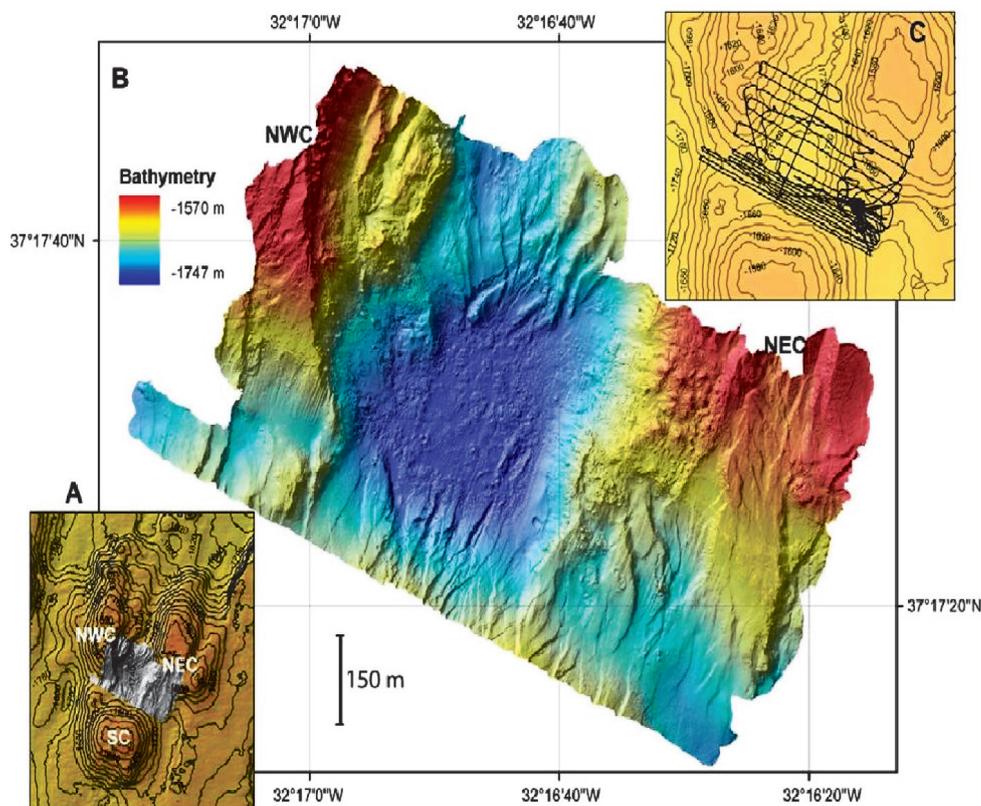


Рис. 5. Батиметрическая съемка гидротермального поля «Lucky Strike» с использованием ТНПА «Victor 6000»: обзорная карта-схема района — фрагмент А; детальная топография гидротермального поля «Lucky Strike», по данным съемки с ТНПА «Victor 6000» — фрагмент В; схема галсов батиметрической съемки с использованием ТНПА «Victor 6000» — фрагмент С

Полигон для съемки рельефа с ТНПА находился между вершинами трех вулканов, занимая площадь 1200×800 м, как показано на рис. 5 (фрагменты В и С). Галсы съемки с азимутом 110° были проложены через 20 м (8 галсов) при высоте ТНПА над дном 8 м и через 70 м (семь галсов) при высоте над дном 30 м (см. рис. 5 фрагмент С). Таким образом, было обеспечено горизонтальное разрешение 0,4 м для восьми галсов (высота 20 м) и 1,5 м для остальных семи часов с высотой над дном 8 м. В результате была построена регулярная сетка глубин с ячейкой размером 0,5 м, представленный на рис. 5 фрагмент В. Подробные сведения по результатам детального изучения гидротермального поля «Lucky Strike» в 2005–2007 гг. представлены в работе [9].

В 2008–2010 гг. комплексные исследования гидротермального поля «Lucky Strike», включающие мониторинг изменения рельефа, проводились в рамках уникального проекта «MoMAR-D». Детальная съемка рельефа была продолжена с ТНПА «Victor 6000», а затем с использованием АНПА «Aster-X». Применение АНПА позволило существенно сократить время исследований, освобождая НИС для решения других задач. В процесс исследований компания «IFREMER» продолжила использовать свой ГОА «Nautile» для визуальных наблюдений гидротермальных построек и биоты. При использовании с МЛЭ EM 2000 (200 кГц) высота АНПА «Aster-X» над рельефом составляла, как правило, не более 70 м. При этом удавалось создавать ЦМР регулярную сетку с размером ячейки 0,25–2,0 м (в зависимости от высоты АНПА надо дном).

Детальная съемка рельефа с ТНПА «Victor 6000» и АНПА «Aster-X» покрыла дополнительно 35 км² в районе вулкана в центральной части рифтовой долины. В итоге общая площадь детальной съемки гидротермального поля «Lucky Strike» составила 190 км², что до настоящего времени является одной из самых больших площадей детальной «микробатиметрической» съемки (Microbathymetry Survey), выполненной в зонах спрединга срединно-океанических хребтов. В результате работ по проектам «MOMAR-08» и «Bathyluck-09» удалось уточнить рельеф и положение отдельных гидротермальных построек поля. На рис. 6 представлена детальная топография дна и положение рудных сульфидных построек на гидротермальном поле «Lucky Strike».



Рис. 6. Детальное трехмерное представление положения рудных построек на поле «Lucky Strike»

Детальное описание процесса мониторинга рельефа дна на гидротермальном поле «Lucky Strike», по проектам «MOMAR-08» и «Bathyluck-09» приведено в работе [10]. В дальнейшем результаты мониторинга рельефа дна гидротермального поля «Lucky Strike» были использованы для исследований высокоточного подводного позиционирования объектов (ТНПА, АНПА) по ГАНС ДБ, выполняемых в качестве подготовки к этапу промышленной добычи ГПС. Применение АНПА для обеспечения НГО разнообразных видов морской деятельности, требующих высокоточного определения положения подводных объектов и съемки рельефа дна, является в настоящее время ведущим направлением морской геологии и океанографии. Компания «IFREMER» продолжила использование АНПА «Aster-X» для реализации различных проектов, в том числе на ГПС (адрес сайта: <http://flotte.ifremer.fr/fleet/Presentation-of-the-fleet/Underwater-systems/AUV-Aster-x>).

Американская некоммерческая организация по исследованию Мирового океана MBARI (The Monterey Bay Aquarium Research Institute) разработала свои варианты АНПА, оснащенных набором датчиков для картографирования дна на глубинах до 6000 м со скоростью 3,5 уз и автономностью более 20 ч. В состав датчиков входит МЛЭ Reson-7125, Edgetech FSDW (профилограф, ГБО)¹. Свои варианты АНПА для картографирования дна разработала также немецкая компания GEOMAR. По опубликованным сведениям, АНПА «Abyss» используется для детальной съемки рельефа на в районах залегания ЖМК. Данный АНПА, укомплектованный видеосистемой, может использоваться для регистрации информации с целью автоматического расчета объема конкрецией на базе новой технологии, основанной на подсчете количества конкрецией по площади при учете корреляции с типом рельефа.

Обсуждение (Discussion)

В течение последнего десятилетия интенсивно развиваются гидрографические информационные технологии, основанные на анализе акустических сигналов МЛЭ с целью дистанционного анализа донного грунта и распознавания объектов в водной толще. До недавнего времени такие технологии, реализованные в промышленных гидрографических пакетах CARIS TELEDYNE, Qimera/Fledermaus QPS, HYDRACK и др., использовались, как правило, только в инженерной гидрографии при выполнении мелководных съемок.

¹ Vehicle Technology. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mbari.org/technology/emerging-current-tools/vehicle-technology/> (дата обращения: 1.08.2019).

Гидрографический пакет QINSy (QPS) [11], [12] позволяет обеспечивать выполнение съемки рельефа дна с помощью МЛЭ, установленной на ТНПА. Аналогичные возможности имеют пакеты EIVA NaviSuit. Применение программного пакета Fledermause [7], содержащего также модуль «Vessel Manager», позволяет осуществлять объемную визуализацию «объектов»: НИС и ТНПА на фоне ЦМР дна в реальном масштабе времени. Это открывает новые возможности активного управления объектами и решения многих дополнительных задач НГО. Использование микробатиметрической съемки с использованием ТНПА позволит применить технологии дистанционного анализа донного грунта и распознавания объектов в водной толще при НГО ТПИ. Одно из первых описаний применения указанных технологий при НГО содержится в работе [13].

Применение АНПА по сравнению с ТНПА имеет преимущества в производительности выполнения микробатиметрической съемки рельефа. Скорость хода ТНПА составляет, как правило, 0,5–1,5 уз, а у АНПА скорость хода более 4 уз. Однако высота хода АНПА надо дном, как правило, значительно больше, чем у ТНПА, что связано с обеспечением его безопасности. Поэтому детальность съемки рельефа с помощью МЛЭ, установленном на ТНПА, выше, чем у АНПА. ЦМР, полученные в результате микробатиметрической съемки рельефа с помощью МЛЭ, установленного на ТНПА, может иметь размер ячейки 0,2–0,5 м, а для АНПА размер ячейки — от 1,0 м и более. Вместе с тем применение ТНПА требует наличия на НИС системы динамической стабилизации для обеспечения удержания судна в заданной точке и движения по проектному галсу на малых ходах. Практика показывает, что применение АНПА для разведочной микробатиметрической съемки с помощью МЛЭ является эффективным на больших глубинах с выровненным рельефом (ЖМК на абиссальных равнинах). На локальных участках со сложно расчлененным рельефом и глубинами до 3000 м преимущество имеют ТНПА. Позиционирование ТНПА осуществляется по ГАНС УКБ, обеспечивая относительную точность планового положения 0,2 % от глубины [14]. Это, в частности, подтверждает опыт разведочных работ на ГПС, полученный компанией «Nautilus Minerals Inc» на участке «Salwara 1» в море Бисмарка^{1, 2}.

В отличие от ТНПА использование АНПА для детальной съемки рельефа на больших глубинах до настоящего времени представляет собой инновационную задачу, связанную с созданием и внедрением в практику морских глубоководных роботизированных комплексов. Для обеспечения высокоточной навигации и позиционирования на АНПА должно быть установлено следующее основное оборудование: инерциальная навигационная система (ИНС); доплеровский акустический лаг (ДАЛ); впередсмотрящий гидролокатор (ГЛ); альтиметр (эхолот для определения высоты АНПА над дном); гидрологический зонд (СТД-зонд); ГНСС датчик (для определения позиции на поверхности моря); гирокомпас (ГК); маяк-ответчик (МО) ГАНС УКБ, датчики пространственной ориентации и датчик глубины. Для выполнения съемки рельефа дна на АНПА устанавливают МЛЭ или батиметрический ГБО.

Навигация АНПА может осуществляться в трех режимах: автономном режиме с использованием ИНС, ДАЛ, ГК, автономном режиме с коррекцией по ГНСС (при всплытии) и автономном режиме с коррекцией по ГАНС. Точность позиционирования в автономном режиме составляет в реальном времени порядка 0,1–0,2 % от пройденного расстояния (при использовании ДАЛ). В режиме с коррекцией по ГНСС точность позиционирования составляет 2–10 м при продолжительности подводного хода один-два часа. Наиболее точное позиционирование, обеспечиваемое в режиме коррекции по ГАНС, может составлять 1–6 м в зависимости от величины заглупления АНПА. Особенностью применения АНПА для съемки рельефа дна является необходимость постобработки данных позиционирования. Программное обеспечение для работы с АНПА включает:

- программу реального времени для обеспечения выполнения маршрута съемки (в АНПА);
- программы для планирования маршрута, загружаемого в АНПА;
- пакет программ для анализа и постобработки навигации и построения ЦМР дна.

¹ Международная горнорудная компания «Nautilus Minerals Inc» (Наутилус Минералз) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.nautilusminerals.com/IRM/content/default.aspx>.

² Report. Preliminary Economic Assessment of the SolwaraProjectBismarckSeaPNG». [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.nautilusminerals.com/irm/PDF/1974_0/PEAoftheSolwaraProjectBismarckSeaPNG.

Программное обеспечение для АНПА является специализированным и, как правило, поставляется в составе морского роботизированного комплекса. До недавнего времени для позиционирования АНПА по ГАНС рассматривалось применение только УКБ ввиду того, что развертывание сети МО на дне, необходимой для применения режима ГАНС с длинной базой (ДБ), как правило, занимает большое количество судового времени. Экономия судового времени НИС является одним из решающих факторов обеспечения эффективности поисково-разведочных работ на ТПИ.

Применение ГАНС УКБ для позиционирования АНПА требует его постоянного сопровождения НИС. Опыт показывает, что на больших глубинах ГАНС УКБ не обеспечивают надежного позиционирования АНПА. Необходимо обеспечить реальную автономность АНПА и его высокоточную навигацию, необходимую для съемки рельефа с помощью МЛЭ, чтобы в то же время НИС могло выполнять решение других задач. С этой целью французская фирма IxBlue создала инновационную технологию использования ГАНС ДБ, предусматривающую размещение на АНПА интеллектуальной акустической системы AMSES, интегрированной с ИНС RHINS при условии установки на морском дне только одного специального МО «CONOPUS»¹. Данная технология основана на жестком комплексировании (Tightly Coupled) данных от акустического модема RAMSES, ИНС RHINS и ДАЛ на основе использования фильтра Калмана. Для успешной работы достаточно одного МО CONOPUS, но при использовании большего количества МО повышается надежность позиционирования и отпадает необходимость постобработки данных для создания ЦМР по результатам съемки рельефа МЛЭ на АНПА. Указанная технология, получившая название «Sparse-LBL navigation» уже прошла успешные морские испытания на НИС французской компании IFREMER при выполнении поисково-разведочных работ на ГПС.

Применительно к поисково-разведочным работам на ГПС можно рекомендовать следующие этапы выполнения перспективного НГО.

1-й этап — съемка рельефа МЛЭ на НИС для получения цифровой батиметрической карты масштаба 1: 50 000 для участка рифта 100–200 км² с выявлением участков детализации для работы с АНПА;

2-й этап — батиметрическая съемка с МЛЭ на АНПА с получением детальной батиметрической карты масштаба 1: 25 000 для участка 20–25 км² и выявлением участка для детальной разведки с помощью ТНПА. Процесс батиметрической съемки с МЛЭ, установленным на АНПА, показан на рис. 7 [15];

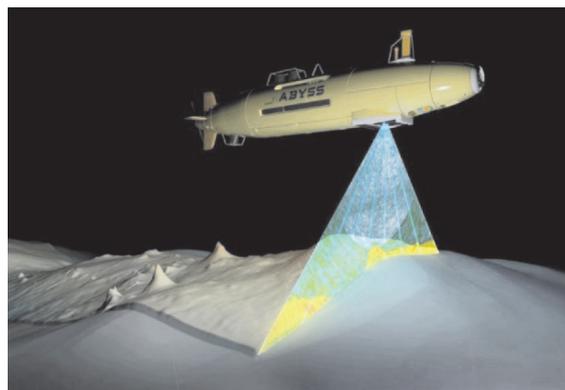


Рис. 7. Батиметрическая съемка с МЛЭ на АНПА

3-й этап — батиметрическая съемка с МЛЭ на ТНПА для поиска и опробования сульфидных построек и создания телеизображений совмещенных с 3D батиметрическими моделями в масштабах 1: 2 000 – 1 : 5 000. Процесс батиметрической съемки с помощью МЛЭ на ТНПА представлен на рис. 8.

¹ LBL and sparse LBL intelligent transceiver <https://www.ixblue.com/products/ramses> <https://www.ixblue.com/sites/default/files/2019-01/Ramses%20-%20Datasheet.pdf>.

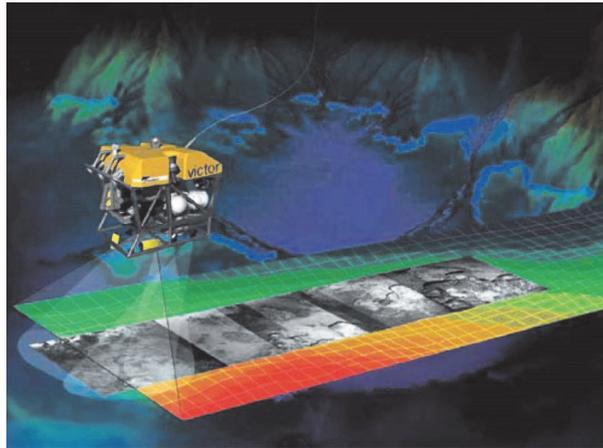


Рис. 8. Батиметрическая съемка с МЛЭ на ТНПА

Особенностью выполнения поисково-разведочных работ на ГПС является необходимость быстрого обследования выбранного гидротермального поля, имеющего размеры 1–2 км, поиск сульфидных построек с поперечным размером до 10 м и выделение активных. Для решения этих задач ТНПА должен быть оснащен системой гидрофизических датчиков и телекамерами для визуального наблюдения за дном.

Создание и использование морских роботизированных комплексов для поиска и разведки глубоководных ТПИ является в настоящее время главной тенденцией в освоении Мирового океана. Промышленные фирмы, такие как Kongsberg Maritime (Норвегия), Sonardyne (Великобритания), IxBlue (Франция), Ocean Floor Geophysics (Канада) и другие, разрабатывают и поставляют морские роботизированные комплексы с АНПА для глубин 3000–6000 м.

Морскими исследовательскими организациями и университетами, которые разрабатывают свои варианты комплексов на базе АНПА и выполняют поисково-разведочные работы с использованием АНПА и ТНПА, являются: Woods Hole Oceanographic Institution (США), Monterey Bay Aquarium Research Institute (США), National Oceanographic Center (Великобритания), IFREMER Marine Geosciences (Франция), GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research (Германия) и др. Подробное описание технологий НГО и батиметрической съемки с применением АНПА и ТНПА при выполнении поисково-разведочных работ на глубоководные полиметаллические сульфиды приводится в отчете компании «Ifremer» [16].

В России морские роботизированные комплексы создаются как промышленными фирмами, так и научно-производственными предприятиями. В настоящее время созданы ТНПА и АНПА, а также специализированные комплексы для геологоразведки на шельфе и в Мировом океане. Так, в АО «Южморгеология» разработан буксируемый геоакустический комплекс «МАК-Рельеф», предназначенный для решения широкого круга задач и в том числе детальных геолого-геофизических исследований дна океана при поисках и разведке месторождений ГПС на глубинах до 6000 м. Каталог образцов морской робототехники, разработанных российскими предприятиями, представлен в сети Интернет¹. Следует ожидать, что отечественные морские роботизированные комплексы на основе АНПА, предназначенные для специального применения, в ближайшие годы станут доступными для научного использования, в том числе для поисково-разведочных работ на морских месторождениях ТПИ.

В сентябре 2017 г. произошло знаменательное событие в морской горной отрасли — японскими специалистами впервые была проведена добычная операция в трог Окинава. С глубины 1500 м впервые на поверхность были подняты промышленные количества сульфидной руды. Промышленная добыча глубоководных ТПИ, по всей видимости, будет предполагать необходимость

¹ Каталог образцов морской робототехники, разработанных российскими предприятиями. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://portnews.ru/upload/basefiles/1813_pkpachtpaplopqpo.pdf.

размещение на морском дне подводной геодезической сети на основе ГАНС с длинной базой (ДБ) и большим числом маяков-ответчиков (МО), стационарно установленных на дне. ГАНС ДБ является основой для высокоточного позиционирования ТНПА, АНПА, а также добычных комбайнов и самого добычного судна. Развитие экспериментальных подводных геодезических сетей в течение ряда лет выполняет компания TOTAL с использованием ГАНС ДБ Fusion 6G фирмы Sonardyne International Ltd. Компания TOTAL уже имеет опыт создания действующих подводных геодезических сетей на нефтяном поле Kaombo, расположенном в 150 км от побережья Нигерии на глубинах 1750 м. При этом были использованы специальные интеллектуальные МО Compatt 6 фирмы Sonardyne и разработаны устройства для долговременного закрепления МО на морском дне. ГАНС ДБ Fusion 6G обеспечивает дециметровый уровень точности планового положения объектов в сети МО на глубинах до 5000 м (модель 8300-5213). Более подробная информация по этому проекту доступна на сайте фирмы Sonardyne в сети Интернет¹. Для успешного перехода к стадии добычи глубоководных ТПИ РФ предстоит пройти этап создания и (или) адаптации, а также освоения необходимых технических средств и технологий. При этом в части НГО предстоит освоить не только технологии детальной съемки рельефа с использованием ТНПА и АНПА, но и создание подводных геодезических сетей для обеспечения высокоточного позиционирования всего используемого подводного оборудования для опытной добычи.

Подготовка специалистов, в том числе гидрографов, для обеспечения детальной съемки рельефа с использованием ТНПА и АНПА является актуальной задачей. В Российской Федерации подготовка специалистов для НГО ГГР только начинается. В ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова по программе магистратуры гидрографам представлен краткий курс по НГО ГГР в рамках дисциплины «Гидрографическое обеспечение морских изысканий». Учитывая новый статус Арктического факультета института «Морская академия» как структурного подразделения ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, представляется целесообразным расширять общенаучное значение предмета «гидрография» и включить в курс НГО ГГР раздел по морской геоморфологии с элементами геотектоники.

Детальные батиметрические исследования в настоящее время являются ведущим направлением изучения Мирового океана. Ведутся международные батиметрические программы: «GEBCO-2019», «GEBCO Seabed 2030», «EMODnet Bathymetry» и ряд региональных проектов детального изучения топографии дна, а также индивидуальные проекты по изучению морских ТПИ, включающие детальную съемку рельефа. Подробную информацию по изучению рельефа дна Мирового океана с НИС, ТНПА, АНПА и ГОА можно найти в обобщающей работе [15].

Выводы (Summary)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Поисково-разведочные работы на ГПС предъявляют наиболее высокие требования в НГО. Создание цифровых моделей микрорельефа на основе многолучевой съемки с АНПА и ТНПА является необходимым условием успешного проведения поисковых и разведочных работ на ГПС.
2. Учитывая высокую стоимость морских исследовательских работ на ГПС, их целесообразно выполнять в три последовательных этапа:
 - *региональный этап* при использовании многолучевой съемки с НИС, обеспечивающей создание ЦМР с гридом размерностью 50 м;
 - *поисково-разведочный этап* многолучевой съемки на АНПА при высоте хода над дном 50–100 м, обеспечивающей создание ЦМР с гридом размерностью 1–2 м.
 - *оценочный этап* при использовании многолучевой съемки с ТНПА при высоте хода над дном 10–20 м, обеспечивающий создание ЦМР с гридом размерностью 0,25–0,5 м.
3. Микробатиметрическая съемка с АНПА позволяет независимо от погодных условий достаточно быстро выполнить детальную съемку рельефа на площади десятков квадратных километров и получить ЦМР дна с размером ячейки грида 1–2 м для уточнения общей топографии рифтовой долины, полученной при проведении многолучевой съемки рельефа с НИС.

¹ Total saves time and money with fusion 6G LBL Offshore west Africa [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sonardyne.com/case-study-total-saves-time-money-fusion-6g-lbl>.

4. Микробатиметрическая съемка с ТНПА должна позволить получать в реальном масштабе времени детальную топографию дна на основе ЦМР рельефа, совмещенного с телевизионным изображением. При этом ЦМР рельефа должна иметь размер ячейки грида 0,25–0,5 м, обеспечивающий опознавание сульфидных построек с линейными размерами в пределах первых метров.

5. Эффективность перспективных поисково-разведочных работ на ГПС во многом будет зависеть от уровня развития морской робототехники и в частности от АНПА при условии внедрения новых источников их автономного питания, повышающих автономную работу АНПА в течение более одних суток.

6. Поисково-разведочные и детальные работы на ГПС предъявляют высокие требования к НИС, которые должны быть оборудованы не только МЛЭ и ГАНС, но и системой динамической стабилизации, а также эффективными спускоподъемными устройствами, позволяющими использовать АНПА и ТНПА даже в сложных погодных условиях.

7. Позиционирование АНПА при выполнении микробатиметрической съемки с МЛЭ на основе ГАНС УКБ не является надежным и оптимальным. При этом перспективным может быть использование технологии «Sparse-LBL navigation».

8. Для опытной добычи ГПС в РФ необходимо будет не только создать новые специализированные суда и необходимые технические средства для извлечения ГПС, но и осваивать технологию позиционирования донных добычных комплексов на основе ГАНС с длинной базой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кеннет Дж. П.* Морская геология / Дж. П. Кеннет. — М.: Мир, 1987. — 397 с.
2. *Гаврилов В. П.* Геотектоника: учеб. для вузов / В. П. Гаврилов. — М.: ФГУП Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2005. — 368 с.
3. *Мазарович А. О.* Строение дна Мирового океана и окраинных морей России (учебное пособие). — М.: ГЕОС, 2005. — 192 с.
4. *Weatherall P.* A new digital bathymetric model of the world's oceans / P. Weatherall [et al] // *Earth and Space Science*. — 2015. — Vol. 2. — Is. 8. — Pp. 331–345. DOI: 10.1002/2015EA000107.
5. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использование гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во «Нестор-история», 2010. — 348 с.
6. *Фирсов Ю. Г.* Гидрографические информационные технологии. Часть I. Основы морской геоинформатики и гидрографические информационные системы / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2015. — 128 с.
7. *Фирсов Ю. Г.* Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
8. *Мировой океан. Т. III: Твердые полезные ископаемые и газовые гидраты в океане*. — М.: Научный мир, 2018. — 708 с.
9. *Ondréas H.* Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge / H. Ondréas [et al] // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. — 2009. — Vol. 10. — Is. 2. DOI: 10.1029/2008GC002171.
10. *Escartin J.* Hydrothermal activity along the slow-spreading Lucky Strike ridge segment (Mid-Atlantic Ridge): Distribution, heatflux, and geological controls / J. Escartin [et al] // *Earth and Planetary Science Letters*. — 2015. — Vol. 431. — Pp. 173–185. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.09.025.
11. *Фирсов Ю. Г.* Гидрографические информационные технологии. Ч. 2: Гидрографические информационные системы «НУРАСК» и «QINSy»: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 284 с.
12. *Фирсов Ю. Г.* Гидрографические информационные системы. Практическое освоение работы с гидрографической информационной системой QINSy: лабораторный практикум: учебно-метод. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 132 с.

13. Ondréas H. Recent high-resolution mapping of Guaymas hydrothermal fields (Southern Trough) / H. Ondréas, C. Scalabrin, Y. Fouquet, A. Godfroy // Cartographie haute résolution des champs hydrothermaux de la ride sud du bassin de Guaymas // Bulletin de la Société Géologique de France. — 2018. — Vol. 189. — Is. 1. DOI: 10.1051/bsgf/2018005.

14. Фирсов Ю. Г. Гидрографическое обеспечение морских изысканий: учеб. пособие. — СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. — 235 с.

15. Wöflf A. C. Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry / A.-C. Wöflf [et al] // Frontiers in Marine Science. — 2019. — Vol. 6. — Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283.

16. Dymont J. Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes. Expertise scientifique collective, Rapport, CNRS –Ifremer / J. Dymont [et al.]. — 2014. — 930 p.

REFERENCES

1. Kennet, Dzh.P. *Morskaya geologiya*. M.: Mir, 1987.
2. Gavrilov, V.P. *Geotektonika: Uchebnik dlya vuzov*. M.: FGUP Izd-vo «Neft' i gaz» RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 2005.
3. Mazarovich, A.O. *Stroenie dna Mirovogo okeana i okrainnykh morei Rossii (uchebnoe posobie)*. M.: GEOS, 2005.
4. Weatherall, Pauline, K. M. Marks, Martin Jakobsson, Thierry Schmitt, Shin Tani, Jan Erik Arndt, Marzia Rovere, Dale Chayes, Vicki Ferrini, and Rochelle Wigley. “A new digital bathymetric model of the world’s oceans.” *Earth and Space Science* 2.8 (2015): 331–345. DOI: 10.1002/2015EA000107.
5. Firsov, Yu.G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovanie gidrograficheskikh sonarov. Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd. «Nestor-istoriya», 2010.
6. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye tekhnologii. Chast' I. Osnovy morskoi geoin-formatiki i gidrograficheskie informatsionnye sistemy*. SPb.: Izd. GUMRF, 2015.
7. Firsov, Yu.G., and I.V. Kozhukhov. “The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
8. *Mirovoi okean. T. III. Tverdye poleznye iskopaemye i gazovye gidraty v okeane*. M.: Nauchnyi mir, 2018.
9. Ondréas, H., M. Cannat, Y. Fouquet, A. Normand, P. M. Sarradin, and J. Sarrazin. “Recent volcanic events and the distribution of hydrothermal venting at the Lucky Strike hydrothermal field, Mid-Atlantic Ridge.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 10.2 (2009). DOI: 10.1029/2008GC002171
10. Escartin, Javier, T. Barreyre, M. Cannat, R. Garcia, N. Gracias, A. Deschamps, A. Salocchi, P.-M. Sarradin, and V. Ballu. “Hydrothermal activity along the slow-spreading Lucky Strike ridge segment (Mid-Atlantic Ridge): Distribution, heatflux, and geological controls.” *Earth and Planetary Science Letters* 431 (2015): 173–185.
11. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye tekhnologii. Chast' 2. Gidrograficheskie informatsionnye sistemy «HYPACK» i «QINSY»*. Uchebnoe posobie. SPb.: Izd. GUMRF, 2016.
12. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskie informatsionnye sistemy. Prakticheskoe osvoenie raboty s gidrograficheskoi informatsionnoi sistemoi QINSY. Laboratornyi praktikum. Uchebno-metodicheskoe posobie*. SPb.: Izd. GUMRF, 2017.
13. Ondréas, Hélène, Carla Scalabrin, Yves Fouquet and Anne Godfroy. “Recent high-resolution mapping of Guaymas hydrothermal fields (Southern Trough) Cartographie haute résolution des champs hydrothermaux de la ride sud du bassin de Guaymas.” *Bulletin de la Société Géologique de France* 189.1 (2018). DOI: 10.1051/bsgf/2018005
14. Firsov, Yu.G. *Gidrograficheskoe obespechenie morskikh izyskaniy. Uchebnoe posobie*. SPb.: Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017.
15. Wöflf, Anne-Cathrin, Helen Snaith, Sam Amirebrahimi, Colin W. Devey, Boris Dorschel, Vicki Ferrini, Veerle A. I. Huvenne, Martin Jakobsson, Jennifer Jencks, Gordon Johnston, Geoffroy Lamarche, Larry Mayer, David Millar, Terje Haga Pedersen, Kim Picard, Anja Reitz, Thierry Schmitt, Martin Visbeck, Pauline Weatherall, and Rochelle Wigley. “Seafloor Mapping—the challenge of a truly global ocean bathymetry.” *Frontiers in Marine Science* 6 (2019). Article 283. DOI: 10.3389/fmars.2019.00283
16. Dymont, J., F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, and J. Tourolle. *Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes*. Expertise scientifique collective, Rapport, CNRS –Ifremer. 2014.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Фирсов Юрий Георгиевич —
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Firsov, Yury G. —
PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gidrograph@mail.ru, kaf_gm@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 22 октября 2019 г.
Received: October 22, 2019.*