Дорожная карта лунной миссии

Развитие лунной инфраструктуры требует одновременного прогресса в транспорте, энергетике, связи, навигации, робототехнике, строительстве и жизнеобеспечении. Большинство решений не стандартизированы, многие — на уровне прототипов. Аналитический отчет Deloitte «Building the Lunar Economy» (2026) оценивает совокупную экономическую ценность лунной экономики в 2026–2050 годах в 343 $–566 млрд. Технологические барьеры и направления научных исследований — в этом обзоре.

Транспорт и посадочная инфраструктура

При работе двигателей лунный грунт разлетается со скоростью до 2000 м/с и повреждает аппараты на расстоянии более 150 метров. Посадочные площадки с укрепленной поверхностью и защитными бермами становятся обязательным элементом — их создают лазерным спеканием реголита, микроволновым уплотнением или трехмерной печатью из местного материала. Точная навигация при посадке критична: ошибка в несколько десятков метров фатальна, когда пригодных площадок на южном полюсе единицы.

Неопределенности: долгосрочная устойчивость спеченного реголита к многократным

нагрузкам, влияние пыли на механические системы после сотен циклов, оптимальная конфигурация посадочных зон. Направления исследований: моделирование гранулярной механики, автономные системы посадки с компьютерным зрением и лидарами, аддитивные технологии строительства, материалы, устойчивые к абразивному воздействию.

Энергетика

Лунная ночь длится 14 земных суток, температура падает ниже –133 °C. От первых миссий с единицами киловатт потребуется переход к сотням киловатт и мегаваттам для постоянной базы и переработки ресурсов. Вертикальные солнечные массивы на мачтах до 20 метров захватывают свет в полярных условиях, радиоизотопные генераторы обеспечивают десятки–сотни ватт непрерывной мощности, топливные элементы работают на водороде и кислороде из воды, ядерные реакторы на 40–100+ кВт планируются к развертыванию к 2030 году.

Неопределенности: эффективность вертикальных панелей в реальных полярных условиях, стоимость и регуляторная нагрузка ядерных систем, долговечность топливных элементов в условиях пыли и температурных циклов. Направления исследований: компактные ядерные реакторы с пассивной безопасностью, системы хранения энергии (водородные топливные элементы, криогенное хранение, тепловые аккумуляторы), беспроводная передача энергии, терморегулирование оборудования.

Связь и навигация

Локальные сети должны связывать экипажи, роверы и стационарные объекты на площади в сотни квадратных километров. Прямая видимость Земли на южном полюсе доступна лишь 17–43% времени, что требует ретрансляционных спутников. Позиционирование и синхронизация времени осложнены отсутствием магнитного поля и спутниковой навигации. Сотовые сети, адаптированные для Луны, прошли первую демонстрацию: в марте 2025 года система Nokia Modul8 стала первой сотовой сетью на другом небесном теле.

Неопределенности: совместимость различных стандартов, пропускная способность радиоканалов при росте числа пользователей, автономность сетей с возможностью самовосстановления. Направления исследований: автономные телеком-системы с самовосстановлением и самооптимизацией, оптическая связь для высокой пропускной способности, алгоритмы навигации без спутниковых систем, киберзащита распределенных лунных сетей.

Поверхностная мобильность

Сигнал с Земли идет более секунды, что делает прямое управление невозможным для быстрых операций. Рельеф южного полюса — глубокие кратеры, острые гребни, рыхлый реголит. Техника должна работать годами без обслуживания. Роверы с автономной навигацией и искусственным интеллектом уже разрабатываются, прорабатываются концепты спеченных дорог между ключевыми точками и лунных железных дорог.

Неопределенности: проходимость в условиях низкой гравитации и пыли, износ колес и гусениц

от абразивного реголита, энергопотребление автономных систем навигации. Направления исследований: алгоритмы одновременной локализации и картографирования, материалы и конструкции колес, устойчивые к пыли, гибридные системы (колесные + шагающие + гусеничные), энергоэффективная автономия с солнечной подзарядкой и рекуперацией.

Строительство и использование местных ресурсов

Реголит богат кремнием, железом, алюминием, титаном и кислородом — сырьем для бетона, стали, стекла. Переработка требует решения задач получения строительных материалов, кислорода, металлов, создания радиационной защиты, автоматизации строительства. Трехмерная печать из реголита, лазерное спекание для дорог и площадок, микроволновое уплотнение для строительных элементов — все это уже в работе.

Неопределенности: механические свойства спеченного реголита после множественных температурных циклов, энергозатраты на переработку, влияние пыли на оборудование. Направления исследований: химия и физика спекания реголита, роботизированные экскаваторы и манипуляторы, композитные материалы на основе реголита, радиационная защита (многослойные структуры, водяные экраны).

Жизнеобеспечение и медицина

На международной орбитальной станции достигается до 98% рециклинга воды, но лишь около 50% кислорода из CO_2. Радиационная защита критична: отсутствие магнитного поля делает экипаж уязвимым к солнечным вспышкам. Медицинское обеспечение в условиях ограниченного пространства требует решений для хирургии, диагностики, фармацевтики.

Неопределенности: долгосрочное влияние лунной радиации на здоровье, надежность систем рециклинга при многолетней эксплуатации, возможность экстренной эвакуации. Направления исследований: замкнутые системы жизнеобеспечения с повышенным процентом рециклинга, трехмерная биопечать тканей и лекарств, материалы для радиационной защиты, телемедицина и автономные диагностические системы.

Открытые вопросы

Концентрация и доступность водяного льда, гелия-3 и других ресурсов не подтверждена в промышленных масштабах. Высокая стоимость доставки и длительные сроки окупаемости делают частные инвестиции рискованными без государственных гарантий. Многие решения находятся на уровне технологической готовности 3–5, до коммерческой эксплуатации — более 10 лет. Отсутствие единых международных стандартов может привести к фрагментации инфраструктуры. Если стоимость запуска продолжит падать, лунная добыча может оказаться менее выгодной, чем доставка с Земли.

Научные направления

- Гранулярная механика и термодинамика — моделирование поведения реголита, расчет посадочных зон, проектирование систем переработки грунта.
- Материаловедение и строительство — композиты на основе реголита, трехмерная печать

строительных элементов, аддитивные технологии для дорог, площадок, укрытий.
- Энергетика — ядерная инженерия, компактные реакторы, системы хранения энергии, топливные элементы, криогенное хранение, тепловые аккумуляторы.
- Робототехника и автономные системы — роверы, экскаваторы, манипуляторы, посадочные алгоритмы, навигация без спутниковых систем, искусственный интеллект.
- Телекоммуникации — оптическая связь, локальные лунные сети, киберзащита распределенных систем.
- Биотехнологии и жизнеобеспечение — химия рециклинга, замкнутые системы, трехмерная биопечать тканей и лекарств, материалы для радиационной защиты.
- Моделирование и тестирование — симуляторы реголита, посадочных зон, термодинамических циклов, гранулярных потоков.

Лунная инфраструктура находится на стадии формирования: большинство решений не стандартизированы, многие — на уровне лабораторных прототипов. Участие в международных консорциумах позволяет влиять на стандарты связи, навигации, энергоснабжения и строительства. Технологии для лунных условий находят применение на Земле: аддитивное строительство в удаленных регионах, автономные системы для экстремальных сред, компактные источники энергии, робототехника для работы в опасных условиях. Инженеры, знакомые с требованиями космических миссий, будут востребованы в космической отрасли и смежных секторах. Вопрос не в окупаемости лунных проектов, а в том, какие технологии потребуются на этапе развертывания инфраструктуры и какие компетенции университет может предложить уже сейчас.

Материал подготовлен на основе отчета Deloitte «Building the Lunar Economy: How a sustained presence on the Moon could transform life, industry, and infrastructure on Earth and beyond» (2026).