

На правах рукописи

МАКАРОВ ВЛАДИМИР СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО ОБОСНОВАННЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПО СОЗДАНИЮ
ПОДВИЖНЫХ КОМПЛЕКСОВ МОНИТОРИНГА
БЕРЕГОВЫХ ЗОН**

05.05.03 – Колёсные и гусеничные машины

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва 2017

Работа выполнена в научно-исследовательской лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева.

Официальные оппоненты: **Баженов Евгений Евгеньевич**, доктор технических наук, директор института Автомобильного транспорта и технологических систем «Уральского государственного лесотехнического университета»;
Вольская Наталья Станиславовна, доктор технических наук, профессор «Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана»;
Котляренко Владимир Иванович, доктор технических наук, старший научный сотрудник, начальник Отдела технической политики Департамента государственной политики в области автомобильного и городского пассажирского транспорта Министерства транспорта Российской Федерации.

Ведущая организация: Государственный научный центр РФ ФГУП Центральный научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт «НАМИ»

Защита диссертации состоится «25» 12 2017 г. в 14 30 на заседании диссертационного совета Д212.141.07 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписью, заверенной печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на официальном сайте МГТУ им. Н.Э. Баумана: www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 201__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, д.т.н.



Е.Б. Сарач

Актуальность работы

Порядка 40% населения Земли проживает на узкой прибрежной полосе вдоль океанов и морей. Прибрежные зоны Российской Федерации занимают около 2/3 ее границ и порядка 10% от береговых зон поверхности суши Земли. Кроме того, большая часть населения проживает вдоль береговых зон внутренних водных объектов, в частности, озер, прудов, рек, ручьёв, искусственных водохранилищ. Для множества наблюдений береговая зона – это пограничная область суши и водной среды, состоящая из собственно берега, определяемого уровнем колебания воды при отливах и приливах, береговой линии и берегового склона. Ширина береговой зоны может быть от нескольких десятков до нескольких сотен метров. Основные факторы, определяющие характер береговой зоны – геологические, климатические, инженерная деятельность человека и др. Береговая зона характеризуется временным непостоянством и меняет свое положение в зависимости от времени года, штормовых условий, фазы прилива, давления атмосферы и многих других причин.

Береговые зоны и прибрежные территории – это место проживания большого числа людей и их культурной деятельности. Как следствие, развиваются сопутствующие отрасли промышленности, сельское, лесное, рыбное хозяйства. Происходит добыча природных ископаемых, нефти, газа, руд. На этих территориях последнее время развивается альтернативная энергетика. Всегда береговые зоны являлись объектом туризма и отдыха, а также районами для научно-исследовательской деятельности. Поэтому обеспечение безопасности жизнедеятельности, государственной и экологической (техногенной и природной) безопасности на этих территориях является важной и актуальной задачей.

Для обеспечения безопасности необходимо проводить мониторинг прибрежных территорий и прилегающих акваторий в широких пространственно-временных рамках. Мониторинг может быть реализован либо посредством большого числа стационарных постов, либо с использованием подвижных комплексов. Наиболее целесообразным в настоящее время является создание подвижных наземных комплексов мониторинга береговых зон. Использование специальных шасси и роботов при таких измерениях представляется весьма перспективным. Такие системы подходят для долгосрочного развертывания, так как они дают возможность непрерывного получения данных, охватывая несколько сотен метров от береговой линии. При этом возникает ряд проблем, связанных с необходимостью обеспечения подвижности в труднодоступных береговых зонах при движении по водонасыщенному грунтовому и заснеженному опорному основаниям и требующих от шасси подвижных комплексов возможности адаптации собственной структуры к обширному диапазону условий эксплуатации. Особые условия эксплуатации требуют разработки научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон.

При этом можно выделить следующие направления исследования:

– особые условия эксплуатации, не характерные для обычных наземных комплексов, обуславливают разработку методик и проведение исследований с целью получения характеристик дорожно-грунтовых поверхностей в береговой зоне с учетом сезонности;

– специфика устанавливаемого оборудования (его тип и массово-габаритные параметры) на подвижный комплекс мониторинга обуславливает разработку методов формирования облика и определения параметров шасси;

– необходимость длительной автономной работы подвижных комплексов мониторинга обуславливает разработку рациональных конструкций шасси, учитывающих специфику работы в береговой зоне, а также энергоэффективного управления движением.

Поэтому разработка научно обоснованных технических решений по созданию комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон, с целью повышения безопасности актуальна для экономики нашей страны.

Цель исследований

Целью работы является обеспечение социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях путем обоснования научно-технических решений и созданием метода разработки подвижных наземных комплексов мониторинга береговых зон.

Задачи исследования

Для достижения цели в работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Проведен анализ существующих технических решений комплексов мониторинга береговых зон, а также методов создания высокоподвижных транспортно-технологических систем.

2. Разработана классификация типовых трасс движения в береговых зонах.

3. Разработана методика получения данных физико-механических и геометрических характеристик опорных поверхностей в береговых зонах с учетом пространственно-временных факторов и особенностей местности. Проведены экспериментальные исследования по определению основных характеристик. Получены новые математические зависимости, характеризующие стохастическое распределение физико-механических и геометрических характеристик доминантных дорожно-грунтовых оснований в береговых зонах.

4. Разработана методика получения геометрических, массовых, мощностных и скоростных характеристик шасси под полезную нагрузку установленных средств мониторинга.

5. Разработаны методики определения рациональной и энергоэффективной конструкции шасси комплексов мониторинга, позволяющие проектировать шасси подвижных комплексов мониторинга береговых зон с точки зрения:

– вероятности отсутствия потери подвижности;
– энергоэффективного управления движением (распределения мощности по двигателям);

– длительности автономной работы (минимального расхода топлива, наибольшего пробега).

6. Разработан метод проектирования шасси подвижных комплексов мониторинга береговых зон для обеспечения социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях.

7. Проведена сравнительная оценка теоретических и экспериментальных данных.

8. Проведена апробация результатов проведенных исследований.

Объект исследований

Специальные шасси и транспортные средства высокой проходимости, предназначенные для использования в береговых зонах с целью проведения мониторинга.

Общая методология исследований

При проведении теоретических исследований использованы: методы теории вероятности и математической статистики, аналитической механики; численные методы решения систем дифференциальных уравнений; методы математического моделирования. При проведении моделирования применены методы теоретической механики, террамеханики, динамики неавтономных систем, визуально-ориентированного блочного имитационного моделирования сложных динамических систем. Исследования условий движения проводились с применением специального оборудования. Экспериментальные исследования по оценке подвижности в береговых зонах проводились на специальных шасси высокой проходимости.

Научная новизна

Впервые приведена классификация и математическое описание опорных поверхностей в береговых зонах, отличающаяся тем, что они рассматриваются как полотно пути для транспортно-технологических машин и комплексов мониторинга.

Разработаны методики получения физико-механических и геометрических характеристик на данной территории, отличающиеся специальным алгоритмом измерений и получения исходных данных об опорных основаниях с учетом пространственно-временных факторов и особенностей местности. Получены новые аналитические зависимости, характеризующие стохастическое распределение и учитывающие особенности опорных поверхностей береговых зон, для проведения мониторинга.

Разработаны новые аналитические зависимости, позволяющие определять геометрические, массовые, мощностные и скоростные характеристики транспортно-технологических машин с целевым использованием в береговых зонах.

Разработаны методики оценки параметров конструкции шасси подвижных комплексов мониторинга с разными типами движителей с использованием

математического моделирования и критериев эффективности, отличающиеся тем, что определяется вероятность отсутствия потери подвижности; оценивается энергоэффективность управления движением (распределения мощности по движителям); рассчитывается длительности автономной работы (минимального расхода топлива, наибольшего пробега) с учетом новых статистических моделей опорных оснований береговой зоны.

Отмеченные пункты научной новизны отражают суть предлагаемого метода разработки научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Из теоретических разработок:

- новая статистическая модель изменения физико-механических и геометрических характеристик основных дорожно-грунтовых оснований в береговой зоне, полученная на основе обработки новых экспериментальных данных;

- новая статистическая модель изменения физико-механических и геометрических характеристик снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин, отличающаяся учетом пространственно-временных факторов и особенностей местности;

- новые аналитические зависимости для определения геометрических, массовых, мощностных и скоростных характеристик специальных шасси транспортно-технологических машин с целевым использованием в береговых зонах.

2. Из научно-методических разработок:

- методики оценки подвижности при стохастическом задании условий движения и соответствующих параметрах взаимодействия движителей шасси подвижных комплексов мониторинга береговых зон, позволяющие производить выбор рациональных параметров специальных транспортно-технологических средств на стадии их разработки, а также выбор рационального движителя для заданных условий эксплуатации;

- метод разработки научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон.

3. Из научно-технических разработок: новые технические решения для шасси подвижных комплексов мониторинга прибрежной зоны, отличающиеся тем, что имеется единое шасси, позволяющее производить мониторинг, в том числе анализ динамики береговых линий, измерение волнового климата, оценку распространения загрязняющих веществ, мониторинг ледовой обстановки, а также комплект сменных движителей, обеспечивающих наилучшую подвижность в условиях береговых зон, и созданные по результатам исследований новые технологические решения и практические рекомендации, направленные на решение проблемы обеспечения подвижности при движении по береговым зонам.

Достоверность результатов

Проведенный комплекс экспериментальных исследований на специальных шасси и вездеходных транспортно-технологических машинах подтвердил основные теоретические положения, методики и методы представленные в работе.

Практическая ценность

Состоит в реализации теоретических разработок, методик расчетов, практических рекомендаций при совершенствовании существующих и создании новых шасси подвижных комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях.

Отдельные разделы диссертационного исследования вошли в следующие научно-практические работы:

1. В рамках научно-исследовательских работ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» по темам:

1.1. Автономный мобильный робототехнический комплекс мониторинга прибрежной зоны и прогнозирование морских природных катастроф.

1.2. Разработка многофункционального вездеходного транспортного средства, оборудованного интеллектуальными системами привода колесных движителей, обладающего повышенным уровнем энергоэффективности и улучшенной топливной экономичностью.

2. В рамках грантов Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых по темам:

2.1. «Разработка метода повышения эффективности использования транспортно-технологических машин в зимний период на основании экспериментально-теоретических исследований».

2.2. «Экспериментально-теоретическое исследование и разработка статистических моделей грунтовых поверхностей береговых зон для прогнозирования путей повышения эффективности функционирования мобильных робототехнических комплексов мониторинга прибрежных районов».

3. В рамках грантов проектов Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ):

3.1. Организация и проведение полевых работ по определению характеристик микропрофиля трасс движения транспортно-технологических машин.

3.2. Разработка научно-технических основ создания шасси модульных амфибийных транспортных средств для проведения исследований в прибрежной зоне.

4. В рамках Государственного задания 2017-2019 гг. по теме «Разработка алгоритмов управления, аппаратных средств и программного обеспечения для группы телеметрически связанных автономных мобильных робототехнических комплексов наземного и надводного базирования».

5. Результаты работы вошли в научно-учебные коллективные монографии: Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина-местность») (2014 г.); Статистическая модель снега как полотна пути для транспортных средств. Научные основы (2015 г.); Расчет проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу. Научные основы (2012 г.); Проходимость многоосных колесных машин по снегу. Научные основы (2012 г.); Каменные дороги. Научные основы. Перспективы исследования (2012 г.); Эффективность движения колесных машин по снегу. Научные основы (2013 г.).

Реализация работы

Данные, полученные в ходе исследования, внедрены в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Специальном конструкторском бюро средств автоматизации морских исследований» ДВО РАН (СКБ САМИ) и в ООО «Завод Вездеходных Машин» (ООО «ЗВМ») в составе автономного мобильного робототехнического комплекса для мониторинга прибрежной зоны и прогнозирования морских природных катастроф, а также в ООО «Завод транспортных машин» (ООО «ТрансМаш»), в составе многофункционального вездеходного транспортного средства. Используются в учебном процессе на кафедрах «Автомобили и тракторы» и «Строительные и дорожные машины» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е.Алексеева.

Апробация работы

Отдельные результаты и основные положения представлены на: 18th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014, (Seoul, South Korea, 2014 г.); 13th European Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, (Rome, Italy, 2015 г.); 8th Americas Regional Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, (Detroit, US, 2016 г.); 19th International & 14th European-African Regional Conference of the ISTVS, (Budapest, Hungary, 2017 г.); The Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 2015), (Varna, Bulgaria, 2015 г.); The 13th International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management & Conservation (Malta, 2017 г.); The 31st International Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice, (Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2016 г.); 79-й Международной научно-технической конференции «Безопасность транспортных средств в эксплуатации», (Н.Новгород, 2012 г.); 87-й международной научно-технической конференции «Эксплуатационная безопасность автотранспортных средств», (Н.Новгород, 2013 г.); 94 международной научно-технической конференции Ассоциации автомобильных инженеров «Беспилотные транспортные средства: проблемы и перспективы», (Н.Новгород, 2016 г.); на III международной научно-технической конференции «Проблемы транспортных и технологических комплексов» посвященной 40-летию кафедры строительные и дорожные машины НГТУ им. Р.Е. Алексеева, (Н.Новгород, 2012 г.); международной научно-практической конференции

«Инновации на транспорте и в машиностроении», (Санкт-Петербург, 2016 г.); международной молодежной научно-технической конференции «Будущее технической науки», (Н.Новгород, 2012-2017 гг.); 10 юбилейной Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы и достижения автотранспортного комплекса», (Екатеринбург, 2012 г.); международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-26», (Н.Новгород, 2013 г.); «Научно-технической конференций и выставки инновационных проектов, выполненных вузами и научными организациями Приволжского федерального округа», (Н.Новгород, 2014 г.); международной конференции «Чистая вода» опыт реализации инновационных проектов в рамках федеральных целевых программ Минобрнауки России, (Москва, 2014 г.); European Geosciences Union General Assembly, (Vienna, Austria, 2015-2017 гг.); международной научно-технической конференции «Промышленная экология», (Минск, Беларусь, 2015 г.); первом Евразийском горно-геологическом форуме - Международно-практической конференции «Актуальные проблемы геологии, геохимии и геофизики», (Минск, Беларусь, 2016 г.); Нижегородской сессии молодых ученых. Технические науки (2016-2017 гг.); Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии», (Н.Новгород, 2016-2017 гг.); International Conference «Data Intensive System Analysis for Geohazard Studies», (Сочи, 2016 г.); The Seventh International Tsunami Symposium (ISPRA-2016), (Ispra, Italy, 2016 г.); XII International Symposium «Intelligent System 2016» INTELS'2016, (Moscow, 2016 г.); на III Международном симпозиуме «Физика, химия и механика снега», (Южно-Сахалинск, 2017).

Технические и конструкторские разработки были представлены и удостоены медалей: на Международном бизнес-саммите (Н. Новгород, 2013-2015 г.); Национальной выставке «Вузпромэкспо» (Москва, 2013-2016 гг.); Международном военно-техническом форуме «АРМИЯ-2015», (Кубинка, Московская область, 2015 г.); Международной выставке изобретений в Женеве (International Exhibition Of Inventions of Geneva) (Женева, Швейцария, 2015-2016 гг.); Сеульской международной ярмарке изобретений SIF (Seoul International Invention Fair) (Сеул, Республика Корея, 2015-2016 гг.); Международной выставке инноваций и новых технологий ITEX (International Invention, Innovation & Technology Exhibition) (Куала-Лумпур, Малайзия, 2015-2016 гг.); Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед» (Москва, 2016 г.); Международной выставке интеллектуальной собственности, изобретений, инноваций и технологий IPITEX (Bangkok International Intellectual Property, Invention) (Бангкок, Таиланд, 2017 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 60 научных работ, в том числе 7 монографий, 13 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ и 7 в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. По результатам работы получено 5 патентов на полезную модель и 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Общий объемом публикаций составляет 43,52 п.л.

Объем и структура работы

Диссертация содержит 311 страниц, включая 178 рисунков и 22 таблицы, состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка используемой литературы (212 наименований).

Квалификационная формула

Диссертационная работа является самостоятельной завершенной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические решения, полученные с использованием созданного метода разработки шасси подвижных комплексов мониторинга автономного движения в береговой зоне, имеющих важное значение для обеспечения социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована её цель, раскрыты методы исследования, отмечены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, представлены объекты исследования, указана практическая ценность получаемых результатов.

В первой главе рассматривается состояние вопроса и ставятся задачи исследования. Рассмотрены существующие вездеходные шасси и специальные мобильные робототехнические комплексы (МРК), используемые для выполнения задач мониторинга в условиях береговых зон. Показано, что конструкция шасси МРК должна определяться исходя из конфигурации полосы суши. При проектировании необходимо учитывать рельеф побережья и виды грунтовых оснований. В зимний период характер распределения снежного покрова по береговым зонам и близлежащим территориям. Анализ МРК позволил сделать выводы, что в основном применяются колесные шасси, не обладающие достаточной подвижностью и приспособленностью к условиям движения на данных территориях. Для обеспечения социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях посредством наземных подвижных комплексов мониторинга (ПКМ), работающих в береговой зоне, необходимо создание специальных шасси, отвечающих широким условиям эксплуатации.

Приведен пример ПКМ, разработанного при непосредственном участии автора, отличительной особенностью которого является возможность установки разных типов движителей: колесного, гусенично-модульного и роторно-винтового. В разработке данного шасси проявилось заинтересованность Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований Дальневосточного отделения Российской академии наук (СКБ САМИ ДВО РАН), основной деятельностью которого являются: фундаментальные и прикладные научные исследования в области океанологии; изучение гидроакустических, гидрофизических и гидродинамических процессов, взаимодействия атмосферы и океана, опасных морских явлений и безопасности

мореплавания. Именно поэтому основным направлением проведенных экспериментальных исследований являлось исследование работы шасси МРК в условиях Охотского моря и береговых зон о. Сахалин (береговые линии Охотского моря занимают порядка $\frac{1}{4}$ от всех морских берегов России).

Исследованиями береговых зон с точки зрения движения транспортно-технологических машин (ТТМ) занимались Степанов А.П., Редькин М.Г., Малахов Д.Ю. и др. Эти работы в основном связаны с исследованием плава машин при различной бальности, движения в прибойной зоне, вход в воду и выход на берег. Приведенные в этих работах расчеты даны для средних значений физико-механических характеристик береговых зон. Но для оценки эффективности движения ПКМ нужно знать характер распределения этих характеристик и особые условия эксплуатации в береговых зонах. Поэтому рассмотрены более подробно особенности береговых зон как полотна пути для шасси высокой проходимости, ТТМ и ПКМ

Анализ условий движения позволил разработать классификацию поверхностей движения в береговых зонах как полотна пути для ТТМ и ПКМ. Структура и классификационные признаки показаны на Рисунке 1.



Рисунок 1.

Структура и классификационные признаки береговых зон

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.

Материалы, приведенные в данной главе, позволили сформулировать основные задачи исследования, которые были решены в последующих главах работы.

Во второй главе показано, что исследованием движения ТТМ, а также процессами взаимодействия движителей с опорным основанием в разное время занимались ученые и исследователи: Агейкин Я.С., Аксенов П.В., Антонов А.С., Бабков В.Ф., Барахтанов Л.В., Безбородова Б.Г., Беккер М.Г., Белоусов Б.Н., Беляков В.В., Бируля А.К., Бочаров Н.Ф., Брянский Ю.А., Вольская Н.С., Вонг Дж., Горячкин В.П., Гришкевич А.И., Гуськов В.В., Забавников Н.А., Зимелев Г.В., Кацыгин В.В., Кемурджиан Л.А., Котиев Г.О., Котляренко В.И., Кошарный Н.Ф., Кристи М.К., Кутьков Г.М., Ларин В.В., Летошнев М.Н., Литвинов А.С., Наумов В.Н., Петрушов В.А., Пирковский Ю.В., Платонов В.Ф., Полунгян А.А., Смирнов Г.А., Софьян А.П., Троицкая М.Н., Ульянов Н.А., Фаробин Я.Е., Фалькевич Б.С., Чистов М.П., Чудаков Е.А., Шухман С.Б., Яценко Н.Н. и др.

В том числе исследованием статистического распределения характеристик дорожно-грунтовых оснований посвящены работы Агейкина Я.С., Баженова Е.Е., Безбородовой Г.Б., Беккера М.Г., Вольской Н.С., Rybansky M. и др. Работы указанных авторов, а также, как показали исследования в первой главе данной работы, не в полной мере могут быть охарактеризовать береговые зоны. Поэтому были проведены дополнительные эксперименты с целью составления и уточнения существующих моделей, описывающих полотно пути в береговых зонах.

Описана методика получения данных о физико-механических и геометрических характеристиках опорных поверхностей в береговых зонах. Отличительной особенностью которой является то, что нужно проводить замеры по линиям поперек уреза воды с расстоянием между замерами в 1 м. Это позволяет оценить характер изменения деформационных и сдвиговых характеристик грунта по мере отдаления от воды, а также получить данные о поперечных уклонах берега.

На основании данной методики проведены исследования и анализ статистического распределения характеристик дорожно-грунтовых оснований в береговой зоне.

Для проведения исследований были выбраны характерные участки местности в районе м. Свободный (стационар СКБ САМИ ДВО РАН). Данные участки берега анализировались с позиции возможности движения ПКМ.

Области исследования в районе стационара были выбраны не случайно. Основываясь на анализе картографической информации о характере рельефа и грунтовых поверхностях, были выбраны характерные участки для исследования.

Первый характерный участок – это восточное побережье Тонино-Анивского полуострова – гористый участок с абразионными уступами, при этом береговую зону формируют образующиеся при абразии песок, галька, гравий и

более крупный обломочный материал. Второй – это залив Мордвинова, представляющий собой равнинный участок с песчаными пляжами.

Исследования физико-механических характеристик грунта проводились с применением пенетromетра грунтового ПГ-1 и «Полевой лаборатории Литвинова» ПЛЛ-9. Исследования микропрофиля проводились с помощью оптического нивелира. Примеры изменения сопротивления пенетрации на участках песчано-гравийного и песчаного пляжей приведены на Рисунке 2. Примеры продольных уклонов на участках песчано-гравийного и песчаного пляжей даны на Рисунке 3.

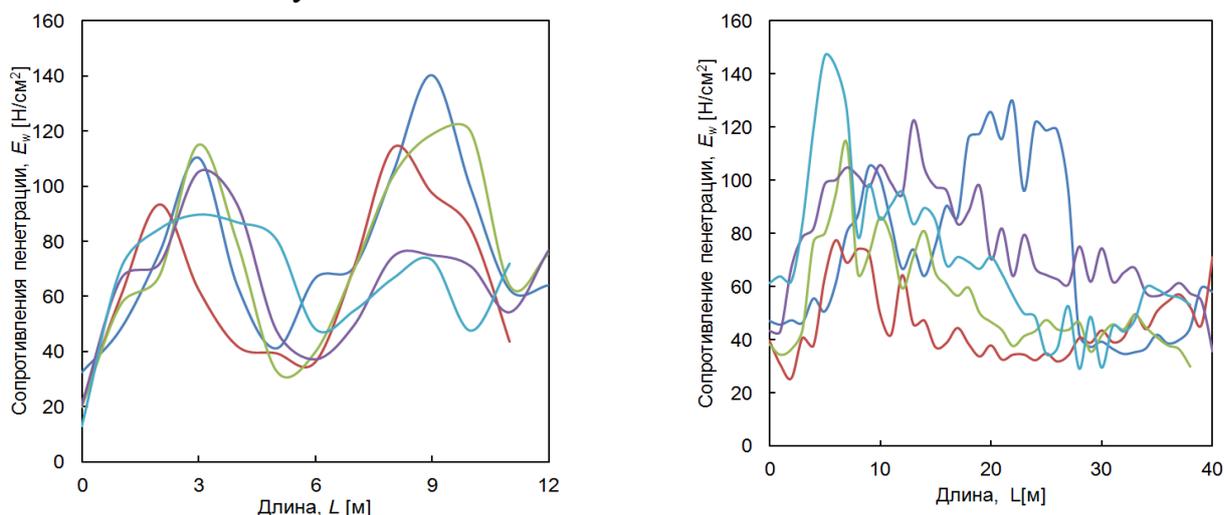


Рисунок 2.

Характер изменения сопротивления пенетрации на участке песчано-гравийного (слева) и песчаного (справа) пляжей

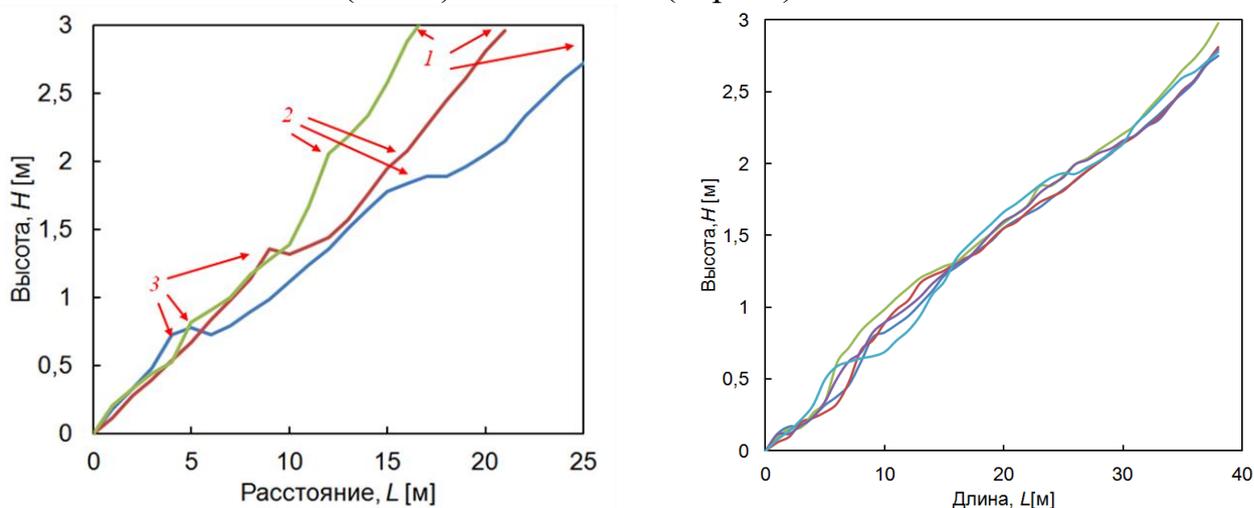


Рисунок 3.

Пример профиля берега на участках песчано-гравийного (слева) и песчаного (справа) пляжей (цифрами показаны характерные участки)

Проведенный анализ экспериментальных данных позволил сделать выводы и предложить новые аналитические зависимости для расчета физико-механических и геометрических характеристик береговых зон и характерных поверхностей движения. Было выделено, по крайней мере, три характерных условия движения, определяемых визуально:

- движение на малом участке с постоянными характеристиками;
- движение на протяженном участке с различными характеристиками;
- движение на участках с сильно изменяющимися характеристиками из-за резкого увеличения влажности грунта (заход с берега в воду или обратно).

В соответствии с этим положением были получены следующие новые аналитические зависимости.

Если рассматривать движение ПКМ на небольшом участке, то сопротивление пенетрации меняется по нормальному закону распределения (Рисунок 4). Для графика на Рисунке 4 средние значения сопротивление пенетрации составляют 67 Н/см^2 , а среднее квадратичное отклонение (СКО) $12,6 \text{ Н/см}^2$.

Если рассматривать движение ПКМ по протяженному участку, то выражение для расчета плотности вероятности сопротивления пенетрации подчиняется логарифмически нормальному закону распределения (Рисунок 5). Для песчано-гравийного пляжа средние значения сопротивление пенетрации составляют 75 Н/см^2 . Для песчаного пляжа средние значения сопротивление пенетрации составляет 60 Н/см^2 .

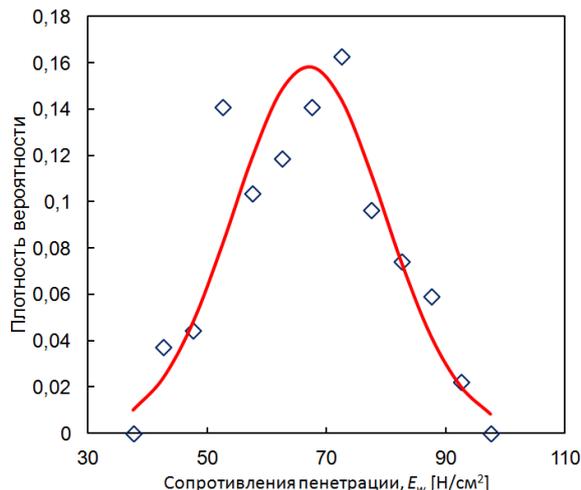


Рисунок 4.

Характер изменения сопротивления пенетрации на однотипном мерном песчаном участке

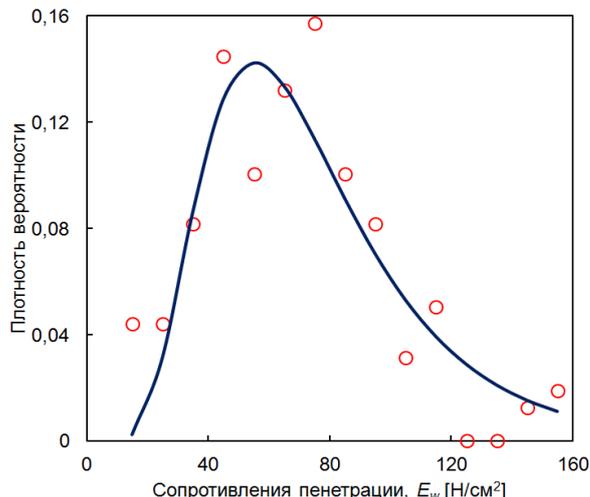


Рисунок 5.

Плотность вероятности изменения сопротивления пенетрации на участке песчано-гравийного пляжа

Также результаты замеров на участках с сильно меняющимися характеристиками показали, что падение несущей способности грунта (сопротивления пенетрации) при движении ПКМ при заходе в воду меняется в несколько раз. Поэтому необходимо это учитывать при проектировании систем управления движением ходовых систем специальных шасси ПКМ.

Для описания профиля опорных оснований нужно выделить три зоны:

- подводная часть берега;
- надводная часть в поперечном направлении;
- микропрофиль пути вдоль берега и на прилегающих территориях.

Анализ геометрических характеристик показывает, что можно выделить следующие типы поверхностей подводной части берега:

- пологий ниспадающий участок с плавно меняющимся углом наклона дна;

- в основном горизонтальный участок дна, немного ниспадающий с многочисленными острыми выступами, оканчивающийся резким бенчем;
- различные участки дна с наличием больших дискретных неровностей (камней, валунов и пр.).

Анализ данных по результатам проведенных экспериментальных исследований показал, что для песчано-гравийного пляжа на измеренном участке поперечный уклон меняется по протяженности. На нем присутствуют участки с большим уклоном и пологие. Распределение уклонов берега подчиняется нормальному закону распределения. Так, для участка песчано-гравийного пляжа средние значения составляют порядка 8° , а СКО $\sigma = 3^\circ$. При этом не учитывались характерные участки (2) и (3), показанные на рисунке 3. Песчаный пляж можно моделировать просто как наклонную плоскость со следующими параметрами: средние значения составляют порядка 4° , а СКО $\sigma = 2^\circ$.

Для описания продольного профиля берега целесообразно использовать описание микропрофиля при помощи корреляционной функции и спектральной плотности. Для моделирования поверхности берега с имеющимися дискретными препятствиями (каменьями, валунами и пр.) удобнее воспользоваться другой моделью. Зависимость числа неровностей от их протяженности и размеры между неровностями подчиняются показательному закону распределения

$$n(x) = \begin{cases} A \cdot \lambda^{-1} \cdot e^{-\frac{x}{\lambda}} & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases},$$

где $A = a \cdot \Delta x$, $\lambda, A, a > 0$ – параметры данного распределения; Δx – шаг дискретизации размеров неровностей.

Для описания макропрофиля прилегающих территорий была предложена многопараметрическая зависимость для расчета характеристик плотности вероятности продольных углов

$$\rho(\alpha_i) = k_1 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_1^2}} + k_2 \frac{\Delta\alpha}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\alpha_i)^2}{2\sigma_2^2}},$$

где σ_1 и σ_2 , k_1 и k_2 – параметры распределения; $(k_1 + k_2) = 1$; $\alpha_{i(j+1)} = \alpha_{ij} + \Delta\alpha$; $\Delta\alpha = 0,5^\circ$; $\alpha_i = 0,5(\alpha_{ij} + \alpha_{i(j+1)})$.

Таким образом, представляется возможным для каждого транспортно-технологического средства и специального шасси ПКМ оценить область эффективного использования с точки зрения статистических характеристик. Полученные характеристики полотна пути были использованы при расчете подвижности и оценки энергоэффективности конструкции шасси ПКМ в главе 5.

Рассмотренные условия движения характерны для теплого времени года. При движении по снегу необходимо учитывать особенности его формирования и изменения в течение зимы. Это рассмотрено в следующей главе работы.

В третьей главе проведено исследование и анализ статистического распределения характеристик снега в береговой зоне и на прилегающих территориях как полотна пути для транспортно-технологических машин и ПКМ.

Проведен обзор исследований по снегу как полотну пути для транспортных средств, начиная с Воейкова А.И., Кузьмина П.П., Рихтера Г.Д.

Проанализированы работы ученых и исследователей из «Нижегородской школы транспортного снеговедения»: Веселовского М.В., Рукавишников С.В., Николаева А.Ф., Куляшова А.П., Барахтанова Л.В., Белякова В.В., Шапкина В.А. и их учеников. Среди иностранных ученых рассмотрены работы Lee J., Shoop S., Bekker M., Melloh R., Rytka J. и др.

Проходимость транспортных средств определяется как конструкцией самой машины, так и характеристиками опорного основания. Необходимыми факторами, достаточными для оценки проходимости и подвижности по снегу, являются его высота H , плотность ρ_s , жесткость K_r , связность c и угол внутреннего трения φ .

На основании данных Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды проанализированы тенденции и особенности формирования снежного покрова в России за последние несколько лет. Получены новые аналитические зависимости.

Отличительной особенностью при расчете характера распределения параметров снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин и ПКМ является то, что не нужно учитывать при расчетах сроки, при которых наблюдается наличие нестабильного снежного покрова в начале и в конце зимы.

В общем виде средние значения высоты снежного покрова можно определить по зависимости

$$H = \sum_{i=0}^4 a_i t_c^i,$$

где a_i – эмпирические коэффициенты; t_c^i – текущая условная продолжительность зимнего сезона с установившимся снежным покровом в декадах ($t_c = \overline{(0,15)}$).

Для удобства использования этих зависимостей целесообразно изменения высоты снега в течение зимнего периода рассчитывать по зависимости

$$H = H_{\max}^{\text{mid}} \sum_{i=0}^4 a_i^H t_c^i,$$

где H_{\max}^{mid} – средняя максимальная высота снега за период; a_i^H – эмпирические коэффициенты.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей высот снежного покрова определяется по формуле

$$H_{5(95)} = H \pm e^{0,5} \zeta \sigma_H,$$

где $\zeta = T_c^{-1}(e - 2)t_c + 1$ – эмпирический коэффициент; σ_H , – среднее квадратичное отклонение для наблюдаемой территории; T_c – условная продолжительность зимнего сезона с установившимся снежным покровом ($T_c = 15$).

Средние значения плотности снежного покрова определяются по зависимости

$$\rho = \sum_{i=0}^4 b_i t_c^i,$$

где b_i – эмпирические коэффициенты.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей плотностей снежного покрова определяется по формуле

$$\rho_{5(95)} = \rho \pm e^{0.5} \sigma_{\rho},$$

где σ_{ρ} , – среднеквадратичное отклонение для рассматриваемой территории.

Для связи реальных сроков залегания установившегося снежного покрова и условных предложена зависимость

$$t_c = T_c(t-1)/(T-1)+1,$$

где t - текущая декада; T - число декад, продолжительности залегания снежного покрова.

Проведенные исследования позволили проанализировать распределение снежного покрова в береговой зоне и на прилегающих территориях на о.Сахалин (рисунок б).

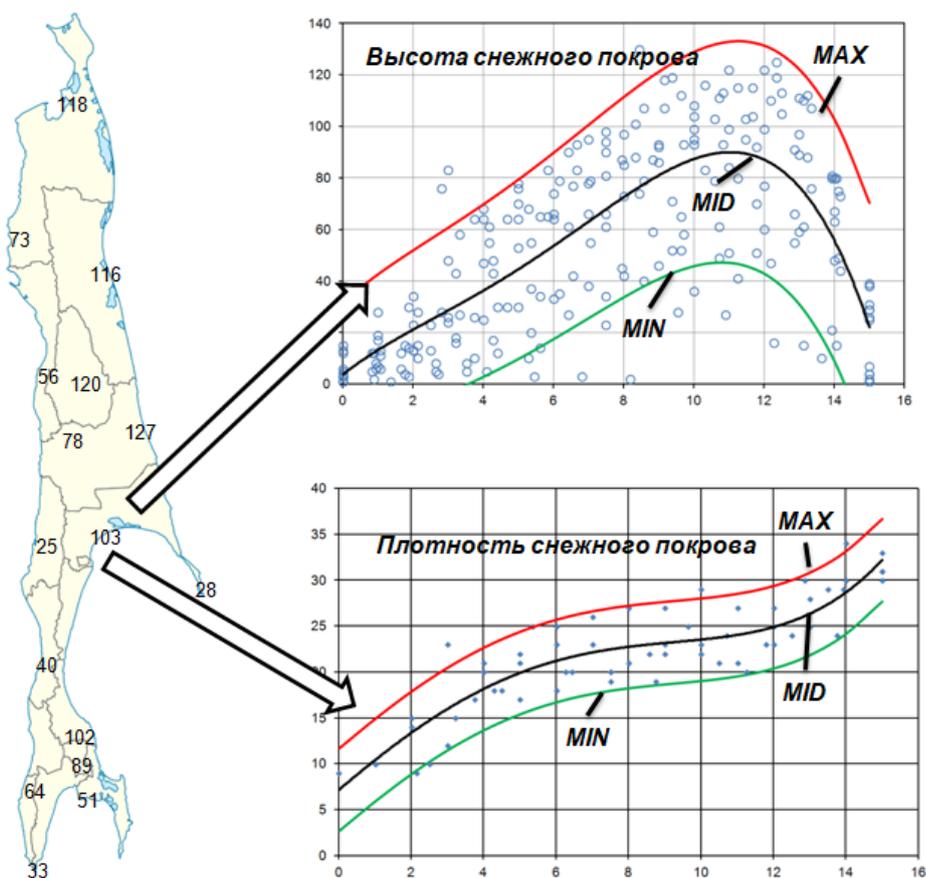


Рисунок 6.

Средние максимальные значения высот снега на территории о. Сахалин, а также примеры зависимостей изменения высоты и плотности снежного покрова

Изменение параметров высоты и плотности снега связано с характером ландшафта местности, растительностью, ветром, солнечной активностью и прочими факторами.

На основании исследований, проведенных автором работы, можно выделить некоторые характерные участки, на которых формирование снега происходит с учетом предложенных зависимостей и поправочных усредненных коэффициентов:

$$H_{real} = H k_H^{area}, \rho_{real} = \rho k_\rho^{area},$$

где H_{real} и ρ_{real} – высота и плотность снега с учетом особенностей ландшафта; k_H^{area} , k_ρ^{area} – коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на высоту и плотность снега, полученные на основании экспериментальных данных, приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на параметры снега

Сравниваемые участки	k_H^{area}	СКО	k_ρ^{area}	СКО
Поляна в лесу/ поле	1,1	0,125	0,9	0,15
Лес/ поле	1,4	0,3	0,85	0,13
Ямы (балки)/поле (лес)	1,4	0,2	1	-

Обобщающие зависимости для определения жесткости K_r , связности c и угла внутреннего трения φ снега в зависимости от продолжительности залегания снежного покрова рассчитываются на основании подхода профессора Белякова В.В. по следующим зависимостям:

$$K_r(t_c) = e^{\sum_{j=0}^s [b_j \rho(t_c)^j]}, C(t_c) = e^{\sum_{j=0}^s [c_j \rho(t_c)^j]}, \varphi(t_c) = \sum_{j=0}^s [d_j \rho(t_c)^j],$$

где b_j, c_j, d_j - эмпирические коэффициенты.

Предложены новые аналитические зависимости для связи плотности и влажности снега:

$$\rho(w) = K_w w + \rho(0), w(\rho) = (\rho - \rho(0)) K_w^{-1}, K_w = \sum_{i=0}^1 k_{\rho i} \rho(0)^i,$$

где $\rho(w)$ - зависимость плотности от влажности; $w(\rho)$ – зависимость влажности от плотности; $\rho(0)$ – плотность снега на момент начала таяния при нулевой влажности; K_w – коэффициент учета влажности; $k_{\rho i}$ - коэффициенты учета влияния плотности на момент начала таяния; $k_{\rho 1} = -0,022$; $k_{\rho 2} = (e - 1)$; w – влажность.

Полученные характеристики снежного полотна пути были использованы при расчете подвижности и оценке энергоэффективности конструкции шасси ПКМ в главе 5.

Анализ условий движения по береговым зонам позволил выделить основные характеристики дорожно-грунтовых оснований как в теплое время года, так и в зимний период. Данные параметры используются для математического моделирования. Но также необходимо знать начальные условия, а именно характеристики шасси ПКМ, оптимизацию которых в дальнейшем нужно производить с учетом условий движения. Выбор этих параметров должен быть произведен с учетом специфики устанавливаемого оборудования (его типа и массово-габаритные параметров) и может быть получен, основываясь на инженерном опыте. Данное исследование проведено в следующей главе работы.

В четвертой главе описана методика выбора геометрических, массовых, мощностных и скоростных характеристик шасси ПКМ и транспортно-технологических машин, включающая аналитические зависимости, полученные с учетом статистических данных по конструкциям последних лет машин с колесным, гусеничным и роторно-винтовым движителями. Основной подход данной методики сводится к тому, что для ПКМ исходными данными для проектирования будут массово-габаритные параметры исследовательского оборудования. В соответствии с этим по новым аналитическим зависимостям, основанным на статистических данных, приведенных в Таблицах 2-5, определяются остальные основные параметры шасси.

Таблица 2.

Регрессионные уравнения соотношения параметров колесных машин

Зависимости	Тип машины	Колесная формула		
		4x4	6x6	8x8
Мощность двигателя от полной массы машины, [кВт - т]	Вездеходы	$P_e = 22 M_a + 55$	$P_e = 40 M_a$	$P_e = 15 M_a + 13$
	Грузовые		$P_e = 12 M_a + 81$	$P_e = 4 M_a + 135$
	Специальные		$P_e = 7,7 M_a + 235$	$P_e = 13 M_a + 21$
Удельная мощность двигателя от полной массы машины, [кВт/т - т]	Вездеходы	$p_e = 75 M_a^{-0,45}$	$p_e = 47 - 9 \ln(M_a)$	$p_e = 27 - 5 \ln(M_a)$
	Грузовые			
	Специальные			
Грузоподъемность от полной массы машины, [т - т]	Вездеходы	$M_r = 0,2 M_a$	$M_r = 0,3 M_a$	$M_r = 0,3 M_a$
	Грузовые	$M_r = 0,3 M_a$	$M_r = 0,7 M_a - 3,3$	$M_r = 0,8 M_a - 9,1$
	Специальные		$M_r = 0,14 M_a$	$M_r = 1$
Максимальная скорость от полной массы машины, [км/ч - т]	Вездеходы	$V_a = 75$	$V_a = 7 M_a + 35$	$V_a = 38 M_a^{0,3}$
	Грузовые	$V_a = 130 M_a^{-0,15}$	$V_a = 80$	$V_a = 80$
	Специальные		$V_a = 100$	$V_a = 38 M_a^{0,3}$

Таблица 3.

Регрессионные уравнения соотношения параметров гусеничных машин

Зависимости	Тип машины	Уравнение
Мощность двигателя от полной массы машины, [кВт - т]	Вездеходы	$P_e = 17 M_a$
	Специальные	
Удельная мощность двигателя от полной массы машины, [кВт/т - т]	Вездеходы	$p_e = 35 M_a^{-0,25}$
	Специальные	
Грузоподъемность от полной массы машины, [т - т]	Вездеходы	$M_r = 0,2 M_a + 0,4$
Удельное давление от полной массы машины, [100кг/см ² - т]	Вездеходы	$p_e = 5,6 \ln(M_a) + 9,6$
	Специальные	$p_e = 13 (2 \ln(M_a) - 1)$
Максимальная скорость от полной массы машины, [км/ч - т]	Вездеходы	$V_a = 60$
	Специальные	

Таблица 4.

Регрессионные уравнения соотношения параметров сочлененных гусеничных машин

Зависимости	Тип машины	Уравнение
Мощность двигателя от полной массы машины, [кВт - т]	Одношарнирные	$P_e = 12 M_a + 35$
	Двухшарнирные	$P_e = 2,7 M_a + 135$
	Специальные	$P_e = 555$
Удельная мощность двигателя от полной массы машины, [кВт/т - т]	Одношарнирные	$p_e = 50 M_a^{-0,55}$
	Двухшарнирные	
	Специальные	$p_e = -0,25 M_a + 25$
Грузоподъемность от полной массы машины, [т - т]	Одношарнирные	$M_r = 0,7 M_a - 15$
	Двухшарнирные	$M_r = 0,3 M_a$
	Специальные	
Удельное давление от полной массы машины, [100кг/см ² - т]	Одношарнирные	$p_e = 6,5 \ln(M_a) + e$
	Двухшарнирные	
	Специальные	
Максимальная скорость от полной массы машины, [км/ч - т]	Одношарнирные	$V_a = -0,2 M_a + 52$
	Двухшарнирные	$V_a = -0,2 M_a + 33$
	Специальные	$V_a = -0,2 M_a + 52$

Таблица 5.

Регрессионные уравнения соотношения параметров машин с РВД

Зависимости	Уравнение
Мощность двигателя от полной массы машины, [кВт - т]	$P_e = 0,4M_a^3 + 1,9M_a^2 + 33M_a + 4$
Диаметра базового цилиндра ротора от полной массы машины, [м - т]	$d_0 = -0,003M_a^2 + 0,107M_a + 0,383$
Высота лопатки винтовой линии от диаметра ротора, [м - м]	$h_{л} = 0,04d_0 + 0,02$
Диаметр ротора от базы машины, [м - м]	$L = 0,19d_0 + 0,04$
База от колеи машины, [м - м]	$L = 2,6B - 1,3$
Угол наклона винтовой линии ротора от скорости движения, [град - км/ч]	$\alpha = (V/3) + 24$

Произведенный расчет параметров позволяет выбрать исходные данные для проектирования и последующей оптимизации конструкции транспортно-технологических машин и шасси ПКМ. Моделирование движения, анализ конструкции и методика выбора рациональных параметров выполнены в главе 5.

В пятой главе проведены экспериментально-теоретические исследования движения специальных шасси ПКМ и транспортно-технологических машин в условиях береговых зон.

Рассмотрена методика задания параметров дорожно-грунтовых оснований, характерных для береговых зон на основании данных, полученных в главах 2 и 3.

Наиболее удобной математической моделью для песчано-гравийных опорных оснований является модель, приведенная в работах Агейкина Я.С.,

Вольской Н.С. Расчет нормальных и сдвиговых напряжений производится по зависимостям, приведенным далее.

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

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

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

$$\Phi_f = b M_a^{-1} \int_0^{h_t} p dh,$$

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

Расчетные схемы для колесного и гусенично-модульного движителей приведены на Рисунке 7.

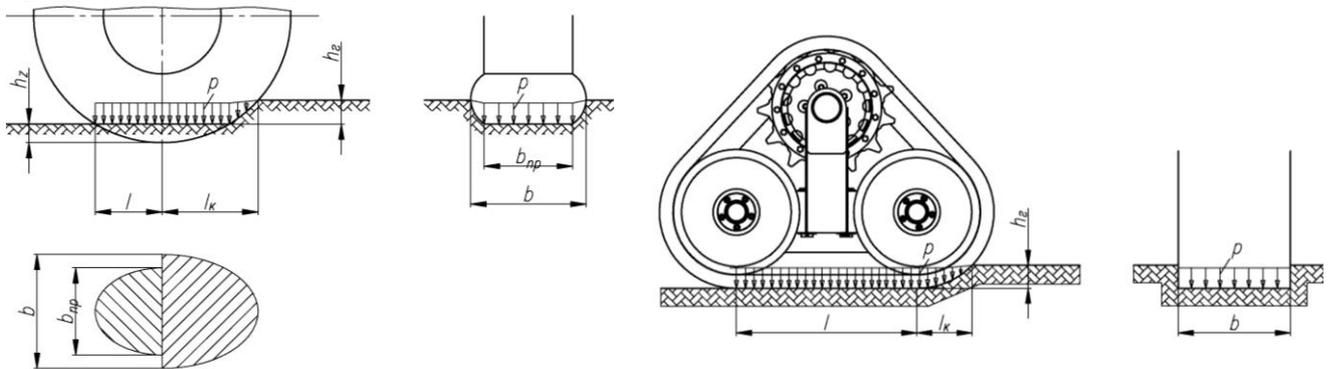


Рисунок 7.

Расчетные схемы взаимодействия колесного и гусенично-модульного движителей с грунтом

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, блок-схема которой приведена на Рисунке 8.

В предложенной методике используется цикл со счётчиком (перебор), в котором базовые параметры шасси ПКМ $\lambda_k = \{M_a, B, D, n, p_e, \dots\}$ изменяют своё значение от заданного начального значения $\lambda_{кн}$ до конечного значения $\lambda_{кк}$ с некоторым шагом $\Delta\lambda_k$, и для каждого параметра тело цикла выполняется один раз. Начальные значения параметров λ_k задаются исходя из инженерного опыта (рекомендации приведены в главе 4) и требований к конструкции, предоставляемых техническим заданием. В данной работе проанализировано изменение значений параметров от среднего на 20%.

В качестве данных о характеристиках опорного основания выступают значения $\lambda_t = \{E, c, \varphi, \rho\}$, а также их статистические характеристики, которые задаются, используя цикл со счётчиком (перебор). Основные параметры опорного основания λ_t изменяют своё значение от заданного начального значения $\lambda_{тн}$ до конечного значения $\lambda_{тк}$ с некоторым шагом $\Delta\lambda_t$, и для каждого параметра тело цикла выполняется один раз. При этом каждому значению λ_t соответствует свое значение плотности вероятности $p(\lambda_t)$.

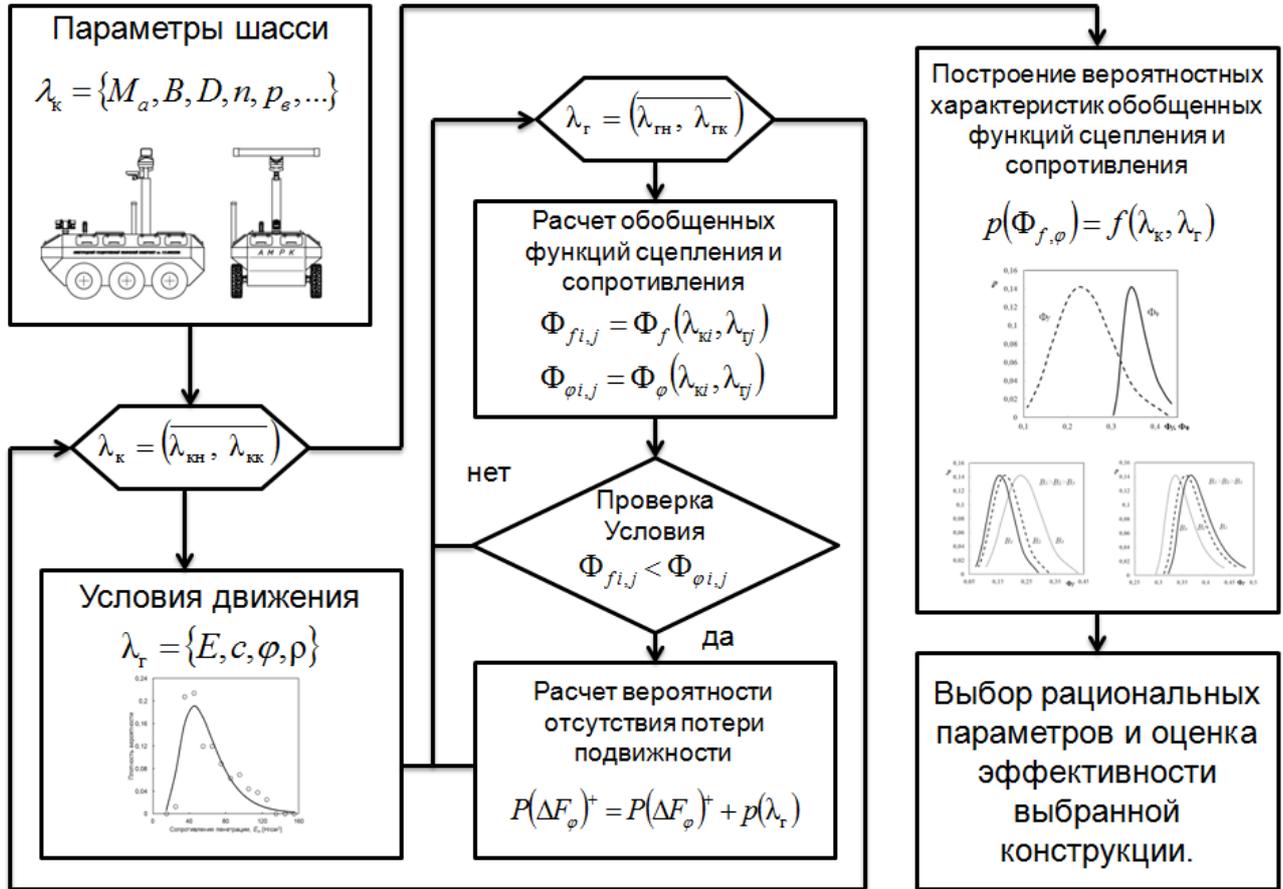


Рисунок 8.

Блок-схема методики оценки конструкционных параметров шасси ПКМ и расчета критерия эффективности

Для каждого соотношения параметров λ_t и λ_k рассчитываются значения обобщенных функций сопротивления Φ_f и сцепления Φ_φ . Проверяется условие $\Phi_f < \Phi_\varphi$. Если условие выполняется, то рассчитывается коэффициент, учитывающий вероятность того, что машина не потеряет подвижность по условию опорной проходимости при заданных условиях λ_t и λ_k . Изменяя параметры опорного основания λ_t и получая значения Φ_f и Φ_φ , строятся зависимости, учитывающие вероятностные характеристики в виде $p(\Phi_f) = f(\lambda_t, \lambda_k)$ и $p(\Phi_\varphi) = f(\lambda_t, \lambda_k)$ при заданных λ_k .

Проведена сравнительная оценка для двух вариантов шасси ПКМ – колесного и гусенично-модульного – с целью выбора рациональной конструкции и расчета вероятности отсутствия потери подвижности по проходимости.

Далее проведен анализ существующих алгоритмов управления распределения мощности по двигателям с целью оценки эффективности и расхода топлива при движении шасси в условиях береговых зон при разных условиях движения. Решение данной задачи рассмотрено на примере регулирования потоков мощности в трансмиссии для многофункционального вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией (ГОТ).

Основные уравнения для расчета параметров движения машин с ГОТ подробно рассмотрены в работах Бахмутова С.В., Курмаева Р.Х., Лепешкина А.В., Шухмана С.Б. и др. Анализ различных алгоритмов управления для трансмиссий с индивидуальным приводом рассмотрен в работах Горелова В.А., Котиева Г.О., Плиева И.А., и др. В качестве исследуемых были приняты следующие законы управления трансмиссией: индивидуальное регулирование внешнего скольжения колес борта по известной линейной скорости движения центра масс шасси; «высокопороговое» регулирование колес борта шасси – сигнал подается датчиком «сильного» колеса, т. е. находящегося в лучших условиях движения; регулирование буксования колес по средней угловой скорости колес борта шасси.

На основании математических моделей была разработана программа в MATLAB/Simulink, позволяющая выбрать регулировки трансмиссии таким образом, чтобы обеспечивать наибольшую эффективность и топливную экономичность при движении в условиях береговых зон. Для оценки энергетической эффективности используется показатель, равный отношению «полезной» работы силы тяги на колесах к «совершенной» работе подводимого к колесам крутящего момента. Так как в каждый момент времени оцениваемые параметры принимают разные значения, то рассматривался интегральный показатель за время движения машины по зависимостям:

– для эффективности $K_{\text{эф}}^{\text{инт}} = \int_T K_{\text{эф}} dt$, где $K_{\text{эф}}$ – коэффициент эффективности в каждый момент времени, T – общее время движения.

– для топливной экономичности $Q_{\text{эф}}^{\text{инт}} = \int_T Q dt$.

Получены диаграммы (Рисунок 9) относительного приращения коэффициента эффективности и относительного уменьшения расхода топлива при использовании системы управления ГОТ с разными алгоритмами управления.

Из диаграмм видно, что эффективность работы системы управления ГОТ тем выше, чем изменчивее характеристики опорных оснований, по которым едет машина. Поэтому можно сделать вывод: правильно выбранные алгоритмы управления позволяют повысить эффективность работы ГОТ до 10% и снизить расход топлива до 18%. На основании этого можно заключить, что существует необходимость применения индивидуального привода двигателей для шасси

комплексов мониторинга работающих в береговых зонах с целью повышения их подвижности.

Таким образом, выбрав варианты конструкции, для которых вероятность отсутствия потери подвижности будет минимальна, определившись с алгоритмами распределения потоков мощности по двигателям, обеспечивающим наибольшую эффективность и наименьший расход топлива, можно сравнить выбранные конструкции по условию обеспечения наибольшего времени автономной работы или расхода топлива. Этот показатель особенно важен для ПКМ автономного движения.

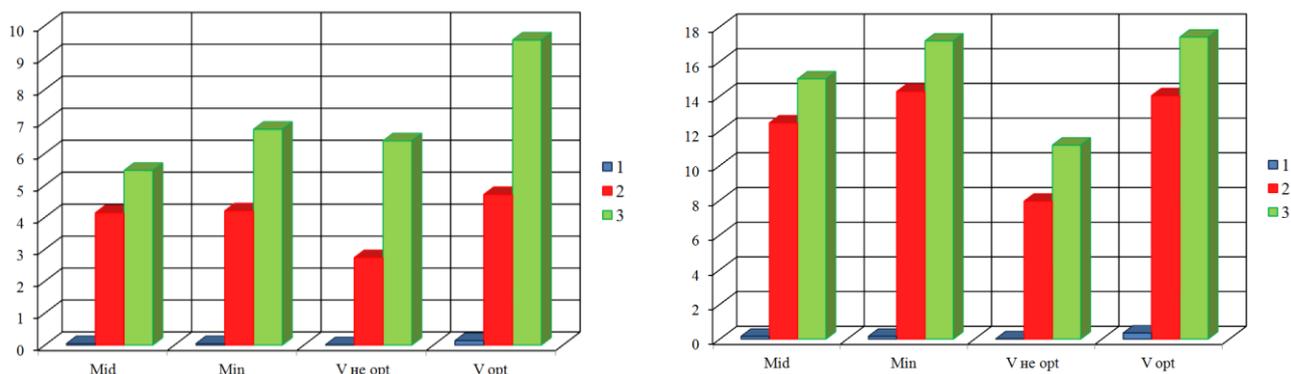


Рисунок 9.

Диаграммы относительных изменений приращения коэффициента эффективности (слева) и уменьшения расхода топлива (справа) для разных условий движения: 1 – для опорной поверхности с высокими сцепными свойствами и переездом на участок с низким сцеплением, 2 – опорной поверхности с высокими сцепными свойствами с чередованием участков с низким сцеплением, 3 – для опорного основания типа «микст»

Одним из способов, позволяющим решать поставленные задачи, является имитационное моделирование в программных комплексах, таких как Adams, Универсальный механизм и др. На рисунке 10 показана блок-схема методики моделирования динамики ПКМ и расчета эффективности по условию минимального расхода топлива (наибольшего пробега) при случайных условиях задания движения в береговых зонах, при выбранных рациональных параметрах шасси, обеспечивающих движение без потери подвижности, и при выбранных алгоритмах управления распределения мощности по двигателям.

Расчет для колесного и гусеничного вариантов шасси ПКМ показал, что расход топлива при одном и том же пробеге со скоростями 10 км/ч (обусловлены спецификой работы ПКМ) для первого варианта на 17% меньше для песчано-гравийного и песчаного опорных оснований.

Таким образом, при правильно выбранных конструкционных параметрах шасси ПКМ колесный вариант будет предпочтительнее с точки зрения расхода топлива при движении по песчаным и песчано-гравийным опорным основаниям береговой зоны.

При движении ПКМ в зимний период по снежному полотну пути необходимо учитывать то, что параметры снега меняются значительно на протяжении всего периода. Поэтому рассмотрим более подробно методику расчета эффективности специальных шасси по снежному полотну пути с учетом

изменчивости характеристик в течение зимнего периода. Для расчета проходимости машин целесообразно использовать подход, описанный в работах профессора Барахтанова Л.В. Совместное рассмотрение зависимости запаса силы тяги от высоты снега и тяговой характеристики машины позволяет построить поверхность проходимости в зависимости от высоты снега и скорости движения машины.

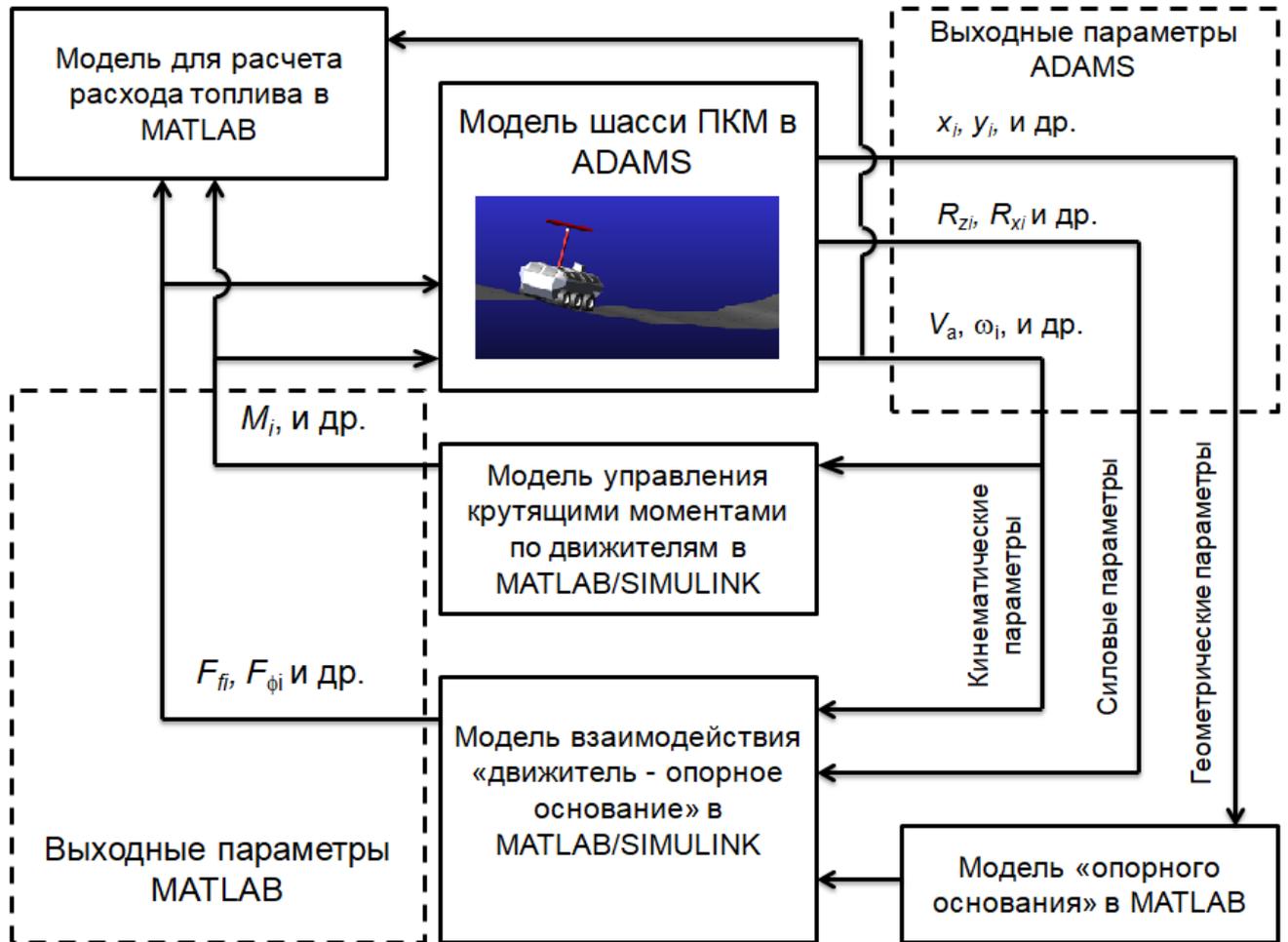


Рисунок 10.

Блок-схема методики моделирования динамики ПКМ

Для расчета тяговой силы и сил сопротивления нужно знать нормальные и сдвиговые напряжения, наиболее удобной математической моделью для снежного полотна пути являются зависимости:

$$q = h\gamma(1 - hh_{\max}^{-1})^{-1},$$

$$\tau = 0,8e^{-K_1\alpha} [c_0A + Bqtg\varphi_0].$$

Для расчета сил, возникающих при движении колесной машины по снегу, целесообразно использовать методику расчета, предложенную Беляковым В.В., для гусеничных машин – Барахтановым Л.В. Рассмотрев аналитические зависимости для расчета сил сопротивления, сцепления, запаса силы тяги, тяговой силы и зная параметры снежного покрова и параметры машины, можно оценить эффективность движения машины в течение зимнего периода.

Для расчета проходимости, подвижности и эффективности шасси ПКМ по снегу в стохастической постановке для начала необходимо задаться параметрами снега в каждый момент времени. Для описания наступления совместного события, а именно сочетания всех возможных значений высоты и плотности необходимо ввести матрицу состояний снежного покрова размерностью $n \times n$, где ij -й элемент представлен в виде $[\rho_i, H_j, p(\rho H)_{ij}]$ (ρ_i – плотность i -го элемента; H_j – высота j -го элемента, $p(\rho H)_{ij}$ – вероятность сочетания ρ_i и H_j , определяемая как произведение вероятностей соответствующих элементов). Задаваясь параметрами машины, исследуют возможность ее движения и силовые факторы. Принципиальная блок-схема приведена на Рисунке 11.

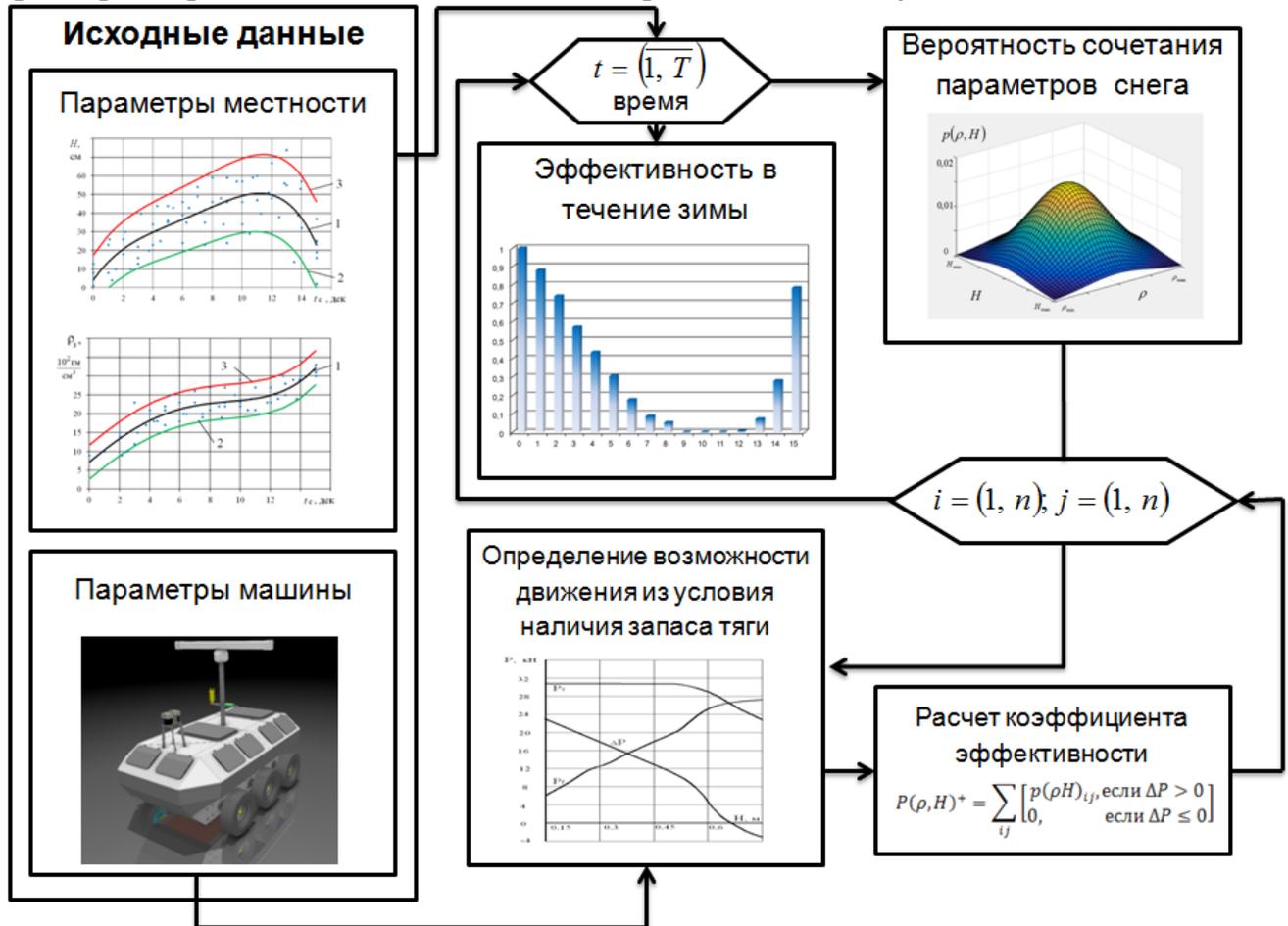


Рисунок 11.

Блок-схема методики расчета эффективности ПКМ по снежному полотну пути с учетом изменчивости характеристик в течение зимнего периода

Критерий по потере подвижности можно определить как вероятность возможного времени движения шасси в течение зимнего времени без потери проходимости: $K_{TA} = \sum_{t=0}^T \frac{[P(\rho, H)^+]_i}{T+1}$, где $[P(\rho, H)^+]_i$ – накопленная вероятность в момент времени t , определяется исходя из возможности движения с заданными параметрами ρ_i и H_j . Фактически можно определить из следующих соображений:

$$P(\rho, H)^+ = \sum_{ij} \begin{cases} p(\rho H)_{ij}, & \text{если } \Delta P > 0 \\ 0, & \text{если } \Delta P \leq 0 \end{cases},$$

где ΔP – запас силы тяги.

В соответствии с предложенной методикой были проведены расчеты для ПКМ на колесном и гусеничном ходу на прилегающих территориях берега залива Терпения о. Сахалин.

Анализ показал, что его эффективность с точки зрения возможности передвижения в зимнее время составляет для ПКМ с колесным двигателем $K_{ТА} = 0,34$, с гусеничным – $K_{ТА} = 0,70$. Вероятность передвижения по декадам представлена на Рисунке 12.

Материалы данной и предыдущих глав позволили разработать метод проектирования комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих безопасность социально-экономической, экологической и хозяйственной деятельности на приморских (береговых) территориях и прилегающих акваториях. Блок-схема метода показана на Рисунке 13.

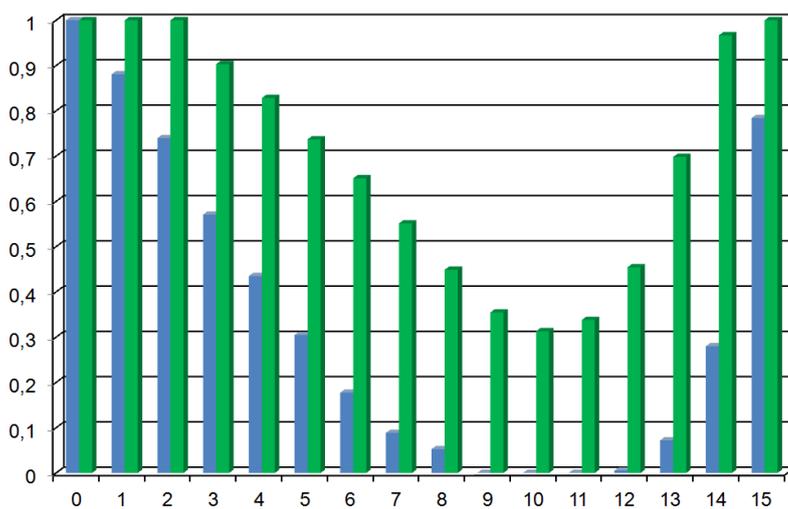


Рисунок 12.

Вероятность передвижения по декадам ПКМ с колесным гусеничным двигателями

Данный метод содержит следующие разделы. На основании потребности в обеспечении безопасности в той или иной деятельности (рассмотрено в главе 1) формируются требования к месту и времени мониторинга и к исследовательскому оборудованию.

Зная место и время проведения мониторинга, определяют тип поверхности, на которой будет работать исследовательский комплекс. Это может быть либо песчано-гравийное опорное основание (рассмотрено в главе 2), либо снежное полотно пути (рассмотрено в главе 3). При необходимости проводят дополнительные замеры характеристик берега. Требования к оборудованию дают данные по необходимым габаритам шасси и массе перевозимого груза. Это позволит определить основные параметры шасси на основании регрессионных уравнений соотношения параметров машин (рассмотрено в главе 4).

После выбора исходных данных производят анализ конструкций с точки зрения выбора рациональных параметров конструкции для заданных условий эксплуатации (рассмотрено в главе 5). Сначала оценивают конструкцию с точки зрения отсутствия потери проходимости и выбирают приемлемые варианты. Далее производят оценку и выбор алгоритмов управления распределения потоков мощности по двигателям. Используя полученные данные, оценивают возможности времени автономного движения. При этом выбирают машину с наименьшим расходом топлива. Далее оценивают подвижность вариантов шасси

ПКМ по критерию вероятности возможного времени движения шасси в течение зимнего времени без потери проходимости.

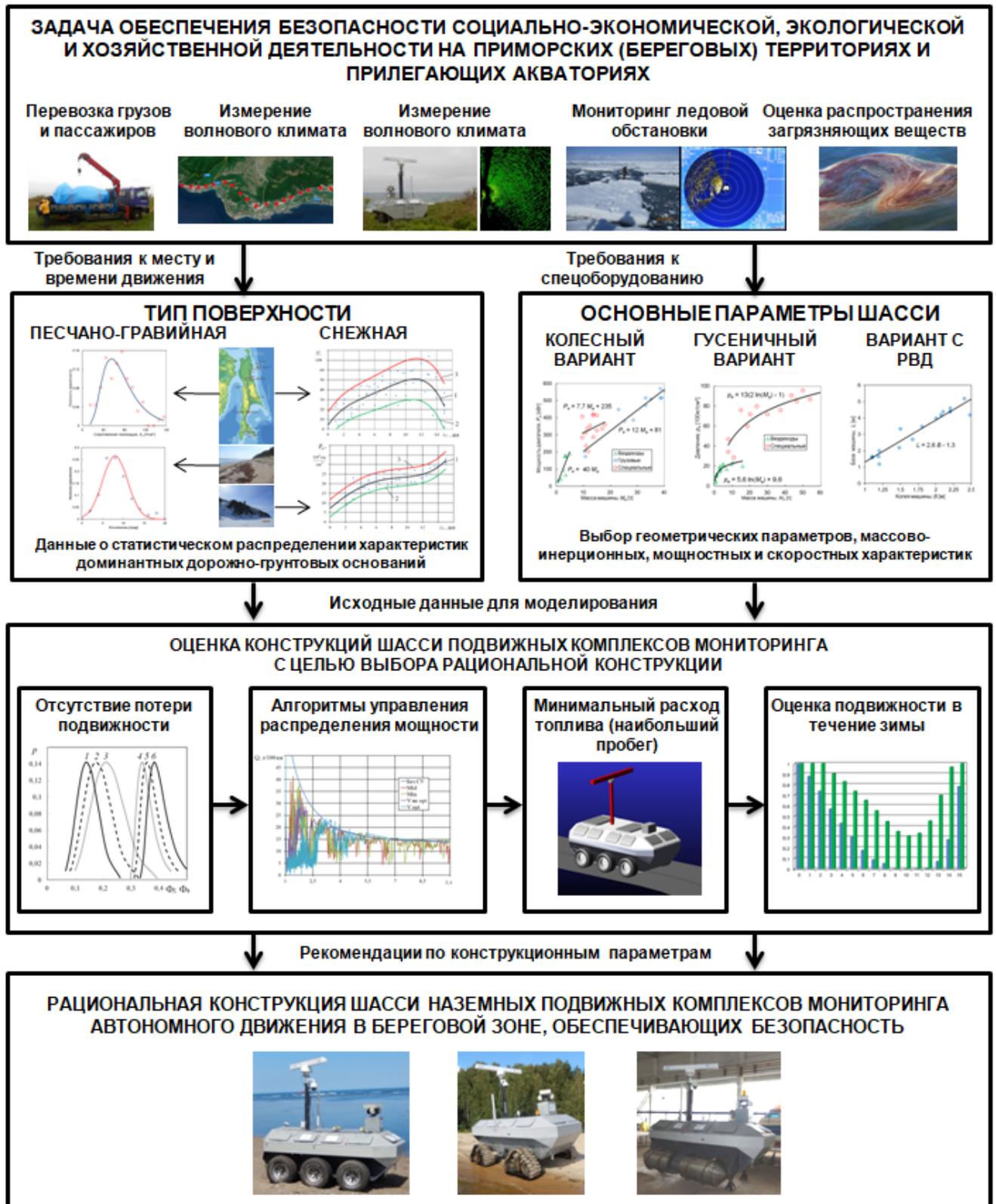


Рисунок 13.

Блок-схема метода проектирования шасси подвижных комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях

Таким образом, указанная последовательность действий позволяет дать рекомендации к рациональным конструкциям шасси подвижных комплексов мониторинга, работающих в условиях береговых зон и обеспечивающих социально-экономическую и экологическую безопасность, а также хозяйственную деятельность на береговых территориях и прилегающих акваториях.

В соответствие с предложенным методом были разработаны различные транспортно-технологические машины и мобильные робототехнические комплексы, в том числе автономный мобильный робототехнический комплекс (АМРК) для мониторинга прибрежных зон. В мае-июне 2016 г. на побережье о. Сахалин были проведены экспериментальные исследования АМРК, которые позволили оценить эффективность принятых технических решений, алгоритмов функционирования подвижных комплексов мониторинга в береговых зонах.

Проведенные экспериментальные исследования по замерам сил сопротивления движения и силы тяги позволяют сделать вывод, что разброс измеренных значений составил не более 10%. При этом при анализе отклонений обобщенных функций сопротивления и сцепления, полученных экспериментально, от средних значений, полученных теоретически, составляют не более 13%, а сами значения лежат в интервале от 5 до 95% вероятностей.

Результаты и выводы

1. Разработан метод проектирования шасси подвижных комплексов мониторинга береговых зон для обеспечения социально-экономической и экологической безопасности, а также хозяйственной деятельности на береговых территориях и прилегающих акваториях. Данный метод основан на результатах проведенного анализа существующих технических решений комплексов мониторинга береговых зон, методов создания высокоподвижных транспортно-технологических систем, а также разработанных научно-технических решений.

2. Разработана классификация трасс в береговых зонах как полотна пути для транспортно-технологических машин. Обоснованы классификационные признаки береговых зон, связанные с геологией, теорией движения транспортных средств, с размерами водного объекта, типом грунта, наличием растений, с учетом движения в зимнее время года, наличием подъезда и съезда к берегу, наличием и размером поперечного уклона берега, с постоянством характеристик движения, изменением влажности, учетом изменчивости характеристик во времени, с учетом формирования.

3. Установлено, что в береговых зонах доминантными опорными поверхностями являются песчано-гравийные и песчаные территории, а также снежное полотно пути в зимнее время года.

4. Разработана методика получения данных физико-механических и геометрических характеристиках опорных поверхностей в береговых зонах, отличительной особенностью которой является то, что нужно проводить замеры по линиям поперек береговой линии с расстоянием между замерами в 1 м. Это позволяет оценить характер изменения деформационных и сдвиговых

характеристик грунта по мере отдаления от воды, а также получить данные о поперечных уклонах берега.

5. Проведены полномасштабные экспериментальные исследования в районе м. Сбодный о. Сахалин с целью получения новых и уточнения существующих данных об условиях функционирования специальных шасси подвижных комплексов мониторинга для этих территорий.

5.1. Получены новые аналитические зависимости, характеризующие изменение сопротивления пенетрации для участков песчаного и песчано-гравийного пляжей. Доказано, что закон распределения сопротивления пенетрации на протяженных участках береговых зон подчиняется нормальному закону распределения. Установлено, что для песчано-гравийного опорного основания среднее значение сопротивления пенетрации составляет 75 Н/см^2 (параметры распределения $a = 4,2$, а $\sigma_{E_w} = 0,46$), для песчаного – 60 Н/см^2 (параметры распределения $a = 4$, а $\sigma_{E_w} = 0,42$). Данные зависимости используются для расчета основных параметров грунтов: модуля деформации; угла внутреннего трения; внутреннего сцепления, входящих в большинство разработанных на сегодняшний день математических моделей движения по мягким грунтам в береговых зонах.

5.2. Получены новые аналитические зависимости для определения продольных углов наклона береговых зон. Доказано, что закон распределения уклонов подчиняется нормальному закону распределения. Произведен учет влияния участков с растительностью в характер поперечных уклонов для песчано-гравийных участков пляжей. Установлено, что для песчано-гравийного пляжа средние значения уклонов составляют порядка 7° , со средним квадратичным отклонением $\sigma = 5^\circ$, для песчаного 4° и $\sigma = 2^\circ$.

5.3. Разработаны новые модели для описания микропрофиля береговых зон, позволяющие моделировать поверхности берега и прилегающих территорий с имеющимися дискретными препятствиями (камнями, валунами и пр.). Установлено, что зависимость числа неровностей от их протяженности, а также размеры между неровностями подчиняются показательному закону распределения. Разработана новая модель, учитывающая характер макропрофиля, сочетающего равнинные и холмистые участки дорог в береговых зонах.

6. Разработана методика обработки характеристик снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин и ПКМ, отличительной особенностью которой является то, что следует не учитывать при расчетах сроки, при которых наблюдается наличие нестабильного снежного покрова в начале и в конце зимнего периода.

7. Разработана новая статистическая модель изменения физико-механических и геометрических характеристик снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин, отличающаяся учетом пространственно-временных факторов и особенностей местности. Разработаны новые аналитические зависимости, описывающие стохастическое распределение высоты, плотности и продолжительности зимнего периода с учетом

пространственно-временных факторов и особенностей местности. Установлены эмпирические коэффициенты, учитывающие взаимосвязь высоты и плотности с продолжительностью зимнего периода, на примере береговых зон о. Сахалин. Приведены новые аналитические зависимости, учитывающие особенности формирования снежного покрова в зависимости от ландшафта местности. Установлены коэффициенты, учитывающие влияние типа ландшафта на высоту и плотность снега. Доказано влияние микропрофиля на изменение высоты снега на однотипном участке. Установлено, что отклонения от средних значений максимальной (минимальной) высоты снега: пропорциональны $1/2$ от высоты снега до значений 0,3 м; 0,15 м при высотах снега более 0,3 м. Разработаны аналитические зависимости, учитывающие взаимосвязь плотности и продолжительности залегания снежного покрова на жесткость, связность и угол внутреннего трения. Разработаны новые аналитические зависимости для связи плотности и влажности снега.

8. Разработана методика получения геометрических, массовых, мощностных и скоростных характеристик шасси под полезную нагрузку установленных средств мониторинга с целевым использованием в береговых зонах.

9. Разработана методика выбора рациональной и эффективной конструкции шасси ПКМ при движении в теплое время года.

9.1. Разработана методика оценки конструкционных параметров шасси ПКМ и расчета критерия эффективности с точки зрения отсутствия потери подвижности при движении по береговым зонам.

9.2. Установлено, что для базового шасси подвижного комплекса мониторинга с колесным двигателем со следующими параметрами: полная масса $M_a = 1000$ кг, радиус шины $R = 0,41$ м, ширина шины $B = 0,32$ м, деформация шины при нормальном давлении в шине $\Delta_{ш} = 0,05R$ м, количество движителей по борту для колесного $n_k = 3$, вероятности движения без потери проходимости составляет 99% для песчано-гравийного и 98% для песчаного опорных оснований береговой зоны. При этом при увеличении полной массы шасси на 20% вероятность потери проходимости увеличивается на 4% для песчано-гравийного опорного основания (при увеличении массы на 50% – на 14%) и на 9% для песчаного опорного основания (при увеличении массы на 50% – на 25%). Снижение массы на 20% обеспечивает полное движение шасси без потери проходимости. Уменьшение радиуса на 20% приводит к снижению проходимости на 6% для песчано-гравийного опорного основания и на 13% для песчаного опорного основания, увеличение на 20% обеспечивает полное движение шасси без потери проходимости. Уменьшение ширины шины на 20% приводит к снижению проходимости на 8% для песчано-гравийного опорного основания и на 15% для песчаного опорного основания, увеличение на 20% обеспечивает полное движение шасси без потери проходимости. Уменьшение деформации шин на 20% приводит к снижению проходимости на 3% для песчано-гравийного опорного основания и на 5% для песчаного опорного основания, увеличение на 20% обеспечивает полное движение шасси без потери

проходимости. Для шасси подвижного комплекса мониторинга с гусенично-модульным двигателем со следующими параметрами: полная масса $M_a = 1000$ кг, ширина гусеницы $B = 0,4$ м, длина контакта гусеницы $L = 0,8$ м, количество двигателей по борту $n_r = 2$ обеспечивается полное движение шасси без потери проходимости.

9.3. Доказана необходимость применения индивидуального привода двигателей для шасси комплексов мониторинга, работающих в береговых зонах. Посредством имитационной модели движения в среде Matlab/Simulink проведен анализ эффективности и топливной экономичности многофункционального вездеходного транспортного средства с ГОТ при разных режимах управления распределения мощности в трансмиссии. Установлено, что эффективность работы системы управления ГОТ тем выше, чем изменчивее характеристики опорных оснований, по которым едет машина. Для ступенчатого изменения параметров полотна пути, характерных для случая движения по поверхности с высокими сцепными свойствами и переездом на участок с низким сцеплением, повышение эффективности и снижение расхода топлива составляют десятки доли процента. Для случая движения по поверхности с высокими сцепными свойствами с чередованием участков с низким сцеплением приращение эффективности составляет 3-5 %, а расход топлива снижается на 8-14 % в зависимости от выбранной схемы регулирования. Для случая движения по поверхности типа «микст» приращение эффективности составляет 5-10 %, а расход топлива снижается на 11-18 % в зависимости от выбранной схемы регулирования.

9.4. Разработана методика моделирования динамики шасси ПКМ и расчета эффективности по условию минимального расхода топлива (наибольшего пробега) при выбранных рациональных параметрах шасси, обеспечивающих движение без потери подвижности, и при выбранных алгоритмах управления распределения мощности по двигателям, отличающаяся тем, что определяется вероятность движения без потери проходимости с учетом новых статистических моделей опорных оснований береговой зоны.

9.5. Установлено, что для колесного и гусеничного вариантов шасси ПКМ расход топлива при одном и том же пробеге со скоростями 10 км/ч (обусловлены спецификой работы ПКМ) для первого варианта на 17% меньше для песчано-гравийного и песчаного опорных оснований. Колесный вариант будет предпочтительнее с точки зрения расхода при движении по песчаным и песчано-гравийным опорным основаниям береговой зоны.

10. Разработана методика оценки подвижности и эффективности специальных шасси по снежному полотну пути с учетом изменчивости характеристик в течение зимнего периода.

10.1. Установлено, что для ПКМ с колесным двигателем эффективность с точки зрения возможности передвижения в зимнее время составляет 0,34. При этом 25% зимнего периода (в рассмотренных условиях при средней максимальной высоте снега порядка 0,85 м) возможность передвижения шасси с колесным двигателем составляет менее 5%.

10.2. Доказано, что в момент интенсивного нарастания снежного покрова средняя предельная высота снега составляет $2/3$ радиуса колеса, в момент медленного нарастания высоты снега предельная высота составляет порядка $1/2$ радиуса колеса, в дальнейшем предельная преодолеваемая высота снега остается такой же, но определяющим является потеря проходимости из-за вклада от сопротивления днища, поэтому целесообразно увеличивать дорожный просвет.

10.3. Установлено, что для ПКМ на гусеничном движителе эффективность с точки зрения возможности передвижения без потери проходимости в зимнее время составляет 0,7. При этом, если увеличить массу шасси в два раза, то эффективность с точки зрения возможности передвижения в зимнее время составляет 0,64.

11. На основании сравнительной оценки теоретических и экспериментальных данных доказано, что разработанные методики и математические модели могут быть использованы при разработке ПКМ береговых зон. В результате замера сил сопротивления движения и силы тяги разброс измеренных значений составил не более 10%. При этом отклонения полученных экспериментально обобщенных сил сопротивления и сцепления от средних значений, полученных теоретически, составляют не более 13% на всей совокупности основных поверхностей береговых зон.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Макаров В.С. Разработка научно обоснованных технических решений по созданию подвижных комплексов мониторинга береговых зон // Труды НГТУ. 2017. № 3. С. 92-98. (0,69 п.л.).
2. Макаров В.С. Статистический анализ характеристик снежного покрова // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013) (0,44 п.л.).
3. Характер изменения снежного покрова как полотна пути с учетом неравномерности его залегания на местности / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 4. URL: <http://www.science-education.ru/110-9696> (дата обращения: 23.07.2013). (0,38 п.л./ 0,3 п.л.).
4. Макаров В.С. Многоуровневая модель снега как полотна пути для транспортно-технологических машин на примере территории Российской Федерации / В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков. Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 270-276. (0,44 п.л./ 0,4 п.л.).
5. Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. URL: www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 29.08.2012). (0,5 п.л./ 0,2 п.л.).
6. Метод повышения эффективности движения колесных машин по снегу путем выбора рациональных параметров движителей / В.С. Макаров [и др.] // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 10. - С. 1203-1208. (0,38 п.л./ 0,13 п.л.).

7. Математическая модель поверхности дорожно-грунтовых оснований, насыщенных характерными повторяющимися дискретными препятствиями / В.С. Макаров [и др.] Современные проблемы науки и образования. 2013. № 5. URL: <http://www.science-education.ru/111-10472> (дата обращения: 25.10.2013) . (0,5 п.л./ 0,45 п.л.).
8. Новые тенденции в обследовании цунами / В.С. Макаров [и др.] Экологические системы и приборы. 2014. № 12. С. 40-51. (0,75 п.л./ 0,38 п.л.).
9. Обоснование рациональной конструкции вездеходного транспортного средства с колесной формулой 8x8 / В.С. Макаров [и др.] Вестник машиностроения. 2015. № 6. С. 3-5. (0,19 п.л./ 0,15 п.л.).
10. Оценка энергоэффективности вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией / В.С. Макаров [и др.] Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2016. № 1. С. 2-8. (0,44 п.л./ 0,35 п.л.).
11. Исследования прибрежных районов охотского моря с использованием наземного мобильного робота / Макаров [и др.]. Экологические системы и приборы. 2016. № 8. С. 11-17. (0,44 п.л./ 0,3 п.л.).
12. Разработка шасси многоосного вездеходного транспортного средства с гидрообъемной трансмиссией / В.С. Макаров [и др.] Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2016. №10. С. 39-48. (0,63 п.л./ 0,5 п.л.).
13. Обеспечение экологической безопасности движения вездеходных машин на местности / В.С. Макаров [и др.] Экологические системы и приборы. 2016. № 12. С. 24-35. (0,75 п.л./ 0,5 п.л.).
14. Makarov V. Prediction of all-terrain vehicles mobility in snowscape scenes / V. Makarov, D. Zeziulin, V. Belyakov. 18th International Conference of the International Society for Terrain-Vehicle Systems, ISTVS 2014. (0,56 п.л./ 0,45 п.л.).
15. Autonomous Robotic System for Coastal Monitoring / V. Makarov [et. al.] The Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 2015), 2015. P.933-943. (0,69 п.л./ 0,45 п.л.).
16. Multifunctional vehicle for coastal areas / V. Makarov [et. al.] //The Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 2015), 2015. P.945-951. (0,44 п.л./ 0,3 п.л.).
17. Methods of tsunami detection and of post-tsunami surveys / V. Makarov [et. al.] Science of Tsunami Hazards. - 2016. - V. 35. - № 2. - P. 68-83. (1 п.л./ 0,5 п.л.).
18. Unmanned Ground Vehicles for Coastal Monitoring / V. Makarov [et. al.] International Journal of Imaging and Robotics. 2017. V. 17. P. 64-75. (0,75 п.л./ 0,55 п.л.).
19. Autonomous Mobile Robotic System for Environment Monitoring in a Coastal Zone // V.S. Makarov [et. al.] Procedia Computer Science. 2017. 103. P. 459 – 465. (0,44 п.л./ 0,19 п.л.).
20. Coastal monitoring of the Okhotsk Sea using an autonomous mobile robot / V. Makarov [et. al.] Science of Tsunami Hazards. 2017. V.36. № 1. P. 1-12. (0,75 п.л./ 0,5 п.л.).