

УДК 629.113

П.О. Береснев, Д.В. Зезюлин, Д.Ю. Тюгин, В.С. Макаров, В.Д. Кузин,  
М.Р. Коленик, В.В. Беляков, А.А. Куркин

## РАЗРАБОТКА ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Поиск и освоение новых месторождений на шельфах существенно затрудняют сложные гидрометеорологические условия, обусловленные частыми штормами и интенсивным морским волнением. Для решения данной проблемы предлагается использовать группы дистанционно управляемых мобильных робототехнических средств. В работе суммированы результаты исследований по разработке и созданию эффективных конструкций шасси для береговых территорий и прилегающих акваторий острова Сахалин. Приведена методика выбора конструктивных параметров транспортных средств и расчета эффективности системы в целом. При расчете проходимости транспортных средств использованы данные о физико-механических характеристиках песчано-гравийных опорных оснований в береговой зоне, которые были получены ранее авторами исследования. Для создания мультиагентной системы мониторинга прибрежной зоны планируется использовать несколько объектов управления наземного базирования, подводного робота для работы в зоне прибоя, которые имеют возможность обмена информацией в режиме реального времени. Приведена схема функционирования мобильных роботов наземного, подводного и надводного базирования в составе группы. Проведены экспериментальные исследования разработанного комплекса.

**Ключевые слова:** мультиагентная система, мобильные роботы, мониторинг прибрежной зоны.

Ускоренное вовлечение в хозяйственный оборот энергетических ресурсов океана все более значимо для развития экономики государства. Это объясняется, прежде всего, постоянно растущими потребностями в топливе, энергии, различных видах минерального сырья. Шельфовая зона играет важную роль в поддержании мировой добычи нефти и газа. За последние десять лет более 2/3 запасов углеводородных ресурсов было открыто именно на шельфе. Особую значимость представляет арктический шельф, общий объем неразведанных нефтегазовых запасов, которого составляет порядка 413 млрд баррелей нефтяного эквивалента (около 22 % совокупных неразведанных запасов традиционных углеводородов в мире). Во всех приарктических государствах приняты правовые акты, закрепляющие стратегическое значение Арктики в первую очередь с точки зрения запасов углеводородных ресурсов.

Для сбора информации о береговой зоне широко применяются радиолокационные станции (РЛС) самолетного и космического базирования. Однако известные аэрокосмические методы не обеспечивают требуемой точности и оперативности поступления важнейшей информации о береговой зоне, а именно волновой динамики. Без этой информации невозможна безопасная эксплуатация береговых сооружений. Главной задачей является мониторинг волновой обстановки в районах эксплуатации нефтегазовых объектов с использованием радиолокационных комплексов наземного базирования для уточнения данных, получаемых от космических средств. Таким образом, на современном этапе развития радиолокационных методов оценки волнового климата важным является непрерывное в любых метеоусловиях наблюдение за волновой активностью в зоне прибоя. Другим способом можно выделить проведение мониторинга прибрежной зоны с помощью летательных аппаратов. Однако данный способ вносит ряд ограничений, таких как грузоподъемность, безопасность и дальность полета.

В связи с этим широкое распространение получили наземные транспортные средства для мониторинга волнового климата в прибрежной зоне, передвигающиеся по дну акватории [1, 2]. Перспективными методами обследования прибрежных зон в настоящее время являются методы дистанционного зондирования. Такие методы базируются на применении датчи-

ков, позволяющих получить информацию о расстоянии до объекта на основе сканирующих устройств радиочастотного [3] или лазерного диапазона волн [4, 5].

### Условия движения

Движение в прибрежной зоне накладывает ряд ограничений, связанных в первую очередь с изменяемой влажностью опорного основания, а также с наличием препятствий на пути следования (булыжники, наносы и т.д.) Анализ условий движения позволил разработать классификацию поверхностей движения в береговых зонах как полотна пути для транспортно-технологических машин.

Доминантными в береговых зонах, на долю которых приходится большая часть опорных поверхностей, можно считать песчано-гравийные и песчаные территории, а также снежное полотно пути в зимнее время года. В 2016-2017 гг. авторам были проведены экспериментальные исследования прибрежной зоны Охотского моря, залив Мордвинова [6].

Наиболее удобной математической моделью для песчано-гравийных опорных оснований является модель, приведенная в работах Я.С. Агейкина, Н.С. Вольской [7]. Расчет нормальных и сдвиговых напряжений производится по зависимостям, приведенным ниже:

$$q_{\beta} = \left[ \frac{(H_{\Gamma} - z)}{b(1 + 1,75 \varphi_0)(k_{\beta_1} \cdot b \cdot \rho \cdot X_1 + k_{\beta_2} \cdot c_0 \cdot X_2 + k_{\beta_3} \cdot \rho \cdot X_3 \cdot z)} \cdot \cos \beta + \frac{a \cdot b}{E \cdot z} \arctg \frac{(H_{\Gamma} - z)}{a \cdot b \cdot \cos \beta} \right]^{-1} \quad (1)$$

$$\tau = \left[ q_{\beta} \cdot \operatorname{tg} \varphi_0 + c_0 \left( 1 - \frac{S_{t_0}}{S_t} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( - \frac{S_{t_0}}{k_r} \right) \right] \quad (2)$$

Зависимости для расчета обобщенных функций сопротивления и сцепления определяются исходя из значений напряжений, возникающих в элементарной площадке с последующим интегрированием по площади контакта.

$$\Phi_f = b M_a^{-1} \int_0^{h_r} p dh, \quad (3)$$

$$\Phi_{\varphi} = b M_a^{-1} \int_A \tau dA. \quad (4)$$

Анализ соотношения обобщенных функций сопротивления и сцепления позволяет оценить возможность движения шасси в условиях береговых зон по песчаным и песчано-гравийным опорным основаниям, а также оценить значения конструктивных параметров, при которых не будет происходить потеря подвижности шасси. В соответствии с этим была разработана методика.

Метод разработки подвижных наземных комплексов мониторинга береговых зон, необходимых для обеспечения экономической, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях. Метод позволяет дать рекомендации к конструкции шасси (выбрать массово-габаритные параметры, размеры движителя), оценить эффективность выбранных алгоритмов управления потоком распределения мощности по движителям, определить области эффективного использования шасси с колесным и гусеничным типом движителями в теплое время года и в зимний период [8].

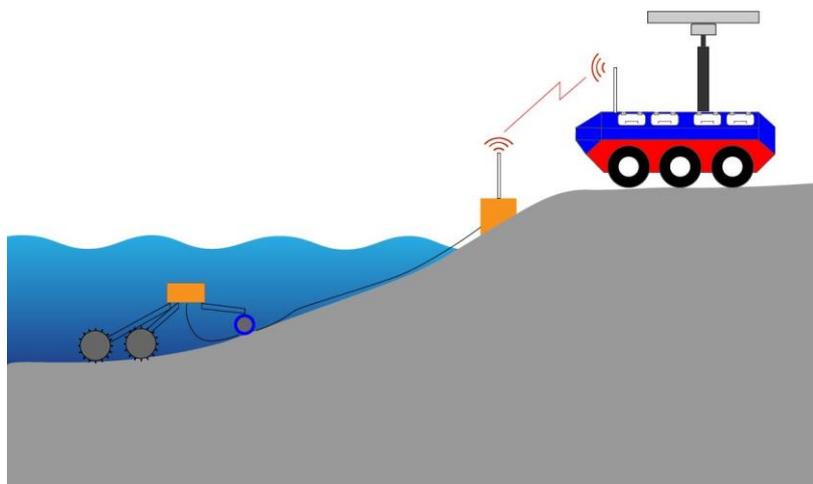
### Мобильная группа роботов

В соответствии с предложенным методом были разработаны различные транспортно-технологические машины и мобильные робототехнические комплексы, в том числе автономный мобильный робототехнический комплекс [9, 10] для мониторинга прибрежных зон. В мае-июне 2016 года на побережье о. Сахалин были проведены экспериментальные исследования данного комплекса, которые позволили оценить эффективность принятых технических решений и алгоритмов функционирования подвижных комплексов мониторинга в береговых зонах. Однако использование одного робота для проведения исследований недостаточно. Для этого предложено создать группу мобильных роботов для мониторинга волновой обста-

новки шельфовой зоны, способного перевозить измерительное оборудование, для проведения комплексных исследований. Методы, основанные на применении группы дистанционно управляемых мобильных робототехнических средств лишены многих недостатков, представленных выше, и хорошо зарекомендовали себя в экспериментальных исследованиях [11-14].

В рамках проекта был предложен подход к проведению мониторинга волнового климата прибрежной зоны, основанный на применении телеметрически связанной группы роботов наземного и подводного базирования. Данный подход позволит существенно расширить зону проведения исследований.

Схема взаимодействия группы и возможную схему проведения эксперимента представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Группа мобильных комплексов**

Данная схема состоит из роботов наземного (1), подводного (2) и надводного (3) базирования. Комплексы наземного и надводного базирования обмениваются информацией об интенсивности волнения вол и детальной батиметрии исследуемой акватории. Подводный сегмент использует кабель для передачи информации со струнного датчика об интенсивности волнения в исследуемой зоне. Данные поступают на стационарную базу, установленную на берегу. Далее информация передается по средствам беспроводной передачи на наземный робот. Обработка получаемой информации осуществляется на бортовом компьютере наземного робота. На рис. 2 представлены роботы, разработанные в НГТУ им. Р. Е. Алексеева. Далее рассмотрим каждый сегмент в отдельности.

### **Наземный сегмент**

В схеме взаимодействия наземный сегмент представлен автономным мобильным робототехническим средством [9-10]. Данный комплекс имеет возможность установки разных типов движителей, надстройки для исполнительных устройств на приводы управления и аппаратной части. Данный комплекс представлен на рис. 2а. Аппаратный состав представлен двумя лидарами LMS511Pro, антенной GNSS, метеостанцией, wi-fi антенной, видеокамерой и радаром кругового обзора MRS-1000.

Робот осуществляет сбор информации о волновой активности в исследуемой зоне. Программный комплекс собирает информация и выдает её в графическом виде. Все данные во время испытаний сохраняются на бортовом компьютере.



Рис. 2. Наземный (а) и подводный (б) сегменты

### Подводный сегмент

Подводный сегмент в схеме представлен амфибийным модульным транспортным средством (АМТС) [15]. АМТС представляет собой трехопорную систему, состоящую из нескольких основных компонентов: опорная платформа, герметичный контейнер с измерительным оборудованием, регулируемые рычаги, шаговые электродвигатели, ведущие колеса, опорное колесо.

Комплекс собирает данные с использованием системы видеоинспектирования и гидростатического волнографа со струнным датчиком, установленным на стационарной опоре корпуса. Работа струнного датчика представляет собой работу обкладок конденсаторов между диэлектриком. Проводниками выступают вода и сама медная проволока [15].

АМТС имеет возможность регулировки положения центра тяжести для повышения устойчивости при движении по крутым склонам морского дна и при значительном гидродинамическом воздействии. Регулировка в вертикальной плоскости производится за счет уменьшения-увеличения длин каждого из опорных рычагов.

Электроника АМТС состоит из управляющей и силовой частей. В основе управляющей части находится одноплатный компьютер. К нему подключаются все остальные датчики: датчик наклона на базе гироскопа MPU-6050, струнный емкостный датчик для регистрации высоты волны, видеокамера для съемки. Управление осуществляется удаленно через Ethernet кабель с берега либо через wi-fi если кабель подключается к бую, плавающему на поверхности. Силовая часть состоит из двух шаговых двигателей с редукторами (1:10) и драйверов шаговых двигателей. Источник питания – литиевый аккумулятор 48V 10Ah. Данный источник питания даёт возможность непрерывного движения в течении 4 часов, что соответствует проведению нескольких экспериментов по погружению.

### Эксперимент

В июле 2017 года были проведены эксперименты по испытанию АМТС и АМРК. Было проведено три экспедиции в различные районы прибрежных зон Охотского моря на острове Сахалин: на мысе Свободный.

Рельеф местности характеризуется небольшой глубиной 2-4 м на протяжении нескольких сотен метров вдали от берега. АМТС был погружен в воду посредством дистанционного управления на удаление от берега около 50 м и глубину порядка 2 м. В то же время выполнялся сбор данных о волновой активности с помощью наземного робота, установленного вблизи АМТС. Данные со струнного датчика передавались на базовую станцию, установленную на берегу, а далее поступали в АМРК, что позволяет провести калибровку оборудования и получить картину интенсивности волнения в зоне, в которой происходят замеры с помощью радара.

Таким образом, оба робототехнических устройства были объединены в единую локальную сеть. Далее на протяжении 60 мин выполнялся сбор данных высоты волн и отображение в режиме реального времени.

### Выводы

На основе проведенных экспериментальных исследований были сделаны выводы.

Разработанный подводный робот можно использовать для верификации данных получаемых с радиолокационной станции, установленной на исследовательских шасси большого класса при работе в группе мобильных роботов наземного и подводного базирования, необходимых для всестороннего изучения волновой динамики.

Классифицированы опорные основания береговых зон. Предложен подход к разработке и созданию эффективных конструкций шасси для береговых территорий и прилегающих акваторий.

Разработана методика выбора рациональных параметров транспортных средств. Разработаны основные требования к машинам, в зависимости от типа местности, на которой им приходится работать.

Предложен принципиально новый подход к изучению картины морского волнения посредством группы мобильных роботов наземного, подводного и надводного базирования. Комплексный подход позволит существенно расширить зону мониторинга и верифицировать данные получаемые с роботов.

Планируется использовать надводный сегмент для проведения замеров глубины морского дна. Робот будет иметь возможность передавать информация для наземного и подводного роботов с помощью wi-fi-передатчика. Предполагается также использование плавающего буя для передачи информации от подводного к наземному роботу, что существенно расширит его зону действия.

### Библиографический список

1. Department of Marine and Environmental Systems Florida Institute of Technology. Modular Amphibious Research Crawler. – [http://my.fit.edu/~swood/AUV\\_Crawler1.html](http://my.fit.edu/~swood/AUV_Crawler1.html) (2010, accessed 10 November 2017)
2. Department of Marine and Environmental Systems Florida Institute of Technology. The SPROV'er. – <http://my.fit.edu/~swood/SPROVER/The%20SPROV'er.htm> (2010, accessed 10 November 2017).
3. Cheng, H. Implementation of S-band marine radar for overwater wave measurement under precipitation [Text] / Cheng H. and Chien H. // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 188. P. 85-94.
4. Park, H.S. Breaking Wave Measurement Using Terrestrial LIDAR: Validation With Field Experiment on the Mallipo Beach [Text] / Park H.S., Sim J.S., Yoo J. and Lee D.Y. // Journal of Coastal Research. 2011. № 64. P. 1718-1721.
5. Martin, K. High Frequency Field Measurements of an Undular Bore Using a 2D LiDAR Scanner [Text] / Bonneton P., Frappart F., Detandt G., Bonneton N. and Blenkinsopp C.E. // Remote Sensing. 2017. Vol. 9. P. 2-14.
6. Makarov, V. Study of trafficability conditions of typical soils of coastal zones of Sakhalin island (Russian Federation). Paper presented at the 19th International and 14th European-African Regional Conference of the ISTVS (2017) [Text] / Makarov, V., Filatov, V., Vahidov, U., Kurkin, A., & Belyakov, V.
7. Ageikin, Ya.S. All-terrain wheels and dual propellers. Theory and Design [Text]. – Moscow: Mashinostroenie, 1972.
8. Макаров, В.С. Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон [Текст]: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / В.С. Макаров. – Нижний Новгород, 2017. – 321 с.
9. Zeziulin, D. Development of an unmanned ground vehicle for coastal monitoring [Text] / Zeziulin D., Beresnev P., Filatov V., Makarov V., Kurkin A., Belyakov V. // Proceedings of the 8th Americas Regional Conference of the ISTVS. 2016.
10. Kurkin, A. Unmanned ground vehicles for coastal monitoring [Text] / Kurkin A., Pelinovsky E., Tyugin D., Kurkina O., Belyakov V., Makarov V., Zezulin D. // International Journal of Imaging and Robotics. 2017. Vol. 17. P. 64-75.

11. Kurkin, A. Multiagent net-work system for coastal monitoring. Paper presented at the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017, 2 [Text] / Kurkin A., Tyugin D., Belyakov V., Makarov V., Zeziulin D., Minaev D. & Zaytsev A. P. 795-804.
12. Incoul, A. Mobile laser scanning of intertidal zones of beaches using an amphibious vehicle [Text] / Incoul A., Nuttens T., De Maeyer P., Seube N., Stal C., Touzé T. and De Wulf A. // INGENIO 2014: 6th international conference on engineering surveying, Prague, 2014. P. 87-92.
13. Wood, S. Modular Amphibious Research Crawler / S. Wood // Sea Technology. 2006. Vol. 47. № 2. P. 71-77.
14. Wübbold, F. Application of an autonomous robot for the collection of nearshore topographic and hydrodynamic measurements [Text] / Wübbold F., Hentschel M., Voudoukas M. and Wagner B. // Coastal Engineering Proceedings. 2012. Vol. 1, N. 3. P. 2133-2143.
15. Kurkin, A. Research complex for surf zone analysis. Paper presented at the 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, MEDCOAST 2017, 2 [Text] / Kurkin A., Makarov V., Zeziulin D., Tyugin D., Beresnev P., Filatov V. & Porubov D. P. 787-794.