

# СИМУЛЯТОРЫ БЕСПИЛОТНОГО НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТА, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ПО ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ<sup>#</sup>

М. И. Макаров\*, Н. А. Коргин\*\*, А. А. Пыжьянов\*\*\*

\*\*\*Иститут проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
\*Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет), г. Москва

\*✉ maxim.i.makarov@gmail.com, \*\*✉ nkorgin@ipu.ru, \*\*\*✉ ipu@isko.moe

**Аннотация.** Рассматриваются популярные симуляторы беспилотных транспортных средств с поддержкой пересеченной местности: Gazebo, CARLA, AirSim, NVIDIA Isaac Sim и Webots. Описаны их основные возможности, связанные с моделированием рельефа, физикой движения, поддержкой датчиков и погодных условий. Особое внимание уделено созданию реалистичных сцен пересеченной местности, сложности импорта реальных карт и взаимодействию с другими программными платформами, такими как Robot Operating System (ROS) и системы ИИ. Проанализированы основные минусы каждого симулятора: трудоемкость создания детализированных моделей рельефа и транспортных средств, высокая сложность интеграции реальных карт и зависимость от характеристик компьютерного оборудования. Также отмечается сложность взаимодействия с различным программным обеспечением и требования к знаниям в области 3D-моделирования. Симуляторы Gazebo и Webots выделяются хорошей интеграцией с ROS, но требуют больше усилий для работы с пересеченной местностью. CARLA и AirSim обеспечивают высококачественную визуализацию, но имеют более высокие требования к оборудованию и навыкам пользователя для создания ландшафтов. NVIDIA Isaac Sim выделяется поддержкой симуляций с использованием ИИ, но требует значительных ресурсов. Представлен опыт авторов в части отображения траекторий и ориентации транспортного средства в некоторых симуляторах.

**Ключевые слова:** беспилотные автомобили, симуляторы, пересеченная местность, гусеничные платформы.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка и тестирование беспилотных транспортных средств являются одними из наиболее сложных и актуальных задач современной робототехники и автомобильной промышленности. Для обеспечения безопасности и надежности автономных систем необходимо проводить масштабные испытания в разнообразных условиях, включая сложные сценарии взаимодействия с окружающей средой и другими участниками дорожного движе-

ния. Однако проведение таких тестов в реальном мире сопряжено с рядом трудностей, включая высокие затраты, риски для безопасности и ограниченные возможности для повторяемости экспериментов [1–3]. Симуляторы давно стали важным инструментом в области инженерии и компьютерных наук. Первые полноценные симуляторы транспортных средств появились еще в 1990-х гг. и были узкопрофильными, направленными на изучение конкретных аспектов и характеристик движения автомобилей. С развитием вычислительных мощностей и алгоритмов моделирования симуляторы постепенно становились все более сложными и реалистичными, позволяя воспроизводить не только дорожные условия, но и взаимодействие с

<sup>#</sup> Исследования Коргина Н. А. частично выполнены за счет гранта Российского научного фонда №23-29-00681, <https://rscf.ru/project/23-29-00681>.

другими транспортными средствами, пешеходами и инфраструктурой.

В последние годы благодаря развитию сообществ пользователей программного обеспечения с открытым исходным кодом (англ. *open source*, OS) симуляторы стали еще более доступными и гибкими. Такие платформы, как CARLA, Gazebo и AirSim, получили широкое распространение благодаря открытым исходным кодам и активной поддержке сообществом разработчиков. OS-симуляторы позволяют исследователям и инженерам настраивать и модифицировать среду симуляции в соответствии с конкретными требованиями их проектов, что существенно ускоряет процессы разработки и тестирования. До широкого развития OS-симуляторов некоторые исследователи использовали релевантные компьютерные игры, такие как GTA [4].

Цель данной статьи – представить обзор современных симуляторов, используемых для разработки и тестирования беспилотного транспорта, с особым акцентом на OS-решения, поддерживающие моделирование движения по пересеченной местности. В работе будут рассмотрены различные типы симуляторов и области их применения в контексте задач беспилотного движения. В частности, для задач моделирования движения уникальных внедорожных транспортных платформ с электрическим приводом разной компоновки – колесно-гусеничной и лыже-гусеничной (рис. 1). В настоящее время в рамках апробации элементов концепции распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях [5] уже собран значительный массив данных для

анализа моделей движения подобных подвижных платформ по пересеченной местности. На их основе в дальнейшем планируется синтезировать алгоритмы управления для автономного движения с помощью методов, предложенных в статье [6] для планирования двумерных траекторий, путем адаптации их к пересеченной местности.

## 1. ТИПЫ СИМУЛЯТОРОВ

Современные системы автопилота представляют собой чрезвычайно сложные комплексы, состоящие из множества взаимосвязанных модулей, каждый из которых выполняет определенные функции. Эти системы включают в себя модули локализации, определения и отслеживания препятствий, анализа транспортного потока, планирования маршрутов и следования по заданному пути. Каждый из этих модулей требует отдельного подхода к разработке, тестированию и оптимизации, что делает использование симуляторов неотъемлемой частью процесса создания и совершенствования автономных транспортных средств. Для эффективного моделирования и тестирования различных аспектов работы системы автопилота используются разнообразные типы симуляторов, каждый из которых фокусируется на конкретных задачах. Симуляторы транспортного потока позволяют моделировать и анализировать взаимодействие транспортных средств в городской и пригородной среде, симуляторы динамики транспортного средства сосредоточены на физическом поведении автомобиля, а симуляторы сенсоров и восприятия – на моделировании данных с камер, лидаров и других сенсоров. Кроме того, существуют симуляторы для создания сложных сценариев движе-

*а**б*

Рис. 1. Гусеничные платформы: *а* – колесно-гусеничные, *б* – лыже-гусеничные



ния, которые позволяют тестировать алгоритмы принятия решений в различных дорожных ситуациях.

В этом разделе будут рассмотрены основные типы симуляторов, используемых для разработки и тестирования систем автопилота, их ключевые характеристики, а также примеры наиболее популярных решений в каждой категории.

### 1.1. Симуляторы транспортного потока

Симуляторы транспортного потока предназначены для моделирования движения множества транспортных средств на дорогах, в том числе взаимодействий между ними, с целью анализа и оптимизации транспортных систем. Эти симуляторы помогают исследовать поведение транспортных потоков, влияние различных сценариев на пробки, эффективность многообразия дорожных инфраструктур, а также поведение участников движения в различных ситуациях [7].

#### Основные характеристики.

- Моделирование движения большого количества транспортных средств.
- Поддержка различных типов дорожных сетей и сценариев.
- Возможность интеграции с системами управления транспортом (например, со светофорами).
- Анализ и визуализация транспортных потоков и заторов.

#### Примеры симуляторов.

- SUMO (Simulation of Urban Mobility) – один из наиболее распространенных симуляторов для моделирования транспортного потока в городской среде. Поддерживает моделирование больших городских сетей и интеграцию с другими симуляторами [8].
- AIMSUN – коммерческий симулятор, используемый для анализа и управления транспортными потоками, с поддержкой сложных моделей взаимодействий между транспортными средствами [9].

### 1.2. Симуляторы динамики транспортного средства

Эти симуляторы сосредоточены на моделировании динамических характеристик отдельных транспортных средств. Они используются для анализа поведения автомобиля в различных условиях, таких как ускорение, торможение, управление на скользких поверхностях и взаимодействие с неровностями дороги. Подобные симуляторы важны для разработки и тестирования систем управления, таких как системы стабилизации и автономного управления [10].

#### Основные характеристики.

- Высокоточное моделирование физических процессов, таких как динамика шасси, подвески, двигателя и тормозной системы.
- Моделирование взаимодействия транспортного средства с дорожным покрытием.
- Поддержка различных типов транспортных средств, включая легковые автомобили, грузовики и мотоциклы.
- Возможность симуляции экстремальных условий, таких как аварийные ситуации.

#### Примеры симуляторов.

- CarMaker – индустриальный стандарт для моделирования динамики транспортных средств. Поддерживает тестирование систем автономного управления и ассистирования водителю (англ. *advanced driver-assistance systems*, ADAS) [11].
- TruckSim – специализированный симулятор для моделирования динамики тяжелых транспортных средств, таких как грузовики и автобусы [12].

### 1.3. Симуляторы сенсоров и восприятия

Эти симуляторы сосредоточены на моделировании используемых в автономных транспортных средствах сенсоров, таких как камеры, лидары, радары и ультразвуковые датчики. Основная цель таких симуляторов – обеспечить реалистичное воспроизведение данных сенсоров, которые могут быть использованы для разработки и тестирования алгоритмов восприятия и принятия решений [13].

#### Основные характеристики.

- Реалистичное моделирование данных сенсоров в различных условиях окружающей среды.
- Поддержка множества типов сенсоров и их комбинаций.
- Возможность интеграции с алгоритмами обработки изображений и сигналов.
- Тестирование и отладка систем восприятия в сложных сценариях, таких как плохие погодные условия или плохая освещенность.

#### Примеры симуляторов [14].

- CARLA – предоставляет широкий набор сенсоров и моделей для тестирования систем восприятия в городских условиях.
- AirSim – симулятор от Microsoft, который поддерживает реалистичное моделирование данных сенсоров и используется для разработки автономных дронов и наземных транспортных средств.

### 1.4. Комплексные симуляторы

Эти симуляторы предназначены для создания и тестирования сложных сценариев движения, в ко-

торых участвуют автономные транспортные средства. Они позволяют моделировать различные дорожные ситуации и взаимодействие автономного транспортного средства с другими участниками дорожного движения, что особенно важно для разработки систем принятия решений. Как правило, в них уже заложена та или иная реализация других типов симуляторов или имеется возможность интеграции сторонних решений [15, 16].

#### **Основные характеристики.**

- Поддержка создания сложных сценариев с участием множества транспортных средств и пешеходов.
- Интеграция с алгоритмами принятия решений и управления движением.
- Возможность моделирования редких и экстремальных ситуаций, таких как аварии или внезапные препятствия.
- Анализ и визуализация принятых решений и их последствий.

#### **Примеры симуляторов.**

- CARLA – гибкая и расширяемая платформа для обучения, тестирования и проверки систем автономного вождения; созданная на основе визуализатора Unreal Engine, CARLA предлагает высокоточные среды, реалистичную физику и полный набор датчиков, включая камеры, лидары (англ. LiDAR) и радары (англ. RADAR) [17].
- PreScan – используется для разработки и тестирования систем ADAS и автономных транспортных средств, включая моделирование сложных сценариев и дорожных ситуаций.
- LGSVL Simulator – поддерживает моделирование различных сценариев и интеграцию с платформами для разработки автономного управления, такими как Apollo и Autoware [14].
- AutoDRIVE Simulator – высокоточная платформа моделирования, разработанная с использованием игрового визуализатора Unity; включает в себя модель транспортного средства, оснащенную комплексным набором датчиков и приводов, что облегчает исследования и обучение в области технологий автономных транспортных средств [18].

## **2. РАБОТА СО СЦЕНАМИ ПЕРЕСЕЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ**

Задачи, которые ставят перед современными беспилотными транспортными средствами, требуют от них движения не только по ровным, асфальтированным и размеченным дорогам, но и по пересеченной местности с различными типами покрытий, начиная от грунтовых и заканчивая снежным покровом [19]. Для отработки алгоритмов управ-

ления, навигации и локализации требуется наличие соответствующего симулятора, способного реализовывать движение по сложному рельефу и представлять набор типичных для такой местности препятствий. Поскольку применение беспилотных транспортных средств пока не так распространено, то и количество соответствующих симуляторов существенно ограничено. Среди дополнительных требований, предъявляемых к таким симуляторам по сравнению с симуляторами, включающими дороги с асфальтовым покрытием, можно выделить следующие:

- Физическая модель местности. Поддержка рельефов с неровностями, различными типами грунта (гравий, песок, камни), водой и другими природными препятствиями; это позволяет тестировать, как беспилотник будет реагировать на скользкие или рыхлые поверхности, а также на подъемы и спуски.
- Детализированные модели транспортных средств. Важно учитывать особенности различных видов транспорта, будь то автономные машины, гусеничные транспортные средства, роботы на колесах или даже дроны, способные передвигаться по труднопроходимой местности; симуляторы должны точно моделировать подвеску, сцепление с дорогой, динамометрию и другие важные аспекты;
- Окружающая среда. Симуляторы должны включать не только разнообразные рельефы, но и имитировать влияние погодных условий, таких как дождь, снег, туман и ветер, которые могут сильно отразиться на управлении транспортным средством; в рассмотренных ниже симуляторах различные метеоусловия влияют только на визуальный ряд, который может быть получен сенсорами; влияние этих факторов на сцепление с дорожным полотном, если это возможно, явно отображается в характеристиках симулятора.

Далее будут более подробно рассмотрены различные симуляторы, которые могут использоваться для имитации движения по пересеченной местности.

### **2.1. Gazebo**

Это один из самых популярных симуляторов роботов и беспилотных транспортных средств, поддерживающий реалистичную физику и высокую степень возможности адаптирования под индивидуальные нужды (кастомизации). Благодаря открытому исходному коду используется в исследовательских и образовательных проектах, а также в коммерческих разработках [20, 21]. Это открытая платформа, которая позволяет интегрировать раз-



личные физические визуализаторы, такие как ODE, Bullet, Simbody и др.

#### Плюсы:

- Реалистичная физика. Gazebo поддерживает сложные рельефы с неровностями, холмами, скалами и даже водой, что позволяет моделировать сценарии движения автономных транспортных средств по пересеченной местности.

- Моделирование сцепления и подвески. Важно для гусеничных или колесных транспортных средств, работающих на пересеченной местности; можно точно симулировать, как транспортное средство будет вести себя на сложном рельефе.

- Поддержка различных типов поверхности. Симулятор может моделировать разные типы грунта, включая скользкие или рыхлые поверхности, такие как песок, гравий, грязь.

- Окружающая среда. Можно добавлять эффекты, такие как дождь, ветер, снег, которые влияют на условия движения по пересеченной местности.

- Интеграция с Robot Operating System (ROS). Gazebo активно используется в связке с ROS, что делает его удобным для разработки и тестирования автономных систем в реальных условиях.

#### Минусы:

- Создание сцен. Хотя Gazebo предоставляет инструменты для создания сцен, разработка детализированных пересеченных ландшафтов может оказаться трудоемкой. Пользователи часто сталкиваются с необходимостью вручную моделировать сложные элементы рельефа.

- Импорт карт. Автоматический импорт карт из реальных данных (например, спутниковых) возможен через дополнительные плагины, но это требует дополнительной настройки и не всегда может обеспечивать достаточную детализацию для сложных рельефов.

- Сложность создания моделей. Создание детализированных 3D-моделей транспортных средств требует знаний в области 3D-моделирования и физической симуляции. Сам процесс может быть сложным для тех, кто не знаком с такими инструментами.

- Интеграция с другими системами. Хотя Gazebo хорошо интегрируется с ROS, интеграция с другими фреймворками может требовать дополнительных усилий. Например, использование других физических визуализаторов или интерфейсов управления может быть ограниченным без ручной настройки.

**Сложность:** средняя. Gazebo ориентирован на исследователей, так что потребуется хорошее понимание работы с ROS и основ симуляции, чтобы создать и настроить сложные сцены.

## 2.2. CARLA

Это симулятор с открытым исходным кодом, разработанный для тестирования автономных транспортных средств в городских условиях [22]. Однако его можно адаптировать и для пересеченной местности, поскольку он предоставляет достаточные возможности для создания нестандартных ландшафтов [23].

#### Плюсы:

- Кастомизация среды. CARLA предоставляет инструменты для создания пользовательских карт, что позволяет строить сложные рельефы с пересеченной местностью.

- Поддержка реалистичной физики движения. CARLA может моделировать динамику автомобиля при движении по неровной местности, включая управление скоростью, сцеплением и устойчивостью.

- Возможность работы с различными типами поверхностей. Несмотря на ориентацию на городские условия, CARLA позволяет моделировать участки с травой, грязью, песком и другими типами поверхностей.

- Учет погодных условий. Возможна симуляция различных погодных условий, влияющих на сцепление и видимость.

#### Минусы.

- Создание сцен. CARLA предназначен в первую очередь для городских условий, и создание сцен пересеченной местности может потребовать ручной настройки. Встроенные карты не включают пересеченную местность, поэтому потребуется импортировать пользовательские карты и вручную настраивать рельефы.

- Импорт карт. Импорт реальных карт требует дополнительных инструментов и модулей, а также навыков работы с 3D-графикой и геопространственными данными. Поддержка пересеченной местности заявлена в новостной статье [24], однако никаких примеров или статей о применении этого функционала не было обнаружено, в результате чего адаптация под пересеченную местность оказывается усложнена.

- Сложность создания моделей. В CARLA уже есть готовые модели транспортных средств, но для создания уникальных моделей придется использовать сторонние инструменты, такие как Blender или Maya. Это может быть сложным, особенно если нужно детализировать подвеску и динамику движения.

- Интеграция с другим ПО. Хорошо интегрируется с Python API для сценариев, но взаимодействие с другими системами требует дополнитель-

ной настройки. Нет встроенной поддержки ROS, что может быть минусом для проектов на ROS.

**Сложность:** высокая для пересеченной местности. Потребуется значительные усилия для создания детализированных природных сцен и интеграции реальных карт.

### 2.3. AirSim

Это симулятор, разработанный Microsoft для дронов и наземных транспортных средств [25]. Его основное преимущество – интеграция с движком Unreal Engine, что позволяет создавать высокодетализированные 3D-сцены, включая пересеченную местность [26].

#### Плюсы:

- Высокая детализация местности. Благодаря использованию Unreal Engine AirSim может точно симулировать сложные рельефы с различными типами местности – от горных ландшафтов до густых лесов.

- Поддержка реалистичной физики движения. В AirSim можно моделировать различные типы транспортных средств, включая колесные и гусеничные платформы, что позволяет тестировать движение по сложной местности.

- Кастомизация датчиков. Симулятор предоставляет возможность моделировать различные датчики, такие как камеры, лидары и GPS, что особенно полезно для тестирования работы на пересеченной местности с затрудненным сигналом.

- Учет погодных условий и освещения. Можно моделировать различные погодные условия, такие как дождь, снег, туман, которые значительно усложняют навигацию на пересеченной местности.

#### Минусы:

- Создание сцен. Поскольку AirSim использует Unreal Engine, создание сцены требует работы с инструментами игрового движка. Несмотря на визуальную мощь, Unreal Engine имеет достаточно высокий порог вхождения для новичков. Создание сложных ландшафтов и окружений может занять много времени и требовать серьезных навыков в области 3D-моделирования.

- Импорт карт. В AirSim не предусмотрена прямая возможность для импорта реальных географических данных. Однако есть сторонние инструменты, которые можно использовать, но их настройка усложнена.

- Сложность создания моделей. Для создания детализированных моделей транспортных средств также придется использовать Unreal Engine или сторонние программы 3D-моделирования. Процесс интеграции новых моделей с физической симуляцией может быть трудоемким.

- Интеграция с другим ПО. AirSim предоставляет API для работы с Python и C++, но взаимодействие с ROS или другими системами потребует дополнительных усилий. Интеграция с другими фреймворками ограничена по сравнению с Gazebo.

**Сложность:** высокая. Несмотря на мощные возможности визуализации, сложность создания сцен и работы с картами из реальных данных делает AirSim более трудоемким для использования в академических или коммерческих проектах с пересеченной местностью.

### 2.4. NVIDIA Isaac Sim

Это платформа для симуляции роботов от NVIDIA, разработанная для поддержки сложных задач робототехники и автономного транспорта. Она использует возможности графического процессора (GPU) и позволяет моделировать сложные сценарии, включая пересеченную местность. Есть возможность реализации собственных расширений гибкими функциональными возможностями [27–29].

#### Плюсы:

- Фотореалистичная среда. Использование движка PhysX и GPU-акселерации позволяет точно симулировать физику движения транспортных средств по сложным рельефам и разнообразным поверхностям.

- Интеграция с реальными алгоритмами. Isaac Sim поддерживает интеграцию с алгоритмами глубокого обучения и планирования маршрутов, что позволяет моделировать и тестировать сложные сценарии на пересеченной местности.

- Поддержка различных типов роботов. Симулятор может моделировать как колесные транспортные средства, так и гусеничные роботы или дроны, что делает его универсальным для задач автономного передвижения на пересеченной местности.

- Датчики. Поддерживается симуляция сложных сенсорных систем, включая камеры, лидары и GPS, что помогает тестировать работу роботов в условиях пересеченной местности.

#### Минусы:

- Создание сцен. Хотя Isaac Sim предоставляет инструменты для создания сложных сцен, моделирование пересеченной местности потребует значительных усилий. Платформа ориентирована на высокопроизводительные вычисления с использованием GPU, что может усложнить разработку пользователям без мощного оборудования.

- Импорт карт. В Isaac Sim можно интегрировать модели реальных карт через 3D-моделирование, но процесс требует использования сторон-



них инструментов и может быть достаточно сложным, особенно для реалистичной симуляции рельефа и природных условий.

- Сложность создания моделей. Создание новых моделей транспортных средств и адаптация их к физике движения требует серьезной подготовки и знаний в области 3D-графики. Включение динамики подвески и сложных механизмов может быть сложным для непрофессионалов.

- Интеграция с другим ПО. Хорошо интегрируется с NVIDIA AI-инструментами, но для интеграции с ROS или другими автономными системами могут потребоваться дополнительные модули и настройки. Это может быть затруднительно для проектов, где требуется быстрая и легкая интеграция.

## 2.5. Webots

Это бесплатный симулятор роботов с открытым исходным кодом, который используется в образовательных и исследовательских целях [30, 31]. Он поддерживает широкий спектр роботизированных систем, включая беспилотные транспортные средства.

### Плюсы:

- Гибкость моделирования рельефов. В Webots можно создавать собственные модели сложной местности, включающие горы, холмы, каньоны и другие природные объекты.

- Поддержка различных транспортных средств. В Webots можно симулировать работу как колесных, так и гусеничных транспортных средств, что позволяет тестировать алгоритмы движения по сложной местности.

- Моделирование датчиков. Webots поддерживает широкий набор датчиков, что делает его пригодным для тестирования автономных систем на пересеченной местности с использованием камер, лидаров и GPS.

- Учет погодных условий. Можно моделировать различные погодные условия, такие как дождь и туман, которые влияют на видимость и сцепление.

### Минусы:

- Создание сцен. Webots обладает удобным интерфейсом для создания простых сцен, но если речь идет о сложной пересеченной местности, то придется вручную настраивать рельефы и поверхности, что может служить ограничением по сравнению с другими более продвинутыми симуляторами.

- Импорт карт. Импорт реальных карт не поддерживается напрямую, и придется использовать сторонние инструменты для создания сложных

рельефов и местности. Моделирование пересеченной местности будет осуществляться значительно сложнее по сравнению с более мощными симуляторами.

- Сложность создания моделей. Webots имеет библиотеку стандартных роботов, но создание собственных моделей требует использования сторонних инструментов для 3D-моделирования. Встроенные инструменты моделирования ограничены, что может осложнить работу с уникальными транспортными средствами.

- Интеграция с другим ПО. Webots поддерживает интеграцию с ROS и другими популярными фреймворками, но более сложные задачи, такие как глубокая интеграция с внешними ИИ-системами, могут потребовать разработки дополнительных модулей.

## 2.6. Blender с фотограмметрией OpenDroneMap

Blender – редактор для создания трехмерной компьютерной графики, включающий в себя средства моделирования, скульптинга, анимации, симуляции, отрисовки (рендеринга), постобработки и монтажа видео со звуком. OpenDroneMap – набор инструментов для фотограмметрии по аэрофото-снимкам, формирующий 3D-карты отснятой местности [32].

### Плюсы:

- Моделирование. Практически не ограниченные возможности по моделированию и симуляции процессов, так как имеется богатый набор инструментов от базовых до узкоспециализированных, из которых можно собрать собственный симулятор [33].

- Импорт карт. Наличие плагинов для импорта карт и проецирования спутниковых снимков на публично доступные данные о высотах.

- Анимация. Гибкие возможности по созданию анимации и доступ к Python API, в котором возможно изменение любых свойств.

- Понятный интерфейс. После создания необходимых вспомогательных инструментов задачи импорта записей с датчиков сводятся к однокнопочным решениям с возможностью быстрой отладки результатов.

### Минусы:

- Модульность. Необходимость искать (создавать, собирать) все части симуляции.

- Поддержка GNSS. Отсутствие встроенной привязки базового пространства 3D-редактора к географическим координатам – вся работа с реальными данными требует внимательного пересчета координатных систем и предварительной подготовки (обработки) записей.

- Физика взаимодействий. Сложность симуляции физического взаимодействия транспортного средства с рельефом. Blender в первую очередь используется для анимации, и встроенные инструменты эмуляции физики обычно используются для упрощения реализации художественного замысла, а не для расчета физических нагрузок.

**Сложность:** высокая. Несмотря на мощные возможности визуализации, первичная сложность создания сцен и работы с картами из реальных данных делает симулятор сложным для использования в академических или коммерческих проектах с пересеченной местностью.

### 2.7. NV073

Это 3D-симулятор, разработанный в Институте проблем управления им. В. А. Трапезникова на основе визуализатора Unreal Engine 5.2 и AirSim для моделирования совместной работы группы наземных, подводных, надводных и воздушных беспилотных аппаратов [34]. Использование в основе симулятора AirSim наследует все его преимущества и недостатки. Есть адаптированная и упрощенная сборка для просмотра записей траекторий движения электротранспорта вместе с характеристиками работы силовой установки.

#### Плюсы:

- Простота управления просмотром – удобный слайдер со шкалой времени, кнопки запуска/остановки.
- Поддержка разнородных аппаратов – заявлена поддержка четырех типов беспилотных аппаратов: наземные, воздушные, надводные и подводные.
- Разнообразие анимаций – можно визуализировать обороты двигателя через анимацию вращения колес, менять освещение и погодные условия.
- Упрощен запуск и импорт записей – вся среда запускается одним исполняемым файлом и читает подготовленный файл записи из заранее заданной папки.
- Встроенный алгоритм корректирует запись траектории по высоте, привязывая движение к поверхности карты.

#### Минусы:

- Отсутствует возможность добавления моделей местности – новые карты можно добавить только с привлечением разработчика.
- Не поддерживается отображение всей траектории – для каждого момента времени показывается только положение транспортного средства в этот момент, что затрудняет оценку всей записи в целом.

- Привязка к поверхности игнорирует записанные данные о высоте, что делает симуляцию сильно зависимой от качества модели местности.

- Отсутствие документации – вся информация о симуляторе может быть получена только из ограниченного набора статей или напрямую у авторов симулятора, что накладывает сложности на его установку и дальнейшее использование.

### 2.8. Сравнение рассмотренных симуляторов

Каждый из перечисленных симуляторов предоставляет некоторые возможности для моделирования пересеченной местности, поэтому выбор какого-то из них зависит от специфики проекта. Gazebo и AirSim подходят для высокодетализированного моделирования физических условий, CARLA может быть адаптирован для нестандартных задач, NVIDIA Isaac Sim предлагает мощные возможности для симуляции с использованием GPU, а Webots – простой и гибкий инструмент для образовательных целей. При этом Gazebo и Webots легче интегрируются с ROS, но могут потребовать больше ручной работы для создания сложных природных ландшафтов. CARLA и AirSim, в свою очередь, отлично подходят для высококачественной визуализации, но требуют значительных усилий для создания сцен пересеченной местности и импорта реальных данных. NVIDIA Isaac Sim предлагает мощную поддержку симуляций с ИИ, но требует высокопроизводительных ресурсов и сложной настройки для создания сцены. Построение модели местности с помощью OpenDroneMap и проигрывание (симуляция) записи движения в Blender подходят для визуализации рельефа и траекторий, но не дают готовых инструментов для симуляции физических взаимодействий. Большая часть этих симуляторов поддерживает взаимодействие с внешними инструментами, что дает возможность воспроизведения поведения реального объекта в симуляционной среде.

Для дальнейшего выбора симулятора определим основные сравниваемые параметры.

- RTF (*Real-Time Factor*, коэффициент реального времени) – это показатель, используемый для оценки скорости выполнения симуляции относительно реального времени. Он широко применяется в робототехнике и автономных транспортных системах для анализа производительности и вычислительной эффективности.

- Частота обновления сенсоров – скорость, с которой обновляются сенсоры (лидары, камеры, GPS). Чем выше частота, тем точнее моделирование, но выше нагрузка на процессор и графику.



• Графический визуализатор (движок) – отвечает за рендеринг изображений. Unreal Engine и Omniverse RTX обеспечивают высокое качество графики, но требуют мощного оборудования. OGRE и OpenGL более простые и легковесные.

• Физический визуализатор (движок) – отвечает за моделирование динамики движения, столкновений, силы трения, реакции подвески и других физических эффектов. Чем мощнее движок, тем реалистичнее поведение объектов.

• Максимальное число транспортных средств (роботов) – показывает, сколько объектов можно одновременно моделировать. Ограничивается вычислительной мощностью процессора и видеокарты.

Сравнение для выбранных в статье симуляторов по перечисленным параметрам приведено в табл. 1.

Итоговое экспертное сравнение возможностей симуляторов и их технических характеристик приведено в табл. 2, где оценка 1 соответствует наименее сложным в реализации вариантам, 2 – средним, 3 – сложным. Согласно табл. 2 нельзя выделить один симулятор, который будет лучше других по всем параметрам.

### 3. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИМУЛЯТОРОВ

Перед авторами данной статьи стоит задача симуляции движения колесно-гусеничных и лыже-гусеничных платформ, приведенных на рис. 1, в первую очередь в рамках анализа сценариев их применения на участках распределенной сети по-

лигонов, расположенных в горных районах Мурманской области и Кавказа [5]. Для решения научных и прикладных задач от симулятора требуется:

- поддержка движения по пересеченной местности, включая различные типы покрытий (грунт, снег, песок);
- наличие готовых моделей транспортных средств, близких по характеристикам к изображенным на рис. 1, или возможность добавления своей модели;
- интеграция с Python;
- отсутствие необходимости в покупке лицензии;
- возможность отобразить движение по данным, записанным с реального транспортного средства.

Согласно приведенному выше обзору и сравнительной табл. 2, нельзя выделить один симулятор, который будет лучше других по всем параметрам. Наиболее подходящими оказываются симуляторы Webots, Isaac Sim и Gazebo. Однако Isaac Sim требует наличие высокопроизводительных видеокарт, Gazebo же является лидером по всем параметрам, исключая сложность создания сцен (он уступает в этом Webots). Авторам статьи не так важна возможность создания собственных сцен, поэтому дальнейшие эксперименты и тестирование будут производиться с использованием Gazebo. Данный симулятор предлагает инструменты для моделирования физического поведения транспортного средства, работы с датчиками и визуализации собранных данных. Поскольку рассматриваемые гусеничные платформы обладают сложной динамикой,

Таблица 1

Сравнение характеристик симуляторов для беспилотных транспортных средств

Характеристики	Gazebo	CARLA	AirSim / NVO73	NVIDIA Isaac Sim	Webots
Физический визуализатор	ODE, Bullet, Simbody, DART	Unreal Engine PhysX	Unreal Engine PhysX	NVIDIA PhysX	ODE
RTF	1.0–2.0	~1.0 (зависит от видеокарты)	~1.5 (зависит от настроек)	1.0 (требовательный к GPU)	1.0–3.0 (легковесный)
Частота обновления сенсоров	100–1000 Hz	~100 Hz (камеры, LiDAR)	120 Hz (LiDAR), 30-60 Hz (камеры)	240 Hz (LiDAR), 60 Hz (камеры)	~100 Hz
Графический визуализатор	OGRE (basic)	Unreal Engine 4	Unreal Engine 4 (5.2 в случае NVO73)	Omniverse RTX (высокая детализация)	Встроенный OpenGL-based
Максимальное число транспортных средств	50+ (оптимизирован)	~20–50 (зависит от настроек)	10-30 (зависит от GPU)	100+ (с ускорением RTX)	10–50 (оптимизирован для мобильных роботов)

**Сравнение симуляторов для беспилотных транспортных средств с поддержкой пересеченной местности (низкая оценка соответствует более приоритетному варианту)**

Критерий	Gazebo	CARLA	AirSim / NVO73	NVIDIA Isaac Sim	Webots	ODM+Blender
Создание сцен	2	3	3	2	1	2
Импорт карт	2	3	3	3	3	2
Сложность создания моделей	2	3	3	3	1	2
Интеграция с другим ПО	1	1	1	2	2	1
Поддержка пересеченной местности	1	3	1	1	2	1
Возможность отображения логов реального объекта	1	1	3	2	1	2
Требования к оборудованию	1	2	3	3	1	2

особенно при движении по пересеченной местности, Gazebo с его реалистичным физическим движком позволяет тестировать такие аспекты, как сцепление гусениц с поверхностью, поведение подвески и влияние различных типов грунта (песок, грязь, камни) [35].

Для задачи отображения реальных данных, записанных при движении на мотоцикле или гусеничной платформе, авторами были опробованы два различных инструмента:

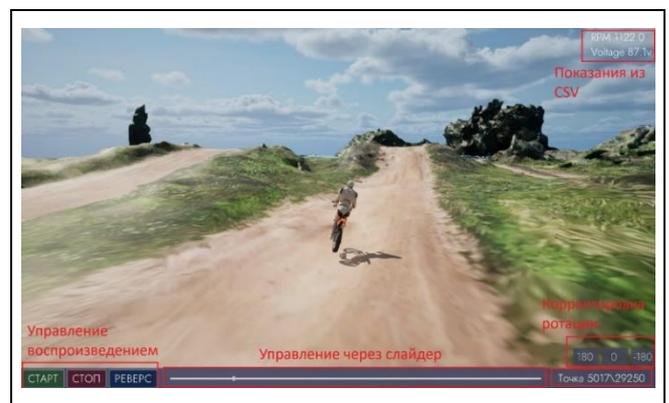
– система симуляции NVO 73 на базе игрового движка Unreal Engine [34, 36];

– Blender с фотограмметрией OpenDroneMap.

Функциональные возможности NVO 73 пока сильно ограничены, что не позволяет удовлетворить все требования, предъявляемые к инструментам визуализации, однако есть возможность воспроизведения движения из заранее записанного файла логов. Интерфейс симулятора представлен на рис. 2.

Отрисовка траекторий движения на моделях местности из OpenDroneMap в Blender получается довольно наглядной, что отображено на рис. 3, и также позволяет показать запись движений человека, однако синхронизация записей очень трудоемка, так как требует ручного подбора поправок для всех исходных положений – модели местности и координат спутниковой навигации, взаимного расположения транспортного средства и человека на нем [36]. Без разработки физической модели движения и привязок транспортного средства к поверхности земли, а также человека к транспортному средству на реконструкции получаются периодические значительные расхождения с кон-

трольной видеозаписью – транспортное средство улетает в небо или проваливается под землю, человек поворачивается и сдвигается в разные стороны.



**Рис. 2. Интерфейс симулятора NVO 73**



**Рис. 3. Отрисовка движения в Blender с ODM**



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен обзор популярных симуляторов для моделирования различных аспектов движения автономных транспортных средств. Отдельное внимание уделено симуляторам, поддерживающим пересеченную местность: Gazebo, CARLA, AirSim, NVIDIA Isaac Sim и Webots. Каждый из рассмотренных симуляторов обладает уникальными возможностями, которые делают их подходящими для различных задач, но при этом имеют и некоторые ограничения.

Так, Gazebo и Webots выделяются простотой интеграции с ROS и низкими требованиями к оборудованию, но требуют значительных усилий для создания сложных сцен пересеченной местности. CARLA и AirSim предлагают высококачественную визуализацию и гибкость при работе с индивидуально разработанными сценариями, однако сложность настройки пересеченных рельефов и высокая нагрузка на оборудование могут стать ограничивающими факторами. NVIDIA Isaac Sim, в свою очередь, демонстрирует выдающиеся возможности симуляции с использованием ИИ и GPU-ускорения, но его применение связано с высокими требованиями к вычислительным ресурсам и сложностью настройки. Итоговый выбор симулятора зависит от целей проекта, доступного оборудования и требуемой степени детализации моделирования. Независимо от выбора, использование симуляторов значительно ускоряет разработку и тестирование автономных систем, минимизируя риски и затраты на реальных испытаниях. Для задач, связанных с пересеченной местностью, важно учитывать не только возможности симулятора, но и сложность интеграции реальных данных, таких как рельеф и записи движения, что особенно актуально для исследования и оптимизации алгоритмов автономного управления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Karunakaran, D., Berrio, J.S., Worrall, S. Challenges of Testing Highly Automated Vehicles: A Literature Review // Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Recent Advances in Systems Science and Engineering (RASSE). – Tainan, 2022. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/RASSE54974.2022.9989562
2. Beringhoff, F., Greenyer, J., Roesener, C. Thirty-One Challenges in Testing Automated Vehicles: Interviews with Experts from Industry and Research // Proceedings of 2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). – Aachen, 2022. – P. 360–366. – DOI: 10.1109/IV51971.2022.9827097
3. Lou, G., Deng, Y., Zheng, X., et al. Testing of Autonomous Driving Systems: Where Are We and Where Should We Go? // Proceedings of the 30th ACM Joint European Software Engineering Conference and Symposium on the Foundations of Software Engineering. – Singapore, 2022. – P. 31–43.
4. Martinez, M., Sitawarin, C. Beyond Grand Theft Auto V for Training, Testing and Enhancing Deep Learning in Self-driving Cars. – arXiv:1712.01397, 2017. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1712.01397>
5. Коргин Н.А., Мецераков П.В. Концепция проекта по созданию распределенной сети полигонов для отработки сценариев применения гетерогенных групп транспортных средств с электрическим приводом в сложных климатических и ландшафтных условиях // Труды 11-й Всероссийской научной конференции «Системный синтез и прикладная синергетика»: сборник научных трудов (п. Нижний Архыз, ССПС-2022). – Ростов н/Д.: Южный федеральный университет, 2022. – С. 197–202. [Korgin, N.A., Meshcheryakov, R.V. Kontsepsiya proekta po sozdaniyu raspredelennoi seti poligonov dlya otrabotki stsensariyev primeneniya geterogennykh grupp transportnykh sredstv s ehlektricheskim privodom v slozhnykh klimaticheskikh i landshaftnykh usloviyakh. kh // Trudy 11-i Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Sistemnyi sintez i prikladnaya sinergetika»: sbornik nauchnykh trudov (p. Nizhnii Arkhyz, SSPS-2022). – Rostov n/D.: Yuzhnyi federal'nyi universitet, 2022. – P. 197–202. (In Russian)]
6. Макаров М.И. Алгоритм локального планирования пути для объезда препятствий в путевых координатах // Проблемы управления. – 2024. – № 3. – С. 66–72. [Makarov, M.I. A local path planning algorithm for avoiding obstacles in the frenet frame // Control Sciences. – 2024. – No. 3. – P. 56–61.]
7. Mitrohin, M.A., Alyaev, A.O., Lobanov, R.I., Semenkin, M.V. Investigation of the Influence of Lighting Objects Control Algorithms on the Characteristics of Road Traffic at Intersections // Transport Automation Research. – 2024. – No. 3. – P. 282–295.
8. Lim, K.G., Lee, C.H., Chin, R.K., et al. SUMO Enhancement for Vehicular Ad Hoc Network (VANET) Simulation // Proceedings of 2017 IEEE 2nd International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS). – Kota Kinabalu, 2017. – P. 86–91.
9. Barceló, J., Barceló, P., Casas, J., Ferrer, J.L. AIMSUN: New ITS Capabilities // Proc. Eur. ITS Conf. – Bilbao, Spain, 2001. – P. 1–10.
10. Ghafarian, M., Watson, N., Mohajer, N., et al. A Review of Dynamic Vehicular Motion Simulators: Systems and Algorithms // IEEE Access. – 2023. – Vol. 11. – P. 36 331–36 348.
11. Ziegler, S., Höppler, R. Extending the IPG CarMaker by FMI Compliant Units // Proceedings of 8th International Modelica Conference. – Dresden, 2011. – P. 779–784.
12. TruckSim Overview. – URL: <https://www.carsim.com/products/trucksim/index.php> (дата обращения: 30.09.2024). [Accessed September 30, 2024.]
13. Silva, I., Silva, H., Botelho, F., Pendao, C. Realistic 3D Simulators for Automotive: A Review of Main Applications and Features // Sensors. – 2024. – Vol. 24, no. 18. – Art. no. 5880.
14. Li, Y., Yuan, W., Zhang, S., et al. Choose Your Simulator Wisely: A Review on Open-Source Simulators for Autonomous Driving // IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2024. – Vol. 9, iss. 5. – P. 4861–4876.
15. Cantas, M.R., Guvenc, L. Customized Co-simulation Environment for Autonomous Driving Algorithm Development and Evaluation // arXiv:2306.00223, 2023. – DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.00223>
16. Holen, M., Knausgard, K., Goodwin, M. An Evaluation of Autonomous Car Simulators and Their Applicability for Supervised and Reinforcement Learning // Proceedings of International Conference on Intelligent Technologies and Applications. – Grimstad, 2021. – P. 367–379.
17. May, J., Poudel, S., Amdan, S., et al. Using the CARLA Simulator to Train a Deep Q Self-Driving Car to Control a Real-

- World Counterpart on a College Campus // Proceedings of 2023 IEEE International Conference on Big Data. – Sorrento, 2023. – P. 2206–2210.
18. *Tanmay, V.S., Chinmay, V.S., Ming, X.* AutoDRIVE Simulator: A Simulator for Scaled Autonomous Vehicle Research and Education // Proceedings of the 2021 2nd International Conference on Control, Robotics and Intelligent System (CCRIS '21). – Qingdao, 2021. – P. 1–5.
19. *Hanevold, M.* Path Following Model Predictive Control of a Differential Drive UGV in Off-Road Terrain: Master of Informatics thesis. – Oslo: University of Oslo, 2022. – 88 p.
20. *Zheng, H., Smereka, J.M., Mikulski, D., et al.* Bayesian Optimization Based Trust Model for Human Multi-robot Collaborative Motion Tasks in Offroad Environments // International Journal of Social Robotics. – 2023. – Vol. 15, no. 7. – P. 1181–1201.
21. *Koenig, N., Howard, A.* Design and Use Paradigms for Gazebo, an Open-Source Multi-robot Simulator // Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Sendai, 2004. – Vol. 3. – P. 2149–2154.
22. *Dosovitskiy, A., Ros, G., Codevilla, F., et al.* CARLA: An Open Urban Driving Simulator // Proceedings of Conference on Robot Learning. – Mountain View, 2017. – P. 1–16.
23. *Han, I., Park, D.H., Kim, K.J.* A New Open-Source Off-road Environment for Benchmark Generalization of Autonomous Driving // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 136 071–136 082.
24. *Let's go off-road!* – URL: <https://carla.org/2023/04/21/avl-off-road-simulation> (дата обращения: 30.09.2024). [Accessed September 30, 2024.]
25. *Shah, S., Dey, D., Lovett, C., Kapoor, A.* Airsim: High-Fidelity Visual and Physical Simulation for Autonomous Vehicles // Proceedings of the 11th International Conference on Field and Service Robotics. – Cham: Springer International Publishing, 2018. – P. 621–635.
26. *Jansen, W., Verreycken, E., Schenck, A., et al.* COSYS-AIRSIM: A Real-Time Simulation Framework Expanded for Complex Industrial Applications // Proceedings of 2023 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM). – Hamilton, 2023. – P. 37–48.
27. *Richard, A., Kamohara, J., Uno, K., et al.* Omnirls: A Photorealistic Simulator for Lunar Robotics // Proceedings of 2024 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – Yokohama, 2024. – P. 16 901–16 907.
28. *Jacinto, M., Pinto, J., Patrikar, J., et al.* Pegasus Simulator: An Isaac Sim Framework for Multiple Aerial Vehicles Simulation // Proceedings of 2024 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). – Chania, 2024. – P. 917–922.
29. *Ellis, K., Zhang, H., Stoyanov, D., Kanoulas, D.* Navigation among Movable Obstacles with Object Localization Using Photorealistic Simulation // Proceedings of 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – Huntington Place, 2022. – P. 1711–1716.
30. *Zea, D., Toapanta, A., Perez, V.H.* Intelligent and Autonomous Guidance through a Geometric Model for Conventional Vehicles // In: Innovation and Research: A Driving Force for Socio-Econo-Technological Development. – Cham: Springer International Publishing, 2020. – P. 78–93.
31. *Couceiro, M. S., Vargas, P. A., Rocha, R. P.* Bridging the Reality Gap between the Webots Simulator and E-puck Robots // Robotics and Autonomous Systems. – 2014. – Vol. 62, no. 10. – P. 1549–1567.
32. *Zhang, C., Maga, A. M.* An Open-Source Photogrammetry Workflow for Reconstructing 3D models // Integrative Organismal Biology. – 2023. – Vol. 5, no. 1. – Art no. obad024.
33. *OpenDroneMap + blender = Fun.* – URL: <https://smathermather.com/2019/12/30/opendronemap-blender-fun-part-2/> (дата обращения: 30.09.2024). [Accessed September 30, 2024].
34. *Амосов О.С., Амосова С.Г., Кулагин К.А.* Моделирование виртуального полигона для отработки совместной навигации группы разнородных беспилотных аппаратов // Материалы 34-й конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург, 2024). – Санкт-Петербург, 2024. – С. 117–120. [Amosov, O.S., Amosova, S.G., Kulagin, K.A. Modelirovanie virtual'nogo poligona dlya otrabotki sovmestnoy navigacii gruppy raznorodnyh bespilotnyh apparatov // Materialy 34-j konferencii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova (Sankt-Peterburg, 2024). – Saint Petersburg, 2024. – S. 117–120. (In Russian)]
35. *Dobrokvashina, A., Lavrenov, R., Bai, Y., et al.* Servosila Engineer Crawler Robot Modelling in Webots Simulator // International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. – 2022. – Vol. 11, no. 6. – P. 417–421.
36. *Trefilov, P., Kulagin, K., Mamchenko, M.* Developing a Flight Mission Simulator in the Context of UAVs Group Control // Proceedings of 2020 13th International Conference “Management of Large-Scale System Sevelopment” (MLSD). – Moscow, 2020. – P. 1–4. – DOI:10.1109/MLSD49919.2020.9247692
37. *Базенков Н.И., Пыжьбянов А.А.* Система сбора данных для реконструкции движений мотоциклиста // XIV Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2024): сб. науч. тр. – М.: ИПУ РАН, 2024. – С. 1776–1280. [Bazhenkov N.I., Pyzh'yanov A.A. Sistema sbora dannyh dlja rekonstrukcii dvizhenij motociklista // XIV Vserossijskoe soveshhanie po problemam upravlenija (VSPU-2024): sb. nauch. tr. – Moscow, 2024. – S. 1776–1780. (In Russian)]

Статья представлена к публикации членом редколлегии  
П.В. Мецгеряковым.

Поступила в редакцию 03.12.2024,  
после доработки 11.02.2025.  
Принята к публикации 12.02.2025.

**Макаров Максим Игоревич** – мл. науч. сотрудник, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва; Московский физико-технический институт (Государственный университет), г. Москва,  
✉ [maxim.i.makarov@gmail.com](mailto:maxim.i.makarov@gmail.com)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-4854-5910>

**Коргин Николай Андреевич** – д-р техн. наук, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
✉ [nkorgin@ipu.ru](mailto:nkorgin@ipu.ru)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0003-1744-3011>

**Пыжьбянов Андрей Александрович** – инженер-программист, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва,  
✉ [ipu@isko.moe](mailto:ipu@isko.moe)  
ORCID iD: <https://orcid.org/0009-0000-4539-6190>

© 2024 г. Макаров М. И., Коргин Н. А., Пыжьбянов А. А.



Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная.



# UNMANNED VEHICLES: A SURVEY OF MODERN SIMULATORS

M. I. Makarov\*, N. A. Korgin\*\*, and A. A. Pyzh'yanov\*\*\*

\*\*\*\*\*Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

\*Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

\*✉ maxim.i.makarov@gmail.com, \*\*✉ nkorgin@ipu.ru, \*\*\*✉ ipu@isko.moe

**Abstract.** This survey is devoted to popular simulators supporting rough terrain for unmanned vehicles, namely, Gazebo, CARLA, AirSim, NVIDIA Isaac Sim, and Webots. Their main capabilities related to terrain modeling, motion physics, and support for sensors and weather conditions are described. Particular attention is paid to the creation of realistic rough terrain scenes, the complexity of importing real maps, and interaction with other software platforms, such as Robot Operating System (ROS) and artificial intelligence (AI) systems. The main drawbacks of each simulator are analyzed: the labor intensity of creating detailed terrain and vehicle models, the high complexity of integrating real maps, and the dependence on powerful hardware. The survey also notes the complexity of interaction with various software solutions and the required knowledge of 3D modeling. Gazebo and Webots are remarkable for their good integration with ROS but require more effort to work with rough terrain. CARLA and AirSim provide high-quality visualization but have higher requirements for creating landscapes. NVIDIA Isaac Sim stands out for AI simulation support but is resource-intensive. The authors' experience in mapping vehicle trajectories and orienting in some simulators is presented.

**Keywords:** unmanned vehicles, simulators, rough terrain, tracked platforms.

**Acknowledgments.** The research of N. A. Korgin was supported in part by the Russian Science Foundation, project no. 23-29-00681, <https://rscf.ru/project/23-29-00681>.