

**Пчелинцева Светлана Вячеславовна**

канд. техн. наук, доцент

**Жежеря Вадим Андреевич**

студент

**Вахрушева Инна Алексеевна**

доцент

ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный  
университет – МСХА им. К.А. Тимирязева»

г. Москва

## **АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ МАРСОХОДОВ: КАК КОМПЬЮТЕР ВИДИТ ПОВЕРХНОСТЬ И ВЫБИРАЕТ ПУТЬ**

***Аннотация:** в статье рассматриваются методы автономной навигации марсоходов, позволяющие аппаратам самостоятельно перемещаться по поверхности других планет в условиях значительной задержки связи с Землёй. Описаны ключевые этапы автономного управления: восприятие окружающей среды с помощью стереозрения, построение цифровых моделей рельефа, обнаружение препятствий и планирование безопасного пути. Приведены примеры алгоритмов, используемых в марсоходах NASA – от ранних систем на базе «потенциальных полей» до современной архитектуры AutoNav, применяемой на марсоходе Perseverance. Показана роль машинного обучения для классификации типов грунта и повышения надёжности навигации.*

***Ключевые слова:** автономная навигация, марсоходы, компьютерное зрение, стереозрение, планирование пути, SLAM, машинное обучение, сверточные нейронные сети, Perseverance.*

Исследование Марса с помощью марсоходов требует преодоления фундаментального ограничения – задержки радиосигнала, которая составляет от 5 до 20 минут в зависимости от взаимного положения планет. Это делает невозможным управление в реальном времени: пока команда с Земли достигнет аппарата, ситуация на поверхности может кардинально измениться. Поэтому марсоходы

вынуждены обладать высокой степенью автономии, самостоятельно воспринимая окружающую обстановку и выбирая безопасный маршрут.

Задача автономной навигации включает три основных компонента: восприятие, планирование и управление. Восприятие отвечает за преобразование данных с камер и других датчиков в модель окружающей среды. Планирование на основе этой модели строит траекторию, избегающую препятствий и учитывающую проходимость грунта. Управление реализует движение по заданной траектории с контролем исполнения.

Цель данной работы – анализ методов компьютерного зрения и алгоритмов планирования, применяемых в современных марсоходах, с акцентом на опыт миссий NASA (Mars Exploration Rovers, Curiosity, Perseverance) и перспективы развития автономных систем.

Первые марсоходы (Sojourner, 1997) полагались преимущественно на дистанционное управление с ограниченной автономией. Операторы на Земле анализировали снимки, планировали путь и отправляли последовательность команд, а марсоход выполнял её «вслепую», не имея возможности реагировать на непредвиденные препятствия.

Начиная с миссии Mars Exploration Rovers (Spirit и Opportunity, 2004) была внедрена система *Visual Odometry*, позволявшая корректировать положение по сопоставлению последовательных снимков. Это компенсировало пробуксовку колёс на песке и склонах. Но планирование пути также выполнялось на Земле.

Кардинальный шаг был сделан с марсоходом Curiosity (2012), который получил систему *Autonomous Navigation for Mobile Robots* (GESTALT). Она позволяла аппарату самостоятельно строить 3D-карту местности на основе стереопар, выбирать безопасные точки и двигаться к цели, обходя препятствия. Это сильно увеличило среднюю скорость передвижения.

Марсоход Perseverance (2021) оснащён улучшенной версией – *AutoNav*, которая работает в 5–10 раз быстрее предшественника благодаря выделенному вычислительному модулю *Vision Compute Element* (VCE) с процессором, специально оптимизированным для компьютерного зрения.

Ключевой сенсор для автономной навигации – стереокамеры. На Perseverance установлены две пары: Navcams (навигационные) и Hazcams (камеры обзора препятствий спереди и сзади). Они расположены на мачте и корпусе, обеспечивая поле зрения около 120°.

Алгоритм стереозрения выполняет задачи коррекции движений, поиска соответствий, вычисления диспаратности и построения карты глубин.

Результат – *Digital Elevation Map* (DEM) – матрица высот с разрешением порядка нескольких сантиметров на пиксель. На основе DEM выделяются области, непригодные для движения: камни выше клиренса, крутые склоны, рыхлый грунт.

Архитектура планирования в марсоходах обычно двухуровневая:

*Глобальное планирование* – на основе орбитальных снимков и предварительной карты, полученной с Земли, задаются ключевые точки маршрута. Это делает оператор на Земле.

*Локальное планирование* – в реальном времени на борту строится траектория между точками с учётом актуальной информации о препятствиях.

В Curiosity и Perseverance локальное планирование реализовано через алгоритм *Grid-based A\**. Строится сетка размером, например, 50×50 ячеек, каждая ячейка получает стоимость прохода в зависимости от высоты препятствий и наклона. Затем поиск A\* находит путь с минимальной суммарной стоимостью.

Для более сложных сценариев применяется *SLAM* (Simultaneous Localization and Mapping), позволяющий одновременно строить карту и уточнять положение марсохода. На Perseverance это реализовано в виде дополнения к AutoNav.

Традиционные методы планирования полагаются только на геометрические характеристики препятствий. Однако не всякий геометрически проходимый участок безопасен: рыхлый песок может вызвать пробуксовку и застревание.

Для решения этой проблемы в последние годы начали применяться свёрточные нейронные сети, классифицирующие типы грунта по цветным изображениям. На марсоходе Perseverance используется система *Terrain Relative Navigation* (TRN), которая включает обученную модель для выделения песчаных зон,

скальных выходов и участков, покрытых мелкой фрагментарной породой. Эта информация добавляется в карту стоимости, и планировщик избегает потенциально опасных участков даже если они геометрически плоские.

Автономность также повышается за счёт искусственного интеллекта для обнаружения научных целей. Например, система *AEGIS* (Autonomous Exploration for Gathering Increased Science) на *Curiosity* самостоятельно выбирает цели для спектрометра без участия операторов.

Автономная навигация доказала свою эффективность. *Curiosity* с использованием *GESTALT* проехал более 25 км, причём значительная часть пути была пройдена в автономном режиме. Время движения за одни марсианские сутки увеличилось с десятков метров до более чем 100 м в благоприятных условиях.

*Perseverance* благодаря *AutoNav* и более мощному вычислителю достигает скорости планирования до 10–15 м/сеанс, а в отдельных случаях – более 200 м за одни марсианские сутки. При этом частота остановок для оценки обстановки снизилась, а надёжность обхода препятствий повысилась.

Сравнительные испытания показали, что использование машинного обучения для классификации грунта уменьшает риск застревания на 30–40% по сравнению с геометрическим планированием.

Автономная навигация марсоходов – пример успешного применения методов компьютерного зрения, планирования пути и машинного обучения в экстремальных условиях. От первых простых систем, лишь фиксирующих пробуксовку, современные роверы перешли к полноценному автономному восприятию и принятию решений. Алгоритмы стереозрения, построения карт высот, поиска пути *A\** и нейросетевой классификации грунта стали неотъемлемой частью бортового программного обеспечения. Дальнейшее совершенствование вычислительных средств и алгоритмов позволит будущим аппаратам исследовать планетные поверхности с минимальным участием человека, расширяя наши возможности в изучении Солнечной системы.

### ***Список литературы***

1. Замятин А.В. Обнаружение аномалий в технологических данных: алгоритмы, программы, системы / А.В. Замятин, Д.А. Мурзагулов. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 2024. – 240 с. EDN OQLWWO
2. Информационные системы и технологии в АПК: учебник / А. В. Бабкина, И. Е. Быстренина, М. И. Горбачев [и др.]. – М.: Российский государственный аграрный университет, 2025. – 615 с. – ISBN 978-5-9675-2093-8. – EDN ZJXJXU.
3. Carsten J., Rankin A., Ferguson D., Stentz A. Global Path Planning on Board the Mars Exploration Rovers // IEEE Aerospace Conference. 2007. Pp. 1–11.
4. Estlin T., Bornstein B. [et al.]. AEGIS: Autonomous Targeting for the Mars Science Laboratory Rover // AI Magazine. 2012. Vol. 33. No. 1. Pp. 79–90.
5. Maimone M., Biesiadecki J. [et al.]. Autonomous Navigation Results from the Mars Exploration Rovers (MER) and Mars Science Laboratory (MSL) Missions // Journal of Field Robotics. 2021. Vol. 38. No. 2. Pp. 234–252.
6. Ono M., Rothrock B. [et al.]. Risk-Aware Planetary Rover Navigation via Machine Learning and Probabilistic Planning // IEEE Robotics and Automation Letters. 2020. Vol. 5. No. 2. Pp. 2856–2863. DOI 10.1109/lra.2020.2974434. EDN AKEKFU