

УДК 551.510.3+521.11

Вычисление поправок плотности для модели атмосферы NRLMSISE-00

Носырев Андрей Николаевич^(*)

nosyrev.an@mipt.ru

МФТИ, Москва, Россия

Аннотация. Точность расчета плотности вдоль траектории космического объекта напрямую влияет на погрешность предсказания его движения. В работе получены пространственно-временные поправки плотности для модели атмосферы NRLMSISE-00 на высотах 300–600 км. Поправки были рассчитаны на основе оценок реального торможения группировки из 50–100 объектов за 2000–2019 годы по TLE данным. Показано, что применение поправок в 1,5–3 раза снижает погрешность расчета плотности при различном уровне солнечной активности. Результаты расчетов валидированы сравнением с данными акселерометра спутника CHAMP. Полученные поправки могут быть использованы для оценок погрешности модели NRLMSISE-00 и улучшения точности прогнозирования движения космических объектов при ее использовании.

Ключевые слова: модели плотности атмосферы, аэродинамическое торможение спутников, two-line element set

Введение. Сила сопротивления атмосферы является одним из главных возмущающих факторов для космических объектов (КО) на низкой околоземной орбите. Для точного прогнозирования и определения орбит необходимо знать как можно лучше значения плотности атмосферы по траектории движения КО. Современные модели плотности атмосферы, такие как NRLMSISE-00 [1], имеют среднеквадратичную ошибку от 10 до 50 % в зависимости от модели, высоты и уровня гелиогеомагнитных возмущений [2]. Для уменьшения ошибок моделей предлагается вводить к ним поправки на основе данных о торможении группировки низкоорбитальных КО. Цель данной работы — повышение точности модели NRLMSISE-00 на высотах 300–600 км на основе использования энергетического метода. Научная новизна заключается в построении поправок за длительный период (2000–2019 годы), что позволяет исследовать эффективность метода при различных уровнях солнечной активности.

Методы и материалы; результаты. Поправки задаются в виде линейно-зависящего от высоты множителя к ρ_m [3]. Поправки вычисляются ежедневно методом наименьших квадратов путем сопоставления для каждого КО наблюдаемой плотности ρ_o с усредненной вдоль траектории модельной плотностью ρ_m . Наблюдаемая плотность рассчитывается по убыли средней механической энергии КО за несколько дней [3]. Для расчетов использовались общедоступные TLE-данные из каталога NORAD [4] по выборке из 50–100 пассивных КО, взятой из работы [5].

Применение полученных поправок снижает среднеквадратичную ошибку между ρ_o и ρ_m в 1,5–3 раза в зависимости от года. Точность оценок суточных

поправок зависит от степени торможения выбранных КО. Поэтому основной эффект поправок в периоды низкой солнечной активности достигается за счет снижения систематической ошибки модели плотности, а в периоды высокой солнечной активности — за счет уменьшения разброса случайных ошибок модели. Валидация, проведенная по данным акселерометра спутника CHAMP [6] за 2001–2010 годы, подтвердила снижение ошибок расчета плотности при учете поправок.

Закключение. Подтверждено, что предложенные поправки снижают ошибку между наблюдаемой и модельной плотностью, причем характер уменьшения (среднее или стандартное отклонение) зависит от уровня солнечной активности. Поправки применимы для улучшения точности расчета плотности атмосферы по модели NRLMSISE-00 в период с 2000 по 2019 годы и характеризуют ожидаемый уровень ошибок прогнозирования движения КО при использовании этой модели. Работа может послужить основой для создания сервиса по вычислению поправок в режиме близком к реальному времени.

Список источников

- [1] Picone J.M. et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, vol. 107.A12. <https://doi.org/10.1029/2002JA009430>
- [2] Mutschler S. et al. A Survey of Current Operations-Ready Thermospheric Density Models for Drag Modeling in LEO Operations. *AMOS Conference proceedings*, Maui, HI, USA, 2023.
- [3] Doornbos E. *Thermospheric density and wind determination from satellite dynamics*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] *Space Track*. Официальная платформа под управлением США, предоставляющая TLE данные об орбитах КО. URL: <https://www.space-track.org/> (accessed 01.11.2025).
- [5] Emmert J.T., Dhadly M.S., Segerman A.M. A globally averaged thermospheric density data set derived from two-line orbital element sets and special perturbations state vectors. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, vol. 126.8, e2021JA029455. <https://doi.org/10.1029/2021JA029455>
- [6] Siemes C. et al. New thermosphere neutral mass density and crosswind datasets from CHAMP, GRACE, and GRACE-FO. *Journal of space weather and space climate*, 2023, vol. 13 (16). <https://doi.org/10.1051/swsc/2023014>