

ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 528.422

Е. Н. Колосков,
асп.;

Ю. Г. Фирсов,
канд. техн. наук, доц.

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕЛЬЕФА И ДОННОГО ГАЗОПРОЯВЛЕНИЯ В СЕВЕРНЫХ МОРЯХ РОССИИ

IMPLEMENTATION OF THE NEW HYDROGRAPHIC TECHNOLOGIES FOR BOTTOM TOPOGRAPHY AND SEAFLOOR GAS VENTING INVESTIGATIONS IN THE RUSSIAN NORTHERN SEAS

Рассмотрены вопросы использования гидрографических информационных технологий для изучения дна северных морей России. Современная гидроакустическая аппаратура предоставляет широкие возможности для получения не только детальной топографии дна, но и дополнительной информации, касающейся структуры верхней части разреза донного грунта и наличия объектов в придонной водной толще. Приводятся методы использования гидроакустической аппаратуры для комплексного изучения дна. Подчеркивается решающее значение, которое приобретает выбор электронной гидрографической информационной системы и компьютерной системы окончательной обработки данных. Акцентируется внимание на том, что практическая направленность этих работ связана с изучением субмаринных газовых гидратов. Особое внимание уделено использованию акустических параметрических профилографов как средства для изучения тонкой структуры верхней части разреза морского дна. Отмечается актуальность выбора программы обработки результатов донного профилирования и рассматриваются вопросы совместного представления результатов площадной съемки и разрезов дна в виде трехмерных изображений (3D). Даются рекомендации по совместному использованию многолучевого эхолота и параметрического профилографа при выполнении гидрографических работ в арктических морях.

The study examines modern hydrographic technologies for the Russian northern seas investigations. The hydro acoustics methods for seabed study are discussed. Modern hydrographic equipment provides the possibility not only to obtain the detailed bathymetry but also additional information containing the presence of objects in the water column and sea bottom sections. The importance of the hydrographic software tools needed to process and analyze the bathymetry and water column data are emphasized. The practical importance of the water column and bottom profiler data processing for the submarine gas-hydrates survey is stated. The main attention is paid to the implementation of the parametric sub bottom profilers – the low frequency sonar for the sea bottom vertical section investigation. The ability for the integrated presentation of the multibeam bathymetry and vertical curtains in the 3D environment are discussed. Recommendations for the implementation of the multi beam echo sounder and parametric sub bottom profiler for the combined hydrographic and submarine gas-hydrates survey Russian northern seas are delivered.

Ключевые слова: гидрографические информационные технологии, гидроакустическая аппаратура, площадная съемка рельефа и разреза донного грунта, донное газопроявление, субмаринные газовые гидраты, субмаринная криолитозона, многолучевой эхолот, акустический параметрический донный профилограф.

Key words: hydrographic technologies, hydro acoustics methods, swathe survey, sea bottom vertical section, submarine gas-hydrates, submarine permafrost, seafloor gas venting, multi beam echo sounder, parametric sub bottom profiler.



СОВРЕМЕННЫЕ морские геологоразведочные работы, положившие начало новому этапу геологоразведки и эксплуатации природных ресурсов в российской Арктике, базируются преимущественно на результатах гидроакустических исследований дна. Состо-

яние геологической изученности Арктики и перспективы геологоразведочных работ приведены в работе [1]. Морскую геологию интересует как современный рельеф дна, так и осадочная толща, включая детальную информацию верхней части разреза дна. Данную информацию могут предоставлять современные гидрографические технологии. Актуальным направлением является выполнение инженерных геологических работ, в состав которых также входит детальное изучение поверхности и структуры дна.

В течение последних лет в российской Арктике открыты десятки нефтяных и газовых месторождений. Карта нефтегазовых месторождений западного сектора российской Арктики, расположенных на побережье и континентальном шельфе, приведена на рис. 1.

При освоении полярных месторождений углеводородного сырья на арктических побережьях и континентальном шельфе Российской Федерации формируется арктическая морская транспортная система экспорта нефти и газа. В настоящее время существуют и реализуются различные проекты прокладки многокилометровых газовых и нефтяных магистральных трубопроводов по дну арктического шельфа, строятся новые порты, выполняются дноуглубительные работы. На западном побережье Обской губы создан глубоководный порт Саббета. Для обеспечения функционирования порта в северной части Обской губы выполняются дноуглубительные работы для создания морского канала, при проектировании которого в 2011–2014 гг. были выполнены инженерные батиметрические съемки [5].

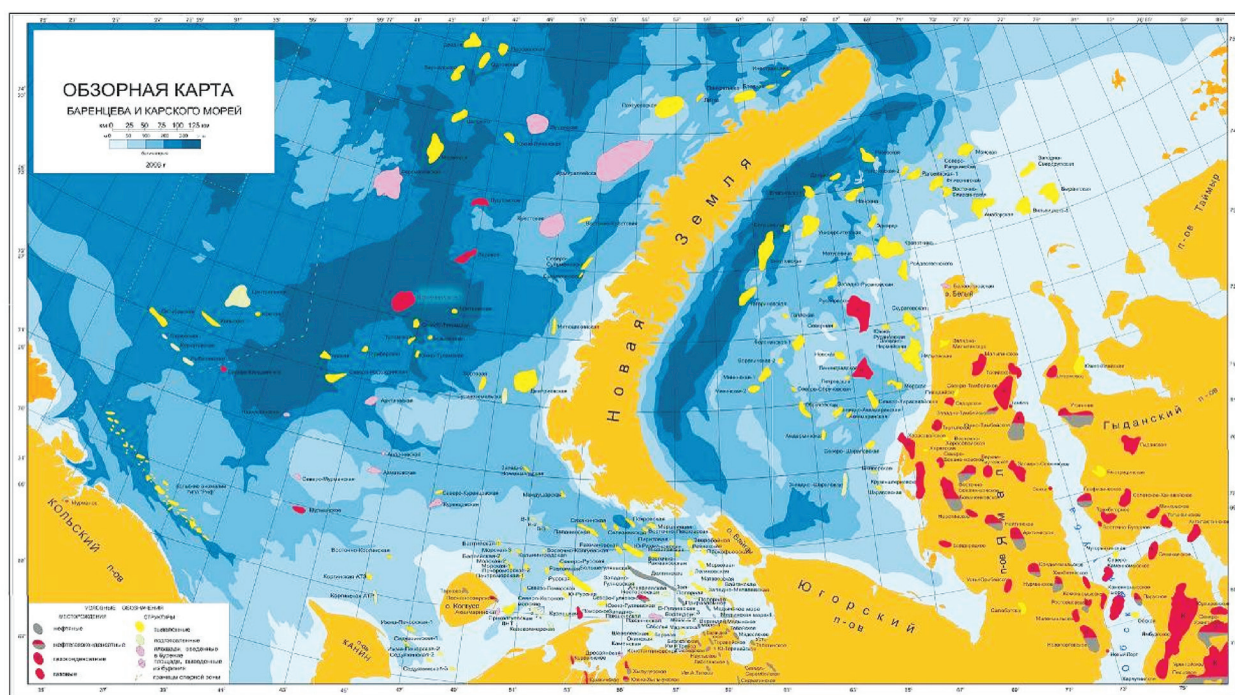


Рис. 1. Карта нефтегазовых месторождений западного сектора российской Арктики

В рамках выполнения подобных проектов важнейшей составляющей служит комплексная гидроакустическая съёмка дна с использованием многолучевых эхолотов (МЛЭ) и гидролокаторов бокового обзора. Применение МЛЭ является ведущей тенденцией в современной гидрографии. При этом основное внимание уделяется мелководным МЛЭ, способным работать на частотах в диапазоне от 200 до 400 кГц с использованием при этом линейно-частотной модуляции, и обеспечивать управление сектором излучения. Объемы батиметрической информации настолько велики, что возникает необходимость применять батиметрические цифровые модели рельефа, которые могут быть реализованы на основе регулярных сеток (гридов) и нерегулярных триангуляционных сеток. Большинство гидрографических пакетов программ используют батиметрические модели на основе гридов.

В течение последнего десятилетия гидрографические технологии съемки подводного рельефа претерпели радикальные изменения в части качества получаемых данных и возможности их наглядного объемного представления средствами компьютерной техники [4], [5]. Современный МЛЭ способен выдавать информацию по батиметрии, сонарное изображение дна, а также изображение водной толщи. Эти инновационные возможности недостаточно изучены и востребованы отечественной практикой. В российской гидрографической практике основное внимание до последнего времени уделялось батиметрии. Однако в связи с потребностью обеспечения морских геологоразведочных работ следует ожидать изменения подобной ситуации.

Вопросы батиметрического обеспечения морских геологоразведочных работ с одновременным получением и анализом придонных изображений водной толщи рассмотрены в работе [6]. При съемке использовался МЛЭ EM2040C фирмы «Kongsberg» с электронной гидрографической информационной системой (ЭГИС) QINSy фирмы «QPS». ЭГИС позволяет одновременно собирать и обрабатывать батиметрическую информацию для оперативной визуализации цифровой модели рельефа дна, сонарное изображение интенсивности обратного рассеивания дна, а также получать изображения объектов в водной толще.

Акватория работ включала Новоземельский трог в районе структуры «Университетская». При этом были зарегистрированы отдельные донные газопроявления. Изображения объектов в придонной водной толще, получаемые в ЭГИС QINSy в реальном масштабе времени, малоинформативны, поэтому требуется определенный опыт для идентификации таких «плюмов» и фиксации их планового положения с целью последующего выхода в точку газового проявления для взятия проб воды и донного грунта. Однако окончательная обработка зарегистрированной информации позволяет получать наглядные и реалистичные изображения. На рис. 2 представлено трехмерное изображение «плюма» газогидрата в среде программного пакета Fledermause на фоне цифровой модели рельефа (регулярная сетка размерностью 0,5 м).

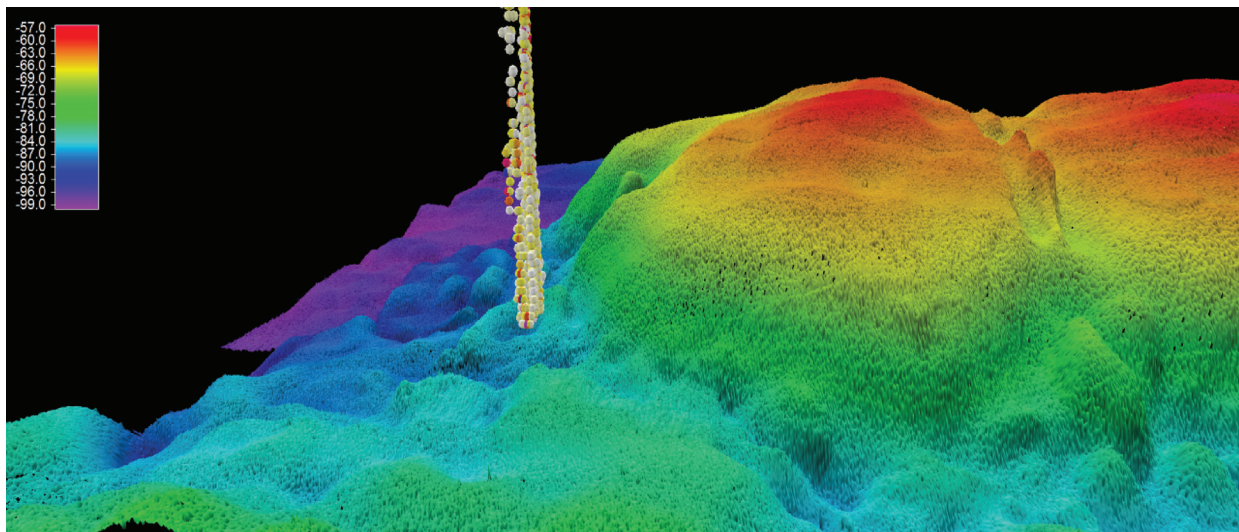


Рис. 2. Трехмерное изображение «плюма» газогидрата в среде программного пакета Fledermause на фоне цифровой модели рельефа

Детальная площадная съемка рельефа позволила выявить новые, ранее неизвестные формы топографии морского дна, в том числе формы, относящиеся к донному газопроявлению. По всей видимости, донное газопроявление в районе структуры «Университетская» является выходом газового гидрата (главным образом, метана) из толщи донных осадков, приуроченных к грязевулканическим структурам. Структуры имеют кольцевидную форму с небольшим (2 – 4 м) превышением и расположены по периферии подводной возвышенности, вершина которой расположена на глубине 40 м с превышением 30 – 40 м относительно окружающего сравнительно плоского рельефа. Такие формы рельефа напоминают *пинго* (*pingo*), в русской классифи-

кации *гидролакколиты*, или *булгунняхи*, – мерзлотные формы рельефа в виде куполообразных возвышений.

В отечественной специальной литературе систематическое изложение известных геологических данных о наблюдениях и признаках субмаринных газовых гидратов представлено в работе [2], в которой детально рассмотрены признаки газовых гидратов, выявленные по результатам анализа проб донных отложений, и имеются только отдельные упоминания об «эхолотных факелах», полученных на эхограмме однолучевого эхолота в Охотском море вблизи о. Парамушир [2, с. 61]. Газогидратное тело, как правило, представляет собой массивное образование, уходящее в толщу донных осадков на десятки и сотни метров. В отдельных районах Мирового океана газогидраты могут находиться под слоем осадков на глубине не менее 30 – 50 см от поверхности дна. Известны и поля газогидратов, лежащие на поверхности донных осадочных отложений, обнаруженные, например, на дне озера Байкал [7]. Фактически там найдены большие месторождения чистого природного газа. В районе грязевого вулкана, получившего название *Санкт-Петербург*, был обнаружен гидратный массив, выходящий непосредственно на поверхность дна и постоянно контактирующий с водой. Структура грязевого вулкана «Санкт-Петербург» была описана в 2000 г., а в 2005 г. на глубине 1400 м был обнаружен газовый факел высотой 900 м. Объемы залежей газогидратов в Байкале ученые оценивают наравне с запасами Ковыктинского месторождения в Иркутской области.

Интерес к субмаринным газогидратам впервые возник в последней четверти XX в. Мировым сообществом газогидраты рассматриваются в качестве перспективной альтернативы современного топлива. По оценкам специалистов [2], [13], [17], мировые запасы газогидратов содержат больше углеводорода, чем все разведанные на сегодня запасы нефти и газа. При этом следует иметь в виду, что газогидрат является возобновляемым ресурсом. В настоящее время во многих странах, включая США, Германию, Японию и Индию, ведутся исследования по поиску и разработке газогидратов [8], [10], [11], [14] – [16], [18], [19], [21] – [24]. Так, в Германии фирма «GEOMAR» занимается проблемой субмаринных газовых гидратов с 80-х гг. XX в. При этом существенной частью исследований, связанных с поисками газовых гидратов, является использование новейших гидроакустических средств, в первую очередь, МЛЭ. Результаты исследований по состоянию на 2002 г. были опубликованы в работе [12]. В США активные работы по изучению субмаринных газовых гидратов проводятся уже в течение более 30 лет. С 2000 г. эти работы координирует Национальный научно-исследовательский совет Национальной академии наук США в рамках нескольких программ, включая программу Министерства энергетики США [17]. Работы ведутся на шельфе североамериканского континента, включая Мексиканский залив [8], [10], [11], [15], [24], а также в Арктике [18], [21], [22].

В последние годы для поисков субмаринных газовых гидратов активно используются гидроакустические средства. Научно-исследовательское судно «Okeanos», принадлежащее Национальной администрации по океану и атмосфере США (NOAA), оборудованное МЛЭ ЕМ302, регулярно совершает исследовательские рейсы с целью поиска субмаринных газовых гидратов в Мексиканском заливе [15]. В целях гидроакустической визуализации последних разрабатывается специальное гидрографическое программное обеспечение [9], [11], [20].

Для России изучение субмаринных газовых гидратов имеет особое значение при проведении геологических и инженерно-геологических работ в арктических морях. Особенностью является то, что арктические шельфы характеризуются *субмаринной криолитозоной*, до недавнего времени обуславливающей стабильность гидратов. Формирование скоплений гидратов в этих условиях в основном контролируется *криогеногенетической моделью гидратообразования*, т. е. в гидратную форму переходит часть газов обычных залежей [2], [18], [21] – [23]. В связи общим потеплением Арктики и возможной деградацией субмаринной криолитозоны ситуация со стабильностью гидратов в грядущие годы может измениться весьма драматически.

В течение последних 20 – 25 лет зарубежные промышленно выпускаемые низкочастотные эхолоты-профилографы (ЭП) прочно вошли в арсенал средств российской морской геологии. При

этом хорошо зарекомендовали себя эхолоты-профилографы, использующие линейно-частотную модуляцию акустического сигнала низкой частоты (4 – 8 кГц). Одними из лучших образцов таких гидроакустических средств являются ЭП фирмы «EdgeTech» (США).

Известным эксплуатационным ограничением ЭП с линейно-частотной модуляцией являются существенные весогабаритные характеристики акустических антенн, препятствующие эксплуатации ЭП на арендованных судах. Наиболее рациональным решением является использование буксируемого варианта гидроакустической антенны, реализованного в ЭП модели «3100 EdgeTech». ЭП модели 3100 с буксируемой гидроакустической антенной типа 216 (масса в воздухе 80 кг) успешно эксплуатируется во ВНИИ «Океангеология» при проведении работ в Арктике с 2004 г.

Визуализация газопроявления в толще морского дна на ямальском шельфе Карского моря на профилограмме эхолота-профилографа «3100 EdgeTech» приведена на рис. 3. При эксплуатации ЭП с буксируемой гидроакустической антенной недостатком являются ограничения по скорости хода судна, составляющей, как правило, не более трех узлов, что существенно затрудняет возможность комплексирования с другими видами съемки, в первую очередь, с многолучевой съемкой рельефа. Методическим новшеством гидроакустического обеспечения морских геологоразведочных и инженерных геологических работ является комплексное применение МЛЭ с низкочастотным эхолотом-профилографом, принцип работы которого основан на нелинейной гидроакустике.

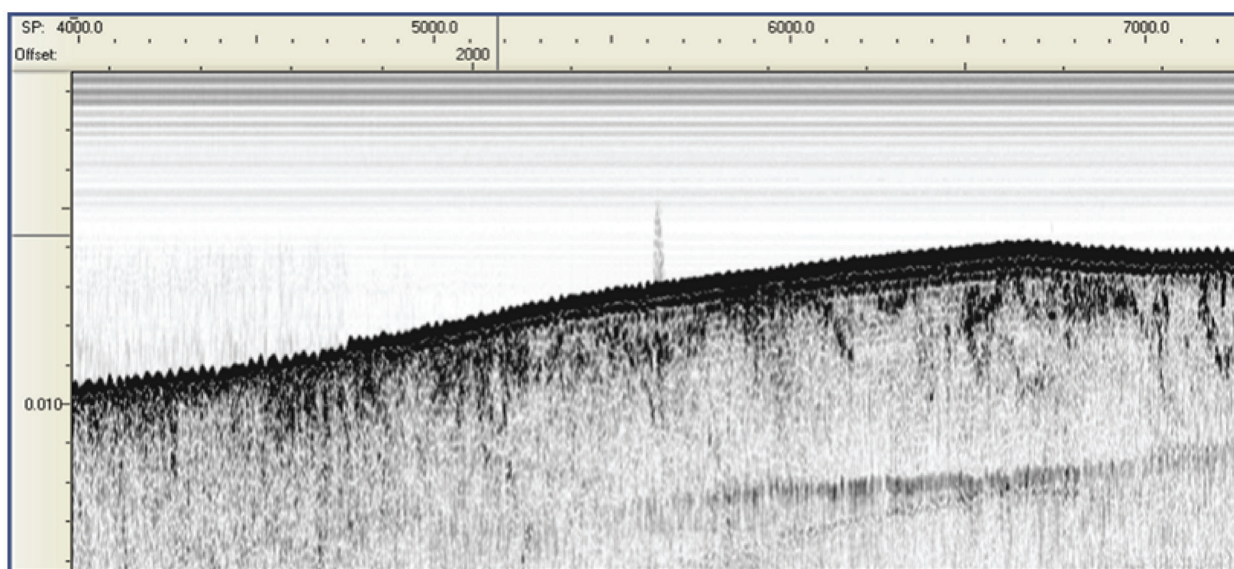


Рис. 3. Визуализация газопроявления в толще морского дна на ямальском шельфе Карского моря на профилограмме эхолота-профилографа «3100 EdgeTech» (ВНИИ «Океангеология»)

Значимым достижением гидроакустики последних лет явились практические результаты исследований в области нелинейной гидроакустики и внедрений параметрических антенн. Нелинейная гидроакустика использует так называемую *антенну накачки*. В антенну подается не один, а два синусоидальных электрических сигнала с частотами f_1 и f_2 , которые преобразуются в ультразвуковые колебания и появляются в водной среде в виде пучка волн с теми же частотами f_1 и f_2 . От квадратичной нелинейности (при возведении в квадрат суммы двух синусов) в каждой точке водной среды появляются сигналы с частотами $2f_1$, $2f_2$, $(f_1 + f_2)$ и, главное, возникает сигнал низкой разностной частоты $F = (f_2 - f_1)$. Все ультразвуковые волны накачки (удвоенные частоты либо сумма частот) быстро затухают с расстоянием, но волны разностной частоты $F = (f_2 - f_1)$, в силу малости затухания на низких частотах, распространяются на большие расстояния. Этот принцип находится в основе построения всех параметрических профилографов. Низкочастотный сигнал получается в результате нелинейного взаимодействия двух высокочастотных сигналов (первичные частоты $\approx 94 - 110$ кГц), излучаемых параметрической антенной. Вторичные настраиваемые

низкие частоты (5, 6, 8, 10, 12, 15 кГц) используются для профилирования морского дна, а высокая частота – для съемки рельефа, что может быть использовано для контроля качества площадной съемки рельефа с помощью МЛЭ.

В настоящее время мелководные параметрические профилографы серийно выпускают фирмы «Инномар» (Германия) – «SES-2000Standard» и «Конгсберг» (Норвегия) «TOPAS PS 40» – (TOpographic PArametric Sonar). Для мелководных съемок в Арктике такая аппаратура представляет несомненный интерес. Преимуществом параметрического профилографа являются малые габариты приемоизлучающей гидроакустической антенны, которую не только можно «врезать» в корпус судна, но и смонтировать на штанге при забортном варианте установки. Так, параметрический профилограф «SES-2000 Standard» имеет массу трансдьюсера в воздухе 22 кг, при этом характеристика направленности (угол луча) составляет $2,0^\circ$, что обеспечивает возможность забортного варианта установки трансдьюсера совместно с антенной мелководного МЛЭ.

Параметрические источники имеют преимущество при генерировании низкочастотного луча, так как не создают ярко выраженных боковых лепестков, обеспечивая проникновение низкочастотного акустического сигнала в грунт до 50 м. Глубина проникновения сигнала в морской грунт зависит от типа грунта, формы импульса (в меньшей степени от глубины моря) и составляет от 2 до 50 м. При этом вертикальное разрешение по слоям может составлять 0,30 м и менее. Такая подробность стратификации донного осадка позволяет надежно опознавать верхнюю кровлю слоя вечной мерзлоты по результатам профилирования донных отложений, что является крайне актуальной задачей [3].

Продолжает совершенствоваться программное обеспечение параметрических профилографов по улучшению качества визуализации цветной профилограммы и повышению информативности. Так, на рис. 4 приведен пример визуализации газопроявления в толще дна на шельфе архипелага Шпицбергена, представленный на профилограмме параметрического эхолота-профилографа PS-40. На цветной профилограмме реального времени хорошо прослеживаются каналы выхода газа из толщи донных осадков, а также следы газопроявления на поверхности дна.

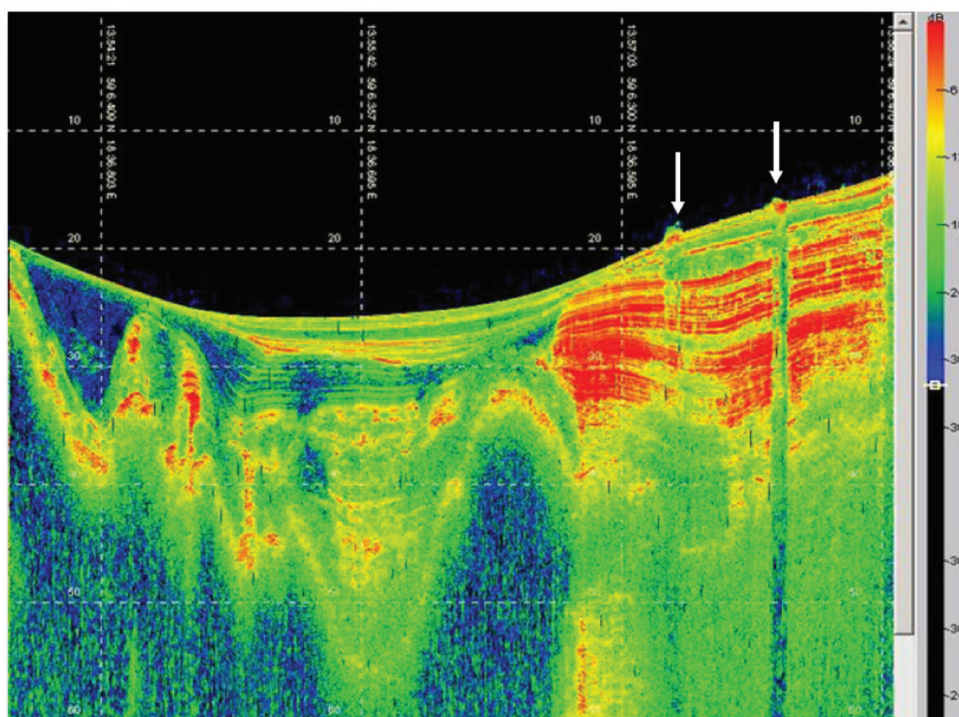


Рис. 4. Визуализация газопроявления в толще и на поверхности морского дна на шельфе архипелага Шпицбергена на профилограмме параметрического эхолота-профилографа PS-40 (Kongsberg)

Большие возможности для анализа структуры донных осадков предоставляют пакеты программ окончательной обработки данных низкочастотных эхолотов-профилографов. ЭП различных фирм, как правило, осуществляют регистрацию данных в своих фирменных форматах. Универсальным форматом, используемым для окончательной обработки данных ЭП, является формат SEG-Y. Известными пакетами программ окончательной обработки данных низкочастотных ЭП являются SonarWIZ5 (Chesapeake Technology) и Fledermause MidWater (QPS/IVS).

Для обработки данных параметрических ЭП серии «SES» фирма «Инномар» предлагает свой пакет программ «ISE». Все имеющиеся на рынке пакеты программ окончательной обработки данных низкочастотных ЭП имеют свои преимущества и ограничения. Выбор конкретного программного обеспечения во многом зависит от целей и задач, решаемых при съемке. Обсуждение особенностей и опций различных специализированных программных продуктов представляет практический интерес, но выходит за рамки данной статьи.

Другой актуальной задачей является наглядное представление результатов площадной съемки рельефа дна совместно с результатами донного профилирования. В настоящее время решением данного вопроса занимается несколько ведущих фирм – разработчиков гидрографического программного обеспечения: «CARIS», «QPS» [11], «IFREMER», «ELAK» [20]. «RESON». Создаваемые этими фирмами программные пакеты, построенные на основе трехмерной визуализации (3D), позволяют использовать данные в различных форматах для создания итогового синтезированного пространственного изображения. Комплексное представление результатов площадной съемки и профилограммы ЭП в пакете программ трехмерной визуализации приведено на рис. 5.

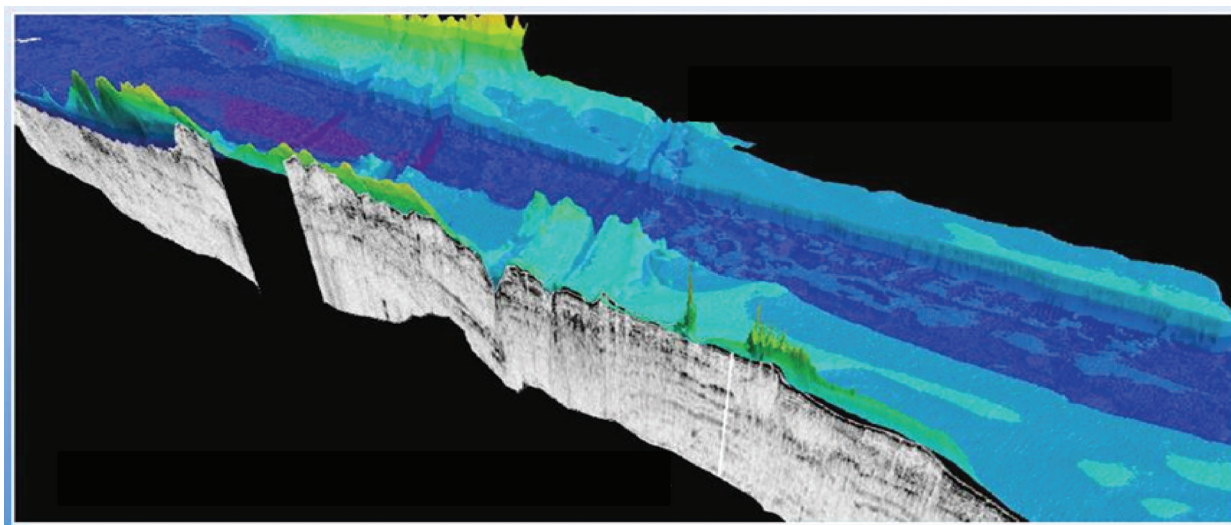


Рис. 5. Комплексное представление данных площадной съемки МЛЭ и данных эхолота-профилографа в пакете программ трехмерной визуализации

Современные гидрографические информационные технологии позволяют комплексировать различные источники гидроакустических данных для повышения информативности исследований и разрешающей способности до уровня распознавания в грунтовой толще положения кровли вечной мерзлоты, мест с вкраплением реликтовых ледовых линз, придонных скоплений газогидратов, а также газопроявлений в придонной водной толще.

Ввиду низкой стабильности подводного рельефа на отдельных акваториях арктических морей, следует включать в комплекс гидрографических работ наряду с многолучевой съемкой рельефа акустическое профилирование дна. Применение для этих целей параметрических профилографов не окажет влияние на производительность выполнения работ даже в варианте забортной установки акустических антенн, но обеспечит получение дополнительной информации, весьма ценной не только для инженерной гидрографии (например, мониторинг подводных трубопроводов), но и для морской геологии и геоэкологии Арктического шельфа.

Экспедиционные работы, направленные на дальнейшее изучение северных морей, являются финансово затратным предприятием. Поэтому необходимо принимать все возможные меры для того, чтобы обеспечить получение максимальных объемов гидроакустической информации о морском дне, которую можно в дальнейшем всесторонне проанализировать с использованием современного программного обеспечения с целью извлечения новых полезных сведений, необходимых для различных областей морской деятельности.

Выводы

1. Современная гидроакустическая аппаратура способна давать большой объем информации о морском дне. Задача заключается в том, чтобы в период экспедиционных работ обеспечить регистрацию максимального объема данных, способных после окончательной обработки дать новую комплексную информацию о состоянии и развитии морского дна.
2. До недавнего времени гидрографы, в первую очередь, интересовались съемкой рельефа дна с целью создания батиметрических моделей. Совершенствование гидроакустической аппаратуры, уменьшение весогабаритных характеристик акустических антенн, увеличение эффективности ЭГИС и связанное с этим повышение уровня автоматизации сбора данных позволяет по-новому организовать процесс морских работ, направленных на исследование морского дна.
3. При выполнении гидрографических работ в арктических морях России рекомендуется использовать гидроакустический комплекс в составе многолучевого эхолота и параметрического профилографа. Современный гидрограф может быть оператором одновременно многолучевого эхолота и низкочастотного эхолота-профилографа.
4. Одним из актуальных приложений всестороннего гидроакустического исследования дна является поиск и обнаружение субмаринных газовых гидратов с целью получения информации об их распределении, а также текущем состоянии для прогноза их развития. Гидроакустическое выявление субмаринных газовых гидратов является первым этапом их последующего изучения с учетом перспективы потенциального использования как сырьевого ресурса.
5. Современные гидрографические информационные технологии, позволяющие обрабатывать и комплексировать информацию от различных гидроакустических средств, предоставляют также возможность визуализации результатов исследований морского дна в виде трехмерных изображений и обеспечивают их последующее хранение в базах данных геоинформационных систем.

Список литературы

1. Каминский В. Д. Минерально-сырьевые ресурсы арктической континентальной окраины России и перспективы их освоения / В. Д. Каминский, О. И. Супруненко, А. Н. Смирнов // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 3 (15). — С. 52–61.
2. Гинзбург Г. Д. Субмаринные газовые гидраты / Г. Д. Гинзбург, В. А. Соловьев. — СПб.: ВНИИОкеангеология, 1994. — 199 с.
3. Кожухов И. В. Северный регион Российской Федерации как зона экологического риска и новый технологический этап освоения Арктики / И. В. Кожухов, Ю. Г. Фирсов, Н. Ю. Гордиенко // Эксплуатация морского транспорта. — 2013. — № 2 (72). — С. 73–78.
4. Фирсов Ю. Г. Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Изд-во «Нестор-История», 2010. — С. 348.
5. 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.
6. Фирсов Ю. Г. Новый этап батиметрических исследований северных акваторий России на примере Карского моря / Ю. Г. Фирсов, М. В. Иванов, Е. Н. Колосков // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6 (28). — С. 115–124.

7. Второй сезон международной научной экспедиции «Миры» на Байкале [Электронный ресурс]. — Сайт Института Океанологии РАН. — Режим доступа: <http://www.ocean.ru/content/view/784/90/>.
8. *Borowski W. S.* A review of methane and gas hydrates in the dynamic, stratified system of the Blake Ridge region, offshore southeastern North America / W. S. Borowski // *Chemical Geology*. — 2004. — Vol. 205. — P. 311–346.
9. *John E. Hughes Clarke.* Applications of multibeam water column imaging for hydrographic survey / E. John // *The Hydrographic Journal*. — 2006. — P. 1–31.
10. *Gardner J. V.* Plume 1400 Meters High Discovered at the Seafloor off the Northern California Margin, EOS Transactions / J. V. Gardner [et al.] // *American Geophysical Union*. — 2009. — Vol. 90. — № 32. — P. 275–275.
11. *Lindsay Gee.* New Tools for Water Column Feature Detection, Extraction and Analysis / Gee Lindsay [et al.] // *Sea Technology*. — October 2014. — P. 27–30.
12. Detailed bathymetric mapping and side scan surveys in the investigation of cold fluid vent sites and associated gas hydrate occurrences / Jens Greinert, Wilhelm Weinrebe, Peter Gimpel, Jörg Brockhoff // *The Hydrographic Journal*. — 2002 — № 106, October. — P. 15–19.
13. *Keith A. Kvenvolden.* Potential effects of gas hydrate on human welfare / A. Keith // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. — 1999. — Vol. 96. — P. 3420–3426.
14. Anomalous sea-floor backscatter patterns in methane venting areas, Dnepr paleo-delta, NW Black Sea / Lieven Naudts [et al.] // *Marine Geology* 251 (2008). — P. 253–267. Режим доступа: http://users.ugent.be/~jgreiner/papers/Naudts_et_al_Marine_Geology_2008.pdf.
15. NOAA and partners demonstrate success of multibeam sonar to detect and map deep-sea gas seeps.— Режим доступа http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20110915_oceanosexplorer.html.
16. *Paull C. K.* Herguera Seafloor geomorphic manifestations of gas venting and shallow subbottom gas hydrate occurrences / C. K. Paull [et al.] // *Geosphere*. — 2015. — 11 (2). — P. 491–513.
17. *Paull C.* Realizing the Energy Potential of Methane Hydrate for the United States / C. Paull [et al.]. — Режим доступа: http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=12831.
18. *Reag M.* Large-scale simulation of methane hydrate dissociation along the West Spitsbergen Margin / M. Reag, G. Moridis // *Geophysical research letters*. — 2009. — Vol. 36. — L23612.
19. *Schneider J von Deimling.* Technical Note: Detection of gas bubble leakage via correlation of water column multibeam images *Ocean Sci.* / J. Schneider von Deimling [et al.]. — Режим доступа: <http://www.ocean-sci.net/8/175/2012>.
20. *Schneider von Deimling.* Flare imaging with multibeam systems / J. Schneider von Deimling, [et al.] // *Data processing for bubble detection at seeps Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2007 — Vol. 8. — Num. 6. — 6 June.
21. *Shakhova.* Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf / Shakhova [et al.] // *Science*. — 2010. — № 237. — P. 1246–1250.
22. *Shakhova.* The distribution of methane on the Siberian Arctic shelves: Implications for the marine methane cycle / Shakhova // *Geophysical research letters*. — 2005. — Vol. 32. — L09601.
23. *Westbrook G.* Escape of methane gas from the seabed along the West Spitsbergen continental margin / G. Westbrook [et al.] // *Geophysical research letters*. — 2009. — Vol. 36. — L15608.
24. *Weber T.* Acoustic estimates of methane gas flux from the seabed in a 6000 km² region in the Northern Gulf of Mexico / T. Weber, et al // *Geochem. Geophys. Geosyst.* — 2015. — 15. — P. 1911– 1925.