

Г.Г. БЕЗРУК, Л.А. МАРТЫНОВА, И.Б. САЕНКО
**ДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОИСКА АНТРОПОГЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ В МОРСКОМ ДНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ**

Безрук Г.Г., Мартынова Л.А., Саенко И.Б. Динамический метод поиска антропогенных объектов в морском дне с использованием автономных обитаемых подводных аппаратов.

Аннотация: Предложен динамический метод поиска антропогенных объектов в толще морского дна с использованием группы автономных обитаемых подводных аппаратов. В отличие от статического метода, при котором все аппараты с геофонами на борту одновременно заглубляются и прикрепляются ко дну, а после окончания сеанса поиска одновременно всплывают, предложенный метод обеспечивает непрерывность ведения поиска за счет динамического поведения группы аппаратов. В то время как основная часть аппаратов с геофонами занята прослушиванием отраженного сигнала, другая часть аппаратов перемещается далее по своему маршруту. Таким образом достигается непрерывность ведения сейсморазведки в заданном районе и существенное сокращение времени на ее проведение. Предложенный метод представляет собой дальнейшее развитие методов поиска антропогенных объектов на морском дне с использованием обитаемых аппаратов. Приведен алгоритм согласованного поведения аппаратов с геофонами на борту и подводного аппарата, перемещающего излучатель. Определено взаимное положение группы и излучателя, обеспечивающее наиболее эффективное ведение сейсморазведки антропогенных объектов. Определен показатель эффективности — всезаимутальность прихода отраженных от толщи морского дна сигналов, и приведен алгоритм его вычисления. Указан порядок решения задачи определения параметров метода поиска. Определено необходимое количество аппаратов в группе с учетом параметров движения аппаратов и излучателя. Описана математическая модель функционирования системы «излучатель — геофоны». Проведены численные эксперименты по определению оптимальных параметров ведения сейсморазведки антропогенных объектов. Результаты моделирования позволили оценить выигрыш от использования предложенного метода, определить его оптимальные параметры и разработать рекомендации по его использованию для поиска антропогенных объектов на дне Мирового океана.

Ключевые слова: робототехнический комплекс, автономный обитаемый подводный аппарат, антропогенный объект, сейсморазведка, излучатель, геофон, среднеквадратическое отклонение.

1. Введение. В настоящей статье рассматривается задача поиска антропогенных объектов на морском дне с использованием группы автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА). Под антропогенным объектом понимается созданный человеком объект, который расположен на морском дне и который необходимо обнаружить и по возможности определить его местоположение. Такими объектами могут быть заиленные затонувшие суда или летательные аппараты, древние города, опустившиеся под воду, очаги загрязнения и так далее.

В 1990 годы с развитием сейсморазведывательной аппаратуры начались активные работы по созданию 3D сейсмоакустических приемоизлучающих систем, работающих в различных частотных диапазонах и позволяющих получать объемное сейсмическое изображение геологической среды морского дна. Рассмотрение и классификация существующих систем и примеров их реального применения приведены в [1-3].

Основным методом решения этой задачи является сейсморазведка. Ее суть заключается в излучении в воду мощных низкочастотных акустических сигналов, которые проникают в грунт и отражаются от различных неоднородностей в нем, в том числе от антропогенных объектов [4-8]. Отраженные сигналы фиксируются полем донных станций [9], оборудованных геофонами, либо протяженными линейными многоэлементными антеннами (сейсмокосами), буксируемыми за судном, либо сейсмокосами, лежащими на дне [10]. Зафиксированные сигналы в береговых условиях обрабатываются на мощных компьютерах по специальным программам, позволяющим интерпретировать зафиксированные сигналы [11-14].

Для решения всех перечисленных задач используется специально оборудованное судно, которое способно буксировать излучатель и сейсмокосу, а также ставить и впоследствии поднимать на борт донные станции [15].

Недостатком описанного способа сейсморазведки является:

- обязательное наличие на судне: спуско-подъемного оборудования для сейсмокос, пневмоизлучателей, параванов (специальные кабельные лебедки, краны и тельферы), систем и устройств буксировки сейсмокос и пневмоизлучателей (специальные кабель-тросы и параваны, комбинированные кабели и шланги высокого давления), мощных и маломощных компрессоров высокой производительности (в сумме до 300–500 л/мин сжатого воздуха до 150 атм), специальных буксиремых буев со спутниковыми приемо-передатчиками, комбинированных многоконтактных герморазъемов для буксиремых и донных антенн [16];

- зависимость от технологических санкций, поскольку ответственные сервисные сейсмические компании, укомплектованные почти на 100% зарубежной аппаратурой компаний ION (США) и Sercel (Франция) [17-21];

- существенная зависимость возможности проведения сейсморазведки от волнения моря [16];

- существенная зависимость возможности проведения сейсморазведки от ледового покрытия водной поверхности [15]. В морях российской части Арктики благоприятная для сейсморазведки погода стоит суммарно не более 1,5 месяцев в году, что делает сейсморазведку экономически неэффективной;

– использование донных станций с прикреплением их ко дну является трудоемким и чрезмерно продолжительным, поскольку большая часть времени затрачивается на подготовительные работы. При этом при проведении сейсморазведки выполняются следующие мероприятия: распределение донных станций с геофонами по морской поверхности; опускание геофонов на морское дно; прикрепление геофонов к дну с определенной их ориентацией; позиционирование геофонов; всплытие геофонов после проведения измерений; сбор по поверхности моря всплывших геофонов.

Одним из вариантов преодоления ледового покрытия является технология, которую применяет в ледовой Арктике компания ION (США). Она основана на использовании двух судов. Впереди идет лидирующий ледокол и формирует относительно безледовый кильватерный след. По нему следует сейсморазведочное судно усиленного ледового класса, буксирующее за собой одну длинную (до 6 км) цифровую геленаполненную сейсмокосу без хвостового буя и кластер пневмоизлучателей. При этом сейсморазведочное судно оборудовано специальными устройствами, защищающими сейсмокосу и поплавки кластера от битого льда [16]. Однако с учетом вышеназванных причин использование такой технологии в отечественной сейсморазведке пока маловероятно.

Выходом из данной коллизии поиска антропогенных объектов в ледовой Арктике является создание всепогодных подводных робототехнических комплексов для поиска антропогенных объектов. Однако ввиду исключительной сложности этой задачи ее решение во всем мире находится на стадии поисковых исследований.

В настоящий момент многие развитые страны, занимающиеся поиском антропогенных объектов в морском дне, осознали необходимость создания всепогодных подводных робототехнических комплексов (РТК) для поиска антропогенных объектов, а ряд стран уже приступил к исследованиям по их созданию. Исследования, посвященные созданию подводных РТК для осуществления морской сейсморазведки, в настоящее время интенсивно проводятся за рубежом. Наиболее известным является финансируемый Евросоюзом проект Widely scalable Mobile Underwater Sonar Technology (WiMUST) [22], посвященный разработке технологии создания подводного РТК, базирующегося на совместном функционировании большого числа АНПА.

В России работы в данном направлении на сегодняшний день ограничены постановкой задачи (например, [15, 16]) либо отдельными техническими предложениями в виде патентов [23-27].

Помещение каждого геофона в корпус АНПА открывает широкие возможности построения и применения динамической системы ведения сейсморазведки антропогенных объектов, поскольку геофон с

АНПА может самостоятельно подвсплывать, перемещаться в заданную точку и опускаться на дно для прослушивания отраженных сигналов, создаваемых специальным излучателем-вибратором (далее по тексту — излучатель). Использование АНПА создает предпосылки для отказа от статической схемы использования геофонов и переходу к динамической схеме ведения донной сейсморазведки.

Поскольку для ведения сейсморазведки необходимо определенное количество геофонов [28], то в этом случае формируется группа АНПА. При этом эффективное ведение сейсморазведки возможно только при согласованных действиях излучателя и группы АНПА, которое, в свою очередь, обеспечивается оптимальным выбором параметров их взаимного функционирования.

Целью настоящей работы является разработка метода поиска антропогенных объектов с использованием АНПА и определение параметров метода, обеспечивающих эффективное ведение сейсморазведки в заданном районе. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи: обоснована оптимальная траектория движения излучателя; предложена оптимальная эффективная схема перемещения группы АНПА с геофонами на борту; определены параметры согласованного функционирования излучателя и группы АНПА; определены параметры метода, обеспечивающие эффективную сейсморазведку в заданном районе путем проведения исследований и численных экспериментов.

Теоретический вклад статьи заключается в дальнейшем развитии методов поиска антропогенных объектов на морском дне с использованием АНПА. Новизна полученных результатов определяется разработкой нового динамического метода непрерывной сейсморазведки с использованием группы АНПА, при котором часть геофонов занята приемом отраженного сигнала, а остальная часть — перемещением в новое положение.

2. Описание метода поиска антропогенных объектов с использованием АНПА. Поиск донных антропогенных объектов осуществляется следующим образом. В заданном районе прикрепляются к дну геофоны в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно района. Вблизи донной поверхности осуществляется перемещение излучателя, зондирующего донную поверхность импульсными сигналами. Геофоны, каждый из которых расположен в АНПА, осуществляют прием отраженных сигналов от объектов в придонном слое. Местоположение антропогенных объектов определяется по разности моментов времени приёма геофонами отраженных сигналов.

Известно, что для повышения эффективности поиска антропогенных объектов наиболее целесообразной траекторией перемещения

излучателя является его движение по круговым траекториям (циклоидам) [29, 30]. Вид круговой траектории (циклоиды) движения излучателя представлен на рисунке 1.

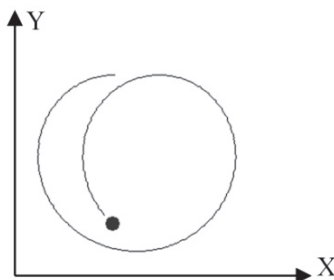


Рис. 1. Вид круговой траектории движения излучателя

Так, при исследовании точности метода в зависимости от траектории движения излучателя относительно АНПА показано, что траектория движения излучателя должна быть такой, чтобы курсовые углы излучателя относительно АНПА в моменты времени измерения отраженного сигнала периодически меняли борт и изменялись в возможно широких пределах [29]. Переход от прямолинейного движения по параллельным направлениям к круговому движению излучателя при обследовании заданного района способствует повышению всеазимутальности направлений отраженных сигналов. Всеазимутальная сейсморазведка гарантирует получение данных в широком диапазоне направлений сейсмических лучей. Опыт показал [29], что этот метод обеспечивает более качественное освещение разреза, более высокое соотношение «сигнал–помеха» и лучшую разрешающую способность сейсмоземки в сложных геологических условиях, например, в пластах, подстилающих соляные тела сложной формы. Указанные факторы, в свою очередь, оказывают существенное влияние на эффективность обнаружения антропогенных объектов.

При традиционной схеме поиска антропогенных объектов со стационарными геофонами сначала все геофоны опускаются и прикрепляются к дну, затем следует процесс приема и регистрации отраженного сигнала, после чего происходит синхронное всплытие всех геофонов и их перемещение в новые позиции для следующего приема отраженных сигналов. Это приводит к тому, что часть времени расходуется на выполнение технологических операций с геофонами, таких как открепление от дна, перемещение, прикрепление к дну, определение собственного местоположения и подготовка к приему отраженного сигнала. Поэтому в настоящей работе предлагается осуществлять

поиск антропогенных объектов с использованием АНПА, обращаясь к имеющимся преимуществам АНПА по сравнению со стационарными геофонами, в частности к способности перемещаться свободно и независимо друг от друга.

Предлагаемый метод поиска основан на согласованном функционировании излучателя и группы АНПА и заключается в следующем. В то время как большая часть АНПА из группы прикреплена к дну и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем, другая часть АНПА перемещается для занятия новой позиции, не участвуя при этом в приеме отраженных сигналов. После занятия новой позиции прием отраженных сигналов осуществляет группа АНПА в обновленном составе. При этом часть АНПА, не задействованная в приеме отраженного сигнала, осуществляет перемещение в места своей новой дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность ведения сейсморазведки [31].

3. Постановка задачи определения параметров метода поиска. Для эффективного ведения сейсморазведки в заданном районе необходимо определить ряд параметров работы АНПА, обеспечивающих согласованное поведение группы аппаратов с движением излучателя. Рассмотрим постановку этой задачи.

Пусть в заданном районе необходимо провести сейсморазведку. Имеется излучатель, движущийся по круговой траектории радиуса $R_{изл}$ со скоростью $V_{изл}$. Скорость излучателя ограничена некоторым значением V_1 , определяемым его техническими возможностями, то есть $V_{изл} \leq V_1$.

Прослушивание отраженных сигналов осуществляется группой АНПА, имеющей форму матрицы размерности $M \times M$, где M — количество рядов и количество АНПА в каждом ряду. Каждый АНПА при движении имеет скорость $V_{АНПА}$. Необходимо определить следующие параметры работы группы аппаратов:

- скорость $V_{АНПА}$ перемещения АНПА;
- количество M аппаратов в каждом ряду;
- расстояние между аппаратами ΔL .

На перечисленные параметры накладываются следующие ограничения:

- скорость $V_{АНПА}$ ограничена некоторым значением V_2 ;
- расстояние ΔL , одинаковое для всех АНПА группы, ограничено сверху. Причиной такого ограничения является максимально допустимая дистанция $d_{св}$ гидроакустической связи между аппаратами. Кроме того, существует максимально допустимая дистанция $d_{рл}$ до

каждого АНПА с координатами $(x_{\text{АНПА}}, y_{\text{АНПА}})$ от положения излучателя с координатами $(x_{\text{изл}}, y_{\text{изл}})$. Чрезмерная удаленность АНПА от излучателя приводит к существенному ослаблению отраженного сигнала и не обеспечивает его регистрацию геофоном на борту АНПА.

Разностью прихода отраженных сигналов на каждый аппарат будем пренебрегать, полагая, что регистрируется лишь момент излучения сигнала.

Определение параметров работы АНПА будем осуществлять так, чтобы процесс поиска антропогенного объекта обладал наибольшей эффективностью. Эффективность поиска в данном случае означает гарантированное обнаружение антропогенного объекта в заданном районе в заданный период времени. Наилучшее обнаружение достигается при обследовании заданного района с наибольшей всеазимутальностью. Всеазимутальность в данном случае означает приход сигнала на геофоны аппаратов со всех направлений из диапазона $0^\circ - 360^\circ$. Наибольший эффект в обнаружении антропогенных объектов достигается при равномерном поступлении отраженных сигналов из различных направлений.

В дальнейшем определение параметров метода ведения сейсморазведки осуществляется на основе оценки степени всеазимутальности, выраженной отклонением полученных значений азимутов от равномерного распределения азимутов. Степень отклонения выражается среднеквадратическим отклонением (СКО) азимутов от их среднего значения.

В каждый k -й момент времени на каждый (i, j) -й аппарат $(i, j=1, \dots, M)$ приходят отраженные сигналы с азимутом $Az_{ij}[k] \in [0; 360^\circ]$. Для анализа всеазимутальности принятых сигналов строится гистограмма направлений их прихода с определенной дискретностью. Пусть количество интервалов гистограммы равно N . Тогда условие попадания азимута в n -й интервал $(n=1, \dots, N)$ имеет следующий вид:

$$\frac{360 \cdot (n - 1)}{N} \leq Az_{ij}[k] < \frac{360 \cdot n}{N}.$$

Обозначим количество азимутов, пришедших на (i, j) -й аппарат к k -му моменту времени $(k=1, \dots, K; K$ — количество моментов времени, в которые происходила регистрация отраженных сигналов за весь период

наблюдения) через $Z_{ij}[n, k]$. Тогда среднее количество азимутов для всех аппаратов, попавших в n -й интервал к k -му моменту времени равно:

$$Z_{\text{сред}}[n, k] = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M Z_{ij}[n, k]}{M^2}. \quad (1)$$

Значение $Z_{\text{сред}}[n, k]$ представляет собой среднюю для всех аппаратов частоту попадания направлений прихода отраженных сигналов в различные интервалы к k -му моменту времени.

Среднее количество азимутов для всех аппаратов по всем интервалам к k -му моменту времени равно:

$$Z_{\text{сред}}[k] = \frac{\sum_{n=1}^N Z_{\text{сред}}[n, k]}{N}. \quad (2)$$

Тогда в k -й момент времени СКО определяется следующим выражением:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (Z_{\text{сред}}[n, k] - Z_{\text{сред}}[k])^2}{N}}. \quad (3)$$

По результатам совокупности всех измерений в процессе проведения численного эксперимента определяется среднее значение СКО азимутов $\sigma_{\text{ср}}$ по следующей формуле:

$$\sigma_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^K \sigma_k}{K}. \quad (4)$$

Выберем показатель $\sigma_{\text{ср}}$ в качестве показателя эффективности сейсморазведки. Этот выбор обусловлен тем, что параметр $\sigma_{\text{ср}}$ наиболее полно характеризует степень всеазимутальности направлений прихода отраженных сигналов, а всеазимутальность, в свою очередь,

обеспечивает наилучшие условия обнаружения антропогенных объектов на морском дне.

Тогда критерий задачи достижения максимальной всеазимутальности направлений прихода отраженных сигналов на АНПА будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{\text{ср}}(V_{\text{АНПА}}, \Delta L, M) \rightarrow \min \quad (5)$$

при следующих ограничениях: $V_{\text{изл}} \leq V_1$, $V_{\text{АНПА}} \leq V_2$, $\Delta L \leq d_{\text{св}}$, $\|x_{\text{изл}}^k - x_{\text{АНПА}ij}^k\| \leq d_p$. Ограничения должны выполняться в каждый k -й момент времени для каждого (i, j) -го аппарата.

4. Порядок решения задачи определения параметров метода поиска. Для решения поставленной задачи вначале следует произвести *определение координат АНПА и излучателя.*

Для каждого (i, j) -го АНПА азимут Az_{ij} направления прихода отраженного сигнала определяется выражением:

$$Az_{ij} = \arctg \left(\frac{Y_{\text{изл}} - Y_{\text{АНПА}ij}}{X_{\text{изл}} - X_{\text{АНПА}ij}} \right), \quad (6)$$

где $X_{\text{изл}}, Y_{\text{изл}}$ — координаты излучателя в момент регистрации отраженного сигнала; $X_{\text{АНПА}ij}, Y_{\text{АНПА}ij}$ — координаты АНПА в момент регистрации отраженного сигнала (индекс i означает положение аппарата в группе вдоль оси X , индекс j означает положение аппарата в группе вдоль оси Y).

В k -й момент времени расчет координат центра окружности $(x_{\text{цк}}, y_{\text{цк}})$, вдоль которой происходит движение излучателя, определяется исходя из следующих выражений:

$$\begin{cases} x_{\text{цк}} = x_0 - \left[\frac{k}{M} \right], \\ y_{\text{цк}} = y_0, \end{cases} \quad (7)$$

где (x_0, y_0) — координаты начального положения излучателя, а операция $[a]$ означает выделение целой части числа a . Оси X и Y образуют

систему координат в горизонтальной плоскости водной среды. При использовании в задаче плана «вид сверху» ось X направлена горизонтально слева направо, а ось Y — вертикально сверху вниз.

Угловая скорость ω движения излучателя вдоль окружности описывается следующим выражением:

$$\omega = \frac{V_{\text{изл}}}{R_{\text{изл}}}. \quad (8)$$

Тогда координаты положения излучателя в k -й момент времени определяются с помощью следующих выражений:

$$\begin{cases} x_{\text{изл}} = x_{\text{цк}} + R_{\text{изл}} \cos \alpha_k, \\ y_{\text{изл}} = y_{\text{цк}} + R_{\text{изл}} \sin \alpha_k, \end{cases} \quad (9)$$

где α_k — угловое положение излучателя в k -й момент времени, оно определяется следующим образом:

$$\alpha_k = \alpha_{k-1} - \omega. \quad (10)$$

Координаты положения АНПА определяются в k -й момент времени, если рассматриваемый аппарат принадлежит j -му ряду, который в k -й момент перемещается:

$$\begin{cases} x_{ijk+1} = x_{ijk} + V_{\text{АНПА}} \Delta t_k, \\ y_{ijk+1} = y_{ijk}. \end{cases} \quad (11)$$

В (11) переменная Δt_k представляет собой интервал между k -м и $(k+1)$ -м моментами времени. Координаты положения АНПА, не принадлежащего ряду, который в k -й момент перемещается, определяются следующим образом:

$$\begin{cases} x_{ijk+1} = x_{ijk}, \\ y_{ijk+1} = y_{ijk}. \end{cases} \quad (12)$$

Таким образом, для расчета показателя $\sigma_{\text{ср}}$, выбранного выше в качестве показателя эффективности, определены все параметры, необходимые для его вычисления по формулам (3) и (4). Следующим этапом решения поставленной задачи является определение параметров $V_{\text{АНПА}}$,

M и ΔL , позволяющих получить минимальное значение показателя σ_{cp} и тем самым обеспечивающих наиболее эффективный поиск антропогенного объекта в морском дне.

Простой перебор перечисленных параметров без анализа складывающейся ситуации и без определения причинно-следственных связей является крайне непродуктивным. Поэтому для определения указанных параметров необходимо разделить поставленную задачу на следующие последовательно решаемые подзадачи:

- определение взаимного положения группы и излучателя;
- определение геометрической протяженности группы;
- определение количества аппаратов.

Покажем, как решаются эти подзадачи.

Определение взаимного положения группы и излучателя. Для решения этой подзадачи рассмотрим группу в виде квадрата со сторонами $L \times L$ метров и движение излучателя по окружности. Покажем, что всеазимутальность достигается при таком взаимном положении группы и окружности, при котором их центры совпадают.

Пусть одиночный аппарат располагается в центре квадрата, совпадающего с центром окружности. По мере движения излучателя его угловая скорость меняется равномерно по линейному закону:

$$Az = \omega R_{\text{изл}}, \quad (13)$$

что, в свою очередь, означает равномерность распределения азимутов направлений прихода отраженных сигналов.

Для любой точки, принадлежащей квадрату и отличной от центральной, имеющей азимут Az направления отраженного сигнала, пришедшего от излучателя, расположенного в произвольной точке окружности. В силу симметрии окружности и квадрата всегда найдутся такие положения точки в квадрате и излучателя на окружности, центрально симметричные относительно первоначальных, для которых:

$$Az'_i = 360^\circ - Az_i. \quad (14)$$

Поэтому при рассмотрении произвольного множества точек, равномерно покрывающих квадрат, распределение азимутов направлений прихода отраженных сигналов также будет равномерным.

Таким образом, результатом данного этапа выбора параметров является вывод о том, что для эффективного ведения поиска антропогенных объектов необходимо, чтобы центр группы и центр окружности, вдоль которой движется излучатель, совпадали.

Однако при ведении сейсморазведки излучатель движется по круговой траектории — циклоиде. Поэтому для обеспечения выполнения вышеуказанного условия необходимо, чтобы центр группы двигался синхронно с движением центра излучателя. Сказанное означает необходимость выполнения следующего условия:

$$V_{ц} = V_{гр}. \quad (15)$$

Определение скорости каждого АНПА основано на том факте, что скорость движения группы АНПА $V_{гр}$ определяется количеством рядов АНПА, которые последовательно перемещаются:

$$V_{гр} = \frac{M_3}{M} V_{АНПА}, \quad (16)$$

где M_3 — количество задействованных рядов АНПА при перемещении. Отсюда определяем скорость перемещения $V_{АНПА}$.

Определение геометрической протяженности группы АНПА. Кроме согласованности движения группы АНПА, с излучателем должна быть обеспечена всеазимутальность приема отраженных сигналов. На всеазимутальность приема сигналов оказывает влияние соотношение между геометрическими размерами группы, определяемой параметром L , и радиусом циклоиды $R_{изл}$, то есть радиусом окружности, вдоль которой происходит движение излучателя. Однако всеазимутальность направлений прихода отраженных сигналов на аппараты достигается в том случае, если излучатель двигается вдоль окружности, совпадающей с окружностью, описанной вокруг группы аппаратов.

Поясним сказанное. Пусть за некоторое время Δt излучатель описывает полный круг вокруг группы. И за это же время один ряд группы должен преодолеть расстояние $(L + \Delta L)$ для обеспечения максимальной непрерывности процесса. Пройденный излучателем путь в этом случае будет определяться следующим выражением:

$$S = 2\pi R_{изл} = V_{изл} \Delta t. \quad (17)$$

За это же время Δt один ряд АНПА, скорость перемещения которого определяется скоростью $V_{АНПА}$ перемещения одиночного АНПА, преодолеет расстояние $(L + \Delta L)$, которое следующим образом выражается через скорость АНПА:

$$L + \Delta L = V_{АНПА} \Delta t. \quad (18)$$

Выражая из (17) и (18) время Δt и приравняв друг другу полученные выражения, получаем следующее условие согласованного поведения группы АНПА и излучателя:

$$\frac{L + \Delta L}{V_{\text{АНПА}}} = \frac{2 \pi R_{\text{изл}}}{V_{\text{изл}}}. \quad (19)$$

Поскольку справедливо равенство $L + \Delta L = M \Delta L$, то расстояние между аппаратами, обеспечивающими их согласованное с излучателем движение, определяется следующим выражением:

$$\Delta L = \frac{2 \pi R_{\text{изл}} V_{\text{АНПА}}}{M V_{\text{изл}}}. \quad (20)$$

Из (20) видно, что при принятых ограничениях по скорости АНПА и радиусу окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, параметр ΔL можно увеличивать лишь до значения, определяемого следующим выражением:

$$\Delta L = \frac{2 \pi d_p V_2}{M V_{\text{изл}}}. \quad (21)$$

Выражение (21) позволяет определить расстояние между аппаратами с учетом ограничения на дальность распространения отраженного сигнала, которое, в свою очередь, оказывают влияние на размер группы. Исходя из этого, геометрический размер группы определяется следующим образом:

$$L_d = M \Delta L. \quad (22)$$

С другой стороны, с учетом того, что размер группы должен быть таким, чтобы циклоида, описываемая вокруг группы, была близка к описанной окружности, геометрический размер группы определяется следующим выражением:

$$L_{\text{изл}} = \sqrt{2} R_{\text{изл}}. \quad (23)$$

Окончательно протяженность группы определяется условием:

$$L = \min \{ L_d, L_{\text{изл}} \}, \quad (24)$$

а расстояние между аппаратами должно быть равно:

$$\Delta L = \min \left\{ \frac{L_d}{M^2}, \frac{L_{\text{изл}}}{M^2} \right\}. \quad (25)$$

Определение количества аппаратов. Геометрический размер группы L и расстояние ΔL между соседними аппаратами позволяют определить количество аппаратов в группе. Решение этой подзадачи, заключающейся в определении количества аппаратов M в каждом ряду и количество рядов M , сводится к решению задачи покрытия квадрата $L \times L$ регулярной сеткой с размером ячейки ΔL , в узлах которой расположены аппараты. Количество узлов сетки определяется количеством аппаратов в группе. Очевидно, что необходимо стремиться к экономии аппаратов и заполнять квадрат наименьшим количеством аппаратов. Тогда, ввиду наличия ограничения на расстояние ΔL между аппаратами, количество аппаратов определяется следующим выражением:

$$M = \frac{L}{d_{\text{св}}} . \quad (26)$$

5. Результаты экспериментальных исследований на имитационной модели. Для численного расчета параметров метода поиска антропогенных объектов была разработана и реализована на программном уровне имитационная модель. В этой модели в каждом такте имитации воспроизводились процессы движения излучателя по круговой траектории, движение группы аппаратов АНПА и отдельно взятых АНПА из группы, а также излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала и прием геофонами отраженного от антропогенных объектов сигнала. Степень детализации воспроизводимых процессов позволяла рассматривать АНПА и излучатель как материальные точки и в то же время учитывать особенности согласованного движения группы АНПА и излучателя. В зависимости от дистанции до излучателя на каждом АНПА оценивался уровень принимаемого отраженного сигнала с учетом среды распространения, затухания, реверберации и рефракции лучей. Глубина места принималась равной 450 м, волнение моря составляло 2-3 балла. Предполагалось, что дно является полностью песчаным.

При проведении экспериментальных исследований были приняты следующие исходные данные по группе АНПА:

- количество АНПА в группе — 49 аппаратов (по 7 аппаратов в каждом ряду, количество рядов — 7);
- расстояние ΔL между АНПА составляет 30 м;
- скорость перемещения группы АНПА определялась количеством рядов группы, перемещающихся вдоль направления движения (в перемещении участвовал один ряд).

По излучателю принималось допущение, что центр вращения окружности в точности совпадает с геометрическим «центром масс» группы АНПА.

Предполагалось, что за время перемещения одиночного ряда АНПА оставшая (бóльшая) часть АНПА успевает выполнить последовательно операции заглабления и опускания на дно, прикрепления к дну, позиционирования, приема отраженных сигналов и их регистрации на карту памяти, всплытия и подготовки к дальнейшему перемещению, включая всплытие на глубину движения в точку новой дислокации.

Поскольку, как видно из (20), изменение расстояния ΔL между АНПА прямо пропорционально изменению радиуса $R_{изл}$, то при проведении эксперимента варьировался радиус окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя. Для каждого значения радиуса проводился численный эксперимент, в ходе которого система «группа АНПА – излучатель» описывала полный контур в виде прямоугольника. Значение радиуса при этом варьировалось от 10 м до 200 м с шагом 10 м. В ходе проведения серии численных экспериментов было определено, каким образом радиус окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, влияет на СКО азимутов. Ограничения по дальности приема отраженных сигналов на этом этапе исследований не учитывались. Результаты этого численного эксперимента приведены на рисунке 2.

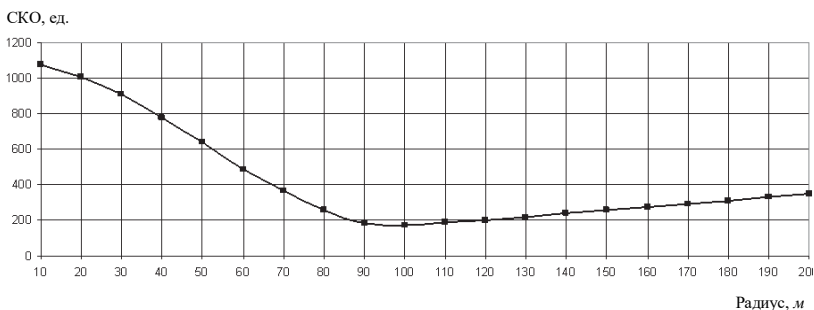


Рис. 2. Зависимость СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит вращение излучателя

На рисунке 2 по горизонтальной оси отложены значения радиусов, по вертикальной — значения СКО азимутов. Из анализа результатов, приведенных на рисунке 2, можно сделать следующие выводы:

1. Изменение радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, оказывает влияние на степень всеазимутальности, выраженной через СКО азимутов.

2. С увеличением радиуса окружности СКО азимутов монотонно убывает от 1100 до 180 единиц и достигает минимальной отметки при значении радиуса $R_{изл} = 100$ м. Дальнейшее увеличение радиуса приводит к увеличению СКО до 380 единиц, зафиксированного при $R_{изл} = 200$ м.

3. Результаты численного эксперимента показывают, что существует оптимальное значение радиуса, при котором СКО азимутов достигает наименьшего значения. Это значение радиуса соответствует окружности, близкой к окружности, описанной вокруг группы АНПА с центром в геометрическом «центре масс» АНПА. Однако, как отмечалось выше, при проведении численного эксперимента ограничения на дальности приема отраженного сигнала не учитывались.

Таким образом, по результатам проведенного численного эксперимента было выявлено, что при движении группы АНПА и движении излучателя по окружности вокруг этой группы наибольшая степень всеазимутальности достигается при таком соотношении размера группы и радиуса окружности, при котором эта окружность близка к окружности, описанной вокруг квадрата, представляющего собой геометрическое изображение группы АНПА.

Однако, как указывалось в постановке задачи на определение параметров метода поиска, имеется ограничение на дальность приема отраженных сигналов. Поэтому были проведены дополнительные экспериментальные исследования для варианта с ограничениями на дальность приема отраженного сигнала.

Учет этой дальности происходил следующим образом. Перед проведением эксперимента задавалось предельное значение дальности приема отраженного сигнала. В ходе проведения численного эксперимента определялись азимуты, как и в эксперименте на предыдущем этапе. Однако на этот раз, если оказывалось, что дальность превышает предельное значение, то эти азимуты исключались из статистической обработки результата. Тем самым определялся «вклад» азимутов в общие предельные заданные значения.

При проведении этого численного эксперимента задавалось значение предельной дальности, с которой еще можно было регистрировать отраженный сигнал. Затем при последовательном изменении радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, проводилась серия численных экспериментов. По результатам этой серии строился график, аналогичный приведенному на рисунке 2.

Затем значение предельной дальности изменялось, и вновь проводилась серия численных экспериментов с изменением радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, от 10 м до 200 м с шагом 10 м.

В результате были определены зависимости СКО от радиуса окружности с учетом дальности приема отраженных сигналов. Результаты этих исследований приведены на рисунке 3.

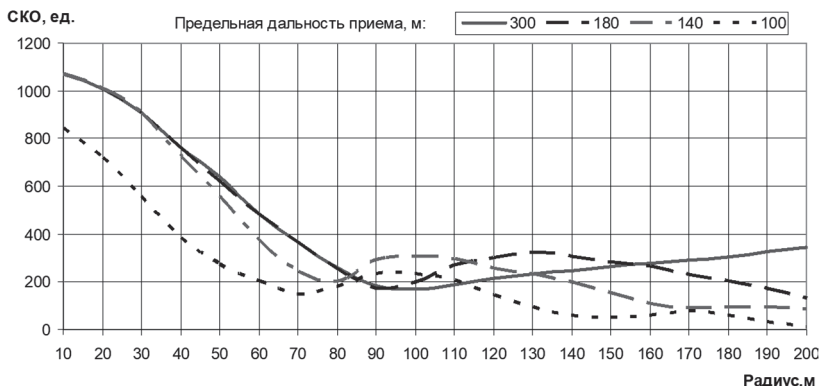


Рис. 3. Зависимость СКО от радиуса окружности, вдоль которой происходит движение излучателя, с учетом предельной дальности приема отраженных сигналов

Анализ результатов, приведенных на рисунке 3, позволяет сформулировать следующие выводы:

1. Учет ограничений по дальности приема отраженных сигналов оказывает влияние на СКО азимутов. Так, при переходе предельной дальности приема отраженных сигналов от 300 м до 100 м снижение СКО азимутов в среднем произошло на величину 200 единиц.

2. Снижение предельной дальности приема отраженных сигналов, например от 300 м до 180 м, приводит к снижению СКО азимутов на больших радиусах только после радиуса 90 м. При этом минимум СКО сохраняется при радиусах, лежащих в диапазоне от 70 до 90 м. В дальнейшем наблюдается более интенсивный рост СКО азимутов по сравнению с вариантом, когда дальность приема сигналов равна 300 м. Объяснить это можно тем, что с ростом радиуса происходит превышение предельной дистанции азимутов, которые исключаются из рассмотрения. Затем наблюдается еще одна точка перегиба, и с дальнейшим увеличением радиуса СКО азимутов начинает снижаться.

3. Схожий характер зависимости СКО азимутов от радиуса окружности, вдоль которой происходит перемещение излучателя, наблюдается при дальнейшем снижении предельной дальности приема отраженных сигналов.

При этом положение минимума СКО азимутов смещается. При дистанции 100 м оно составило 70 единиц, при дистанции 140 м — 80 единиц, при дистанции 180 м — 90 единиц, при дистанции 300 м, а также и при безграничном случае — 100 единиц.

4. При рассмотрении данных, представленных на рисунке 3, было выявлено, что наименьшее значение СКО азимутов наблюдается

при ограничении по дальности, равном 100 м. В этом случае СКО составляет 148 единиц.

Для этого случая гистограмма распределения азимутов имеет вид, представленный на рисунке 4.

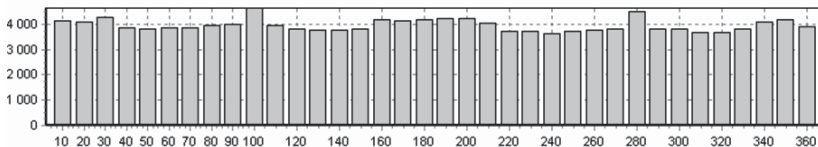


Рис. 4. Гистограмма распределения азимутов при предельной дальности 100 м

При этом траектория перемещения излучателя вокруг группы АНПА должна выглядеть так, как показано на рисунке 5.

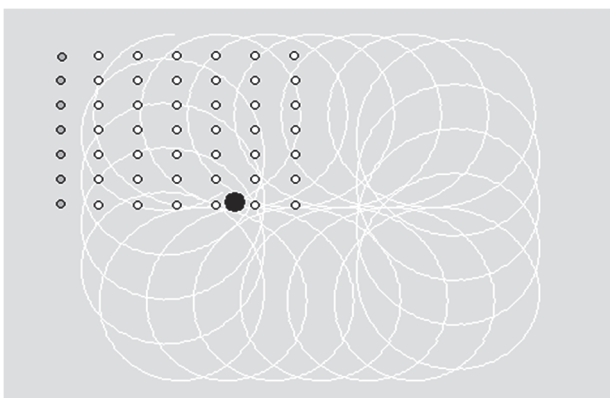


Рис. 5. Результирующая траектория перемещения излучателя вокруг группы АНПА

Таким образом, результаты проведенных численных экспериментов на имитационной модели показали, что для обеспечения эффективного ведения сейсморазведки необходимо согласованно подбирать мощность излучателя и чувствительность геофонов, обеспечивая при этом требуемую дальность приема отраженных сигналов с учетом радиуса обхода группы АНПА.

7. Заключение. В статье предложен новый динамический подход к поиску антропогенных объектов на морском дне, отличающийся от статического тем, что он основан на использовании группы АНПА. Суть данного подхода заключается в согласовании перемещения группы аппаратов с поведением излучателя, при котором основная часть аппаратов занята приемом отраженного сигнала, а остальная часть — перемещением в новое место.

Предложенный новый динамический метод непрерывного ведения сейсморазведки антропогенных объектов с использованием АНПА позволяет существенно сократить время на поиск антропогенных объектов в заданном районе. Выигрыш во времени проведения поиска антропогенных объектов определяется отсутствием времени, затрачиваемого на подготовительные работы по заглоблению или всплытию АНПА на заданную глубину, поскольку они происходят в процессе прослушивания АНПА, неподвижно расположенными на дне, отраженного геосигнала. Результаты численного эксперимента показали, что предложенный метод позволяет существенно повысить эффективность поиска антропогенных объектов на морском дне с использованием АНПА, поскольку основной показатель эффективности, характеризуемый СКО азимутов приема отраженных сигналов, уменьшается от 1100 до 200 градусов.

Дальнейшие исследования связаны с углублением исследований поведения группы АНПА с учетом рельефа дна, гидрологических и гидроакустических условий морской среды, а также гидродинамических особенностей самого АНПА.

Литература

1. *Гайнанов В.Г., Верхняцкий А.А., Шматков А.А., Токарев М.Ю.* Трехмерные сейсмоакустические наблюдения на акваториях: обзор современных технологий // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2017. № 1. С. 56–68.
2. *Токарев М.Ю., Гайнанов В.Г.* Новые технологии сейсмоакустического профилирования на акваториях // Приборы и системы разведочной геофизики. 2016. Т. 3. № 3. С. 18–23.
3. *Шматков А.А., Гайнанов В.Г., Токарев М.Ю.* Обзор технологий трехмерных сейсмоакустических исследований на акваториях // Технологии сейсморазведки. 2015. № 2. С. 86–97.
4. *Крылов А.А.* Моделирование реакции пористых водонасыщенных верхних осадков морского шельфа на сейсмические воздействия // Естественные и технические науки. 2015. № 10. С. 221–223.
5. *Delaney J.R.* NEPTUNE: an interactive submarine observatory at the scale of a tectonic plate. Long-Term Observations in the Oceans // OHP/ION Joint Symposium. 2001. 309 p.
6. *Maultzsch S. et al.* An integrated multi-azimuth VSP study for fracture characterization in the vicinity of a well // Geophysical Prospecting. 2009. vol. 57. pp. 263–274.
7. *Wild P.* Practical applications of seismic anisotropy // First Break. 2011. vol. 29. no. 5. pp. 117–124.
8. *Leurera K.C.* Compressional- and shear-wave velocities and attenuation in deep-sea sediment during laboratory compaction // J. Acoust. Soc. Amer. 2004. vol. 116. no. 4. pp. 2023–2030.
9. *Левченко Д.Г.* Методы и средства измерения параметров океанической среды автоматическими многоцелевыми донными станциями // Нефтегазовая геология. Теория и практика. 2010. Т. 5. № 2. С. 1–9. URL: http://www.ngtp.ru/rub/12/28_2010.pdf (дата обращения: 21.09.2017).
10. *Борисов А.С., Плотникова И.Н.* Геолого-геофизические исследования акваторий: учебно-методическое пособие // Казань. 2011. 51 с.

11. Кузнецов В.М., Шехтман Г.А., Череповский А.В. Методика наблюдений в многоволновой сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. 2013. № 2. С. 37–59.
12. Марченко А.Л., Владов М.Л., Судакова М.С., Старовойтов А.В. Автоматизация скоростного анализа георадарных данных // Инженерные изыскания. 2017. № 5. С. 36–42.
13. Sopher D., Juhlin C. Processing and interpretation of vintage 2D marine seismic data from the outer Hanö Bay area, Baltic Sea // Journal of Applied Geophysics. 2013. vol. 95. pp. 1–15.
14. Coşkun S. et al. Natural and anthropogenic submarine morphologies revealed by high resolution acoustic data in the Gulf of Izmir, western Turkey // Marine and Petroleum Geology. 2016. vol. 71. pp. 211–224.
15. Лавров Н.П. и др. Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2011. № 4. С. 4–13.
16. Подводные камни морской сейсморазведки. Часть 1. URL: https://www.korabel.ru/news/comments/podvodnye_kamni_morskoy_seysmorazvedki_chast_1.html (дата обращения: 21.09.2017).
17. Амфилов Ю.П., Токарев М.Ю. «Окно возможностей» российского шельфа // Бурение и нефть. 2017. № 2. С. 3–9.
18. Амфилов Ю.П. Сейсморазведка на российском шельфе // Offshore [Russia]. 2015. № 2(8). С. 26–35.
19. Амфилов Ю.П., Батурин Д.Г. Новейшие технологии сейсмического мониторинга 4D при разработке морских месторождений нефти и газа // Технологии сейсморазведки. 2013. № 2. С. 31–36.
20. Амфилов Ю.П. Новые вызовы для российской нефтегазовой отрасли в условиях санкций и низких цен на нефть // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2017. № 2. С. 38–50.
21. Амфилов Ю.П., Токарев М.Ю. Сейсморазведка. Время действий или упущенных возможностей? // Бурение и нефть. 2017. № 3. С. 3–13.
22. WiMust – A Fleet of AUVs for Seismic Surveys. URL: <https://www.hydro-international.com/content/article/wimust-a-fleet-of-auvs-for-seismic-surveys> (дата обращения: 21.09.2017).
23. Маиошин А.И. и др. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геологоразведочных работ // Патент РФ № 2381530. 2008. 8 с.
24. Ильин И.А. и др. Автономная донная станция для сейсмических наблюдений // Патент РФ № 2438149. 2011. 14 с.
25. Суконкин С.Я. и др. Подводная геофизическая станция // Патент РФ № 2435180. 2011. 13 с.
26. Груздев П.Д. и др. Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа // Патент РФ № 2515170. 2014. 6 с.
27. Максимов С.В. О применении автономных необитаемых подводных аппаратов в технологии тотальной донной сейсморазведки // Труды 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». 2011. С. 220–224.
28. Кузнецов В.М., Шехтман Г.А., Череповский А.В. Методика наблюдений в многоволновой сейсморазведке // Технологии сейсморазведки. 2013. № 2. С. 37–59.
29. Кебкал К.Г., Маиошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирскопия и навигация. 2016. № 3(94). С. 115–130.
30. Буй М. и др. Морская сейсморазведка по спиральной траектории Coil Shooting // Нефтегазовое обозрение. 2008. Т. 21. № 4. С. 22–39.

31. *Мартынова Л.А.* Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2017. № 2. С. 77–87.

Безрук Георгий Григорьевич — к-т техн. наук, начальник отдела морской робототехники, Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ). Область научных интересов: морская робототехника, комплексная обработка разнородной информации, поиск и обнаружение объектов по различным физическим полям, системный анализ. Число научных публикаций — 40. geoint99@mail.ru; Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064; р.т.: +7(911)947-0457.

Мартынова Любовь Александровна — д-р техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки», АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", младший научный сотрудник, Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ). Область научных интересов: обработка информации, математическое моделирование, системы поддержки принятия решения, искусственный интеллект, беспилотные аппараты, алгоритмы системы управления. Число научных публикаций — 110. martynowa999@bk.ru; Тихорецкий пр., 3, Санкт-Петербург, 194064; р.т.: +7(921)941-13-95.

Саенко Игорь Борисович — д-р техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН), научный сотрудник, Главный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации (ГНИИЦ РТ МО РФ), сотрудник международной лаборатории информационной безопасности киберфизических систем, ФГАОУ ВО "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики" (Университет ИТМО). Область научных интересов: автоматизированные информационные системы, информационная безопасность, обработка и передача данных по каналам связи, теория моделирования и математическая статистика, теория информации. Число научных публикаций — 350. ibsaen@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178; р.т.: +7(812)328-7181, Факс: +7(812)328-4450.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 17-08-00666 и 18-07-01369), бюджетной темы № АААА-А16-116033110102-5, а также при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 08-08).

G.G. BEZRUK, L.A. MARTYNOVA, I.B. SAENKO
**DYNAMIC METHOD OF SEARCHING ANTHROPOGENIC
OBJECTS IN SEABED WITH USE OF AUTONOMOUS
UNDERWATER VEHICLES**

Bezruk G.G., Martynova L.A., Saenko I.B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in Seabed with use of Autonomous Underwater Vehicles.

Abstract. The dynamic method of searching anthropogenic objects in the seabed with autonomous underwater vehicles use is offered. Unlike a static method where all devices with geophones onboard are buried and attached to a bottom simultaneously and after the end of a search session float at the same time, the continuity of guiding of search due to dynamic behavior of group of devices is provided in the offered method. It is offered that while the main part of devices with geophones listens to the reflected signal, other part of devices moves further along the route. The continuity of guiding of seismic exploration in the preset area and essential abbreviation of time for its carrying out is in such a way reached. The algorithm of the coordinated behavior of devices with geophones onboard and the submersible moving the radiator is given. The mathematical model of functioning of "the radiator — geophones" system is described. Experiments by determination of optimum parameters of guiding of seismic exploration of anthropogenic objects are made. Results of simulation allowed to evaluate a scoring from use of the offered method, to determine its optimum parameters and to develop recommendations about its use for search of anthropogenic objects in the thickness of a seabed.

Keywords: robotic complex, autonomous underwater vehicle, anthropogenic object, seismic exploration, radiator, geophone, mean squared deviation.

Bezruk Georgy Grigor'evich — Ph.D., head of department of sea robotic technology, Principal Research and Development Test Centre of Robotic Technology Ministry of Defence of the Russian Federation (PRDCR). Research interests: sea robotic technology, complex processing of heterogeneous information, search and detection of objects on different physical fields, systems analysis. The number of publications — 40. geoint99@mail.ru; 3, Tikhoretsky prospect, St. Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(911)947-0457.

Martynova Lubov' Aleksandrovna — Ph.D., Dr. Sci., associate professor, leading researcher of research center "Illumination system of the situation", JSC State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, junior researcher, Principal Research and Development Test Centre of Robotic Technology Ministry of Defence of the Russian Federation (PRDCR). Research interests: information processing, mathematical simulation, decision-making support systems, artificial intelligence, pilotless devices, management system algorithms. The number of publications — 110. martynowa999@bk.ru; 3, Tikhoretsky prospect, St. Petersburg, 194064, Russia; office phone: +7(921)941-13-95.

Saenko Igor Borisovich — Ph.D., Dr. Sci., professor, leading researcher of computer security problems laboratory, St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of Russian Academy of Sciences (SPIIRAS), researcher, Principal Research and Development Test Centre of Robotic Technology Ministry of Defence of the Russian Federation (PRDCR), researcher of information security of cyber-physical systems international laboratory, ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics). Research interests: automated information systems, information security, processing and transfer of data on data links, theory of modeling and mathematical statistics, information theory. The number of publications — 350. ibsaen@comsec.spb.ru, <http://www.comsec.spb.ru>; 39, 14-th Line V.O., St. Petersburg, 199178, Russia; office phone: +7(812)328-7181, Fax: +7(812)328-4450.

Acknowledgements. This research is supported by the grant of RFBR (projects No. 17-08-00666 and 18-07-01369), by the budget (the project No. AAAA-A16-116033110102-5), and by Government of the Russian Federation (grant 08-08).

References

1. Gajnanov V.G., Verhnjackij A.A., Shmatkov A.A., Tokarev M.Yu. [Three-dimensional seismoacoustic observations on water areas: review of the modern technologies]. *Delovoj zhurnal Neftegaz.RU – Business journal Neftegaz.RU*. 2017. vol. 1. pp. 56–68. (In Russ.).
2. Tokarev M.Yu., Gajnanov V.G. [New technologies of seismoacoustic profiling on water areas]. *Pribory i sistemy razvedochnoj geofiziki – Devices and systems of prospecting geophysics*. 2016. Issue 3. vol. 3. pp. 18–23. (In Russ.).
3. Shmatkov A.A., Gajnanov V.G., Tokarev M.Yu. [The overview of technologies of three-dimensional seismic-acoustic researches on water areas]. *Tehnologii sejsmorazvedki – Technologies of seismic exploration*. 2015. vol. 2. pp. 86–97. (In Russ.).
4. Krylov A.A. [Modeling of reaction of porous water-saturated upper rainfall of the sea shelf to seismic influences]. *Estestvennye i tehniczeskie nauki – Natural and technical science*. 2015. vol. 10. pp. 221–223. (In Russ.).
5. Delaney J.R. NEPTUNE: an interactive submarine observatory at the scale of a tectonic plate. Long-Term Observations in the Oceans. OHP/ION Joint Symposium. 2001. 309 p.
6. Maultzsch S. et al. An integrated multi-azimuth VSP study for fracture characterization in the vicinity of a well. *Geophysical Prospecting*. 2009. vol. 57. pp. 263–274.
7. Wild P. Practical applications of seismic anisotropy. *First Break*. 2011. vol. 29. no. 5. pp. 117–124.
8. Leurera K.C. Compressional- and shear-wave velocities and attenuation in deep-sea sediment during laboratory compaction. *J. Acoust. Soc. Amer.* 2004. vol. 116. no. 4. pp. 2023–2030.
9. Levchenko D.G. [Methods and gages of parameters of oceanic environment automatic multi-purpose ground stations]. *Neftegazovaja geologija. Teorija i praktika – Oil and gas geology. Theory and practice*. 2010. Issue 5. vol. 2. pp. 1–9. Available at: http://www.ngtp.ru/rub/12/28_2010.pdf (accessed: 21.09.2017). (In Russ.).
10. Borisov A.S., Plotnikova I.N. *Geologo-geofizicheskie issledovanija akvatorij* [Geologic-geophysical researches of water areas]. Kazan. 2011. 51 p. (In Russ.).
11. Kuznecov V.M., Shehtman G.A., Cherepovskij A.V. [Technique of observations in multiwave seismic exploration]. *Tehnologii sejsmorazvedki – Technologies of seismic exploration*. 2013. vol. 2. pp. 37–59. (In Russ.).
12. Marchenko A.L., Vladov M.L., Sudakova M.S., Starovojtov A.V. [Automation of the high-speed analysis of georadar data]. *Inzhenernye izyskanija – Engineering researches*. 2017. vol. 5. pp. 36–42. (In Russ.).
13. Sopher D., Juhlín C. Processing and interpretation of vintage 2D marine seismic data from the outer Hanö Bay area, Baltic Sea. *Journal of Applied Geophysics*. 2013. vol. 95. pp. 1–15.
14. Coskun S. et al. Natural and anthropogenic submarine morphologies revealed by high resolution acoustic data in the Gulf of Izmir, western Turkey. *Marine and Petroleum Geology*. 2016. vol. 71. pp. 211–224.
15. Laverov N.P. et al. [Perspectives of ground seismic exploration in the Russian Federation]. *Arktika: jekologija i jekonomika – Arctic: ecology and economy*. 2011. vol. 4. pp. 4–13. (In Russ.).
16. Podvodnye kamni morskoy sejsmorazvedki. Chast' 1 [Reefs of naval seismic exploration. Part 1]. Available at: https://www.korabel.ru/news/comments/podvodnye_kamni_morskoy_sejsmorazvedki_chast_1.html (accessed: 21.09.2017). (In Russ.).
17. Ampilov Yu.P., Tokarev M.Yu. [“Window of opportunities” of the Russian shelf]. *Bu-renie i neft' – Drilling and oil*. 2017. vol. 2. pp. 3–9. (In Russ.).

18. Ampilov Yu.P. [Seismic exploration on the Russian shelf]. *Offshore [Russia] – Offshore [Russia]*. 2015. vol. 2(8). pp. 26–35. (In Russ.).
19. Ampilov Yu.P., Baturin D.G. [The newest technologies of seismic monitoring 4D when developing sea oil and gas deposits]. *Tehnologii sejsmorazvedki – Technologies of seismic exploration*. 2013. vol. 2. pp. 31–36. (In Russ.).
20. Ampilov Yu.P. [New challenges for the Russian oil and gas industry in the conditions of sanctions and the low prices of oil]. *Mineral'nye resursy Rossii. Jekonomika i upravlenie – Mineral resources of Russia. Economy and management*. 2017. vol. 2. pp. 38–50. (In Russ.).
21. Ampilov Yu.P., Tokarev M.Yu. [Seismic exploration. Time of actions or the missed opportunities?]. *Burenie i nef't' – Drilling and oil*. 2017. vol. 3. pp. 3–13. (In Russ.).
22. WiMust – A Fleet of AUVs for Seismic Surveys. – Available at: <https://www.hydro-international.com/content/article/wimust-a-fleet-of-auvs-for-seismic-surveys> (accessed: 21.09.2017).
23. Mashoshin A.I. et al. *Morskaja avtonomnaja donnaja stancija dlja vypolnenija geofizicheskikh i geologorazvedochnyh rabot* [The sea autonomous ground station for accomplishment of geophysical and exploration works]. Patent RF no. 2381530. 2008. 8 p. (In Russ.).
24. Il'in I.A. et al. *Avtonomnaja donnaja stancija dlja sejsmicheskikh nabljudenij* [The autonomous ground station for seismic observations]. Patent RF no. 2438149. 2011. 14 p. (In Russ.).
25. Sukonkin S.Ja. et al. *Podvodnaja geofizicheskaja stancija* [Underwater geophysical station]. Patent RF no. 2435180. 2011. 13 p. (In Russ.).
26. Gruzdev P.D. et al. *Podvizhnaja podvodnaja avtonomnaja sejsmogidroakusticheskaja stancija razvedki uglevodorodov na akvatorii arkticheskogo shel'fa* [The mobile underwater autonomous seismic hydroacoustic station of investigation of hydrocarbons on the water area of the Arctic shelf]. Patent RF no. 2515170. 2014. 6 p. (In Russ.).
27. Maksimov S.V. [About use of autonomous underwater vehicles in technology of total ground seismic exploration]. *Trudy 4-j Vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii "Tehnicheskie problemy osvoenija Mirovogo okeana"* [Works of the 4th All-Russian scientific and technical conference "Engineering Problems of Development of the World Ocean"]. 2011. pp. 220–224. (In Russ.).
28. Kuznecov V.M., Shehtman G.A., Cherepovskij A.V. [Technique of observations in multiwave seismic exploration]. *Tehnologii sejsmorazvedki – Technologies of seismic exploration*. 2013. vol. 2. pp. 37–59. (In Russ.).
29. Kebkal K.G., Mashoshin A.I. [Hydroacoustic methods of positioning of autonomous underwater vehicles]. *Giroskopija i navigacija – Giroskopiya and navigation*. 2016. vol. 3(94). pp. 115–130. (In Russ.).
30. Buja M. et al. [Naval seismic exploration on a spiral trajectory of Coil Shooting]. *Neftegazovoe obozrenie – Oil and gas review*. 2008. Issue 21. vol. 4. pp. 22–39. (In Russ.).
31. Martynova L.A. [Tools for Studying the Efficiency of Seismic Exploration with Standalone Unmanned Submersibles]. *Informatsionno-upravljajushchie sistemy – Information and Control Systems*. 2017. vol. 2. pp. 77–87 (In Russ.).