

УДК 551.46.077 + 629.584  
ББК 32.965.7

## **НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОРСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ МОРСКИХ РОБОТОВ**

**Туфанов И. Е.<sup>1</sup>**

*(Дальневосточный федеральный университет,  
Владивосток)*

**Щербатюк А. Ф.<sup>2</sup>**

*(Институт проблем морских технологий  
Дальневосточного отделения РАН, Владивосток)*

*В статье рассмотрена задача измерения заданных параметров водной среды в указанной акватории на основе использования группы морских роботов. В работе использован централизованный метод планирования работы группы. Рассмотрен вопрос о перепланировании действий в процессе выполнения задания при изменении состава группы. Приведены некоторые результаты морских испытаний, которые были выполнены с применением робототехнического комплекса МАРК, включающего автономные необитаемые водный и подводный аппараты.*

Ключевые слова: автономные необитаемые подводный и водный аппараты, групповое управление, планирование.

### **1. Введение**

Различные аспекты управления группами роботов в настоящее время являются предметом изучения во многих

---

<sup>1</sup> Игорь Евгеньевич Туфанов, к.т.н. (itufanov@gmail.com).

<sup>2</sup> Александр Фёдорович Щербатюк, чл.-корр. РАН, д.т.н., зав. лаб. (scherba@marine.febras.ru).

научных организациях. Один из вариантов систематизации подходов к этой проблеме представлен в [1].

Большое внимание в научной литературе уделяется разработке методов и алгоритмов, позволяющих морским роботам работать в группе для решения общей задачи (в настоящей работе под морскими роботами понимаются автономные необитаемые подводные аппараты /АНПА/ и автономные необитаемые водные аппараты /АНВА/). К таким задачам относится покрытие акватории для съёмки некоторых параметров среды или для поиска некоторого объекта под водой, оконтуривание областей с аномальным значением некоторого параметра и др.

В университете Порто разработан подход к управлению группой роботов с использованием связки программных систем DUNE/NEPTUS [2]. Каждый аппарат выступает в качестве исполнителя некоторого задания. Распределение заданий осуществляет оператор. АНВА, работающий на базе указанной системы, описан в докладе [3].

Существуют примеры реализации автоматического планирования с использованием планировщика T-REX [4], который использует процедуру логического вывода для построения плана.

В статье [5] представлен подход к автоматическому централизованному планированию работы группы АНПА на основе «вариантной» модели и рассмотрены алгоритмы, позволяющие получить точное и приближённое решения задачи планирования. Подход применён к задаче поиска и оконтуривания локальных неоднородностей. Далее, была разработана архитектура программной системы [6], использующей указанную модель. В настоящей работе изложены и проанализированы результаты морских испытаний предложенной системы управления. Во втором разделе статьи приводятся краткие сведения о модели представления задачи в системе управления. Третий раздел

посвящён изложению проведённых морских экспериментов и анализу их результатов.

## **2. Представление задачи в системе группового управления морскими роботами**

«Вариантная» модель служит для представления задачи, которая может быть решена группой аппаратов. Задача состоит в выполнении набора из  $n$  заданий с использованием  $m$  аппаратов. Задание с номером  $i$  может иметь  $v_i$  вариантов выполнения. Вариант  $j$  задания  $i$  характеризуется точкой старта, точкой финиша и временем выполнения.

Планом для аппарата  $q$  будем называть кортеж из пар  $p_q = (i_1, j_1), (i_2, j_2), \dots, (i_{|p|}, j_{|p|})$ . Общим планом будем называть кортеж планов для аппаратов:  $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$ . Время выполнения плана для аппарата  $q$  будем обозначать  $T_q(p_q)$ . Оно зависит от:

- выбранных заданий;
- вариантов выбранных заданий;
- порядка обхода выбранных заданий;
- стартовой позиции аппарата.

Кроме того, время выполнения плана зависит от скорости аппарата в процессе выполнения заданий и при переходе между заданиями. В данной работе мы полагаем, что скорость движения аппарата постоянна.

Задачу можно считать решённой, если выполнены все задания. Положим, что в качестве времени выполнения общего плана взят максимум из времени работы каждого аппарата:  $T(P) = \max_{q=1..m} (T(p_q))$ . Планирование состоит

в поиске такого  $P$ , которое включает все задания и при этом минимизирует  $T(P)$ . Алгоритмы планирования построены на основе алгоритмов, решающих точно и при-

ближённо задачу коммивояжёра. Подробнее данная модель и соответствующие алгоритмы рассмотрены в [5].

Централизованная система управления группой морских роботов была реализована в рамках комплекса МАРК, который включает АНПА [7] и АНВА [8]. В качестве центрального узла выступает компьютер поста оператора. Он решает задачу планирования и отправляет каждому аппарату описание его плана. При выполнении очередного задания аппарат отправляет соответствующее сообщение на пост оператора. Каждый аппарат периодически отправляет также сообщение о своём текущем состоянии (местоположение, наличие/отсутствие текущего задания, наличие/отсутствие команды телеуправления). В случае изменения состава группы планировщик осуществляет перепланирование.

### **3. Описание морских экспериментов**

Морские испытания групповой системы управления были проведены в бухте Новик острова Русский Японского моря в сентябре - октябре 2014 г. Рассматривалась задача покрытия заданного района набором из 7 параллельных галсов.

В экспериментах принимали участие АНПА и АНВА (рис. 1). Таким образом, в задаче планирования  $n = 7$ ,  $m = 2$ . Использовался модифицированный алгоритм Хельда-Карпа для получения точного решения задачи планирования [5]. Каждое задание имело два варианта, поскольку галс может быть пройден в прямом или противоположном направлении. Целевая скорость движения АНПА и АНВА вдоль галсов и между ними не превышала 1 м/с. АНПА использовался в режиме перемещения по поверхности воды. Связь с обоими аппаратами осуществлялась с помощью радио модема. Пост оператора располагался на берегу.

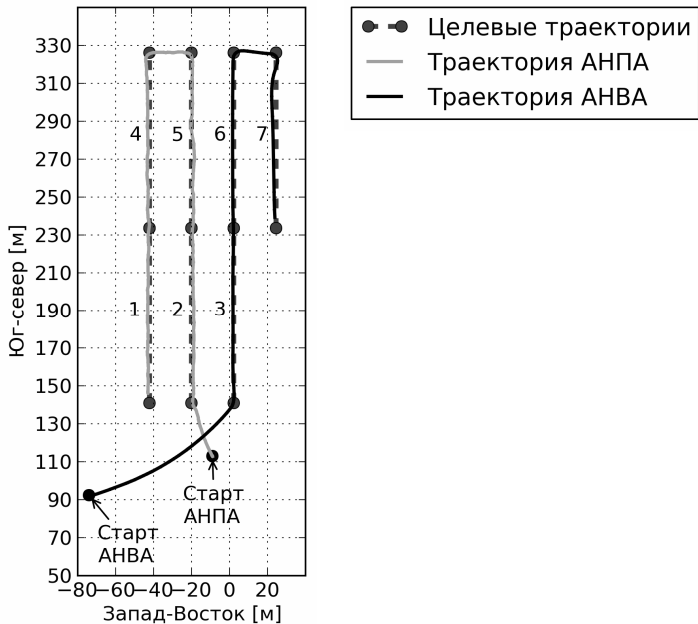


Рис.1. АНПА и АНВА МАРК во время выполнения очередного эксперимента.

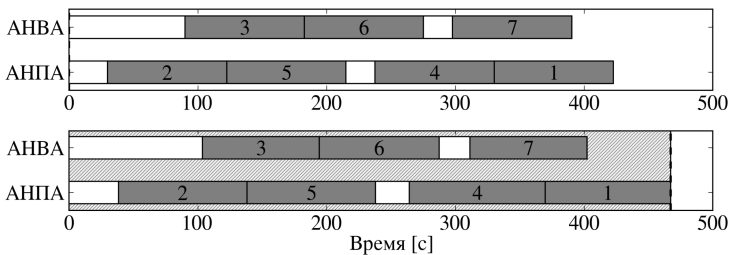
Испытания включали несколько серий запусков. Различные серии запусков были предназначены для отработки ситуаций с постоянным и переменным составом группы. Удаление или присоединение АНПА в состав группы осуществлялось посредством передачи ему соответствующей команды телеуправления. После получения команды аппарат передавал посту оператора информацию о том, что он вышел или вошел в состав группы и планировщик осуществлял перепланирование.

**Эксперименты с постоянным составом группы аппаратов.** В данном случае состав группы в процессе выполнения миссии не изменяется. Траектории аппаратов в одном из запусков (запуск №1) из данной серии экспериментов представлены на планшете на рис. 2. Начало координат совпадает с положением поста оператора.

На диаграмме на рис. 2 представлен исходный план (для каждого задания отмечено прогнозируемое время начала и окончания его выполнения), на нижней – результат выполнения плана. Время каждого события соответ-



а)



б)

Рис. 2. Траектории (а) и планы (б) аппаратов в запуске с постоянным составом группы.

вует моменту времени, когда на пост оператора приходило сообщение о начале или окончании выполнения соответствующего задания.

Полученный план предполагает пересечение траекторий - проанализируем ситуацию:

$$p^{(1)}_{\text{АНПА}} = ((2; \uparrow); (5; \uparrow); (4; \downarrow); (1; \downarrow));$$

$$p^{(1)}_{\text{АНВА}} = ((3; \uparrow); (6; \uparrow); (7; \downarrow));$$

$$P_1 = (p^{(1)}_{\text{АНПА}}, p^{(1)}_{\text{АНВА}}).$$

Время выполнения плана каждого аппарата в отдельности (учитываем, что целевая скорость равна 1 м/с) составляет:

$$t(p^{(1)}_{\text{АНПА}}) = 30.02 + 4(92.57) + 22.27 = 422.57 \text{ с};$$

$$t(p^{(1)}_{\text{АНВА}}) = 89.47 + 3(92.57) + 22.27 = 389.45 \text{ с}.$$

Для стоимости общего плана окончательно имеем:

$$T(P_1) = \max(t(p^{(1)}_{\text{АНПА}}), t(p^{(1)}_{\text{АНВА}})) = 422.57 \text{ с}.$$

Для сравнения рассмотрим другой план с непересекающимися траекториями, который на первый взгляд может показаться лучше:

$$p^{(2)}_{\text{АНПА}} = ((3; \uparrow); (6; \uparrow); (7; \downarrow));$$

$$p^{(2)}_{\text{АНВА}} = ((1; \uparrow); (4; \uparrow); (5; \downarrow); (2; \downarrow));$$

$$P_2 = (p^{(2)}_{\text{АНПА}}, p^{(2)}_{\text{АНВА}}).$$

Для стоимости общего плана  $T(P_2)$  в данном случае имеем:

$$t(p^{(2)}_{\text{АНПА}}) = 30.16 + 3(92.57) + 22.27 = 330.14 \text{ с};$$

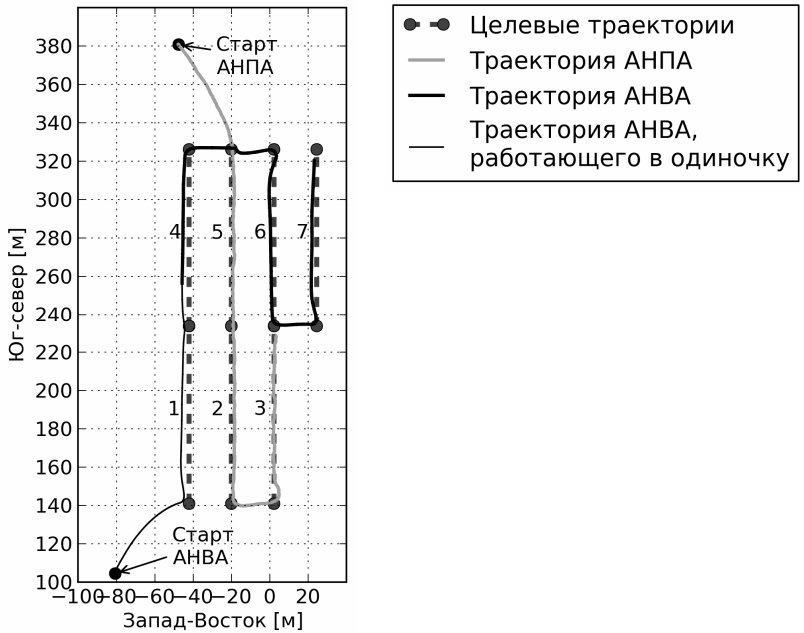
$$t(p^{(2)}_{\text{АНВА}}) = 57.37 + 4(92.57) + 22.27 = 449.92 \text{ с};$$

$$T(P_2) = \max(t(p^{(2)}_{\text{АНПА}}), t(p^{(2)}_{\text{АНВА}})) = 449.92 \text{ с}.$$

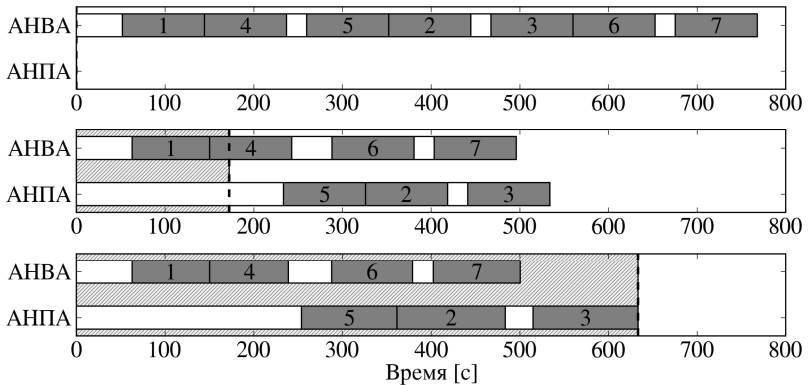
Таким образом, план, найденный автоматически, действительно имеет меньшее время выполнения,  $T^{(1)} < T^{(2)}$ . При этом разница во времени выполнения планов составляет около 27.35 с.

**Эксперименты с добавлением аппарата в состав группы.** В данном случае перед началом выполнения миссии АНПА был выведен из состава группы (посредством подачи команды телеуправления). После этого был запущен планировщик, который построил план, исходя из того, что АНВА должен выполнять все задания 1–7. Фактические траектории аппаратов в одном из запусков (запуск №2) из данной серии экспериментов представлены на планшете на рис. 3.

Когда АНВА выполнил задание 1 и начал выполнение задания 4 (красный участок траектории на рис. 3),



а)



б)

Рис. 3. Траектории (а) и планы (б) аппаратов в запуске с добавлением аппарата в состав группы.

командой телеуправления АНПА был введен в состав



группы. Это привело к перепланированию, и задания 2, 3, 5 были переназначены АНПА, в то время как задания 6 и 7 остались за АНВА, но используемые варианты изменились.

На рис. 3 также представлены три диаграммы. Первая иллюстрирует исходный план, который был построен лишь для АНВА. Вторая диаграмма построена на момент перепланирования. Слева от вертикальной черты (в заштрихованной области) отмечены произошедшие события, справа – ожидаемые. Третья диаграмма отражает фактическое выполнение миссии.

**Эксперименты с удалением аппарата из состава группы.** На планшете на рис. 4 приведены траектории аппаратов в одном из запусков (запуск №3) из серии экспериментов с удалением аппарата из состава группы. Когда АНПА выполнял задание 5, ему была подана команда телеуправления на выход из состава группы. После выхода АНПА из группы планировщик назначил все оставшиеся задания АНВА. Поскольку в модели не предусмотрено деление заданий на части, задание 5 на момент перепланирования считается невыполненным и его выполнение назначается АНВА.

В запуске №3, при начальных позициях аппаратов близких к позициям в запуске №1, первоначальные планы отличаются. Исходя из траекторий на рис. 4 можно заключить, что был построен план, имеющий следующий вид:

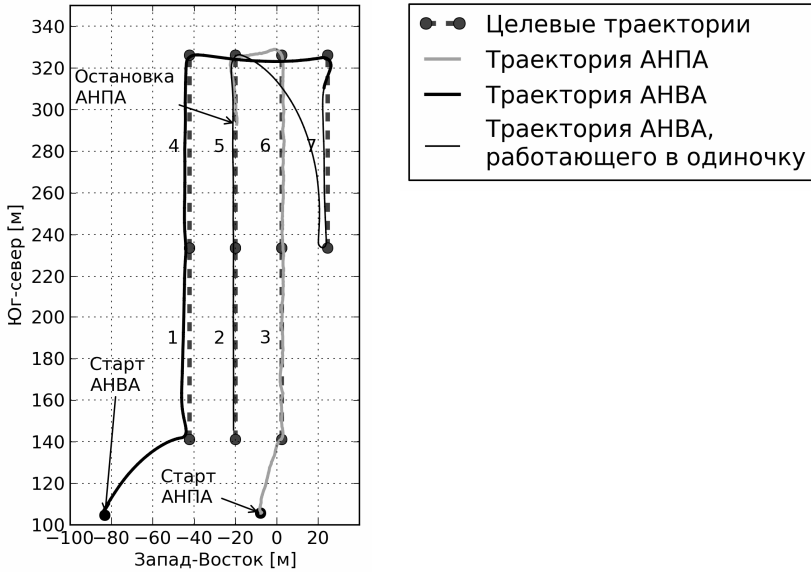
$$p_{\text{АНПА}}^{(3)} = ((3; \uparrow); (6; \uparrow); (5; \downarrow); (2; \downarrow));$$

$$p_{\text{АНВА}}^{(3)} = ((1; \uparrow); (4; \uparrow); (7; \downarrow));$$

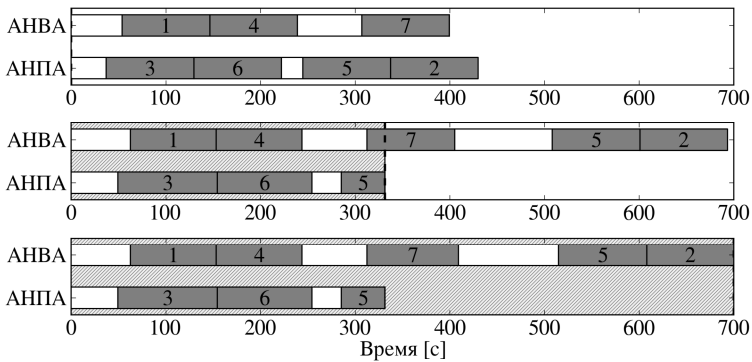
$$P_3 = (p_{\text{АНПА}}^{(3)}, p_{\text{АНВА}}^{(3)}).$$

Вычисления показывают, что при стартовых позициях запуска №3 время выполнения  $P_1$  составляет 429.90 с, в то время как время выполнения  $P_3$  составляет 429.29 с.

Отметим некоторые особенности представленных данных. Из рис. 2 и рис. 3 видно, что во время запусков



а)



б)

Рис. 4. Траектории (а) и планы (б) аппаратов в запуске с удалением аппарата из состава группы.

№1 и №2, АНПА требовалось для перемещения больше времени, чем планировалось. После анализа данных сис-

темы управления АНПА выяснилось, что это связано с настройками регулятора скорости подводного аппарата.

Траектории на рисунках получены по данным бортовых навигационных систем аппаратов. Можно заметить, что траектория АНВА более гладкая. Это связано с тем, что на борту АНВА установлена высокоточная дифференциальная спутниковая навигационная система DGPS RTK, в то время как на АНПА используется обыкновенная GPS.

#### **4. Некоторые выводы**

В процессе морских испытаний была подтверждена работоспособность и эффективность разработанного планировщика для миссий, состоящих из небольшого количества заданий. По результатам экспериментов можно сделать ряд выводов:

1. При работе группы аппаратов в одной и той же области на одной и той же глубине имеется вероятность столкновения аппаратов, что несколько раз случались в процессе испытаний. Данную задачу можно решать как на уровне планирования (строить план, не допускающий столкновений), так и на уровне маневрирования при обходе препятствий. Второй подход представляется более простым в реализации, однако требует наличия на борту АНПА и АНВА эхолотаторов переднего обзора.

2. При работе аппаратов вдали от поста оператора возможны сбои связи. Если с частью аппаратов отсутствует связь, это может приводить к ненужным перепланировкам. Одним из решений в данной ситуации является децентрализация системы управления. Это требует разработки соответствующего коллективного алгоритма планирования и реализации системы связи между аппаратами. Коллективные алгоритмы для групп роботов [1] могут быть построены на основе многократных попарных взаимодействий одиночных роботов. Соответствующий коллективный

алгоритм, исключающий необходимость центрального узла был предложен для вариантной модели в работе [9] и развит в работе [10]. Суть этого итерационного алгоритма заключается в том, что аппараты попарно (в произвольном порядке) обмениваются имеющимися у них заданиями. В каждой паре решается задача поиска оптимального  $P$  лишь для заданий, принадлежащих двум рассматриваемым аппаратам. В группе из двух аппаратов предложенный метод за одну итерацию находит оптимальное решение, и поэтому применим для всех запусков, проиллюстрированных ранее.

## **5. Заключение**

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ N130800967, гранта РФФИ 145000034 (раздел - результаты морских экспериментальных исследований) и гранта Дальневосточного федерального университета. Авторы выражают свою признательность всем сотрудникам ИПМТ ДВО РАН и ДВФУ, принимавшим участие в подготовке и проведении морских испытаний с применением рассмотренного робототехнического комплекса.

## **Литература**

1. КАЛЯЕВ И.А., ГАЙДУК А.Р., КАПУСТЯН С.Г. *Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов – ФИЗМАТЛИТ.* – 2009. – 280 с.
2. DE SOUSA B., GONÇALVES G., *Mixed initiative control of unmanned air and ocean going vehicles: models, tools and experimentation* // Proceedings of the NATO AVT-146 Conference. – Florence, Italy. – 2006.
3. FARIA M., PINTO J., PY F., FORTUNA J., DIAS H., MARTINS R., LEIRA F., JOHANSEN T.A., SOUSA J., RAJAN K. *Coordinating UAVs and AUVs for Oceanographic Field Experiments: Challenges and Lessons Learned* // 2014

- IEEE International Conference on Robotics & Automation (ICRA), May 31 – June 7, 2014, Hong Kong, China.
4. FERREIRA. H., MARTINS R., MARQUES E., PINTO J., MARTINS A., ALMEDA J., SOUSA J., SILVA E.P. – *Swordfish: an autonomous surface vehicle for network centric operations* // Proceedings of the Oceans 2007 Europe MTS/IEEE Conference. – June 18–21, 2007, Aberdeen, Scotland.
  5. ТУФАНОВ И.Е., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Разработка алгоритмов группового поведения АНПА в задаче обследования локальных неоднородностей морской среды* // Управление большими системами. – 2012. – Вып. 36 – С. 262–284.
  6. ТУФАНОВ И.Е. *Разработка системы централизованного управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – №7. – С. 65–70.
  7. ВАУЛИН Ю.В., ДУБРОВИН Ф.С., КУШНЕРИК А.А., ТУФАНОВ И.Е., ЩЕРБАТЮК А.Ф. *Малогобаритный автономный необитаемый аппарат МАРК нового поколения для выполнения групповых операций* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2012. – №6. – С. 59–65.
  8. КУШНЕРИК А.А., МИХАЙЛОВ Д.Н., СЕРГЕЕНКО Н.С., ЩЕРБАТЮК А.Ф., ГОЙ В.А., ТУФАНОВ И.Е., ДУБРОВИН Ф.С. *Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты* // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2014. – №3. – С. 67–72.
  9. САХАРОВ А.М., ТУФАНОВ И.Е. *Разработка методов планирования в группе АНПА на основе вариантной модели* // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2014. – №2(19). – С. 1–12.
  10. TUPHANOV I.E., SAKHAROV A.M. *A decentralized planning algorithm considering tack spatial configuration for a group of AUVs* // Proceedings of the Oceans 2014 MTS/IEEE Conference. – September 14–19, 2014, St. John's, Canada.

## SOME MARINE TRIAL RESULTS OF CENTRALIZED CONTROL SYSTEM FOR MARINE ROBOT GROUP

**Igor Tuphanov**, Far Eastern Federal University, Vladivostok.  
**Alexander Scherbatyuk**, Institute for Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok.

*A problem of underwater environment parameters measurement in the local area by using a group of marine robots is described in the paper. A centralized method for operation planning of robot group is used in the work. A replanning during the operation is considered for the case when the number of group is changed. The results of marine trials using marine robotic complex MARK including AUV and ASV are given.*

Keywords: autonomous underwater and surface vehicles, group control, planning.

**Туфанов Игорь Евгеньевич**

*к.т.н., н.с. лаборатории необитаемых  
подводных аппаратов*

*Дальневосточного федерального университета  
+7(924) 2377998, [ituphanov@gmail.com](mailto:ituphanov@gmail.com)*

**Щербатюк Александр Федорович**

*д.т.н., чл.-корр. РАН, зав. лаб. систем навигации и обработки сенсорной информации Института проблем морских технологий ДВО РАН*

*+7(902)5238156, [alex-scherba@yandex.ru](mailto:alex-scherba@yandex.ru)*

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...  
Поступила в редакцию ...заполняется редактором...  
Опубликована ...заполняется редактором...*