

МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО УДЕРЖАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ АНПА НА МАРШРУТНОЙ ТРАЕКТОРИИ ПРИ ВЕДЕНИИ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, martynowa999@bk.ru
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Малая Посадская ул., 30, Санкт-Петербург, 197046, РФ

Постановка проблемы: в процессе ведения сейсморазведки в подледных условиях автономные необитаемые подводные аппараты могут отклоняться от маршрутной траектории вследствие влияния течения и других случайных нестационарных факторов. В связи с этим для ведения эффективной сейсморазведки необходимо постоянно удерживать аппарат на маршрутной траектории. **Цель:** разработка метода эффективного удержания автономного необитаемого подводного аппарата на маршрутной траектории. **Метод:** после выявления факта отклонения аппарата от маршрутной траектории для последующего его восстановления на маршрутной траектории использован один из методов наведения на цель — метод управления по отклонению угла линии визирования. **Результаты:** получены математические зависимости оценки отклонения аппарата от маршрутной траектории; реализован метод восстановления аппарата на маршрутной траектории, доработанный с учетом ограничений на маневренные характеристики аппарата; разработана математическая модель и проведена оптимизация параметров предложенного метода на основе оценки эффективности ведения сейсморазведки. По результатам моделирования определены значения параметров метода удержания автономных необитаемых подводных аппаратов на маршрутной траектории, обеспечивающих эффективное ведение поиска, с учетом расстояния между маршрутными точками, ограничений на скорость поворота автономных необитаемых подводных аппаратов и допустимой дистанции их отклонения от маршрутной траектории. **Практическая значимость:** разработанный метод позволяет эффективно восстанавливать положение аппарата на маршрутной траектории с учетом ограничений и особенностей ведения сейсморазведки в заданном регионе.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, маршрутная траектория, течение, оценка эффективности.

Цитирование: Мартынова Л. А. Метод эффективного удержания положения АНПА на маршрутной траектории при ведении сейсморазведки // Информационно-управляющие системы. 2018. № 3. С. 34–44. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34

Citation: Martynova L. A. Effective Retention of AUV Position on Route Trajectory during Seismic Survey. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 34–44 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34

Введение

При ведении сейсморазведки по поиску углеводорода в морском дне Арктического шельфа [1–4] в подледных условиях в настоящее время используются сейсморазведочные станции, которые после их распределения на водной поверхности опускаются на дно для прослушивания отраженного сейсмосигнала, создаваемого излучателем. Стремительное совершенствование возможностей автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) создает все предпосылки для их использования в разных отраслях народного хозяйства, в том числе и в сейсморазведке. При использовании группы АНПА на всех аппаратах размещают по одному геофону [5–8]. Каждый АНПА группы с геофоном самостоятельно перемещается в заданную маршрутным заданием точку и опускается на дно. Геофон ведет прием сигналов, создаваемых излучателем и отраженных от толщи морского дна, затем АНПА всплывает и перемещается в новую маршрутную точку и т. д. [9–11].

Процесс перемещения АНПА сопровождается отклонением их положения от заданной маршрутной траектории. Отклонения могут быть вы-

званы внешними возмущающими факторами: течением, изменением параметров морской среды, погрешностями собственного определения местоположения [12, 13] и т. д. Отклонение положения АНПА от заданной маршрутной траектории приводит к нарушению взаимного положения АНПА в группе и снижению возможности обнаружения местоположения залежей углеводородов. Поэтому для эффективного ведения сейсморазведки с помощью АНПА необходимо в случае отклонения АНПА от маршрутной траектории восстанавливать его положение на маршрутной траектории.

Имеющиеся работы в области уточнения положения аппарата и прогнозирования параметров его движения [14–16] не позволяют использовать полученные результаты для подводных аппаратов, поскольку подводная среда отличается чрезмерным затуханием звукового сигнала, ограниченностью связи, влиянием параметров морской среды [17].

Для достижения поставленной в работе цели — разработки метода эффективного удержания АНПА на маршрутной траектории — были решены следующие задачи:

— проанализированы факторы, оказывающие влияние на положение АНПА;

— проанализированы имеющиеся подходы к восстановлению положения АНПА на маршрутной траектории в случае выявления отклонения его положения от заданного;

— разработан алгоритм восстановления положения АНПА на маршрутной траектории с учетом ограничений на маневренные возможности АНПА;

— определены показатели эффективности удержания АНПА на маршрутной траектории;

— разработана математическая модель для проведения исследований по выбору оптимальных параметров метода удержания положения АНПА на заданной траектории;

— получены оптимальные значения параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории, обеспечивающие эффективное ведение сейсморазведки;

— по результатам численного эксперимента выданы рекомендации.

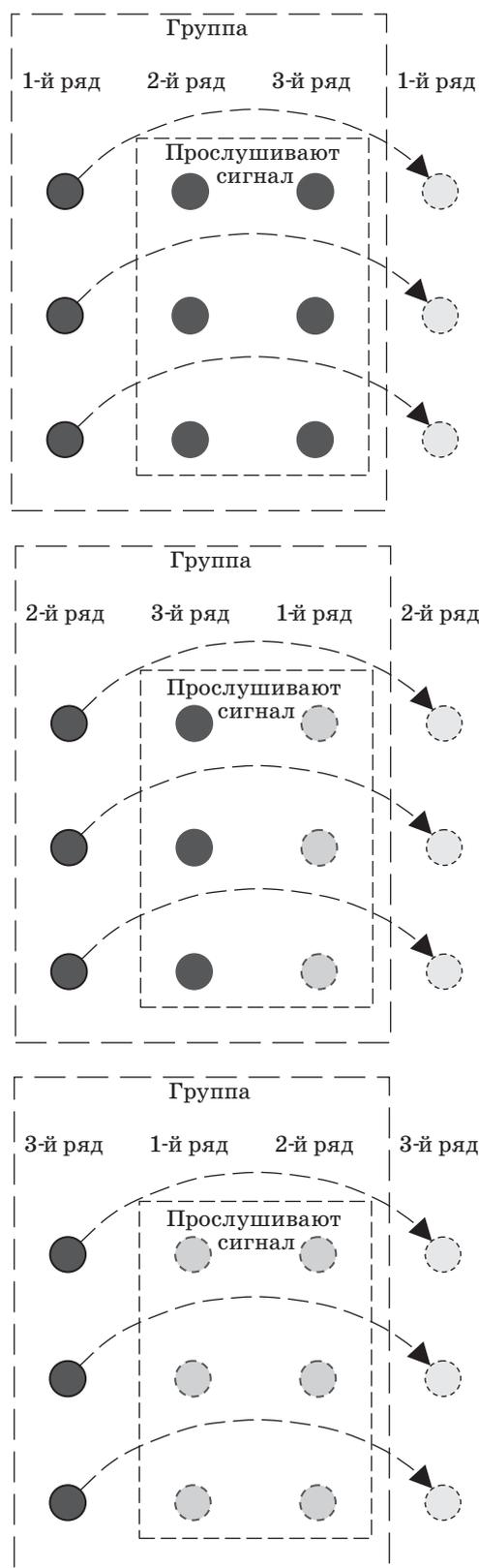
Описание поведения группы АНПА

Перед началом выполнения сейсморазведки в каждый аппарат вводится маршрутное задание с указанием положения маршрутных точек. Линия, соединяющая маршрутные точки, является маршрутной траекторией. После того как аппараты доставлены в район выполнения сейсморазведки, они выстраиваются группой в исходное положение.

В ходе ведения сейсморазведки излучатель зондирует донную поверхность импульсными сигналами. Большая часть АНПА из группы с помощью геофонов принимает отраженный сигнал, создаваемый излучателем. 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, перемещается в места новой своей дислокации в соответствии с маршрутным заданием. Схема поэтапного перемещения АНПА группы, в результате которого происходит поступательное движение группы АНПА, приведена на рис. 1. Общая схема взаимного положения излучателя и группы аппаратов представлена на рис. 2, а и б.

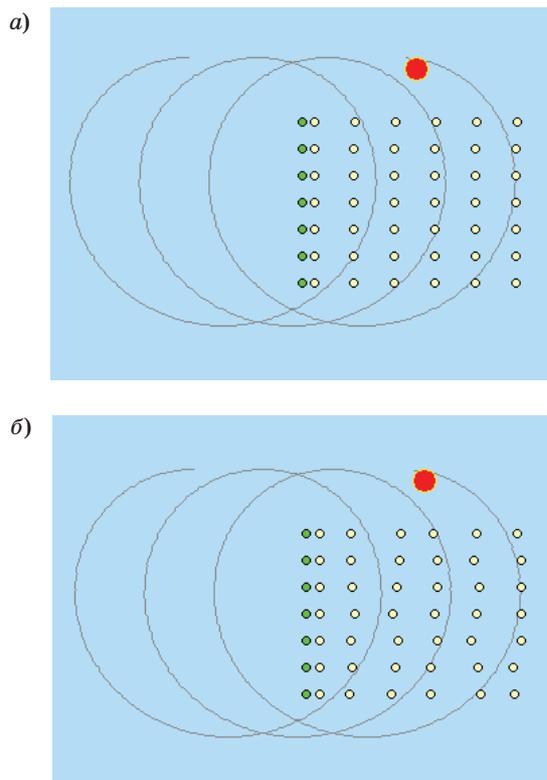
По результатам постобработки зарегистрированных сигналов определяется местоположение залежей углеводородов.

Из приведенного описания тактической ситуации при ведении сейсморазведки с использованием АНПА следует, что для снижения погрешности определения местоположения залежей



■ **Рис. 1.** Схема последовательного перемещения ряда АНПА, обеспечивающего согласованное перемещение группы АНПА с излучателем

■ **Fig. 1.** Scheme of sequential displacement of a series of AUV, ensuring a coordinated movement of the AUV group with the radiator



■ **Рис. 2.** Положение АНПА без влияния (а) и с влиянием (б) возмущающих факторов
 ■ **Fig. 2.** The position of the AUV without influence (a) and with the influence of (b) perturbing factors

углеводородов аппарату необходимо с высокой точностью оказаться в окрестности точки для последующего опускания на дно и прослушивания в этой точке отраженного сигнала. Однако на положение АНПА при перемещении влияние оказывают внешние факторы (например, течение), которые вызывают отклонение АНПА от заданной маршрутной траектории.

Задача состоит в удержании АНПА на маршрутной траектории так, чтобы обеспечить прибытие АНПА в окрестность заданной точки с погрешностью в пределах заданной. Разработан метод для решения указанной задачи.

Метод удержания положения АНПА на маршрутной траектории

Удержание АНПА на маршрутной траектории определяется:

- собственным позиционированием аппарата;
- результатами анализа влияния внешних факторов, которые вызывают отклонение АНПА от заданной маршрутной траектории;
- алгоритмом возврата на маршрутную траекторию.

Собственное позиционирование АНПА в момент движения происходит с использованием бортовой инерциальной навигационной системы и (или) вспомогательных средств — донных или поверхностных маяков-ответчиков. Частота обновления данных менее 1 с.

Анализ положения АНПА на маршрутной траектории заключается в определении отклонения положения АНПА от маршрутной траектории и сравнении полученного отклонения с допустимой дистанцией. Выбор допустимой дистанции определяется возможностью возвращения АНПА на маршрутную траекторию. На маршрутную траекторию аппарат должен вернуться до местоположения ближайшей маршрутной точки.

Расчет отклонения АНПА от маршрутной траектории между i -й и $(i + 1)$ -й маршрутными точками будем проводить следующим образом. Для одной из координат положения АНПА, например X , определяется соответствующая ей вторая координата Y , как точка, принадлежащая маршрутной траектории:

$$Y_{\text{м.т}} = Y_i + (X_{\text{АНПА}} - X_i) \frac{(Y_{i+1} - Y_i)}{(X_{i+1} - X_i)},$$

где $Y_{\text{м.т}}$ — координата АНПА при нахождении его на маршрутной траектории; $X_{\text{АНПА}}$ — текущая координата АНПА; X_i, Y_i — координаты i -й точки; X_{i+1}, Y_{i+1} — координаты $(i + 1)$ -й точки.

Если текущее отклонение АНПА от маршрутной траектории превышает значение допустимой дистанции $D_{\text{доп}}$, т. е. если выполняется условие $|Y_{\text{АНПА}} - Y_{\text{м.т}}| > D_{\text{доп}}$, то АНПА производит корректировку своего положения путем маневрирования по курсу.

Выбор алгоритма корректировки определяется обеспечением прибытия АНПА в маршрутную точку с погрешностью не выше заданной.

Возможность возвращения АНПА на маршрутную траекторию определяется:

- оставшимся расстоянием до маршрутной точки;
- ограничениями, накладываемыми на маневренные характеристики АНПА;
- алгоритмом, выбранным для формирования курса АНПА, обеспечивающего возвращение на маршрутную траекторию.

При выборе алгоритма учитывалась целесообразность перехода от возвращения АНПА на маршрутную траекторию к прибытию АНПА в маршрутную точку. Поэтому были рассмотрены алгоритмы, ориентированные на прибытие АНПА в окрестность маршрутной точки:

- метод погони, условием выполнения которого является непрерывное направление продольной оси АНПА на ближайшую маршрутную точку;

— метод наведения с упреждением, вектор скорости АНПА направлен в упрежденную точку «встречи» с ближайшей маршрутной точкой;

— метод «накрытия» ближайшей маршрутной точки, при котором должно быть обеспечено равенство углов между «АНПА — i -я маршрутная точка» и «АНПА — $(i + 1)$ -я маршрутная точка».

В настоящей работе с учетом специфики ведения сейсморазведки выбран алгоритм «наведения на цель» [18–21], обеспечиваемый алгоритмом управления по отклонению угла линии визирования. Этот алгоритм отличается тем, что не требует каких-либо дополнительных специальных измерений, например расстояния до маршрутной траектории. В качестве цели рассматривается заданная маршрутная точка траектории. В результате определяется курс, на который должен лечь АНПА. Для исключения ситуации «промаха» АНПА относительно заданной маршрутной точки, когда АНПА входит в область вокруг заданной маршрутной точки траектории, система управления АНПА запускает наведение на следующую маршрутную точку траектории. Описанный алгоритм «наведения на цель» минимизирует время восстановления положения АНПА на маршрутной траектории, в том числе и в условиях течения как стационарного, так и нестационарного.

Задача АНПА заключается в совмещении линии визирования «АНПА — $(i + 1)$ -я маршрутная точка» с идеальной траекторией. Условием выполнения совмещения линии является равенство нулю угла β между линией визирования и линией маршрутной траектории. Заданный угол курса АНПА определяется выражением [7]

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

где α — угол наклона траектории АНПА (рис. 3); K_1, K_u — коэффициенты системы управления.

Приведенные выше выражения позволяют определить текущий курс АНПА так, чтобы ему оказаться в окрестности маршрутной точки.

Схема взаимного расположения АНПА и предыдущей (i -й) и ближайшей ($(i + 1)$ -й) маршрутных точек представлена на рис. 3.

Достоинством алгоритма является то, что отсутствует колебательный характер траектории движения АНПА при переходе на новый участок галса [7]. При этом АНПА следует траекторией, близкой к идеальной, как при отсутствии, так и при наличии течения.

Однако в приведенном алгоритме восстановления положения АНПА на маршрутной траектории отсутствуют ограничения на маневренные характеристики. Для их учета модифицируем приведенный алгоритм, добавив ограничение на корректировку текущего курса АНПА:

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

при $K_1 K_u \int \beta dt \leq \psi_{огр},$

где $\psi_{огр}$ — ограничение на угол поворота.

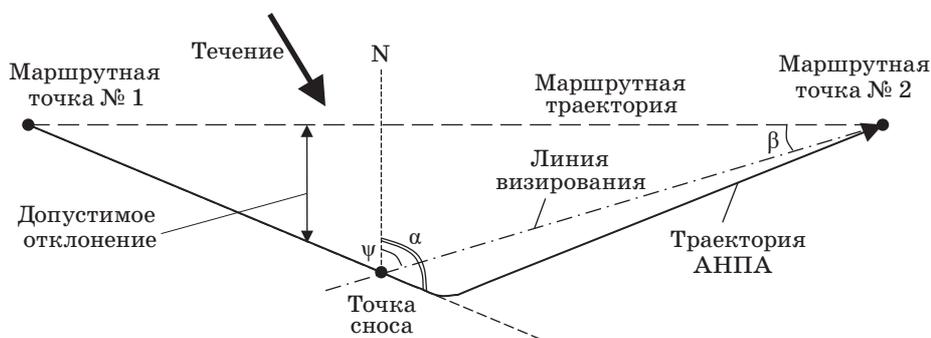
При этом указанный ранее параметр — допустимое отклонение — зависит от ограничения на скорость изменения угла поворота АНПА, вызванного его инерционностью.

Поэтому, для того чтобы можно было воспользоваться предложенным в настоящей работе методом удержания АНПА на маршрутной траектории, необходимо определить параметр метода — допустимое отклонение $D_{доп}$ с учетом ограничения на скорость изменения курса:

$$D_{доп i} = f(i, V_{теч}, R_{i,i+1}, Q_{огр}, D_{м.т}),$$

где $V_{теч}$ — скорость течения, измеряемая лагом, которым оборудован АНПА; $R_{i,i+1}$ — расстояние между заданными маршрутными точками; $Q_{огр}$ — ограничение на скорость изменения курса АНПА; $D_{м.т}$ — допустимое отклонение от маршрутной точки для прибывающего в нее АНПА.

С точки зрения периодичности корректировки положения АНПА, определяющей допустимое отклонение, необходимо отметить следующее.



■ **Рис. 3.** Схема изменения курса АНПА при восстановлении своего положения на маршрутной траектории

■ **Fig. 3.** Scheme change course of the AUV when restoring its position on the route trajectory

Автономный необитаемый подводный аппарат в ходе своего перемещения подвержен не только постоянным возмущающим факторам, таким как течение, но и случайным факторам, связанным, например, с вихревыми образованиями, турбулентностью, изменением ее параметров, а также случайными погрешностями определения собственного местоположения и т. д. В такой ситуации вести постоянную корректировку собственного положения аппарату нецелесообразно.

С другой стороны, слишком большая дистанция отклонения может привести к нехватке времени для возврата к маршрутной траектории из-за ограничений на скорость изменения угла поворота АНПА. Поэтому необходимо было определить оптимальное значение допустимого отклонения АНПА от маршрутной траектории, при котором восстановление АНПА на маршрутной траектории обеспечивает эффективное ведение сейсморазведки.

Для определения оптимального значения допустимого отклонения АНПА от маршрутной траектории необходимо было, прежде всего, выработать показатель эффективности ведения сейсморазведки. Использование показателя эффективности позволяет по результатам численного эксперимента определить оптимальное значение допустимой дистанции отклонения АНПА от маршрутной траектории.

Эффективность E ведения сейсморазведки в формализованном виде может быть представлена следующим образом:

$$E = f(i, D_{\text{доп } i}, V_{\text{теч}}, R_{i,i+1}, Q_{\text{огр}}, D_{\text{м.т}}) \rightarrow \max.$$

Показатель эффективности характеризует успешность сейсморазведки. Успешность сейсморазведки определяется погрешностью определения положения обнаруженного месторождения залежей углеводородов. Погрешность определения местоположения залежей углеводородов зависит, в свою очередь, от равномерности распределения азимутов в ходе проведения приема отраженных сигналов. Поэтому в данной работе в качестве показателя эффективности ведения сейсморазведки, по аналогии с работами [9, 10], принято среднеквадратическое отклонение (СКО) азимутов направлений прихода отраженных сигналов.

Для определения параметров эффективного удержания АНПА на маршрутной траектории было использовано математическое моделирование.

Описание математической модели

Для выбора параметра метода разработаны две математические модели: одна, так называемая макромодель, предназначена для оценки эф-

фективности ведения сейсморазведки. Модель основана на математической модели [10], в которой воспроизводились процессы перемещения излучателя, периодически посылающего импульсные сигналы в толщу морского дна, и группы АНПА. Излучатель и АНПА при моделировании представлены в виде материальных точек, движение которых определяется курсом, скоростью, дифферентом, а положение характеризуется глубиной и координатами.

Макромодель использована для численных экспериментов, направленных на определение отклонения и восстановления положения АНПА на траектории.

Математическая модель в полном объеме воспроизводит поведение излучателя и группы АНПА при ведении сейсморазведки в районе заданной площади.

В математической модели в каждом такте имитации осуществляется:

- воспроизведение движения излучателя;
- воспроизведение движения каждого АНПА группы;
- решение навигационной задачи каждым АНПА;
- постоянная оценка дистанций между АНПА группы;
- обмен информацией между АНПА;
- излучение излучателем зондирующего импульсного сигнала;
- прием геофонами отраженного от месторождений углеводородов сигнала.

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.

В результате математическая модель и ее программная реализация позволяют оценить эффективность ведения сейсморазведки при различных отклонениях положения АНПА в момент прибытия в маршрутную точку.

Это в свою очередь дает возможность сформулировать определенные требования к параметрам метода удержания АНПА на заданной траектории, которые обеспечивали бы прибытие АНПА в маршрутную точку с погрешностями не выше тех, которые определены в макромодели.

Поэтому для оптимизации параметров метода удержания АНПА на траектории специально была разработана вторая математическая модель. Она рассматривает перемещение отдельно взятого АНПА, моделирует отклонение АНПА с маршрутной траектории, вызванное течением, которое характеризуется направлением и скоростью. В модели реализован алгоритм возвращения АНПА на маршрутную траекторию в случае

отклонения от нее на дистанцию, превышающую допустимую.

Дополнительно разработанная математическая модель позволяет провести:

- оценку отклонения каждым АНПА своего положения от заданного на маршрутной траектории;

- анализ превышения отклонения положения АНПА от маршрутной траектории, по результатам которого определяется необходимость восстановления положения АНПА на маршрутной траектории;

- корректировку собственного положения каждым аппаратом в случае отклонения от заданной траектории с использованием предложенного в настоящей работе метода.

Благодаря модели оценивалась погрешность отклонения положения АНПА от маршрутной точки в момент его прибытия в ближайшую маршрутную точку.

Результатом использования этой математической модели является получение погрешности прибытия АНПА в окрестность маршрутной точки при различных параметрах метода удержания аппарата на траектории.

С использованием описанных двух математических моделей и их программных реализаций проведены исследования по выбору параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории.

Результаты исследований по оптимизации параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории

Исследования по оптимизации параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории проводились в два этапа.

На первом этапе определялись допустимые отклонения положения АНПА в момент прибытия

в маршрутную точку, при которых ведение сейсморазведки являлось эффективным.

На втором этапе полученные допустимые отклонения использовались для определения оптимального значения допустимой дистанции. При этом учитывались следующие параметры:

- ограничения на угловую скорость поворота АНПА при маневрировании;

- расстояние между маршрутными точками.

Рассматривались различные варианты течения, вызывающего отклонение АНПА от маршрутной траектории.

Результаты моделирования при различных параметрах тактической ситуации позволили оптимизировать параметры метода удержания положения АНПА на маршрутной траектории, обеспечивающего минимальную погрешность отклонения положения аппарата от маршрутной точки.

По полученным результатам определялись варианты сочетания параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории.

В ходе проведения численного эксперимента в качестве исходных данных приняты:

- размер района ведения сейсморазведки 1000×1000 м;

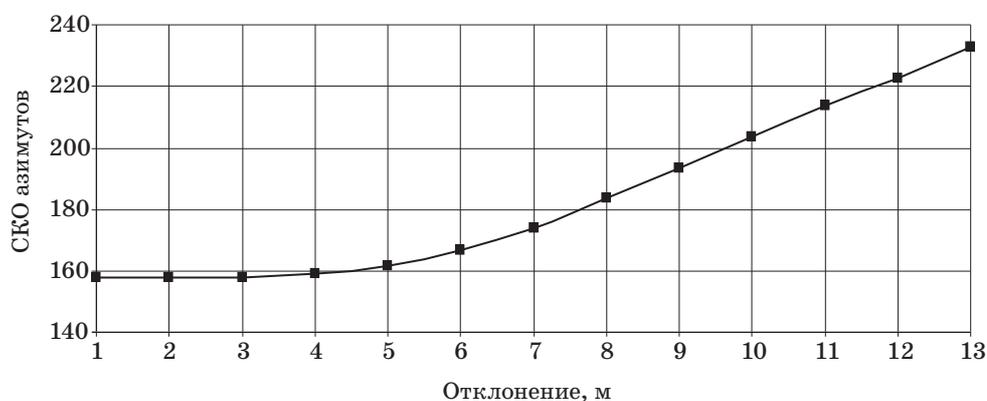
- скорость движения АНПА 1 уз;

- количество аппаратов в группе 49: 7×7 ед.

Рассматривались варианты оценки эффективности сейсморазведки при различном отклонении АНПА от маршрутной траектории в момент его прибытия в маршрутную точку.

Размер отклонения варьировался в диапазоне от 1 до 13 м, направление отклонения разыгрывалось равновероятно относительно маршрутной точки. Результаты исследований в виде зависимости СКО азимутов от погрешности прибытия АНПА в маршрутную точку представлены на рис. 4.

Зависимость носит монотонный характер, и с увеличением погрешности прибытия АНПА в маршрутную точку происходит увеличение СКО



■ Рис. 4. Зависимость СКО азимутов от погрешности прибытия АНПА в маршрутную точку

■ Fig. 4. Dependence of standard deviation azimuths on the arrival error of the AUV on the waypoint

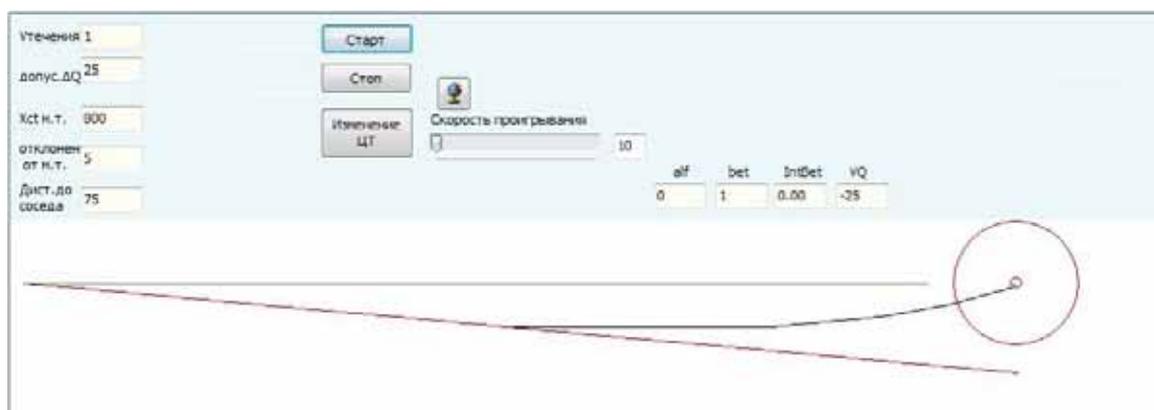
азимутов от 160 до 235. Представленный график позволяет определить допустимые значения погрешности прибытия АНПА в окрестность маршрутной точки. Так, при принятии решения о том, что СКО азимутов в пределах до 180 позволяет считать ведение сейсмозазведки эффективным, означает, что допустимое отклонение АНПА от маршрутной точки не должно превышать 7,7 м.

После того как с использованием макромодели были получены ограничения по допустимому отклонению АНПА от маршрутной точки, на следующем этапе исследований они были использованы для выбора параметров корректировки положения АНПА.

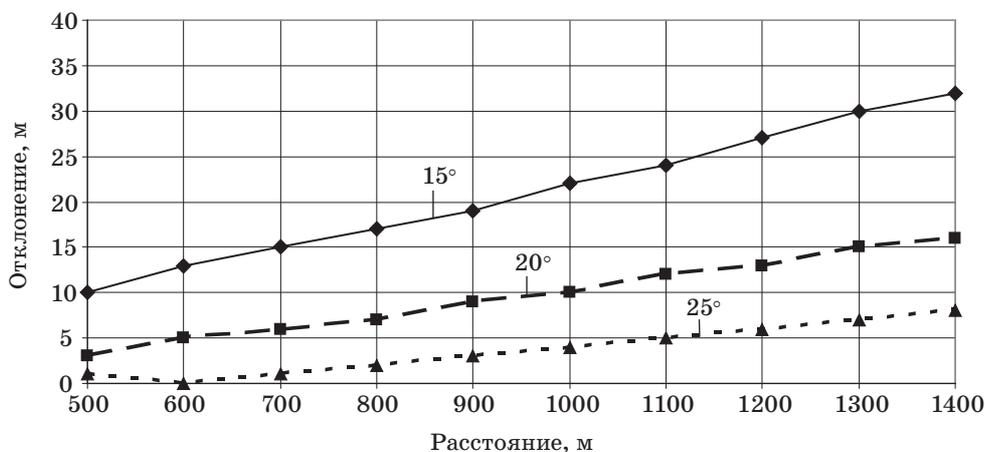
На экране программы, с использованием которой происходило исследование (рис. 5), линия зеленого цвета отражает маршрутную траекторию, линия красного цвета — траекторию АНПА в отсутствие корректировки, линия синего цвета —

траекторию АНПА с учетом корректировки курса в момент выявления отклонения. Положение маршрутной точки показано кружком малого радиуса, окрестность маршрутной точки ограничена кругом большого радиуса.

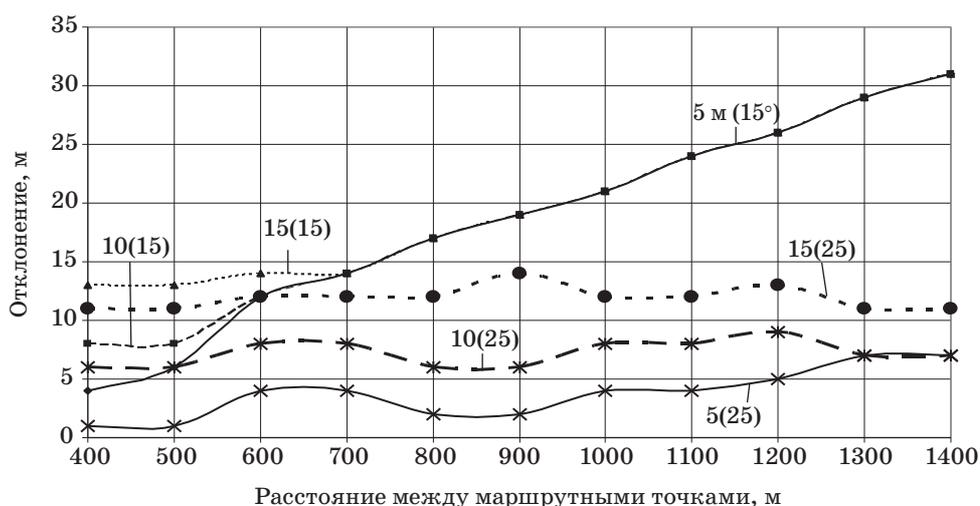
При проведении исследований принималось, что допустимая дистанция — фиксированная (составляла 25 м), и целью эксперимента было определение влияния расстояния между маршрутными точками на погрешность местоположения АНПА при различных ограничениях на маневрирование по курсу. Рассматривались варианты расположения маршрутных точек в диапазоне от 500 до 1400 м с шагом 100 м. Ограничения на маневр по курсу рассматривались в трех вариантах: 15, 20 и 25° за время, допустимое для возвращения на траекторию. Значение допустимой дистанции принималось равным 25 м. Результаты исследований представлены на рис. 6.



■ Рис. 5. Окна программы для определения оптимальных параметров метода
 ■ Fig. 5. Windows program to determine the optimal parameters of the method



■ Рис. 6. Зависимость отклонения положения АНПА от расстояния между маршрутными точками при различных ограничениях на маневр АНПА
 ■ Fig. 6. Dependence of the deviation of the position of the AUV on the distance between the waypoints under various restrictions on the maneuver of the AUV



■ **Рис. 7.** Зависимость отклонения положения АНПА от допустимой дистанции, расстояния между маршрутными точками и различными ограничениями на маневр по курсу

■ **Fig. 7.** Dependence of the deviation of the position of the AUV from the permissible distance, the distance between the waypoints and various restrictions on maneuvering at the rate

Из рисунка видно, что дистанция между маршрутными точками и ограничения на изменение курса оказывают влияние на отклонение положения АНПА от маршрутной точки. Так, при изменении дистанции между маршрутными точками от 400 до 1400 м погрешность увеличилась от 3 до 7 м при ограничении на изменение курса, равное 15° , от 5 до 17 м — при ограничении на изменение курса 20° и от 10 до 34 м — при ограничении на изменение курса 25° .

На следующем этапе исследований с использованием этой же математической модели оценивалось влияние допустимой дистанции на погрешность попадания АНПА в окрестность маршрутной точки. Рассматривались ограничения на курс 15° и 25° . Допустимая дистанция при проведении исследований принималась 15, 20 и 25 м.

При проведении исследований рассматривались следующие варианты:

— ограничения на изменение курса 15° и 25° ;

— допустимая дистанция, на которой АНПА принимает решение относительно корректировки курса для восстановления своего положения на маршрутной траектории, 5, 10, 15 м;

— расстояние между маршрутными точками в диапазоне от 400 до 1400 м с шагом 100 м.

Результаты исследований (рис. 7) позволяют определить оптимальные значения допустимой дистанции в зависимости от погрешности положения АНПА в окрестности маршрутной точки. Так, например, в том случае, если по результатам первого этапа выявлено, что допустимым значением погрешности является дистанция 8 м, то это значение обеспечивают только варианты:

— при ограничении на скорость изменения курса 15° допустимые дистанции 5 и 10 м при расстоянии до маршрутной точки 400–500 м;

— при ограничении 25° допустимые дистанции 5 и 10 м для всех дистанций между маршрутными точками в диапазоне 400 ÷ 1400 м.

В том случае, если по результатам моделирования с использованием макромоделей принято значение погрешности 12 м, что соответствует СКО = 220, то допустимыми можно считать варианты:

— при ограничении на изменение курса 15° , в дополнение к указанным ранее, и варианты расстояния между маршрутными точками 600 м;

— при ограничении на изменение курса 25° — практически все рассмотренные дистанции между маршрутными точками, т. е. от 400 до 1400 м, и при допустимых отклонениях от маршрутной траектории 5, 10 и 15 м.

Таким образом, полученные результаты моделирования позволяют определить допустимые дистанции отклонения АНПА от маршрутной траектории, на которых принимается решение относительно корректировки положения АНПА, обеспечивающее эффективное ведение сейсморазведки.

Заключение

Разработанный метод удержания АНПА на маршрутной траектории в случае отклонения его на дистанцию, превышающую допустимую, позволяет прибыть АНПА в маршрутную точку с погрешностью не выше заданной — с учетом

ограничений, налагаемых на маневрирование АНПА по курсу.

Разработанные математические модели: оценки эффективности сейсморазведки и оценки отклонения АНПА от маршрутной точки с реализацией предложенного метода удержания АНПА на маршрутной траектории — были использованы для определения оптимальных параметров метода, обеспечивающих эффективное ведение сейсморазведки.

Результаты моделирования позволили определить значения параметров метода удержания АНПА на маршрутной траектории с учетом рас-

стояния между маршрутными точками, ограничений на скорость поворота АНПА, допустимой дистанции отклонения АНПА от маршрутной траектории, обеспечивающих эффективное ведение поиска.

Результаты исследований позволяют учитывать особенности влияния внешних факторов на движение АНПА и его маневренные характеристики при подготовке маршрутных заданий каждому АНПА.

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

Литература

1. **Фасхутдинов Р. В.** Подводные камни морской сейсморазведки // *www.Korabel.ru*. 2016. Вып. 2(32). С. 98–106.
2. **Лаверов Н. П., Дмитриевский А. Н., Боговяленский В. И.** Фундаментальные аспекты освоения нефтегазовых ресурсов арктического шельфа России// *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 1. С. 25–37.
3. **Лаверов Н. П., Лобковский Л. И., Тулупов А. В., Воронов М. А., Ганжа О. Ю.** Перспективы донной сейсморазведки в Российской Федерации // *Арктика: экология и экономика*. 2011. № 4. С. 4–13.
4. **Крылов А. А.** Некоторые аспекты донных сейсмологических исследований и мониторинга на объектах нефтегазовой добычи и транспортировки на шельфе// *Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе*. 2015. № 9. С. 20–25.
5. Пат. 2381530 РФ. Морская автономная донная станция для выполнения геофизических и геологоразведочных работ/ А. И. Машошин, С. В. Жуменов, В. Б. Зиннатов, С. Ю. Ермаков, А. С. Смирнов (РФ). — № 2008124873/28; заявл. 10.06.2008; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 4. — 8 с.
6. Пат. 2438149 РФ. Автономная донная станция для сейсмических наблюдений/ И. А. Ильин, П. Г. Бродский, В. С. Аносов, Д. Г. Левченко, Е. Р. Павлюкова, В. П. Леньков, В. В. Чернявец, А. А. Зайцев, А. Л. Гвоздецкий (РФ). — № 2010103093/28; заявл. 29.01.2010; опубл. 27.12.2011, Бюл. № 36. — 14 с.
7. Пат. 2435180 РФ. Подводная геофизическая станция/ С. Я. Суконкин, С. В. Белов, А. В. Кошурников, П. Ю. Пушкарев, Н. П. Рыбаков, С. Ю. Чернявец, В. В. Червинчук (РФ). — № 2010113601/28, заявл. 07.04.2010; опубл. 27.11.2011, Бюл. № 33. — 13 с.
8. **Максимов С. В.** О применении автономных необитаемых подводных аппаратов в технологии тотальной донной сейсморазведки// *Технические проблемы освоения Мирового океана: тр. 4-й Всерос. науч.-техн. конф., Владивосток, 2011. Секция 2. 2011. С. 220–224.*
9. **Мартынова Л. А.** Метод согласованного поведения излучателя и автономных необитаемых подводных аппаратов для эффективного ведения сейсморазведки // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 1. С. 83–92. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
10. **Мартынова Л. А.** Инструментарий для исследований эффективности ведения сейсморазведки с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 2. С. 77–87. doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.2.77
11. **Мартынова Л. А., Машошин А. И.** Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // *Изв. ЮФУ. Технические науки*. 2016. № 2. С. 38–48.
12. **Степанов О. А., Торопов А. Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1: Обзор алгоритмов // *Гироскопия и навигация*. 2015. Т. 6. № 3. С. 102–125. doi:10.17285/0869-7035.2015.23.3.102-125
13. **Степанов О. А., Торопов А. Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2: Современные тенденции развития // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 4. С. 147–159. doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.147-159
14. **Шпаков В. М.** О ситуационно-событийном подходе к управлению взаимодействующими дискретно-непрерывными процессами // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 2. С. 26–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.26
15. **Бритов Г. С.** Терминальное диагностирование дискретных динамических систем // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 4. С. 18–24. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
16. **Фуртат И. Б.** Алгоритм компенсации помех измерения и возмущений // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 5. С. 21–29. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.21

17. Малышкин Г. С. Сравнительная эффективность классических и быстрых проекционных алгоритмов при разрешении слабых гидроакустических сигналов // Акустический журнал. 2017. Т. 63. № 2. С. 196–208.
18. Edwards D. B. A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations// Proc. of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. 2004. 10 p.
19. Edwards D. B. Decentralized Control of Multiple Autonomous Underwater. https://www.researchgate.net/publication/235092321_Decentralized_Control_of_Multiple_Autonomous_Underwater_Vehicles (дата обращения: 15.11.2017).
20. Лямина Е. А. Алгоритмы управления движением группы АНПА по поисковым траекториям. <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637281.html> (дата обращения: 15.11.2017).
21. Rastgoftar H. Continuum Deformation of Multi-Agent Systems. — Springer International Publishing, 2016. — 217 p.

UDC 519.87

doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34

Effective Retention of AUV Position on Route Trajectory during Seismic SurveyMartynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru^aConcern CSRI Elektropribor, JSC State Research Center of Russia, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: during subglacial seismic survey, autonomous underwater vehicles can deviate from the route trajectory due to currents and other random non-stationary factors. To maintain an effective survey, it is necessary to permanently keep the device on the route trajectory. **Purpose:** Developing a method for effective retention of an AUV on a route trajectory. **Method:** An AUV which has deviated from the route trajectory is sent back to it by a method of aiming at the target, which uses the sight line deflecting angle. **Results:** Mathematical dependencies of the deviation from the route trajectory were obtained. A method of restoring the device on the route trajectory was developed and modified in order to take into account the limitations on the maneuvering characteristics of the device. A mathematical model was built, and parameterization of the proposed method was conducted on the basis of seismic survey efficiency evaluation. The simulation results made it possible to determine the parameters of the method used to hold an AUV on the route trajectory, taking into account the distance between the waypoints, the restrictions on the device rotation speed and the permissible deviation from the route trajectory. **Practical relevance:** The developed method allows you to efficiently restore the position of an AUV on the route trajectory, taking into account the limitations and peculiarities of conducting a seismic survey in a given area.

Keywords — Autonomous Underwater Vehicle, Route Trajectory, Water Currents, Efficiency Evaluation.

Citation: Martynova L. A. Effective Retention of AUV Position on Route Trajectory during Seismic Survey. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 34–44 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.34

References

- Faskhutdinov R. V. Reefs of Naval Seismic Exploration. *www.Korabel.ru*, 2016, iss. 2(32), pp. 98–106 (In Russian).
- Laverov N. P., Dmitriyevsky A. N., Bogoyavlensky V. I. Fundamental Aspects of Development of Oil and Gas Resources of the Arctic Shelf of Russia. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2011, no. 1, pp. 25–37 (In Russian).
- Laverov N. P., Lobkovsky L. I., Tulupov A. V., Ravens M. A., Ganzha O. Y. The Prospects of Ground Seismic Exploration in the Russian Federation. *Arktika: ekologiya i ekonomika* [Arctic: Ecology and Economy], 2011, no. 4, pp. 4–13 (In Russian).
- Krylov A. A. Some Aspects of Ground Seismological Researches and Monitoring on Objects of Oil and Gas Production and Transportation on the Shelf. *Zashchita okruzhaiushchei sredy v neftegazovom komplekse* [Environment Protection in an Oil and Gas Complex], 2015, no. 9, pp. 20–25 (In Russian).
- Mashoshin A. I., Zhumenkov S. V., Zinnatov V. B., Ermakov S. Y., Smirnov A. S. *Morskaya avtonomnaya donnaia stantsiya dlia vypolneniia geofizicheskikh i geologorazvedochnykh rabot* [The Sea Autonomous Ground Station for Accomplishment of Geophysical and Exploration Works]. Patent RU, no. 2381530, 2008.
- Il'in I. A., Brodskij P. G., Anosov V. S., Levchenko D. G., Pavljukova E. R., Len'kov V. P., Chernjavets V. V., Zajtsev A. A., Gvozdet'skij A. L. *Avtonomnaya donnaia stantsiya dlia seismicheskikh nabludeniij* [Independent Bottom Station for Seismic Observations]. Patent RU, no. 2438149, 2010.
- Sukonkin S. J., Rybakov N. P., Belov S. V., Chervinchuk S. J., Koshurnikov A. V., Pushkarev P. J., Chernjavets V. V. *Podvodnaya geofizicheskaya stantsiya* [Underwater Geophysical Station]. Patent RU, no. 2435180, 2010.
- Maximov S. V. About use of Autonomous Uninhabited Submersibles in Technology of Total Ground Seismic Exploration. *Trudy 4-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheckoi konferentsii "Tekhnicheskie problemy osvoeniia Mirovogo okeana"* [Proc. of the 4th All-Russian Scientific and Technical Conf. "Engineering Problems of Development of the World Ocean"], Vladivostok, 2011, Section 2, pp. 220–224 (In Russian).
- Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
- Martynova L. A. Tools for Studying the Efficiency of Seismic Exploration with Standalone Unmanned Submersibles. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 2, pp. 77–87 (In Russian). doi: 10.15217/issn1684-8853.2017.2.77
- Martynova L. A., Mashoshin A. I. Formation of AUV Control System based on Multi-Agent Technology. *Izvestiia IuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, no. 2, pp. 38–48 (In Russian).
- Stepanov O. A., Toropov A. B. Nonlinear Filtering for Map-Aided Navigation. Part 1. An Overview of Algorithms. *Girokopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and Navigation], 2015, vol. 6, no. 3, pp. 324–337 (In Russian).
- Stepanov O. A., Toropov A. B. Nonlinear Filtering for Map-Aided Navigation. Part 2. Current Trends of Develop-

- ment. *Giroskopiia i navigatsiia* [Gyroscopy and Navigation], 2015, vol. 6, no. 4, pp. 147–159 (In Russian).
14. Shpakov V. M. About Situation-Event Approach to Control of Interacting Discrete-Continuous Processes. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 2, pp. 26–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.26
 15. Britov G. S. Terminal Diagnostics of Discrete Dynamic Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 18–24 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.18
 16. Furtat I. B. Algorithm for Compensation of Measurement Noises and Disturbances. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 5, pp. 21–29 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.21
 17. Malyskhin G. S. The Comparative Efficiency of Classical and Fast Projection Algorithms in the Resolution of Weak Hydroacoustic Signals. *Akusticheskii zhurnal* [Acoustical Physics], 2017, vol. 63, no. 2, pp. 216–228 (In Russian).
 18. Edwards D. B. A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations. *Proc. of IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles*, 2004, 10 p.
 19. Edwards D. B. *Decentralized Control of Multiple Autonomous Underwater*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235092321_Decentralized_Control_of_Multiple_Autonomous_Underwater_Vehicles (accessed 15 November 2017).
 20. Lyamina E. A. *Algoritmy upravleniia dvizheniem gruppy ANPA po poiskovym traektoriiam* [Algorithms of Motion Control of the AUV Group on Search Trajectories]. Available at: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/637281.html> (accessed 15 November 2017).
 21. Rastgoftar H. *Continuum Deformation of Multi-Agent Systems*. Springer International Publishing, 2016. 217 p.

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio (*.vsd, *.vsdx); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.docx); Adobe Illustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подрисовочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИБД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»
Тел.: (812) 494-70-02
Эл. почта: i-us.spb@gmail.com
Сайт: www.i-us.ru