

## О морских информационных сетевых системах в Арктике

В. В. Коваленко<sup>1</sup>, кандидат технических наук,

Научный совет по комплексной проблеме «Гидрофизика» РАН

*На основе анализа зарубежного опыта и с акцентом на акватории арктических морей излагаются принципы создания морских информационных систем, обеспечивающих решение различных прикладных задач. Среди этих задач — обеспечение безопасности морских объектов, оценка состояния морской окружающей среды и управление ресурсной деятельностью. Выделяется общая для различных приложений и исследований основа современных систем получения информации о морских объектах и окружающей среде — сенсорные сети как распределенный наблюдатель.*

**Ключевые слова:** морские информационные системы, распределенные сетевые системы, сенсорные сети, системы подводного наблюдения, системы наблюдения за океаном, оперативная океанология

Поступила в редакцию 12.2.13

### **Введение. Элементы стратегии и постановки задач освоения морей Арктики в представлении прибрежных стран Арктической зоны**

Со времени появления первых работ о принципах создания сетевых (сетевых) систем прошло более десяти лет [1]. За это время и теоретические основы, и практика создания различных систем, основанных на сетевых принципах, получили в мире значительное развитие. Сейчас они превратились в парадигму, распространившуюся на различные сферы человеческой деятельности, включая науку, разведку и контроль состояния природных ресурсов, сохранение окружающей среды и обеспечение различных видов безопасности. Произошло это из-за присущих данным системам характерных свойств. Одним из них является нацеленность указанных систем на получение достаточной для решения соответствующих прикладных задач информации от пространственно развитой сети наблюдений в темпе, соответствующем характеру этих задач (в реальном времени).

Большая группа задач, эффективное решение которых основывается на применении сетевых систем, связывается с морем и морской деятельностью. Имеются примеры, когда совокупность наиболее приоритетных конечных задач представляется в виде государственной стратегии, а ответ на вопрос, зачем создаются информационные сетевые системы, непосредственно связывается с такой стратегией [2]. Здесь выделяется основной приоритет — достиже-

ние нужного качества информации, необходимого для решения поставленных задач. Есть адекватная информация — конечные задачи эффективно решаются, нет ее — не решаются. В ряде критически важных случаев отсутствие информации нужного качества является причиной того, что решить поставленные задачи не удастся. И поскольку решение крупных приоритетных национальных задач основывается на адекватной информации, можно сказать, что именно информационные системы — основа реализации стратегии достижения поставленных целей, а качество решения конечных прикладных задач является основным критерием.

Примером действующих государственных стратегий, направленных на освоение высокоширотных акваторий, является документ [2], принятый правительством Норвегии в 2006 г. и существенно расширенный «дополнительными блоками» [3] в 2009 г. Эти документы содержат постановки конечных задач, решение которых, как следует из описания концепции соответствующих информационных систем [4], непосредственно связывается с их созданием. Стратегия [2] содержит формулировки семи важнейших политических приоритетов и 22 конкретных задач, подлежащих решению. Дополнительные блоки стратегии [3] развивают основной документ и включают детализацию политических приоритетов и конкретных задач, а также указывают срок их реализации — 10—15 лет. Важнейшим и связанным с созданием развитой информационной структуры положением государственной стратегии является обеспечение суверенитета и контроля над использованием ресурсов со ссылкой на существующие

<sup>1</sup> e-mail: hydrophys@mail.ru



Рис. 1. Концепция и структура проекта по созданию целостной системы мониторинга арктических морей

оценки разведанных и неразведанных запасов нефти и газа в Арктике.

В связи со стратегической целью обеспечения суверенитета [2] примечательны положения работы [5], в которой на примере Норвегии обсуждаются пути улучшения сопротивляемости малых стран внешним угрозам. В их основе лежит идея создания сетевидной оборонительной структуры (Net-centric Defense), важной частью которой являются информационные системы ситуационной осведомленности или раннего предупреждения об опасности с возможностью эффективного использования собственных силовых ресурсов и своевременного привлечения внешних ресурсов. В данном случае речь идет о задаче обеспечения безопасности и защиты от внешних угроз как одной из ряда прикладных задач, обозначенных в концепции создания целостной информационной системы мониторинга обстановки в арктических морях (A holistic information system for monitoring of maritime security, marine environment and marine resources of the Nordic Seas and Arctic Ocean — i-Nord). Баренцево море в проекте выделено особо. Более того, проект i-Nord включен также в ряд приоритетных проектов комплексной программы Varents-2020 [6]. Готовится к реализации мощная система, имеющая разветвленную систему приложений и составных технологий. Приложениями объявлены решаемые задачи безопасности, экологи-

гии, мониторинга океанологических процессов и явлений, контроля климатических изменений, контроля ресурсной деятельности, включая, нефтегазовый комплекс и рыболовство, реагирование на чрезвычайные и кризисные явления. Объявлено, что с точки зрения доступа создаваться будет открытая и закрытая конфигурации системы. Но они будут представлять собой единый комплекс, так как открытая и закрытая его части взаимосвязаны и должны «питать» друг друга. В основу подводной сети положена американская система Seaweb.

Проект обширен и вбирает в себя практически все, что требуется для решения стоящих в регионе разноплановых задач. В связи с этим он сам представляет собой часть усилий мирового сообщества, занятого Мировым океаном и его арктической зоной. Имеют место его связи с глобальной системой наблюдения за океаном GOOS, его европейской составляющей Euro GOOS и его арктической составляющей Arctic GOOS. Имеют место его связи с рядом других проектов и программ, таких как My Ocean и соответствующих им систем. Вместе с тем этот проект рассматривается как предпроект по отношению к названному головным проекту «Баренцево морское наблюдение» (Varents Watch), задачи которого специализированы преимущественно на наблюдении за морским судоходством. При этом проект i-Nord ориентирован на разработку полномасштабной системы наблюдения.



Рис. 2. Место проекта i-Nord в системе взаимосвязанных международных программ, проектов и работ

Все работы скомпонованы в организованные в виде двумерной структуры взаимосвязанные блоки работ (WP — Work Packages). Эта структура, одновременно являющаяся концепцией проекта, показана на рис. 1. Вертикально ориентированными блоками (WP1—WP3) представлены приложения с их требованиями, горизонтальными блоками (WP4—WP7) — пакеты работ, которые путем реализации соответствующих научно-технических решений должны ответить на исходящие от приложений требования.

Место проекта i-Nord в системе взаимосвязанных проектов и программ представлено на рис. 2. Общая нацеленность всех показанных усилий — создание панарктической сетевой системы наблюдения (Pan Arctic Observing Network). Во всех указанных отдельных работах и системе в целом сетевой принцип представляется как объект усилий, устремленный в будущее. Пример системы i-Nord со сроком окончания работ в 2017 г. показывает реалистичность создания таких систем в настоящее время. Важная особенность этих проектов — они предусматривают развитие систем. Последнее обеспечивается тем, что подобные системы создаются на принципах открытой архитектуры, модульности и унифицированных технических решений. Такие решения распространя-

ются и на гражданские, и на военные части систем. Это касается принципов создания систем, используемых технологий и элементной базы. Чтобы достигнуть поставленной цели, считается необходимым:

- сформировать целостную инфраструктуру, объединяющую существующие источники информации, системные устройства, цепочки обработки данных и службы (океанологическую и метеорологическую);
- сформировать там, где это требуется, новую систему обслуживания существующих источников информации, включая разработку новых долгосрочных показателей физического, химического и биологического состояния океанической среды, и представить их в динамике;
- улучшить сбор данных путем исчерпывающе полного использования спутниковых, авиационных, корабельных, позиционных якорных, донных и дрейфующих платформ;
- разработать и развернуть новые сенсорные системы и сенсорные технологии там, где требуется новое качество наблюдения или где наблюдения сейчас не ведутся;
- поддержать разработку и интегрирование в системы современных численных моделей с режимом работы 24/7, обеспечивающих адекватное оцени-

- вание и прогнозирование океана, морского льда, метеорологических показателей;
- поддержать разработку и интеграцию пространственно зависимых моделей экосистем, работающих для обеспечения адекватного и пространственно разрешающего прогноза в отношении компонентов и процессов экосистемы;
  - поддержать адекватное управление данными и их распределение для обеспечения систем океанических и атмосферных исследований.

Дополнительными задачами разработки системы i-Nord являются:

- обеспечение надежного оценивания и прогноза морского льда, ветра, волн, течений, распространения льда;
- обеспечение заинтересованных потребителей информацией о значимых параметрах морской среды, к которым отнесены: температура, соленость, течения, положение фронтальных зон, турбулентность, глубина вертикального перемешанного слоя, стратификация, высота и направление волн, концентрация морского льда, а также взвешенное вещество, кислород, хлорофилл, фито- и зоопланктон, распределение рыбы и транспорт загрязнителей;
- объединение сообщений системы автоматической идентификации судов (AIS) о судах, перевозящих опасные грузы, с прогнозами погоды и знаниями о чувствительных с точки зрения опасности районах для своевременной реакции на чрезвычайную ситуацию;
- предупреждение потенциального риска происшествий, связанного с морскими объектами; задачей является получение знания о том, где эти объекты располагаются, чтобы обеспечить своевременную реакцию при возникновении проблем.

### **Системы наблюдения и модели. Практическая реализация инструмента оперативной океанологии как основы систем нового поколения**

Решение всех обозначенных выше (см. рис. 1) прикладных задач (WP1—WP3) требует текущего знания о состоянии океанической среды в необходимом пространственном объеме. На получение этого знания нацелен блок работ WP6. Это одно из проявлений двумерной сущности структуры и концепции проекта. Системы наблюдения и численные модели являются главными элементами эффективной системы мониторинга состояния океанической среды [4, 7]. Такая система должна объединять наблюдения и численные модели. В зависимости от задачи акцент делается на работе в реальном времени, в масштабе времени, близком к реальному, или на уровне климатических представлений. Для понимания происходящих в океанической среде процессов требуются наблюдения и соответствующая моделирующая система. Без модели нет понимания. Для определения

(синтеза) оптимальной системы наблюдения (в том числе в задачах обеспечения безопасности) также требуются модели. И наконец, для того, чтобы в полной мере реализовать потенциал объединения системы наблюдения (при использовании различных источников) и численных моделей, должна быть применена техника ассимиляции данных.

Системы наблюдения могут включать те составляющие, которые осуществляют наблюдения за атмосферой (это расположенные на побережье, в океане и на ледяном покрове станции и буи), и те, что наблюдают за состоянием водной среды путем использования якорных станций, автономных аппаратов, в том числе глайдеров, дрейфтеров, а также специализированных и попутных судов. Зачастую имеется необходимость в высокоразрешающих (по пространству и времени) наблюдениях течений и волн, что, в свою очередь, требует входных данных для моделей. Это требование отчасти можно удовлетворить путем использования ряда ориентированных на различные дальности и установленных вдоль береговой линии радиолокационных систем. С помощью такого инструмента, устанавливаемого совместно с метеорологическими радиолокационными станциями, можно наблюдать за течениями и волнами.

Оптимальные свойства системы мониторинга и моделирования достигаются только при эффективной двусторонней увязке в одно целое наблюдений и моделей регионального и локального масштабов и системы предсказания бассейнового масштаба. Измеренные данные посредством сетевых систем передачи должны поступать в обрабатывающие центры, где они превращаются в продукт для принимающих решения пользователей. Критически важным для принятия решений о практических действиях при использовании моделей является оценка и уменьшение неопределенностей. Сокращение неопределенностей, выражаемых часто в виде доверительных интервалов получаемых оценок, в процессе объединения данных и моделей осуществляется путем формирования сети наблюдения с адекватным покрытием и ассимиляции данных. При этом могут использоваться мультимодельные процедуры предсказания. Научная сторона решаемой задачи (создания системы мониторинга состояния океанической среды) заключается в получении нужного для приложений пространственного и временного разрешения и оптимального перечня оцениваемых параметров. Представляемое системой i-Nord следующее поколение системы наблюдения должно на регулярной основе обеспечивать потребителей информацией с адекватным решаемым задачам пространственным и временным разрешением. Развитие существующих систем наблюдения признается неоправданным с экономической точки зрения [4]. Сейчас предлагаются новые сенсоры, платформы и подходы, использующие адекватные модели. Наблюдения должны производиться совершенно новой инфраструктурой. Система формируется из набора

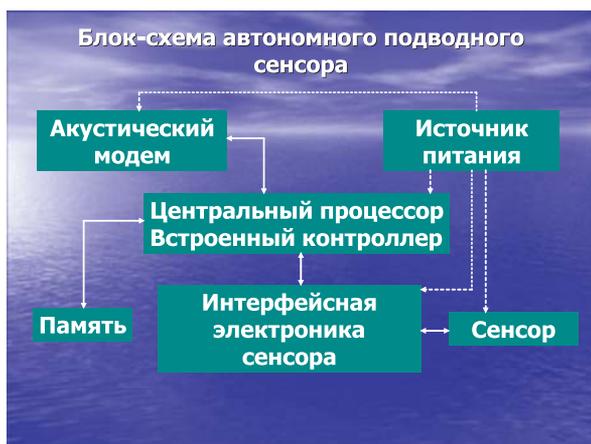


Рис. 3. Блок-схема типичного автономного подводного сенсора

платформ и сенсоров, объединенных в сеть. Разумеется, при создании системы наблюдения принципиальные решения идут не только от инженерных блоков (здесь — WP6) к прикладным (WP1—WP3), но и в обратном направлении. Чрезвычайно важны требования, исходящие от приложений и влияющие на все составляющие инженерных решений. Характерным примером таких связей является работа [7], посвященная постановкам задач в связи с требованиями оборонных приложений («тактическое подводное наблюдение», противоминные операции и — в связи с тем и другим — применение необитаемых подводных аппаратов). Прежде всего здесь речь идет об исходящих от указанных приложений *требованиях к качеству океанологической информации*. Для получения нужного качества в специфической постановке десятилетие назад начались работы по физической океанологии, морской метеорологии, акустике океана и геофизике дна. Сердцевина этих работ по физической океанологии сводится к трем приоритетным областям:

- процессы в пограничных слоях с акцентами на взаимодействие атмосферы и океана, динамику границы перемешанного слоя, процессы в придонном слое, взаимодействие потоков жидкости с топографией дна, поверхностные волны;
- субмезомасштабные процессы и параметризация и в связи с ними изменчивость фронтальных зон, внутренние волны, распределение температуры и солености, турбулентность и перемешивание;
- системы оценивания и прогноза с акцентами на процедуры ассимиляции, фильтрации, оптимальной и адаптивной выборки, анализа неопределенностей (полей неопределенностей).

Особое внимание уделяется разработке и тестированию сквозных (end-to-end) моделей и систем (акустика — океанология), где требования к океанологической информации сочетаются с требованиями к акустической информации. Показательны примеры разработки систем для реализации так называемого устойчивого подводного наблюдения (Undersea

Persistent Surveillance). В рамках этих систем вопросы текущего оценивания характеристик окружающей среды неразрывно связаны со специфической задачей подводного наблюдения с использованием распределенных в пространстве сенсоров, в том числе с кооперативным использованием множества подводных аппаратов. Отметим в качестве некоторого ориентира указанные в [7] количественные характеристики, относящиеся как к решаемой прикладной задаче, так и к качеству океанологической информации. В мелком море область, подконтрольная системе устойчивого подводного наблюдения, характеризуется величиной порядка 10 тыс. км<sup>2</sup> с возможностью наращивания; пространственное разрешение параметризованных моделей оценивается интервалом порядка 50 м — 5 км.

### Сенсоры и сенсорные сети как основа систем наблюдения

Основными сенсорами, необходимыми для мониторинга безопасности, океанической среды, экосистем и морских ресурсов, в рассматриваемых системах являются сенсоры акустические, электрического и магнитного полей, гидрофизические, сейсмоакустические, биологические пробоотборники, оптические. Отдельно следует отметить средства дистанционного съема информации о состоянии морской среды, размещаемые на спутниковых платформах. Спутниковые сенсоры используются для регистрации распределений температуры поверхности и уровня моря, поверхностных геострофических течений, приповерхностного ветра и волнения, динамики фронтальных зон, распределения цветности океана, концентрации и дрейфа морского льда. Когда такая информация связывается с непосредственными океаническими наблюдениями в водном слое, например с помощью акустических, оптических датчиков или пробоотборников, спутниковые сенсоры становятся важной составной частью общей стратегии эффективных наблюдений за состоянием океанической среды и стратегии рациональной выборки данных, чтобы обнаруживать и характеризовать подлежащие мониторингу процессы и явления.

Многие сенсоры имеют специфическое применение при работе с тех или иных платформ или в составе различных систем. В инфраструктуре систем предполагается использование различных сенсоров: на судовых платформах, в составе донных кабельных систем, на буях и плавучестях, на автономных подводных аппаратах и глайдерах, на спутниках и авиационных носителях, на берегу (например, обзорные и метеорологические радиолокаторы, средства наблюдения за атмосферой) и, что особо важно, в составе беспроводных сенсорных сетей. Типовая конструкция сенсора, работающего в составе беспроводных (подводных акустических) сенсорных сетей, приведена на рис. 3.

Типовые схемы организации (архитектуры) беспроводных сенсорных сетей, использующие в зави-

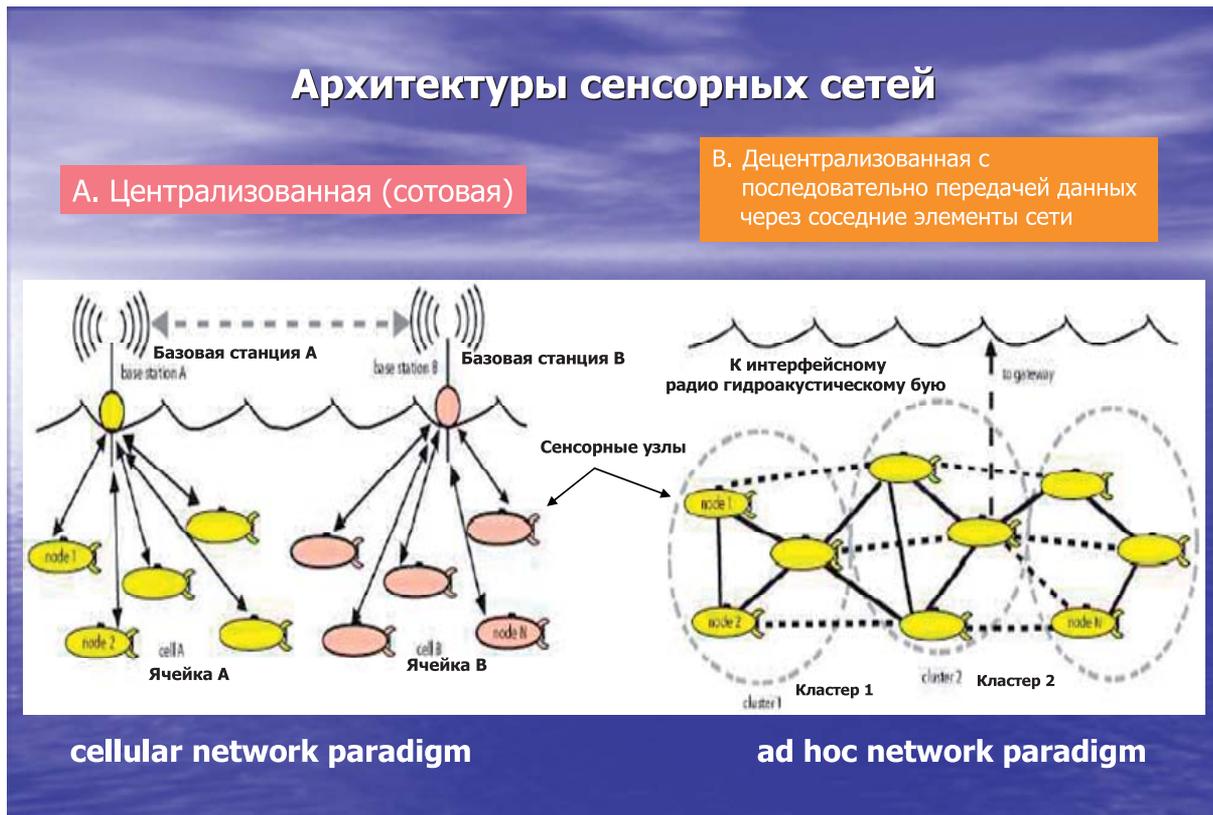


Рис. 4. Примеры организации сенсорных сетей в составе систем наблюдения за океаном в интересах решения прикладных задач

симости от задачи различные сенсоры, приведены на рис. 4. Сенсорные сети состоят из переменного по количеству состава сенсоров и аппаратов, которые развертываются для выполнения задач объединенного мониторинга в заданном районе. Один из распространенных вариантов организации наблюдения с использованием сенсорных сетей представлен на рис. 5.

При организации распределенных систем мониторинга наибольшее распространение получила децентрализованная архитектура. Обобщенная децентрализованная (ad hoc) сеть может быть определена следующим образом: это совокупность автономных ячеек или терминалов, которые осуществляют связь (радио- или акустическую) друг с другом с множеством транзитных участков для передачи сообщений и установки связи децентрализованным образом. Какой-либо фиксированной инфраструктуры в виде совокупности базовых станций в сетях этого типа нет. Оба типа сетей могут иметь в своем составе позиционные и мобильные элементы. К последним, в частности, относятся те, что размещаются на автономных аппаратах.

Подводные сенсорные сети находят применение в сборе океанологических данных, мониторинге загрязнений, геофизической разведке, сборе информации в целях предотвращения чрезвычайных ситуаций, в навигационном обеспечении и тактическом наблюдении. Внедрение подводных акустических

сетей является востребованной технологией для таких приложений. Однако часто возникают вопросы об ограничениях, которые имеют беспроводные каналы связи под водой, и об опыте, накопленном в области кабельных средств передачи информации (например, в сфере геофизики и систем военного назначения), и их преимуществах. Ответы на подобные вопросы чрезвычайно важны, так как касаются выбора перспектив развития соответствующих информационных систем. Казалось бы, очевидно, что каждое из решений не должно противопоставляться другим, а использоваться в целесообразном сочетании, но стоит отметить некоторые особенности различных подходов.

Кабельные системы оказываются предпочтительными, когда требуется передавать в реальном времени широкополосные данные и для поддержания работоспособности приборов требуется большой расход электроэнергии. Такие системы успешно используются при создании донных обсерваторий, в том числе для тестирования элементов перспективных систем. Однако широкому распространению кабельных систем, за исключением их использования в небольшом числе ключевых позиций (в геофизике [8] и в военных системах), в настоящее время препятствует высокая стоимость их развертывания, низкая устойчивость к повреждениям и отсутствие гибкости при необходимости переустановки и изменения конфигурации систем.



Рис. 5. Вариант организации системы наблюдения, основанной на использовании сенсорных сетей

Трудности с применением систем этого типа возникают также при необходимости оперативной установки систем в новых географических районах. В ряде важных случаев, например, когда системы формируются из (или с привлечением) мобильных элементов — автономных аппаратов, использование кабельных систем просто невозможно. Именно поэтому характерной современной тенденцией при создании морских информационных систем является ориентация на применение беспроводных сенсорных сетей. Причем эта тенденция распространяется на все отмеченные на рис. 1 прикладные задачи. В работах (например, в [9]), касающихся обеспечения безопасности морских объектов имеется дополнительная аргументация в пользу беспроводных сенсорных сетей. Она сводится к тому, что важным свойством средств

обеспечения безопасности (кроме уже упомянутых) является скрытность их развертывания. Обеспечить это качество по отношению к кабельным системам сложно, а к беспроводным — легко. В подводном пространстве основой сетей являются средства акустической связи, над водой и в общем случае — это радио- или комбинированная связь. В отличие от радио подводным акустическим сетям, в свою очередь, приписывается ряд отрицательных свойств: низкая скорость передачи данных и, как следствие, латентность всей сети, ограничения на полосу пропускания и, соответственно, на объемы передаваемых данных, подверженность влиянию условий распространения акустических волн, открытый характер связи, позволяющий воздействовать на нее. Перечисленные свойства действительно имеют место. Однако в том,

Таблица 1. Соответствие расстояний между ячейками сети и используемыми рабочими частотами

Дальность связи	Интервал между ячейками сети, м	Частота, кГц	Решаемая задача
Сверхмалая	5—50	Более 100	Связь между близкими объектами
Малая	50—500	30—100	Локальные в пространстве сети
Средняя	500— $5 \cdot 10^3$	8—30	Сети, покрывающие большие площади
Большая	$5 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^4$	1—8	Сети, обеспечивающие тактические задачи
Очень большая	$5 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^5$	Менее 1	Сети, обеспечивающие системы глубокого моря



Рис. 6. Элементы экспериментальной системы наблюдения, основанной на использовании сенсорных сетей с сетевой акустической и комбинированной связью

что касается их улучшения, достигнут значительный прогресс. Совершенствование характеристик и устойчивости сетей подводной акустической связи в последнее десятилетие оказалось обещающим настолько, что они стали рассматриваться в качестве основного варианта создания долговременных систем мониторинга в отношении различных прикладных задач [10]. В табл. 1 представлены данные по соответствию расстояний между ячейками сети и используемыми рабочими частотами. В качестве примера на рис. 6 представлены элементы системы наблюдения DADS, основанной на использовании акустической и комбинированной (акустика и радио) сенсорной сети.

Распределенные в пространстве и объединенные с помощью сетей связи в единые системы совокупности различных сенсоров в настоящее время становятся новым мощным инструментом решения прикладных задач с качествами, превышающими те, которыми обладали информационные средства предыдущего поколения. Среди приложений: мониторинг загрязнителей окружающей среды, детальное изучение нефтегазовых месторождений, исследование и контроль сейсмической активности, мониторинг биологических ресурсов и трафика надводного и подводного судоходства, изучение свойств ледяного покрова. Этот же инструмент кладется в основу новых средств получения фундаментальных знаний об океане.

### Литература

1. *Alberts D. S., Garstka J. J., Stein F. P. Networked Centric Warfare: Developing and Leveraging Information Superiority // CCRP Publications Series. — 2<sup>nd</sup> ed. — [S. l.], 1999.*
2. *Government's High North Strategy. — [S. l.], 2006.*
3. *New Building Blocks in the North: The next step in the Government's High North Strategy / Norwegian Ministry of Foreign Affairs. — [S. l.], 2009.*
4. *i-Nord: A holistic information system for monitoring of maritime security, marine environment and marine resources of the Nordic Seas and Arctic Ocean: Main Report SINTEF. — Trondheim, 2009.*
5. *Berglund J. Networked centric Warfare: A realistic Defense alternative for smaller Nations? Master's Thesis / NPS. — Monterey, CA, 2004.*
6. *Johnsen A. Barents 2020 — A tool for a Forward-looking High North Policy. — Oslo, 2006.*
7. *Harper S. AESOP: Assessing the Effects of Submesoscale Ocean Parameterizations / Office of Naval Research Presentation. — [S. l.], 2006.*
8. *Лаверов Н. П., Рослов Ю. В., Лобковский Л. И. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2011. — № 4.*
9. *C4ISR for Future Naval Strike Groups. — [S. l.], National Academies Press, 2006.*
10. *Hovem J. M. Underwater Sensor Networks for Marine Environmental Surveillance // SINTEF-ICT, NTNU OSS. — 2009. — 27.01.*