

УДК 629.78

## Проектирование низкоэнергетических траекторий перелета к Луне на основе теории вековых возмущений

Широбоков Максим Геннадьевич<sup>(\*)</sup>shirobokov@keldysh.ru  
SPIN-код: 7046-4960

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена разработке метода проектирования низкоэнергетических траекторий перелета к Луне с использованием гравитационного возмущения Солнца на основе теории вековых возмущений. Выведены аналитические формулы и условия, при которых гравитационное возмущение Солнца повышает перигей и изменяет наклонение орбиты до значений, соответствующих орбите Луны вокруг Земли. Формулы численно уточняются для применения в неусредненной модели движения. Траектории далее оптимизируются методом параллельной пристрелки. Приведены примеры построенных траекторий.

**Ключевые слова:** низкоэнергетическая траектория, перелет к Луне, теория возмущений

**Введение.** Современный этап освоения космоса характеризуется высоким интересом к Луне. С одной стороны, ведущие космические агентства разрабатывают планы по созданию орбитальных станций и баз на лунной поверхности [1–3], с другой стороны, — частные космические фирмы разрабатывают собственные технологии и проявляют стремление к формированию рыночной ниши, связанной с дальним космосом. Это делает актуальными исследования эффективных и экономичных методов перелета к Луне.

Методы и материалы; результаты. В работе представлена методология проектирования траекторий перелета к Луне с гравитационным возмущением Солнца. Подход основан на теории вековых возмущений [4] и развивает работу [5]. Основным теоретическим результатом является вывод аналитических условий, связывающих долготу восходящего узла и аргумент перигея с наклонением орбиты, которые обеспечивают одновременное повышение высоты перигея и изменение наклона для достижения орбиты Луны. Условия получены в рамках усредненной модели движения двух тел с возмущением от Земли. Для применения в неусредненной динамике аналитические выражения уточнены введением эмпирических коэффициентов коррекции, определенных численно. Полученные формулы позволяют быстро проектировать низкоэнергетические траектории без численного поиска. Представлен каталог начальных приближений траекторий на 2028 г. для различных конфигураций аргумента перигея и направлений (к Солнцу и от Солнца) с ежемесячными стартовыми окнами.

В работе также представлен метод оптимизации траекторий на основе метода параллельной пристрелки с учетом ограничений на большую полуось,

эксцентриситет и наклонение стартовой орбиты, величину первого импульса, а также на целевые расстояние и скорость у Луны. Метод позволяет находить как чисто баллистические перелеты, так и траектории с промежуточными маневрами. Численные эксперименты показывают, что предложенная методология успешно генерирует траектории с длительностью полета 80–100 дней и характеристической скоростью отлета 3,0–3,2 км/с. Приводятся примеры траекторий перелета с солнечно-синхронных орбит на высоте 832 км и наклонением  $98,8^\circ$ . Успешно построена траектория к замороженной эллиптической орбите Луны с чисто баллистическим участком перелета. Импульс скорости выхода на орбиту Луны при этом составил 277,5 м/с.

**Заключение.** Разработанная методология может служить практическим инструментом проектирования траекторий перелета к Луне. Уточненные аналитические формулы применимы для произвольных стартовых наклонений и обеспечивают быстрое построение начальных приближений. Формулировка оптимизационной задачи позволяет находить траектории перелета в высоко-точной модели движения на орбиты вокруг Луны.

*Работа поддержана грантом Российского научного фонда  
(проект № 24-11-00038).*

#### **Список источников**

- [1] Fuller S., Lehnhardt E., Zaid C., Halloran K. Gateway program status and overview. *Journal of Space Safety Engineering*, 2022, vol. 9, no. 4, pp. 625–628. <https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.07.008>
- [2] Xu F., Ou J. Promoting international cooperation on the International Lunar Research Station: Inspiration from the ITER. *Acta Astronautica*, 2023, vol. 203, pp. 341–350. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.12.004>
- [3] В РАН обсудили реализацию российской лунной программы до 2060 года. URL: <https://new.ras.ru/activities/news/v-ran-obsudili-realizatsiyu-rossiyskoy-lunnoy-programmy-do-2060-goda/> (дата обращения 06.11.2025).
- [4] Лидов М.Л. Эволюция орбит искусственных спутников планет под действием гравитационных возмущений внешних тел. *Искусственные спутники Земли*, 1961, № 8, с. 5–45.
- [5] Ивашкин В.В. О траекториях полета точки к Луне с временным захватом ее Луной. *Доклады Академии наук*, 2002, т. 387, № 2, с. 196–199.