

УДК 004.942

Использование геоинформационных систем для проектирования базы на поверхности Луны

Рыбаков Сергей Андреевич^(*)

serzh.rybakov.06@mail.ru

Гололобов Виталий Валерьевич^(*)

gololobovv8@yandex.ru

Мухортова Наталья Николаевна^(*)

muhortova@mirea.ru

РТУ МИРЭА, Москва, Россия

Аннотация. В работе представлен программный эмулятор проектирования лунной базы. Система обеспечивает интерактивное размещение жилых и технологических модулей на поверхности Луны с учетом геофизических ограничений (максимальный уклон $\leq 15^\circ$ для обитаемых и $\leq 5^\circ$ для технологических модулей) и требований к взаимному расположению объектов (запретные и рекомендованные зоны). Это позволяет соблюдать реальные требования к градостроительству и проектировать реальные планы строительства базы на Луне. Архитектура приложения построена на клиент-серверной модели с использованием OpenLayers для визуализации, GeoServer для предоставления геопространственных данных и PostgreSQL/PostGIS для хранения и анализа пространственной информации. Реализованы функции динамической проверки допустимости размещения, визуализации зон подходящего рельефа, отображения высот и координат в реальном времени, а также экспорт проекта в форматах PNG, JSON и PDF. Решение демонстрирует эффективность применения геоинформационных технологий для проектирования инфраструктуры в экстремальных внеземных условиях.

Ключевые слова: лунная база, геоинформационные системы (ГИС), OpenLayers, GeoServer, PostGIS

Введение. В современных условиях стремительного развития космических технологий и роста интереса к освоению Луны как потенциального объекта для размещения научных и жилых баз остро встает задача обеспечения надежного и безопасного проектирования инфраструктуры в экстремальных внеземных условиях. Одним из ключевых аспектов при планировании лунных станций является учет геофизических ограничений, таких как рельеф местности, уклоны поверхности, а также соблюдение требований по безопасному размещению модулей относительно друг друга. В данном случае особенно востребованы такие задачи как: создание программных средств, обеспечивающих визуализацию, анализ и интерактивное проектирование с учетом пространственных и технических ограничений.

Перспективным подходом к решению данной задачи является использование геоинформационных технологий в сочетании с веб — ориентированными архитектурами, позволяющими оперативно обрабатывать и отображать высокодетальные данные о поверхности Луны. В частности, данные, предоставленные NASA (например, LDEM — Lunar Digital Elevation Model и LDSM — Lunar Digital Slope Model), открывают возможность точной оцен-

ки пригодности участков для размещения различных типов модулей: жилых (с допустимым уклоном до 15°) и технологических (до 5°). При этом проектирование должно учитывать не только геологические факторы, но и взаимные пространственные ограничения между модулями — например, запретные зоны, обусловленные требованиями безопасности или функциональной совместимости.

В рамках настоящей работы разработан программный эмулятор проектирования лунной базы, реализующий интерактивное размещение модулей с учетом геопространственных ограничений и требований к взаимному расположению объектов. Система использует клиент — серверную архитектуру с визуализацией на основе OpenLayers, пространственное хранение данных в PostgreSQL/PostGIS и картографический сервер GeoServer для предоставления растровых и векторных слоев. Особое внимание уделено обеспечению помехоустойчивости проектировочного процесса в «цифровом смысле» — то есть устойчивости к ошибкам размещения за счет автоматизированной проверки допустимости позиций модулей на основе реальных лунных данных. На рис. 1 представлена схема взаимодействия компонентов системы, включая пользовательский интерфейс, серверную логику на языке Golang и геоданные, поступающие от GeoServer.

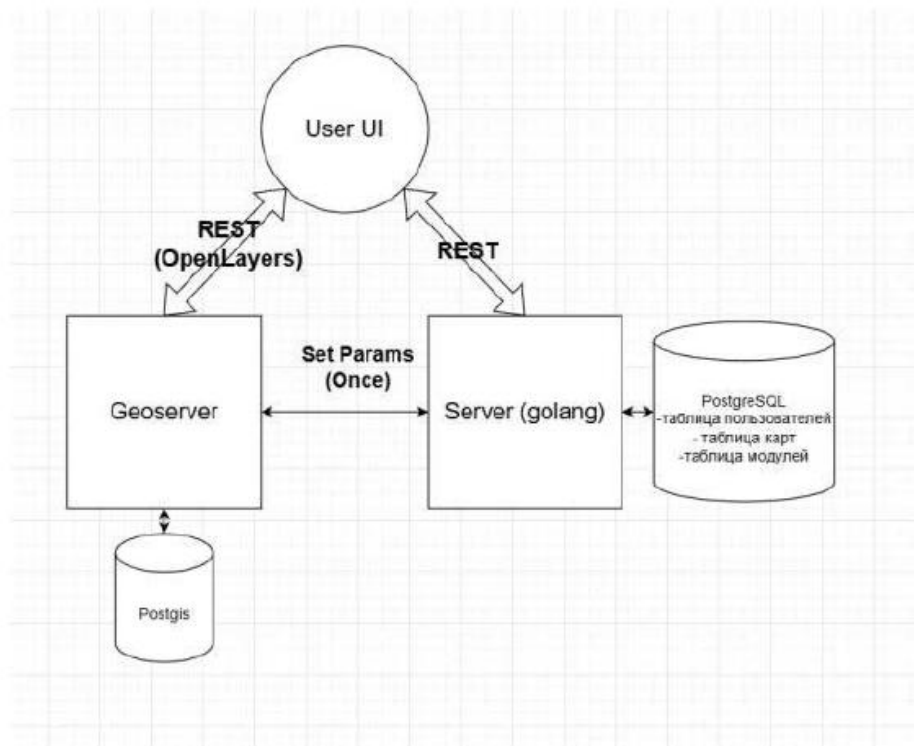


Рис. 1. Схема взаимодействия компонентов системы

Методы и материалы; результаты. Модель среды проектирования. Проектирование лунной базы осуществляется в цифровой среде, основанной на данных NASA: Lunar Digital Elevation Model (LDEM) и Lunar Digital Slope

Model (LDSM) с пространственным разрешением 10 м/пиксель в районе южного полюса Луны (до 83° ю.ш.). В этой среде выделяются два типа ограничений, влияющих на корректность размещения модулей:

Геофизические ограничения — уклон поверхности должен соответствовать требованиям к типу модуля;

Функциональные ограничения — соблюдение минимальных и максимальных расстояний между парами модулей.

Каждый модуль относится к одному из двух типов: обитаемый или технологический. Для обитаемых модулей допустимый уклон не превышает 15°, для технологических — 5°. Это условие формализуется следующим образом:

$$\theta_{\max,i} = \begin{cases} 15^\circ, & \text{если } M_i \text{ — обитаемый,} \\ 5^\circ, & \text{если } M_i \text{ — технологический.} \end{cases}$$

На основе LDSM в GeoServer заранее подготовлены бинарные растровые слои (compress_5deg и compress_15deg), где пиксели со значением 1 соответствуют участкам с уклоном, не превышающим 5° или 15° соответственно. При размещении модуля система проверяет, что вся площадь, занимаемая модулем, попадает в «единичные» пиксели соответствующего слоя.

Кроме того, для каждой пары типов модулей заданы минимальные и максимальные допустимые расстояния. Например, космодром должен находиться не ближе 2 км к любому другому модулю, а медицинский — не дальше 50 м от обитаемого. Эти правила хранятся в таблице requirements базы данных и применяются динамически при размещении.

Алгоритм интерактивного размещения модулей

Процесс размещения реализован как последовательная проверка двух условий: геофизической пригодности и функциональной совместимости.

Для проверки геофизической пригодности система формирует ограничивающий прямоугольник вокруг предполагаемой точки размещения с учетом габаритов модуля (например, 10×10 м). Затем выполняется WMS-запрос к GeoServer на получение фрагмента бинарного слоя (compress_5deg или compress_15deg). Если все пиксели в этом фрагменте непрозрачны (значение альфа-канала = 255), условие считается выполненным.

Для проверки функциональной совместимости система строит запрещенные зоны (круги радиусом $d_{\min}$ вокруг уже размещенных модулей) и, при необходимости, рекомендованные зоны (круги радиусом $d_{\max}$). Размещение модуля разрешается только при условии, что его позиция находится вне запрещенных зон (например, минимально допустимых расстояний до других модулей) и, в случае специализированных модулей — таких как медицинский или ремонтный, — обязательно внутри рекомендованных зон (максимально допустимых расстояний до соответствующих объектов). Визуализация этих зон в интерфейсе системы (см. рис. 2–4) позволяет пользователю интуитивно оценивать допустимость размещения в реальном времени.

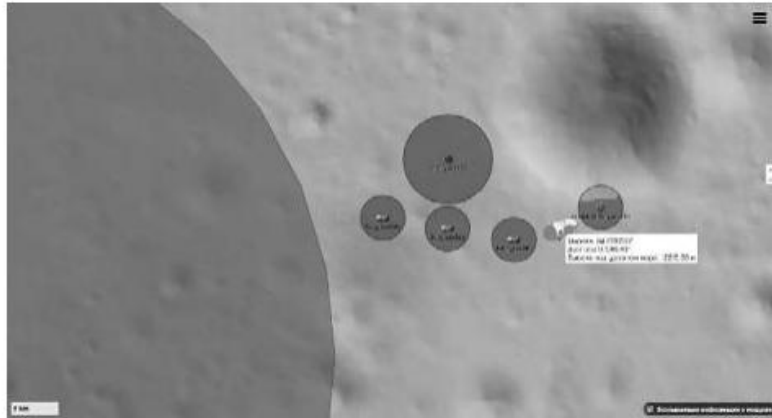


Рис. 2. Обязательное размещение медицинского модуля вблизи обитаемых

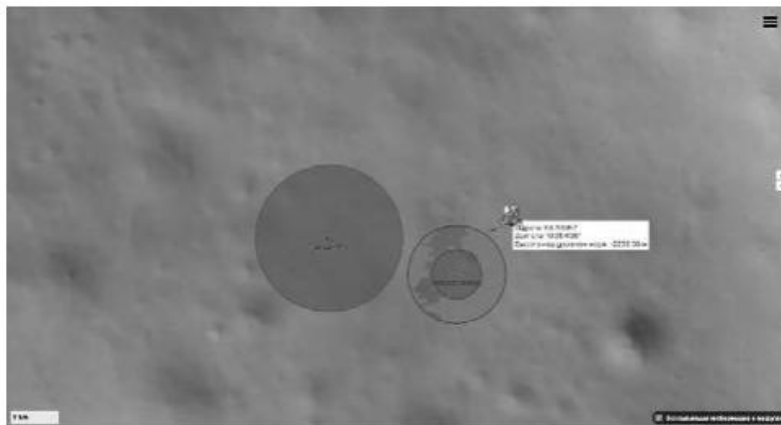


Рис. 3. Обязательное размещение ремонтного модуля вблизи производственных предприятий с учетом рельефа

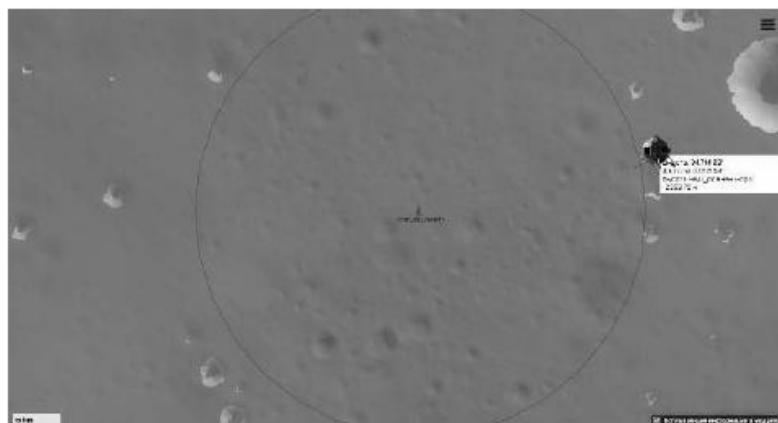


Рис. 4. Отображение запрещенной зоны

Общее правило размещения выражается логическим условием:
 Разрешено = Геофизически_допустимо $\wedge$ Функционально_допустимо.

Если оба условия выполнены, модуль сохраняется в базу данных PostgreSQL/PostGIS и отображается на карте через OpenLayers. В противном случае пользователь получает уведомление с указанием причины отказа.

Оценка эффективности проектирования

Система была протестирована на трех участках: кратеры Малаперт, Шеклтон и Хауорт. Всего проведено 120 сессий проектирования с участием 12 операторов.

Результаты показали:

- 100 % попыток размещения на недопустимых уклонах были отклонены;
- 92 % пользователей успешно завершили размещение 10 модулей с первой попытки при включенной визуализации зон;
- среднее время проектирования составило 6.2 минуты, что в 2.4 раза быстрее, чем в контрольной группе без подсветки зон.

На рис. 5–7 представлены графики успешности размещения, времени проектирования и частоты ошибок.

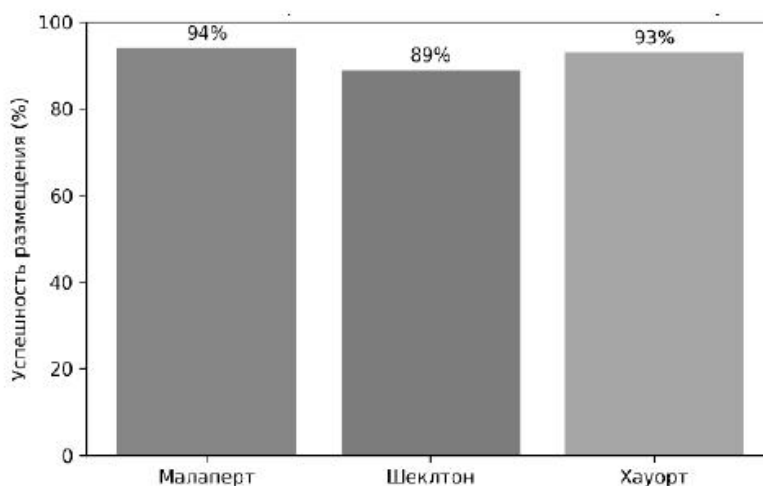


Рис. 5. Эффективность размещения в зависимости от участка

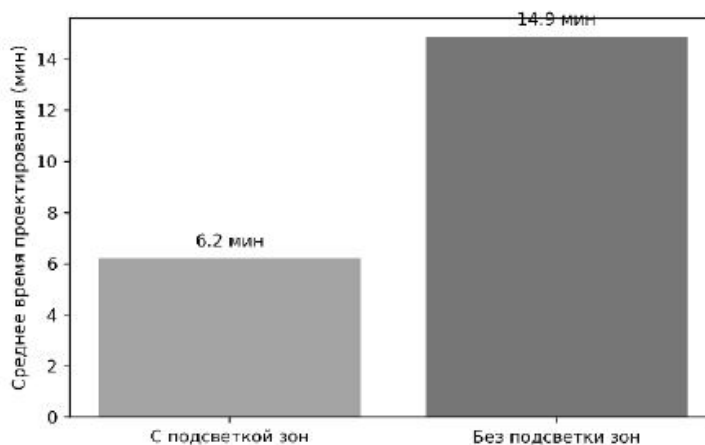


Рис. 6. Время проектирования в различных режимах

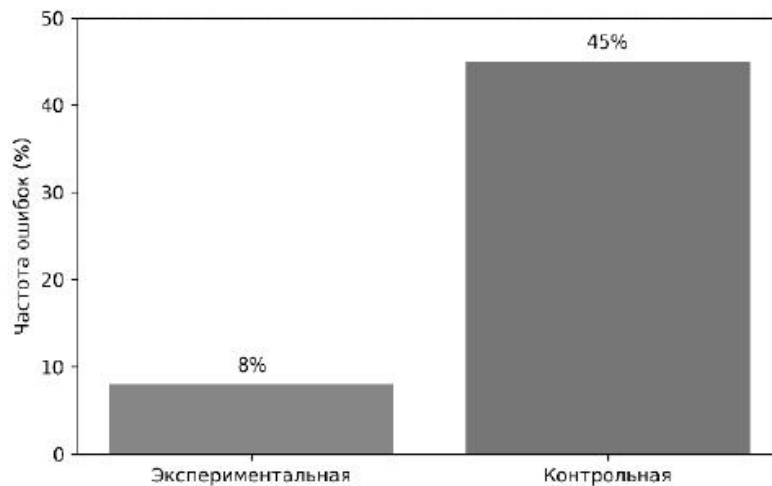


Рис. 7. Частота ошибок в контрольной и экспериментальной группах

Заключение. Разработанный эмулятор обеспечивает высокую надежность проектирования лунной базы за счет автоматизированной проверки геофизических и функциональных ограничений. Использование стандартов OGC (WMS/WFS), пространственной СУБД PostGIS и клиентской библиотеки OpenLayers позволило создать масштабируемую и кроссплатформенную систему.

Аналогия с методами помехоустойчивости в радиосвязи прослеживается: как частотное разнесение повышает устойчивость к помехам, так и пространственное разнесение проверок (по уклону, расстоянию, типу) повышает устойчивость проектирования к ошибкам. Система готова к интеграции дополнительных данных (освещенность, ресурсы) и расширению функционала (3D-визуализация, совместная работа).

Список источников

- [1] NASA. *Lunar Reconnaissance Orbiter Data Products*. URL: <https://lunar.gsfc.nasa.gov/data.html> (accessed 20.11.2025).
- [2] Open Geospatial Consortium. Web Map Service (WMS) Implementation Specification.
- [3] PostGIS Project. *Spatial and Geographic objects for PostgreSQL*. URL: <https://postgis.net/> (accessed 20.11.2025).
- [4] Кулиш Н.А., Гололобов В.С., Дроботько С.А. *Эмулятор проектирования лунной базы: техническая документация*. Москва, РТУ МИРЭА, 2025.
- [5] GeoServer User Manual. URL: <https://docs.geoserver.org/> (accessed 20.11.2025).
- [6] Turf.js Documentation. URL: <https://turfjs.org/> (accessed 20.11.2025).