

16. Goldberg, D.E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley. 1989.
17. Kennedy J., Eberhart R. Particle Swarm Optimization, *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV*, 1995, p. 1942-1948.
18. Mirjalili S.A., Mirjalili S.M., Lewis A. Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*, 2014, Vol. 69, pp. 46-61.
19. Pham D.T. et al. The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems, *Intelligent Production Machines and Systems. 2nd I\*PROMS Virtual International Conference 3-14 July 2006. Elsevier Ltd, 2006*, pp. 454-459.
20. Panteleev A.V., Letova T.A. *Metody optimizatsii v primerakh i zadachakh: ucheb. posobie [Optimization methods in examples and tasks: textbook]*. Moscow: Vysshaya shkola, 2005, 544 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

**Дивеев Асхат Ибрагимович** – Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН; e-mail: aidiveev@mail.ru; 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2; зав. сектором проблем кибернетики; д.т.н.; профессор.

**Шмалько Елизавета Юрьевна** – e-mail: e.shmalko@gmail.com; к.т.н.; с.н.с.

**Diveev Askhat Ibragimovich** – Federal research center «Computer science and control» of RAS; e-mail: aidiveev@mail.ru; 44, Vavilova street, Moscow, 119333, Russia; head of the department of cybernetics problems; dr. of eng. sc.; professor.

**Shmalko Elizaveta Yurievna** – e-mail: e.shmalko@gmail.com; cand. of eng. sc.; senior researcher.

УДК 519.87

DOI 10.23683/2311-3103-2017-9-21-34

**Л.А. Мартынова, Г.В. Конюхов, И.В. Пашкевич, Н.Н. Рухлов**

### **ОСОБЕННОСТИ ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ АНПА ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ\***

*При использовании группы автономных необитаемых подводных аппаратов для ведения сейсморазведки в подледных условиях на Арктическом шельфе возникает ряд задач, решение которых должно быть получено с учетом особенностей ведения сейсморазведки. Целью работы явился анализ задач, возникающих при ведении сейсморазведки с использованием группы аппаратов, и определение методов их решения. При этом разработаны подходы к формированию алгоритмов системы управления аппарата, исключающие возникновение между аппаратами конфликтных ситуаций. Особенности поведения группы аппаратов при ведении сейсморазведки связаны с необходимостью навигации каждого аппарата, удержания аппарата на маршрутной траектории с корректировкой местоположения, координацией выполнения разнородных функций отдельными аппаратами группы. В качестве решения задачи навигации предложено использовать разностно-дальномерный метод, при котором по четырем измерениям положения излучателя в различные моменты времени каждый аппарат определяет свое местоположение. При решении задачи удержания аппарата на маршрутной траектории использован алгоритм наведения автономного необитаемого подводного аппарата путем управления аппаратом по углу между линией визирования и заданной траекторией. Для обеспечения координации действий, производимых каждым аппаратом, использован мультиагентный подход. При этом определены возможности и полномочия каждого аппарата-агента, алгоритм их взаимодействия, объем и содержание сообщений при их общении между собой. Для обеспечения взаимодействия*

\* Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00666).

*аппаратов рассмотрен вариант использования гидроакустических модемов. Предложенные решения при определенных условиях могут вызвать конфликт системы, поэтому для его исключения предложена иерархическая многоуровневая схема формирования алгоритмов системы управления аппарата. Для тестирования предложенных решений на предмет их совместимости специально была разработана математическая модель. Результаты проведенных численных экспериментов позволили уточнить принятые решения, оптимизировать параметры используемых методов и оценить эффективность предложенных решений.*

*Группа автономных необитаемых подводных аппаратов; алгоритмы системы управления; математическая модель; сейсморазведка; Арктический шельф.*

**L.A. Martynova, G.V. Konyukhov, I.V. Pashkevich, N.N. Rukhlov**

### **PECULIARITIES OF GROUP CONTROL OF ANPA IN SEISMIC EXPLORATION**

*When using a group of autonomous underwater vehicles for seismic exploration in subglacial conditions in the Arctic shelf, a number of problems arise, the solution of which must be obtained taking into account the features of conducting the seismic exploration. The purpose of the work is to analyze the problems arising in the conduct of seismic exploration using a group of vehicles, and determine the methods for their solution. At the same time, approaches to the formation of algorithms for the control system of the vehicles have been developed, which exclude the emergence of conflict situations between the vehicles. Features of the behavior of a group of vehicles in the conduct of seismic exploration are associated with the need to navigate each vehicle, keep the vehicle on a route trajectory with position adjustment, coordinate the performance of heterogeneous functions by individual units of the group. As a solution to the navigation problem, it is proposed to use a difference-ranging method, in which each vehicle determines its location by four positions of the emitter at different times. When solving the problem of holding the vehicle on a route trajectory, an algorithm for guiding an unoccupied uninhabited underwater vehicle has been used by controlling the vehicle along the angle between the line of sight and the specified trajectory. To ensure coordination of actions performed by each vehicle, a multi-agent approach has been used. At the same time, the capabilities and authorities of each agent vehicle, the algorithm for their interaction, the volume and content of messages in their communication with each other are determined. To ensure the interaction of vehicles, the option of using sonar modems is considered. The proposed solutions under certain conditions can cause a conflict in the system, therefore, to exclude it, a hierarchical multi-level scheme for the formation of algorithms for the control system of the vehicle is proposed. To test the proposed solutions for their compatibility, a mathematical model has been developed. The results of the numerical experiments make it possible to clarify the decisions taken, optimize the parameters of the methods used and evaluate the effectiveness of the proposed solutions.*

*Group of autonomous uninhabited underwater vehicles; control system algorithms; mathematical model; seismic survey; Arctic shelf.*

**Введение.** В настоящее время наблюдается повышенный интерес к поиску месторождений залежей углеводородов в морском дне, в особенности в Арктическом шельфе [1]. Наиболее целесообразным способом поиска залежей углеводородов является сейсморазведка [2]. При ведении сейсморазведки геофоны располагаются на морском дне для прослушивания и последующей регистрации отраженных сигналов, создаваемых излучателем. При этом используется подход, при котором геофоны распределяют по водной поверхности, после чего они самостоятельно опускаются на дно для прослушивания отраженных от толщи морского дна сигналов. После окончания сеанса сейсморазведки геофоны самостоятельно всплывают, их собирают и перемещают в другой район, и вся процедура повторяется заново. Другим способом ведения сейсморазведки является способ с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [3–13]: на каждом АНПА – по одному геофону. В этом случае АНПА с геофонами в составе

группы самостоятельно перемещаются в заданную точку, опускаются на дно, ведут прием и регистрацию отраженных сигналов, всплывают, перемещаются в следующую точку и т.д. [14].

При этом для эффективного ведения сейсморазведки необходимо рациональная пространственная топология положения аппаратов в каждый момент времени и синхронизация их действий между собой.

Пространственная топология положения аппаратов обеспечивается навигационными определениями и корректировкой собственного положения каждым аппаратом. Координация действий между аппаратами обеспечивается обменом информацией посредством связи друг с другом и организацией взаимоотношений между аппаратами.

В связи с этим задачи, решаемые каждым АНПА на отдельных этапах сейсморазведки, являются:

- ◆ навигация;
- ◆ перемещение из одной точки в другую, сопровождаемое процессами всплытия и заглужения;
- ◆ координация поведения аппаратов;
- ◆ связь АНПА друг с другом.

В свою очередь, каждая из перечисленных задач имеет свои особенности при ведении сейсморазведки. Так, **навигация** каждого отдельно взятого АНПА включает в себя решение задачи определение местоположения АНПА на этапе его перемещения, заглужения, прослушивания отраженных сигналов, всплытия на заданную глубину.

**При перемещение** каждого АНПА из одной точки в другую должно учитываться:

- ◆ безаварийность перемещения группы АНПА из одного района в другой;
- ◆ перемещение АНПА не должно мешать функционированию АНПА, которые прикреплены к дну и заняты прослушиванием отраженных сигналов;
- ◆ движение АНПА должно учитывать особенности рельефа дна, причем для каждого АНПА движение может осуществляться на индивидуальной глубине;
- ◆ глубина движения каждого АНПА должна удовлетворять условию прямой видимости для обеспечения связи АНПА с другими аппаратами.

**Координация** поведения аппаратов имеет следующие особенности:

- ◆ синхронизация готовности АНПА к позиционированию после заглужения АНПА и укладки на дно, поскольку из-за неровностей рельефа время заглужения АНПА – различное;
- ◆ синхронизация времени всплытия АНПА на заданную глубину после окончания сеанса приема отраженных сигналов, вызванная различным временем всплытия каждого АНПА на заданную глубину из-за неровностей рельефа.

**Связь** АНПА между собой, а также между излучателем и каждым АНПА имеет следующие особенности:

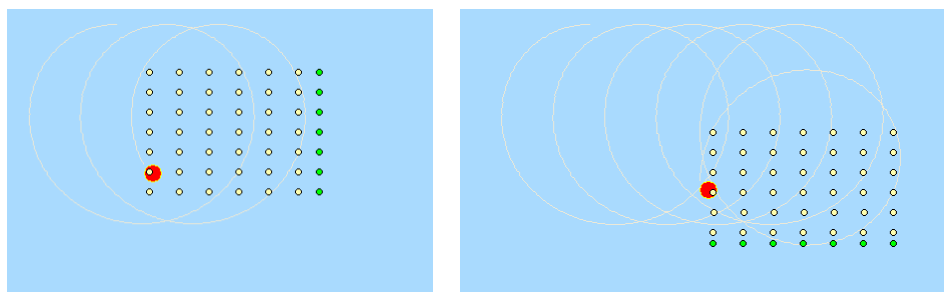
- ◆ устойчивая связь АНПА с другими аппаратами при перемещении создает ограничения на удаление АНПА друг от друга и на обеспечение прямой видимости между соседними АНПА;
- ◆ преодоление неустойчивости связи вследствие подвижности АНПА группы при перемещении;
- ◆ учет ограничений, накладываемых морской средой на дальность связи и на объем передаваемой информации как между АНПА внутри группы, так и между АНПА группы и излучателем.

В связи со сказанным, **целью работы** явилось объединение совокупности решений перечисленных задач на основе системного подхода в единый интеллектуальный комплекс с реализацией решений в виде многоуровневых алгоритмов системы управления АНПА.

**1. Описание поведения группы АНПА при ведении сейсморазведки.** Каждому аппарату передается маршрутное задание с указанием положения маршрутных точек. Тем самым формируется пространственное расположение аппарата, траектория его перемещения между точками, называемая маршрутной траекторией.

После того, как аппараты доставлены в район выполнения сейсморазведки, они самостоятельно занимают исходное положение и выполняют действия, предписанные алгоритмами согласованного ведения сейсморазведки. Согласованное поведение группы АНПА и излучателя заключается в том, что большая часть АНПА с геофонами на борту размещается на дне в точках, расположенных в узлах условной сетки, покрывающей дно заданного района, и принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем. Вблизи донной поверхности перемещающийся по циклоидной траектории излучатель зондирует донную поверхность импульсными сигналами. По разности моментов времени приема геофонами отраженных сигналов определяется местоположение залежей углеводородов.

В это время 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, в свою очередь, осуществляет перемещение в место новой своей дислокации. Тем самым достигается динамичность функционирования всей системы в целом и непрерывность ведения сейсморазведки. На рис. 1 показано последовательное перемещение группы АНПА сначала вправо, затем – с изменением направления поворотом группы направо.



*Рис. 1. Начальный и промежуточный моменты согласованного движения излучателя и группы АНПА*

Из приведенного описания процесса ведения сейсморазведки следует, что для обеспечения согласованного с излучателем поведения группы АНПА необходимо слаженное взаимодействие между аппаратами внутри группы.

Первое, что необходимо обеспечить, это согласованность поведения аппарата в пространстве и во времени с действиями других аппаратов группы в условиях разнородности выполняемых действий каждым аппаратом как по функционалу, так и по времени.

Второе – это то, что согласованность обеспечивается, прежде всего, навигационными определениями каждого отдельно взятого аппарата группы.

Третье – это максимально возможное выдерживание маршрутной траектории каждым аппаратом в отдельности, с корректировкой в случае необходимости, своего положения, с учетом неоднородности факторов, оказывающих влияние на отклонение положения АНПА от заданной маршрутной траектории, например, течения.

Четвертое – это координация выполняемых действий аппаратами, которая возможна только при наличии целевого назначения действия и наличия связи между аппаратами для обмена информацией. Наиболее подходящим решением организации взаимодействия аппаратов внутри группы является мультиагентный подход.

Пятое – это для обеспечения взаимодействия между аппаратами необходима устойчивая связь, посредством которой происходит обмен информацией. Для обеспечения устойчивой связи необходимо соблюдать дистанции между аппаратами. Кроме того, должен быть четко определен объем информации, ее вид, темп передачи, средство связи, технологии связи.

Сказанное можно условно в обобщенном виде представить в виде структурной схемы взаимосвязи основных функций, обеспечиваемых системой управления АНПА (рис. 2).

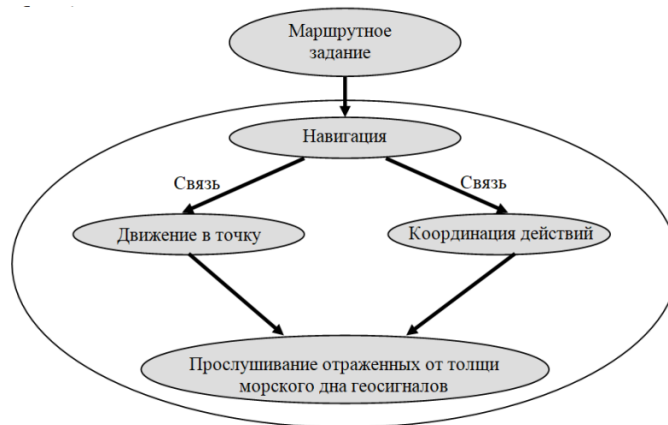


Рис. 2. Структурная схема взаимосвязи основных действий, обеспечиваемых системой управления АНПА

**2. Навигация в момент приема отраженного сигнала.** Несмотря на большое количество известных методов определения местоположения подводного объекта [15], при выполнении сейсморазведки существует ряд особенностей, которые не позволяют в полной мере воспользоваться этими методами и способами из-за сложностей их использования. Такими особенностями навигации при ведении сейсморазведки являются:

- ◆ обеспечение точного позиционирования АНПА не только при движении АНПА, но и в стационарном его положении при прослушивании отраженных сигналов;
- ◆ период времени, затрачиваемого на определение местоположения стационарно расположенных АНПА, не ограничен: определение местоположения можно вести синхронно с ведением сейсморазведки;
- ◆ излучатель оснащен качественной навигационной системой: высокоточной БИНС и возможностью определения своего местоположение, например, с использованием информации глобальной навигационной спутниковой системы;

- ◆ навигационная система излучателя обеспечивает стабильную временную шкалу;
- ◆ уход шкалы времени у каждого АНПА – постоянен, и с течением времени – не меняется, перед сейсморазведкой проводится синхронизация часов АНПА с точностью до  $10^{-6}$  сек (с использованием, например, NTP-протокола) в предположении, что за время проведения сейсморазведки дрейф часов не превысит допустимое значение;
- ◆ движение излучателя происходит по круговой траектории.
- ◆ мощность излучаемого сигнала такова, что акустический сигнал регистрируется каждым АНПА.

С учетом особенностей ведения сейсморазведки предложено использовать разностно-дальномерный метод определения каждым АНПА собственного положения. При использовании разностно-дальномерного метода последовательно измеряют четыре значения задержки времени прихода сигналов при различных последовательных положениях излучателя.

Ограничением на применение разностно-дальномерного метода является требование относительно положения излучателя в моменты определения положения АНПА: положения излучателя должны быть достаточно широко разнесены в пространстве для повышения точности позиционирования АНПА [14].

Такой процесс может происходить параллельно с зондированием дна сейсмосигналами, поскольку они отличаются по частоте, и их приемом заняты геофоны, а не гидрофоны. Тогда можно синхронизировать излучение акустических сигналов с излучением геопосылок.

После окончания сейсморазведки в ходе постобработки собираются данные моменты времени прихода акустических сигналов на каждом АНПА, по которым определяются разности времени между приходами сигналов от излучателя. По разностям времени принятых сигналов определяется местоположения каждого АНПА.

**3. Движение. Корректировка собственного положения.** Как отмечалось выше, маршрутное задание каждому АНПА задается в виде последовательности маршрутных точек с указанием их координат. Линия, соединяющая соседние маршрутные точки, является маршрутной траекторией. Задача АНПА состоит в постоянной проверке двух условий:

- ◆ соответствия положения АНПА маршрутной траектории;
- ◆ выдерживания АНПА заданной горизонтальной дистанции  $d$  до тех аппаратов, с которыми ему необходимо общаться для обеспечения согласованного движения.

При движении задача каждого АНПА – удерживаться в окрестности своей траектории и сохранять дистанцию до соседних АНПА для устойчивой связи. Для решения задачи следования АНПА траектории предлагается использовать один из алгоритмов «наведения на цель», в качестве которой рассматривается заданная точка траектории. Таким алгоритмом является алгоритм наведения АНПА путем управления аппаратом по отклонению угла между линией визирования и заданной траекторией [16, 17]. Задача алгоритма системы управления – совместить линию визирования «АНПА – заданная точка траектории» с идеальной траекторией. Условием выполнения совмещения линии является равенство нулю угла  $\beta$  между линией визирования и линией идеальной траектории. Заданный угол курса АНПА определяется выражением:

$$\psi = \alpha + K_1\beta + K_1 \cdot K_u \cdot \int \beta dt ,$$

где  $\alpha$  – угол наклона траектории АНПА;  $K_1$ ,  $K_u$  – коэффициенты СУ.

Достоинством алгоритма является то, что отсутствует колебательный характер траектории движения АНПА при переходе на новый участок галса. При этом АНПА следует траектории, близкой к идеальной как в отсутствии течения, так и при его наличии, а сам алгоритм минимизирует время восстановления положения на маршрутной траектории, в том числе и в условиях течения как стационарного, так и нестационарного.

Для исключения ситуации «промаха» АНПА относительно заданной точки, когда АНПА входит в окрестность заданной точки траектории, система управления АНПА запускает наведение на следующую маршрутную точку траектории.

**4. Координация действий, выполняемых аппаратом. Мультиагентный подход.** Предлагается функционирование АНПА в группе организовать с использованием мультиагентного подхода [18], при котором каждый АНПА обладает определенными функциями, а именно:

- ◆ получение индивидуального маршрутного задания;
- ◆ самостоятельное определение собственного местоположения;
- ◆ корректировка собственного положения.
- ◆ связь между аппаратами для реализации мультиагентного подхода.

Движение группы происходит за счет перемещения отдельных ее рядов [14]. Поэтому для координации действия между рядами необходимо общение между АНПА каждого ряда. Однако общение с каждым АНПА ряда нецелесообразно, поскольку все АНПА одного ряда двигаются с одними и теми же курсом и скоростью. Поэтому целесообразно перейти от общения с каждым АНПА к общению с каким-то одним АНПА (лидером ряда). Тогда остальные АНПА этого ряда по команде лидера будут выполнять заранее предписанные функции:

- ◆ начать заглупление;
- ◆ начать всплытие;
- ◆ начать позиционирование;
- ◆ подготовиться к сеансу;
- ◆ закончить сеанс;
- ◆ начать движение;
- ◆ кончить движение.

Координация действий в этом случае будет происходить между лидерами каждого ряда. При этом лидер передает всем остальным АНПА своего ряда соответствующие команды на выполнение предписанных функций.

Согласованность между действиями АНПА должна быть обеспечена не только в рамках одного ряда, но и между рядами. В этом случае общение происходит между лидерами каждого ряда, они согласовывают «межрядные» действия, а затем - отдают команды АНПА своего ряда.

При этом возникает задача выбора лидера. В качестве лидера предлагается использовать тот АНПА, у которого сумма расстояний до остальных АНПА его ряда - минимальная, чтобы в максимальной степени обеспечить устойчивость связи. При этом расстояние между лидерами каждого ряда также должно быть в пределах дистанции устойчивой связи.

Еще одной задачей является определение лидера в том случае, если:

- ◆ текущий лидер перестал выходить на связь по причине увеличения дистанции выше допустимой, выхода из строя связного канала, поломки собственно АНПА-лидера и т.д.;
- ◆ при изменении направления движения группы, при котором происходит изменение состава перемещающегося ряда, что влечет за собой смену лидера во вновь образовавшемся ряду.

Для определения лидера предлагается реализовать постоянный обмен функциями полезности между агентами, тогда лидером становится тот, кто имеет наибольшее значение функции полезности. Функция полезности определяется минимальным суммарным расстоянием от лидера до остальных до АНПА ряда. Каждый аппарат получает информацию от соседних аппаратов об их функции полезности и сравнивает с собственным значением функции полезности, и по результатам анализа принимает для себя решение: он лидер или ведомый. В том случае, если аппарат выявляет, что его приоритет – наиболее высокий на текущий момент времени, он берет на себя функции лидера, отказывается от функций ведомого и об этом оповещает остальные ведомые аппараты.

При общении в целях минимизации объема передаваемой информации целесообразно использовать подход, согласно которому в том случае, если собственная ценовая функция – максимальна – данные не передаются, если же по принятым данным выясняется что появился ведомый с более высоким значением ценовой функции, то этот аппарат начинает передавать остальным аппаратам свое значение ценовой функции.

Таким образом, при мультиагентном подходе в каждый момент времени:

- ◆ каждый ведомый общается с лидером, определяет дистанцию до лидера и на этом основании – свою ценовую функцию; ценовая функция лидера равна 1;
- ◆ все ведомые общаются между собой, сообщая значение ценовой функции по правилу: тот, у кого больше – не сообщает, все остальные – сообщают.

Взаимодействие между аппаратами обеспечивает связь, поэтому в следующем разделе рассмотрены вопросы связи.

**4. Описание связи, используемой для обмена между АНПА.** Для обеспечения функционирования мультиагентной системы, аппараты должны передавать друг другу определенную информацию. Информация передается для того, чтобы аппаратам сменил выполнение одной функции на выполнение другой функции.

Передаваемое сообщение включает в себя:

- ◆ информацию о выполняемом действии в закодированном виде;
- ◆ значение функции полезности;
- ◆ координаты собственного положения (широта, долгота, глубина);
- ◆ параметры своего движения (курс, скорость);
- ◆ момент времени формирования сообщения.

Благодаря поступившей информации определяется момент начала выполнения определенного действия, например, всплытия, заглубления, начала сеанса сейсморазведки, окончание сеанса сейсморазведки и т.д.

Получив команду на смену направления действия, СУ аппарата выдает своим механизмам и устройствам соответствующие команды.

Для связи целесообразно использовать связные модемы, например, [19] которые должны обеспечивать дистанции обеспечения связи не только с ближайшими аппаратами, но и ближайшими аппаратами соседних рядов, то есть аппаратами, являющимися лидерами - каждый в своем ряду.

**5. Реализация предложенных решений в системе управления АНПА в виде многоуровневых алгоритмов.** Использование предложенных решений реализовано в виде многоуровневых алгоритмов функционирования системы управления АНПА, принцип построения которых приведен в [20]. Алгоритмы системы управления АНПА определяются:

- ◆ задачами, которые необходимо решить АНПА в процессе выполнения миссии;



- ♦ возможностями аппаратной части АНПА, его устройств и механизмов, способностями оперативно реагировать на поступившие команды и отбатывать принятые решения;
- ♦ условиями функционирования АНПА – как внешними (среда, препятствия), так и внутренними (состояние и износ устройств и механизмов, их исправность и т.д.).

Ввиду многообразия задач, решаемых системой управления аппарата разработку алгоритмов системы управления АНПА целесообразно вести с учетом как глобальных задач, определяемых миссией в целом, так и локальных задач на уровне устройств и механизмов АНПА. При этом алгоритмы системы управления верхнего уровня формируют требования и ограничения, накладываемые на алгоритмы более низкого уровня, и наоборот.

Функционирование как АНПА в целом, так и отдельных его систем, устройств и механизмов, определяется алгоритмами их функционирования с учетом автономности АНПА и полной самостоятельности принимаемых решений относительно своего поведения. Для формирования алгоритмов функционирования систем, устройств и механизмов использована сформированная ранее технология разработки алгоритмов функционирования систем АНПА для последующей их реализации в СУ АНПА, в основу которой положено разбиение процесса формирования алгоритмов функционирования системы на уровни в зависимости от решаемых задач [20].

При обосновании формирования уровней будем отталкиваться от того, что на глобальном уровне миссия должна быть выполнена, а на локальном уровне системы АНПА должны обеспечить выполнение поставленной перед АНПА миссии. Тогда на самом верхнем уровне таким объектом является группа АНПА, уровнем ниже – АНПА, уровнем еще ниже – отдельные функции АНПА. На следующем уровне такими объектами будут являться системы АНПА, обеспечивающие эти функции, еще ниже уровнем объектом являются отдельно взятые системы АНПА.

После того, как определены объекты каждого уровня, для них сформированы алгоритмы их работы. Например, для группы с точки зрения выполнения миссии в целом задача заключается в обеспечении ее выполнения в заданный промежуток времени, или покрытие определенной площади, или условия, которые ограничивают сверху и снизу функционирование группы. Затем на каждом уровне были разработаны алгоритмы поведения объекта в параметрическом виде. Так, для АНПА в целом такими алгоритмами являются алгоритмы движения, для отдельных систем АНПА – алгоритмы перехода из одного режима функционирования в другой. На следующем этапе были определены показатели эффективности функционирования объекта для выбора оптимальных параметров сформированных алгоритмов поведения объекта. Далее были разработаны математические модели для проведения исследований по оптимизации алгоритмов поведения объектов, определив при этом необходимую и достаточную степень детализации воспроизводимых процессов. Здесь же были определены различные условия, в которых целесообразно провести исследования функционирования рассматриваемого объекта. В результате выполнения всех перечисленных действий были сформированы оптимальные алгоритмы функционирования объекта на каждом из уровней. Полученные результаты каждого уровня были использованы в качестве входных данных и ограничений при решении задачи формирования алгоритмов поведения объектов более низкого уровня. В качестве входных данных выступали временные ограничения, ограничения на параметры поведения, ограничения на функционирование отдельных устройств как снизу, так и сверху. В результате последовательного решения указанных задач были сформированы алгоритмы, апробация которых происходила с использованием специально разработанной математической модели и ее программной реализации.

Реализация описанных алгоритмов в составе группы при ведении сейсморазведки и отработка их совместного функционирования проведены с использованием программной реализации специально разработанной математической модели.

**6. Описание математической имитационной модели.** Для апробации предложенных алгоритмов и методов разрешения противоречий между предложенными решениями отдельных задач была разработана математическая общая модель группового управления АНПА при проведении сейсморазведки.

В этой математической модели объекты управления (излучатель, АНПА) представлены в виде материальных точек, движение которых частными параметрическими моделями, входными параметрами которых являются курс, скорость, дифферент, глубина и координаты.

В общей математической модели осуществляется:

- ◆ воспроизведение поведения излучателя;
- ◆ воспроизведение поведения каждого АНПА группы;
- ◆ воспроизведение поведения отдельно взятого АНПА, всецело определяемого поведением группы АНПА, как единого целого (АНПА в «контейнере»);
- ◆ обмен информацией между АНПА;
- ◆ каналы связи;
- ◆ решение навигационной задачи каждым АНПА;
- ◆ уточнение координат при нерегулярных возмущениях;
- ◆ корректировка собственного положения каждым аппаратом в случае отклонения от заданной траектории.

Разработанная общая математическая модель воспроизводит процесс сейсморазведки в целом и может быть использована на начальных этапах исследований. На дальнейших этапах проведения исследований, направленных на уточнение полученных на первом этапе результатов, ее необходимо дополнить и масштабировать за счет повышения степени детализации отдельных процессов с учетом сбалансированности всех воспроизводимых процессов, реализованных в математической модели.

В каждом такте имитации воспроизводились процессы движения излучателя по круговой траектории, движение группы АНПА и отдельно взятых АНПА из группы, излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала и прием геофонами отраженного от месторождений углеводородов сигнала. При этом оценивались задержки прихода сигнала на геофоны, и по полученным задержкам с использованием разностно-дальномерного метода определялись координаты положения залежей месторождений углеводородов. Месторождение углеводородов моделировалось в виде эллипсоида, размеры которого являлись случайными и разыгрывались равномерно из заданного диапазона. Положение месторождения в заданном районе также было случайным и разыгрывалось равномерно.

**7. Результаты.** Математическая модель в ходе проведения численных экспериментов подтвердила работоспособность предложенных алгоритмов, установленную последовательность выполнения задач, стоящих перед АНПА. Кроме того были определены общие требования к техническим решениям, которые обеспечивают использование АНПА для решения столь сложной многосторонней задачи – от момента разработки маршрутного задания и передачи его соответствующему АНПА, до оценки степени достижения поставленной цели.

**Заключение.** Предложенные в работе алгоритмы решения задач группового управления АНПА, возникающих при их использовании для ведения сейсморазведки, и апробация их с использованием математической модели позволяет определить требования к техническим решениям, а также учесть имеющийся уровень технических решений для определения параметров и стратегии ведения поиска залежей углеводородов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фасхутдинов Р.В.* Подводные камни морской сейсморазведки // [www.Korabel.ru](http://www.Korabel.ru). – 2016. – Вып. 2 (32). – С. 98-106.
2. Пат. 2 381 530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геологоразведочных работ / А.И. Машошин, С.В. Жуменков, В.Б. Зиннатов, С.Ю. Ермаков, А.С. Смирнов. – № 2008124873/28; заявл. 10.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4. – 8 с.
3. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. Агеева М.Д. – М.: Наука, 2005. – 398 с.
4. *Инзарцев А.В. и др.* Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. – 2007. – № 2 (4). – С. 5-14.
5. *Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А.* Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2010. – Т. 3, № 1. – С. 4-13.
6. *Боженев Ю.А.* Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 1. – С. 4-68.
7. *Millar G., Mackay L.* Maneuvering under the ice // *Sea technology*. – 2015. – Vol. 56, No. 4. – P. 35-38.
8. *Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю.* Угроза из глубины: XXI век. – Хабаровск: КГУП "Хабаровская краевая типография", 2011. – 304 с.
9. *Белосов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // *Зарубежное военное обозрение*. – 2013. – № 5. – С. 79-88.
10. *Викторов Р.В., Илларионов Г.Ю., Квашинин А.Г.* Двойное применение автономных необитаемых подводных аппаратов типа "REMUS" // *Двойные технологии*. – 2010. – № 3. – С. 54-62.
11. *Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р.* Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2011. – Т. 4, № 3. – С. 37-48.
12. *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". – Владивосток, 2011. – С. 220-224.
13. Пат. № 2515170 РФ. Подвижная подводная автономная сейсмогидроакустическая станция разведки углеводородов на акватории арктического шельфа / П.Д. Груздев, В.П. Дмитриченко, Р.А. Жостков, В.Н. Кочедыков, М.З. Нисневич, О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич, В.А. Солдатенков, П.Д. Сухопаров). – № 2012136491/28; заявл. 24.08.2012; опубл. 27.02.2014, Бюл. № 6. – 6 с.
14. *Мартынова Л.А.* Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. – 2017. – № 1 (86). – С. 83-92.
15. *Кебкал К.Г., Машошин А.И.* Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирокоспия и навигация. – 2016. – Т. 24, № 3 (94). – С. 115-130.
16. *Edwards D.B.* A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations // *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*. – 2004. – P. 10.
17. *Лямина Е.А.* Алгоритмы управления движением группы АНПА по поисковым траекториям. Электронный ресурс.
18. *Мартынова Л.А., Машошин А.И.* Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 2 (175). – С. 38-48.
19. *Кебкал К.Г., Кебкал А.Г., Кебкал В.К.* Инструментальные средства синхронизации гидроакустических устройств связи в задачах управления подводными сенсорами, распределенными антеннами, автономными аппаратами // Гирокоспия и навигация. – 2014. – № 2 (85). – С. 70-85.

20. Мартынова Л.А., Конюхов Г.В., Пашкевич И.В., Рухлов Н.Н. Технология разработки моделей и алгоритмов системы управления АНПА при выполнении сложной миссии // Материалы двенадцатой Всероссийской научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" 3-7 апреля 2017 г. в п. Домбай Карачаево-Черкесской республики. – Ростов-на-Дону, 2017. – С. 117-128.

## REFERENCES

1. Faskhutdinov R.V. Podvodnye kamni morskoy seysmorazvedki [The pitfalls of offshore seismic exploration], *www.Korabel.ru*, 2016, Issue 2 (32), pp. 98-106.
2. Mashoshin A.I., Zhumenkov S.V., Zinnatov V.B., Er-makov S.Yu., Smirnov A.S. Morskaya avtonomnaya donnaya stantsiya dlya vypolneniya geofizicheskikh i geologorazvedochnykh rabot [Marine Autonomous bottom station for geophysical and geological exploration]. Patent RF 2 381 530, No. 2008124873/28; stated 10.06.2008; published 10.02.2010, Bull. No. 4, 8 p.
3. Avtonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii [Autonomous underwater robots. Systems and technologies], ed. by Ageeva M.D. Moscow: Nauka, 2005, 398 p.
4. Inzartsev A.V. i dr. Primenenie avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata dlya nauchnykh issledovaniy v Arktike [The application of Autonomous underwater vehicle for scientific research in the Arctic], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2007, No. 2 (4), pp. 5-14.
5. Gizitdinova M.R., Kuz'mitskiy M.A. Mobil'nye podvodnye roboty v sovremennoy okeanografii i gidrofizike [Mobile underwater robots in modern oceanography and hydrophysics], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika], 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 4-13.
6. Bozhenov Yu.A. Ispol'zovanie avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya issledovaniya Arktiki i Antarktiki [The use of Autonomous underwater vehicles for exploration of the Arctic and Antarctic], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika], 2011, Vol. 4, No. 1, pp. 4-68.
7. Millar G., Mackay L. Maneuvering under the ice, *Sea technology*, 2015, Vol. 56, No. 4, pp. 35-38.
8. Illarionov G.Yu., Sidenko K.S., Bocharov L.Yu. Ugroza iz glubiny: XXI vek [Threat from the depths: the XXI century]. Khabarovsk: KGUP "Khabarovskaya kraevaya tipografiya", 2011, 304 p.
9. Belousov I. Sovremennyye i perspektivnyye neobitaemye podvodnye apparaty VMS SShA [Modern and perspective unmanned underwater vehicles, the US Navy], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2013, No. 5, pp. 79-88.
10. Viktorov R.V., Illarionov G.Yu., Kvashnin A.G. Dvoynoe primeneniye avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov tipa "REMUS" [Dual use Autonomous non-manned underwater vehicles such as "REMUS"], *Dvoynyye tekhnologii* [Dual technology], 2010, No. 3, pp. 54-62.
11. Kuz'mitskiy M.A., Gizitdinova M.R. Mobil'nye podvodnye roboty v reshenii zadach VMF: Sovremennyye tekhnologii i perspektivy [Mobile underwater robots in the tasks of the Navy: Modern technologies and perspectives], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika], 2011, Vol. 4, No. 3, pp. 37-48.
12. Maksimov S.V. O primeneniye avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov v tekhnologii total'noy donnoy seysmorazvedki [On the application of Autonomous underwater vehicles technology total bottom seismic survey], *Trudy 4-y Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana"* [Proceedings of 4th all-Russian scientific-technical conference "Technical problems of World ocean exploration"]. Vladivostok, 2011, pp. 220-224.
13. Gruzdev P.D., Dmitrichenko V.P., Zhostkov R.A., Kochedykov V.N., Nisnevich M.Z., Rudenko O.V., Sobisevich A.L., Sobisevich L.E., Soldatenkov V.A., Sukhoparov P.D. Podvizhnaya podvodnaya avtonomnaya seysmogidroakusticheskaya stantsiya razvedki uglevodorodov na akvatorii arkticheskogo shel'fa [Movable underwater Autonomous seismodislocations station for exploration of hydrocarbons in the waters of the Arctic shelf]. Patent RF No. 2515170. No. 2012136491/28; stated 24.08.2012; published 27.02.2014, Bull. No. 6, 6 p.

14. *Martynova L.A.* Metod soglasovannogo povedeniya izluchatelya i avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov dlya effektivnogo vedeniya seysmorazvedki [The method consistent behavior of the emitter and autonomous unmanned underwater vehicles for the efficient conduct of seismic data], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and control systems], 2017, No. 1 (86), pp. 83-92.
15. *Kebkal K.G., Mashoshin A.I.* Gidroakusticheskie metody pozitsionirovaniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Hydro-acoustic methods of positioning Autonomous unmanned underwater vehicles], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2016, Vol. 24, No. 3 (94), pp. 115-130.
16. *Edwards D.B.* A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations, *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, 2004, pp. 10.
17. *Lyamina E.A.* Algoritmy upravleniya dvizheniem gruppy ANPA po poiskovym traektoriyam. Elektronnyy resurs [The motion control algorithms of the group of ANPA at the search trajectories. Electronic resource].
18. *Martynova L.A., Mashoshin A.I.* Postroenie sistemy upravleniya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov na baze mul'tiagentnoy tekhnologii [Construction of control system of Autonomous underwater vehicles on the basis of multi-agent technology], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, No. 2 (175), pp. 38-48.
19. *Kebkal K.G., Kebkal A.G., Kebkal V.K.* Instrumental'nye sredstva sinkhronizatsii gidroakusticheskikh ustroystv svyazi v zadachakh upravleniya podvodnymi sensorami, raspredelemnymi antennami, avtonomnymi apparatami [Tools of synchronization of acoustic communication devices in control of underwater sensors, distributed antennas, and Autonomous vehicles], *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and navigation], 2014, No. 2 (85), pp. 70-85.
20. *Martynova L.A., Konyukhov G.V., Pashkevich I.V., Rukhlov N.N.* Tekhnologiya razrabotki modeley i algoritmov sistemy upravleniya ANPA pri vypolnenii slozhnoy missii [Technology development of models and algorithms of a control system of AUV while performing complex missions], *Materialy dvenadtsatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya" 3-7 aprelya 2017 g. v p. Dombay Karachaevskoy respubliky* [The twelfth all-Russian scientific-practical conference "advanced systems and control problems" from 3 to 7 April 2017 in p. Dombay Karachay-Cherkess Republic]. Rostov-on-Don, 2017, pp. 117-128.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.Г. Капустян.

**Мартынова Любовь Александровна** – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Санкт-Петербург, Малая Посадская ул. 30; тел.: +79219411395; д.т.н.; с.н.с.; в.н.с.

**Пашкевич Иван Владимирович** – e-mail: iv@bk.ru; тел.: 79119330006; главный специалист.

**Конюхов Геннадий Вячеславович** – e-mail: kongv1@yandex.ru; тел.: +79216537768; руководитель научно-исследовательской группы; к.т.н.

**Рухлов Никита Николаевич** – e-mail: ruhlov\_nn@elprib.ru; тел.: +79119826437; инженер.

**Martynova Liubov Alexandrovna** – JSC CSRI Elektropribor; e-mail: martynowa999@bk.ru; 197046, Saint-Petersburg, Malaya Posadskaya, 30; phone: +79219411395; dr. of eng.sc.; senior research; leading researcher.

**Pashkevich Ivan Vladimirovich** – e-mail: iv@bk.ru; phone: 79119330006; chief specialist.

**Konyukhov Gennadiy Viacheslavovich** – e-mail: kongv1@yandex.ru; phone: +79216537768; head of research group; cand. of eng. sc.

**Rukhlov Nikita Nikolaevich** – e-mail: ruhlov\_nn@elprib.ru; phone: +79119826437; engineer.