

Автономная донная станция оперативного контроля как элемент комплексной системы мониторинга и контроля радиационного и химического загрязнения арктических морей

А. И. Вялышев¹, доктор физико-математических наук,

В. М. Добров²

ФГБУ Всероссийский научно-исследовательский институт
по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России

В. В. Стоянов³

ООО «Ситекрим»

В. А. Пантелеев⁴, кандидат физико-математических наук,

М. Д. Сегаль⁵, доктор технических наук

ФГБУН Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН

В связи с перспективой широкомасштабного освоения Арктики возрастает актуальность работ в области экологической безопасности арктических морей, которая обусловлена активизацией разработки нефтегазовых месторождений, наличием обширного «ядерного наследия» СССР, а также возможными авариями судов с ядерными энергоустановками, плавучих АЭС, хранилищ радиоактивных отходов. Показано, что разработанная автономная донная станция для мониторинга радиационной обстановки и токсичности водной среды позволит предоставлять оперативную информацию и способствовать выработке оптимальных управленческих решений в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций и управления рисками в водах арктических морей.

Ключевые слова: Арктика, экология, безопасность, радиация, мониторинг, загрязнение, чрезвычайная ситуация, донная станция, передача информации, водная среда, ВАБ, риск.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показывает, что с учетом количественных и качественных характеристик арктического пространства с точки зрения геополитики, экономики, экологии, транспорта и ряда других факторов статус Арктики будет возрастать [1].

В последние годы руководством России утверждены такие важнейшие документы, как «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу» и «Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года».

Континентальный шельф Северного Ледовитого океана содержит значительные объемы мировых шельфовых запасов углеводородов, более миллиарда баррелей нефти и многие триллионы кубометров природного газа [1].

Нельзя не упомянуть и о перспективах крупномасштабной проводки судов по Северному морскому пути из Европы в страны Азиатско-Тихоокеанского региона, что позволит уменьшить время в пути с примерно 42 до 22 сут (по сравнению с традиционной проводкой через Суэцкий канал, например из Мурманска в Шанхай) и получить существенные экономические выгоды для России, поскольку только она обладает мощным ледокольным атомным флотом.

В связи с перспективой широкомасштабного освоения Арктики возрастает актуальность экологической безопасности арктических морей, в первую очередь химической, обусловленной активизацией разработки нефтегазовых месторождений, и радиационной, обусловленной «ядерным наследием»

¹ e-mail: vialyshev@rambler.ru.

² e-mail: dobrov007@mail.ru.

³ e-mail: stoyanov2000@mail.ru.

⁴ e-mail: pant@ibrae.ac.ru.

⁵ e-mail: nag@ibrae.ac.ru.

СССР, а также возможными авариями судов с ядерными энергоустановками, плавучих АЭС, хранилищ радиоактивных отходов [2; 3].

Что касается «ядерного наследия», то в литературе отмечается, что суммарное количество радиоактивных источников, затопленных в морях, омывающих Мурманскую область, составляет примерно две трети активности всех радиоактивных отходов, захороненных в Мировом океане [4].

Таким образом, можно отметить, что с учетом перспективы широкомасштабного промышленного освоения Арктики особую значимость приобретает проблема мониторинга и контроля химического и радиационного загрязнения арктических морей.

В этих условиях существует высокий риск аварийных ситуаций, ликвидация последствий которых представляет особые технические трудности в Арктике. Для решения вопросов снижения рисков при возникновении и развитии аварийных ситуаций и повышения эффективности мер по ликвидации их последствий в труднодоступных районах шельфа и прибрежных акваторий необходима система надежного контроля состояния акватории, интегрированная в общий комплекс средств оповещения о возникновении аварийных ситуаций и оперативной разработки мер по ликвидации их последствий.

Для решения указанной задачи необходимо создать многофункциональную систему измерения гидрологических и физико-химических параметров водных масс в выбранных точках контролируемой акватории и по ее площади. Измерительная система должна обеспечивать надежное оперативное обнаружение превышений пороговых значений основных характеристик водных масс, подвергшихся техногенному загрязнению.

Интегрированные системы контроля экологии и аварийных ситуаций (ИСКА) создаются с учетом целей и задач, решаемых данным инфраструктурным проектом на основе использования выработанных технологий [5]. Особенности технологий, примененных для создания ИСКА, являются:

- комплексность измерений, заключающаяся в измерении распределения гидрофизических и гидрохимических параметров морской среды по глубине и по площади акватории с практически одновременным получением и обработкой информации от всех измерительных модулей;
- модульное построение измерительной системы, позволяющее создавать систему любой размерности и конфигурации;
- использование для оперативного химического анализа морской среды современных методов анализа (ион-селективные электроды, рамановская спектроскопия, погружной масс-спектрометр и др.);
- использование для сбора информации автономного необитаемого подводного аппарата;
- использование для подзарядки автономных подводных аппаратов автоматических донных станций (АДС) контроля;

- использование для передачи информации оптоволоконных, гидроакустических и спутниковых каналов связи;
- использование информационно-аналитической подсистемы, обеспечивающей поддержку принятия управленческих решений при возникновении чрезвычайных ситуаций с применением ГИСТехнологий и современных методов оценки рисков.

На рис. 1 показана схема расположения измерительных модулей ИСКА на примере акватории, прилегающей к нефтегазодобывающей платформе, на рис. 2 — структура ИСКА. Конфигурация системы ИСКА основывается на реальных требованиях опытно-конструкторской работы «Арктика-Страж», учитывающих сезонное наличие ледовых условий, и на технических возможностях вновь создаваемых и существующих современных средств океанологических измерений. Структура ИСКА организована в виде системы с четырьмя зонами контроля экологии и аварийных ситуаций в акватории.

В состав основных измерительных модулей ИСКА входят:

- автономная донная станция контроля химических параметров и уровня радиоактивности водных масс;
- кабельная донная станция контроля химических параметров и уровня радиоактивности водных масс (ДСК);
- автоматизированное профилирующее устройство вертикальной структуры содержания химических примесей водных масс (МАКВЭМ);
- сейсмическая донная станция (ССД);
- подводный аналитический модуль масс-спектрометрических и рентгенофлуоресцентных измерений (МС и РФ модуль).

ДСК, МАКВЭМ, ССД и МС и РФ модуль объединяются в интегрированную систему сбора данных с помощью специально разработанной подводной волоконно-оптической системы скоростной передачи данных (ПМ ВОМ СПД), которая одновременно обеспечивает электропитание измерителей.

АДС обеспечивает передачу данных в аварийных ситуациях с помощью гидроакустического канала или спутникового канала связи при автоматическом всплытии станции в случае превышения пороговых значений содержания загрязнений. Всплытие АДС осуществляется в случае неисправности обмена данными по гидроакустическому каналу и с учетом заданного значения таймера, характеризующего сезонное наличие ледовой обстановки.

Для получения данных о состоянии водных масс в участках контролируемой акватории между стационарными донными измерителями используются автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) с набором датчиков физико-химических параметров воды и с акустическими системами измерения течений, батиметрии и поиска объектов на дне.

В совокупности указанная полномасштабная измерительная система составляется из типовых

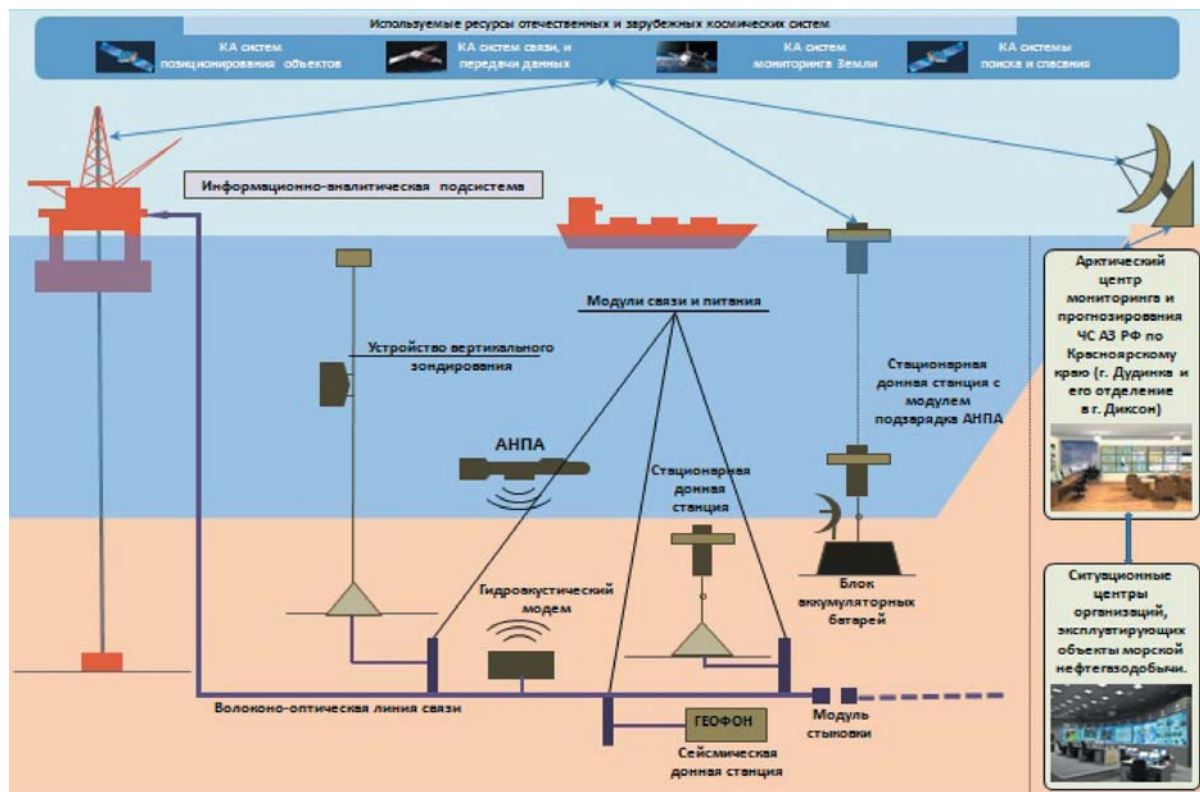


Рис. 1. Интегрированная система контроля арктических акваторий

измерительных сегментов с четырьмя зонами мониторинга и контроля аварийных ситуаций в акватории для каждого сегмента. В соответствии с решаемыми задачами измерительные сегменты в составе ИСКА также могут масштабироваться и содержать от одной до четырех зон мониторинга контроля акваторий.

Научная значимость создания ИСКА в целом заключается в использовании инновационных технологий, разработке методик автоматизированного многопараметрического контроля состояния акваторий и определения в реальном времени начала возникновения аварийных ситуаций на морском шельфе и в прибрежных акваториях включая территории акваторий арктических районов, покрытых льдом. Оценка текущего состояния контролируемой акватории и прогнозирование начала, места и возможного масштаба внештатной ситуации базируется на оперативной обработке данных от всех объемно расположенных измерительных модулей о превышении заданных значений контролируемых характеристик. В целом это обеспечивает достоверную информационную поддержку для принятия управленческих решений в реальном времени.

Одним из основных элементов комплексных систем контроля безопасности проведения подводных работ специального назначения и систем мониторинга акватории является устройство измерения химического и радиационного загрязнения акватории.

В настоящее время существует достаточно большое количество донных и буйковых станций, используемых для определения гидрофизических и сейсмических характеристик акватории [6]. Однако в подавляющем большинстве эти измерительные системы рассчитаны на измерения гидрофизических параметров водной среды и не предназначены для оперативного измерения загрязнений. При необходимости определения загрязнения берется проба воды и проводится ее анализ в стационарных условиях.

Уникальность рассматриваемой АДС состоит в ее многофункциональности и автономности эксплуатации. Многофункциональность обеспечивается возможностью одновременного комбинируемого расположения требуемого набора измерительных элементов и предварительной обработки контролируемых параметров. Автономность эксплуатации АДС, проверенная в реальных условиях Карского моря, составила два года и может быть доведена до четырех лет.

Таким образом, с учетом изложенного была разработана автономная донная станция контроля текущих и пороговых значений радиационных и химических загрязнений морской воды с передачей данных по спутниковому каналу, предназначенная для мониторинга радиационной обстановки и токсичности морской среды вблизи надводных, подводных и береговых потенциально опасных объектов [7; 8].

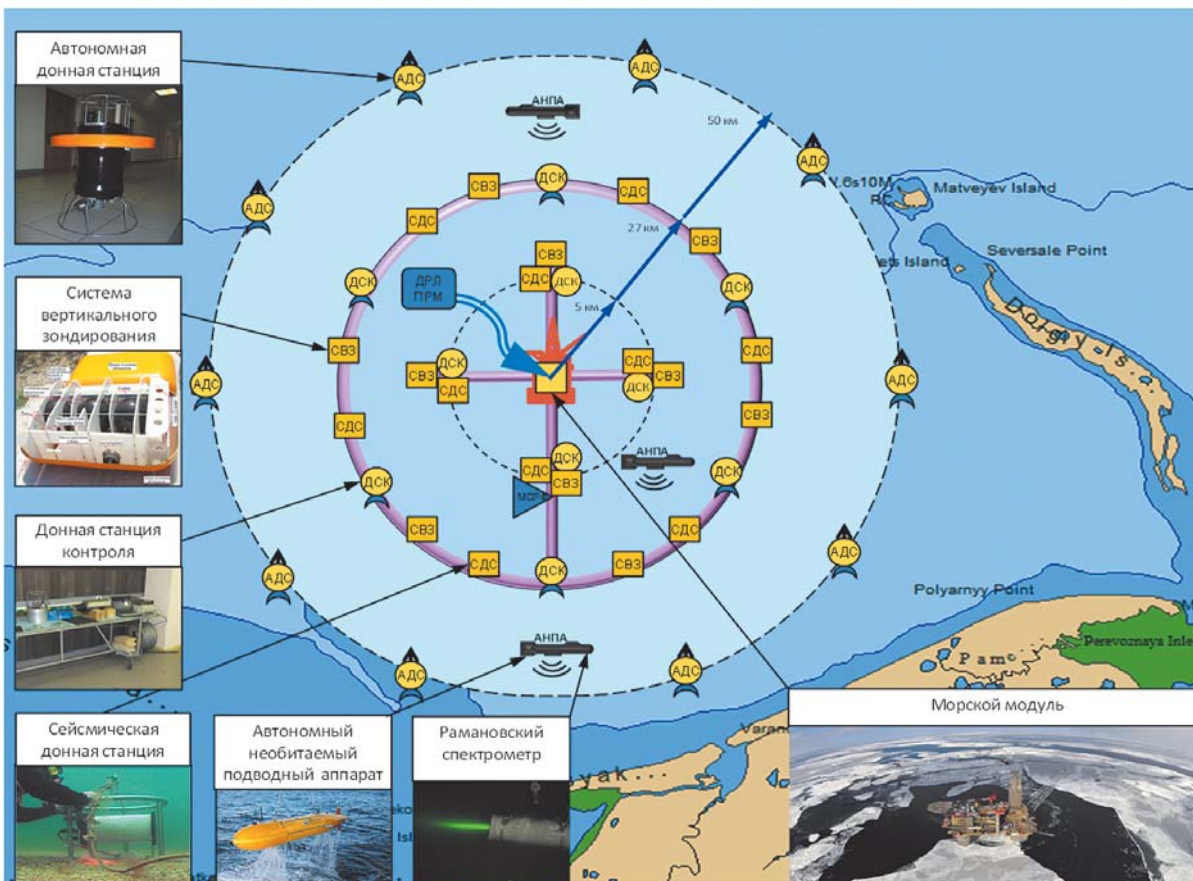


Рис. 2. Структура интегрированной системы контроля экологических ситуаций в арктических акваториях

АДС или совокупность таких станций устанавливается в районе проведения работ с подводными, надводными и береговыми потенциально опасными объектами, осуществляя постоянный контроль выхода опасных веществ в окружающую водную среду. В случае превышения заданного уровня загрязнения АДС всплывает на поверхность и передает информацию в спутниковый канал связи системы «КОСПАС-САРСАТ» (ограниченный объем данных), а позднее системы «Iridium».

АДС предназначена для измерений уровней химического и радиационного загрязнения, а также гидрологических характеристик.

Определяются спектры гамма-излучения окружающей морской среды и идентификация радиоактивных веществ, растворенных в морской воде и в поверхностном слое донных отложений. Также определяются гидрологические характеристики, в том числе температура, электропроводность, гидрооптические характеристики течений на глубинных горизонтах.

На рис. 3 представлен внешний вид автономной донной станции. Конструктивно АДС выполнена в виде подводного автономного всплывающего устройства, состоящего из:

- корпуса с плавучестью;



Рис. 3. Автономная донная станция

- блока химического контроля;
- блока спектрометрического анализа;
- устройства управления;
- радиомаяка спутниковой системы «КОСПАС-САРСАТ» и передатчика спутниковой системы «Iridium»;
- блока автономного питания;

- датчика затекания;
- устройства гидроакустического вызова;
- механизма размыкания;
- проблескового маяка.

АДС имеет следующие технические возможности:

- мониторинг гамма-квантов в морской среде;
- мониторинг повышенного уровня ионов отдельных химических элементов;
- задание перед постановкой параметров мониторинга и порога срабатывания с помощью персонального компьютера;
- хранение результатов мониторинга во внутренней памяти;
- автономное электропитание;
- механизм размыкания якоря, обеспечивающий всплытие на поверхность акватории при выработке сигнала о превышении установленного порога, технической неисправности или при вызове по гидроакустическому каналу;
- передача через спутниковую систему «Iridium» («КОСПАС-САРСАТ») на электронный адрес получателя SBD-сообщений, содержащих координаты, причину всплытия и записи от радиационного и электрохимических датчиков;
- считывание данных мониторинга из автономной донной станции по кабелю в персональный компьютер;
- обнаружение автономной донной станции на поверхности воды в темное время суток по проблесковому световому маячку.

АДС может устанавливаться с борта необорудованного судна. Установка производится при волнении моря не более 4 баллов. Масса донной станции без якоря не более 31 кг. Масса якоря (балласта) в воде не менее 14 кг. Длина буйрепа 1—10 м в зависимости от условий постановки. Габаритные размеры АДС: диаметр — 410 мм, высота — 870 мм. Габаритные размеры плавучести: диаметр — 520 мм, высота — 240 мм.

АДС предназначена для установки на глубинах до 3000 м. Продолжительность функционирования на позиции без изменения основных параметров — 24 мес. Станция устойчива к подводным течениям со скоростью до 2 узлов. Срок службы автономной донной станции — 5 лет. Диапазон рабочих температур — от 0 до +35°C.

Блок-схема автономной донной станции приведена на рис. 4.

При всплытии на поверхность в связи с технической неисправностью (затеканием, уменьшением емкости батарей до критического уровня) или чрезвычайной ситуацией включается передатчик радиомаяка спутниковой системы «Iridium», который излучает радиосигналы, содержащие координаты, код причины всплытия и записанные данные. При всплытии включается световой проблесковый маяк.

Блок химического контроля. Химический контроль состояния водной среды на донной станции основан на использовании метода ион-селективных

электродов. С заданной дискретностью фиксируются химические параметры воды, в том числе: нефтяные углеводороды, растворенный кислород, водородный показатель, хлорированные углеводороды, основные химические элементы морской воды (натрий, хлор, магний, кальций, сера, калий, бром, стронций), тяжелые металлы (ртуть, свинец, кадмий, медь, йод, цезий, полоний, радий, стронций, молибден, палладий), фенолы, синтетические поверхностно-активные вещества, нитритный азот, кремний.

Для получения гидрофизических параметров среды используются датчики электропроводности и температуры (показатель солёности).

Под перекрестной чувствительностью понимается свойство сенсора быть специфичным не только к основному определяемому компоненту, но также и к другим компонентам определяемой среды. Использование таких сенсоров позволит проводить интегральный качественный анализ сложных жидких сред.

Таким образом, общее количество электродов — 10 плюс электрод сравнения и датчики температуры и электропроводности.

Диапазон измерений по отдельным элементам представлен в табл. 1.

Таблица 1. Диапазоны измерений по элементам

Элемент	Диапазон измерений, мг/л
Cl-	0,35—35 000
F-	0,02—1 900
S2-	0,03—3 200
Cu2+	0,006—63 000
Pb2+	0,01-21 000
Cd2+	0,11—11 000
Ag+	0,01—108 000
Hg2+	0,02—20 000

Блок спектрометрического анализа. Регистрация гамма-квантов сцинтилляционным блоком детектирования основана на измерении интенсивности световых вспышек, возникающих при их взаимодействии с веществом кристалла [8]. Периодичность включения блока и длительность измерений задаются программно перед установкой модуля. Энергонезависимая память спектрометра обеспечивает хранение всех результатов измерения и анализа радиационной обстановки.

После окончания цикла измерения включается программа обработки и анализа спектров. Производится оценка динамики изменения радионуклидного состава среды.



Рис. 4. Блок-схема автономной донной станции

Если превышено установленное пороговое значение, процессор многоканального анализатора амплитуд импульсов передает сигнал о чрезвычайной ситуации в процессор управляющего устройства донной станции.

АДС предназначена для выполнения следующих задач радиационного мониторинга:

- измерения с заданной периодичностью радиационного фона на арктическом шельфе и прибрежных акваториях;
- принятия решения о превышении установленного уровня радиационного фона определенных радиоактивных изотопов;
- хранения в памяти результатов измерения и спектрометрического анализа;
- всплытия на поверхность и излучения радиосигнала через спутниковую систему «Iridium».

Диапазон регистрации энергии гамма-квантов — 200—3000 кэВ. Минимальное значение контролируемой объемной активности ^{137}Cs , равномерно растворенного в морской воде (1 ч, точность 98%) — 6—8 Бк/л. Чувствительность тракта: для ^{137}Cs — 0,16 (имп/с)/(Бк/л), для ^{40}K — 0,08 (имп/с)/(Бк/л).

Управляющее устройство осуществляет непрерывный контроль напряжений питания, сигнала от датчика затекания для регистрации аварийной ситуации и сигналов от блока химического анализа и блока спектрометрического анализа для выявления чрезвычайной ситуации.

Команда на срабатывание размыкателя подается от управляющего устройства в случаях:

- превышения заранее установленного радиационного порога;

- истечения временного интервала (от внутреннего таймера контроллера при работе по алгоритму «установка на время»);
- попадания воды внутрь прочного корпуса (датчик затекания);
- понижения напряжения автономного источника электропитания до критического предела, способного вызвать прекращение нормального функционирования;
- вызова автономной донной станции на поверхность по гидроакустическому каналу связи.

Решение о всплытии вырабатывается с учетом возможной ледовой обстановки. При всплытии включается световой проблесковый маяк. При всплытии на поверхность в связи с технической неисправностью (затеканием, уменьшением емкости батарей до критического уровня) или чрезвычайной ситуацией управляющее устройство включает передатчик радиомаяка спутниковой системы «Iridium», который излучает радиосигналы, содержащие координаты, код причины всплытия и записанные спектры.

После подъема донной станции результаты измерений радиационных спектров и химического анализа могут быть записаны в память персонального компьютера.

Для управляющего устройства предусмотрено три режима функционирования:

1. Регистрация данных — всплытие осуществляется по таймеру или вызову по гидроакустическому каналу. В отдельном случае — при достижении критических уровней напряжения батарей либо затекании. Сигналы от блока химического контроля



Рис. 5. Механизм размыкания

и блока спектрометрического анализа о превышении порога игнорируются.

2. Мониторинг — гарантированное всплытие осуществляется по истечении времени таймера, задаваемого оператором, и через вызов по гидроакустическому каналу в произвольный момент времени и при чрезвычайной ситуации. В отдельном случае — только при достижении критических уровней напряжения батареи либо затекании.

3. Контроль — всплытие при превышении порогов уровней, заданных для блока химического контроля и блока спектрометрического анализа, или через вызов по гидроакустическому каналу в произвольный момент. В особом случае — только при достижении критических уровней напряжения одним из банков батарей либо при затекании.

При принятии решения о всплытии устройство управления учитывает наличие ледяного покрова в месте установки автономной донной станции, введенное ранее. При попадании в интервал времени с возможным наличием на поверхности ледяного покрова устройство управления ожидает окончания этого интервала и только потом принимает решение о всплытии.

Аппаратура передачи спутникового радиосигнала состоит из комплексной антенны («Iridium», GPS), установленной на крышке корпуса, и передатчика, находящегося в герметичном корпусе (модем). Модем может посылать данные GPS с устанавливаемым перед началом работы интервалом (от ежесекундно до раз в 45 дней). Встроенный GPS-приемник находится в активном состоянии независимо от

того, включен или нет терминал при подключенном питании.

На нижней крышке корпуса автономной донной станции располагается электромагнитный размыкатель типа TOS, обеспечивающий всплытие станции на поверхность (рис. 5) [9].

АДС помимо возможности вызова на поверхность по гидроакустическому каналу может быть оборудована модемом для передачи информации по гидроакустическому каналу связи.

Это позволяет помимо информации о возникшей чрезвычайной ситуации, передаваемой через спутниковые каналы связи, осуществлять передачу текущей информации о состоянии водной среды без всплытия на поверхность. В связи с возможностью ледового покрова существенную часть года для использования в арктических условиях АДС должна быть дооборудована гидроакустическим модемом.

Гидроакустическая связь — это обмен информацией через водную среду, по которой распространяются гидроакустические сигналы между надводными судами, подводными лодками, водолазами и т. д. Передаваемая информация — речевые сигналы и кодированные сообщения. Гидроакустическая связь осуществляется приемопередающими станциями или гидроакустическими модемами, состоящими из приемной и передающей антенн (или из одной приемопередающей антенны), приемного и передающего трактов.

Скорость обмена информацией ограничивается невысокой скоростью распространения звука в воде (около 1,5 км/с) и явлением «затягивания»

во времени принятых сигналов, приходящих в точку приема по нескольким лучам в различное время вследствие рефракции звука. Для информации, передаваемой от АДС, пропускная способность гидроакустического канала достаточна. Дальность связи составляет 2000—3000 м.

АДС в условиях Арктики представляют собой базовый элемент для построения различных стационарных и мобильных систем мониторинга водной среды с возможностью создания различных конфигураций системы. Кроме того, АДС допускает установку дополнительных измерительных модулей, что значительно расширяет ее возможности.

Проблемы обеспечения безопасного развития территорий Арктической зоны приобретают все большую актуальность в связи с перспективным широкомасштабным освоением запасов углеводородного сырья, организацией регулярных проводок судов по Северному морскому пути, а также с радиационной опасностью, обусловленной «ядерным наследием» СССР, возможными авариями судов с ядерными энергоустановками, плавучих АЭС, хранилищ радиоактивных отходов. Одним из средств обеспечения безопасности является мониторинг и контроль химического и радиационного загрязнения арктических морей. АДС могут рассматриваться как одно из перспективных направлений создания современных систем мониторинга акваторий морских и береговых опасных объектов.

В [10] отмечается, что по поручению президента России Российской академии наук предложено подготовить прогноз социально-экономического и научно-технического развития страны до 2030 г. с использованием критериев стратегических рисков.

В этой связи нельзя не упомянуть актуальность развития и практического применения в специфических условиях Арктики методов вероятностного анализа безопасности (ВАБ) всех уровней для получения количественных оценок рисков при различных авариях и инцидентах, в первую очередь радиационного характера, обусловленных особенностями арктических морей, о которых говорилось выше.

При этом, на наш взгляд, значительная роль в прогнозировании рисков, оценке последствий чрезвычайных ситуаций в районах Крайнего Севера, выработке мероприятий по снижению рисков и смягчению последствий чрезвычайных ситуаций, принадлежит системе оперативного контроля состояния акватории.

Разработанная АДС для мониторинга радиационной обстановки и токсичности водной среды позволит предоставлять оперативную информацию и способствовать выработке оптимальных управленческих решений в области предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Кроме того, такие АДС позволят проводить верификацию разрабатываемых методов, алгоритмов и специального программного обеспечения для оценки последствий выбросов радиоактивных и токсичных веществ, в том числе и для задач вероятностного анализа безопасности.

Литература

1. Кондратов Н. А. Освоение Арктики: Стратегические интересы России // Вестн. Сев. (Арктич.) федер. ун-та. Сер. Естеств. науки. — 2014. — Вып. 1.
2. Антипов С. В., Билашенко В. П., Высоцкий В. Л. и др. Прогноз и оценка радиоэкологических последствий гипотетической аварии на затонувшей в Баренцевом море атомной подводной лодке Б-159 // Атом. энергия. — 2015. — Т. 119, вып. 2. — С. 106—113.
3. Саркисов А. А., Антипов С. В., Высоцкий В. Л. и др. Проблемы и перспективы радиоэкологический реабилитации арктических морей // Вопр. утилизации АПЛ. — 2012. — № 3 (23). — С. 8—23.
4. Тихонов М. Н. Радиационная география России как объект системного исследования // Материалы IX Международного ядерного форума «Безопасность ядерных технологий, аварийная готовность и реагирование», 29.09—03.10 2014 г. — СПб., 2014. — С. 186—206.
5. Большагин А. Ю., Вялышев А. И., Добров В. М. и др. Комплексный мониторинг — неотъемлемая часть безопасности Арктической зоны Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. — 2014. — № 1 (13). — С. 38—47.
6. Алексеев С. П., Римский-Корсаков Н. А. и др. Справочник технических средств изучения параметров природной среды Мирового океана / ГНИНГИ МО РФ. — СПб., 2009. — 183 с.
7. Vialyshev A. I., Stoyanov V. V., Paramonova O. A. The System For Monitoring Of Underwater Potentially Dangerous Objects And Integrated Information Control System With Using Of Autonomous Devices // Proc. The Fourteenth Annual Conference of The International Emergency Management Society («TIEMS-2007»). — Trogir, Croatia, 2007.
8. Стоянов В. В., Вялышев А. И., Степанец О. В. Автономная буйковая придонная станция. Патент на изобретение № 2344962, 2009 г.
9. Вялышев А. И., Добров В. М., Долгов А. А., Стоянов В. В. Автономная донная станция оперативного контроля состояния акватории — элемент системы снижения риска возникновения чрезвычайной ситуации с подводными потенциально опасными объектами // Тезисы докладов XX Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, 19—21 мая 2015 г. — М., 2015.
10. Махутов Н. А., Лебедев М. П., Большаков А. М., Гаденин М. М. Научные основы анализа и снижения рисков чрезвычайных ситуаций в районах Сибири и Севера // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 4 (12). — С. 4.
11. Арутюнян Р. В., Пантелеев В. А., Сегаль М. Д., Чернов С. Ю. О значимости разработки методологического аппарата вероятностного анализа безопасности третьего уровня (ВАБ-3) для объектов использования атомной энергии // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. — 2015. — № 2. — С. 91—99.