

## Классификация ТКО на НОО методами машинного обучения

*Самородова Екатерина Борисовна*

Кафедра математической логики и теории алгоритмов, Москва

*E-mail: katsam@passap.ru*

Количество техногенных космических объектов (ТКО) как в околоземном космическом пространстве (ОКП) в целом, так и на низких околоземных орбитах (НОО) в частности неуклонно растет последние несколько лет, что впоследствии может привести к каскадным столкновениям и другим катастрофическим последствиям для космических миссий [1, 2, 3, 4]. ТКО включают в себя искусственные спутники Земли (ИСЗ), обломки ракет-носителей (РН) и разгонные блоки, потерянные инструменты, космический мусор (КМ) и т.д., причем действующие космические аппараты (КА) составляют лишь небольшую часть всех каталогизированных ТКО диаметром больше 5-10 см [4, 5]. Для предотвращения дальнейшего роста количества КМ в ОКП необходимо, в первую очередь, осуществлять мониторинг ТКО и своевременно обновлять информацию в соответствующих каталогах. Для этого последовательно решается ряд задач, в том числе идентификация космических объектов. Идентификация чаще всего производится в результате подсчета корреляций между новыми наблюдениями и имеющимися в каталоге как реальными, так и симулированными траекториями объектов [4, 6]. Количество потенциальных объектов, соответствующих данному наблюдению, можно значительно уменьшить с помощью предварительной классификации ТКО, что позволит сравнивать его только с небольшой частью каталога.

Методы для классификации КА на НОО по разнородным наблюдениям включают в себя методы машинного обучения [7, 8]. Однако указанные решения дают не самую точную классификацию, которая может быть получена в результате анализа записей TLE. Выделенное в данной работе разбиение ТКО по типам, сериям или группировкам спутников содержит 12 категорий, тогда как космический мусор, составляющий  $> 50\%$  всех наблюдений, выделен в отдельную группу, что так же не было представлено в предыдущих исследованиях. Таким образом, в данной работе решается задача несбалансированной классификации ТКО по набору данных TLE. Данные, полученные после преобразования записей с сайта space-track.org, достаточно специфичны, т.к. содержат признаки в угловой мере (орбитальные элементы, сферические координаты и т.д.), а выделенные категории ТКО состоят из различного числа объектов. Следовательно, для решения данной задачи следует выбирать модели машинного обучения с учетом специфики данных.

В результате сравнения как линейных моделей, так и методов на основе решающих деревьев и их модификаций, было установлено, что наиболее оптимальной моделью для решения задачи предварительной классификации ТКО по TLE является ансамбль из решающих моделей - модель градиентного бустинга из фреймворка CatBoost. Данная модель позволяет с более чем 93% точностью предсказывать тип космического объекта. Для дополнительного тестирования модели были получены прогнозы категорий для объектов с неидентифицированным типом, и распределение полученных предсказаний совпало с ожидаемым, что подтверждает согласованность модели классификатора с наблюдениями и устойчивость к данным с нехарактерным распределением признаков. Таким образом, предлагаемая модель может быть использована в системе мониторинга ОКП для предварительной классификации объектов по наблюдениям в формате TLE, что позволит сократить время на поиск возможного соответствия среди каталогизированных объектов, если проводить поиск в первую очередь среди объектов предсказанной категории.

### Источники и литература

- 1) Вениаминов С. С., Червонов А. М. Космический мусор — угроза человечеству. Инт космических исслед. Российской акад. наук (ИКИ РАН), 2012. URL: <http://www.iki.rssi.ru/books/2012veniaminov.pdf>.
- 2) Шпакович А. В., Константиновская Л. В., Щемелинина М. С. Современные проблемы мониторинга объектов космического мусора // Вестник РУДН. 2013. Т. 5.
- 3) Адушкин В. В., Аксёнов О. Ю., Вениаминов С. С., Козлов С. И. Об оценке опасности мелкого космического мусора для космической деятельности и экологии Земли // Воздушно-космическая сфера. 2019. Т. 3. С. 72–81.
- 4) T Flohrer, S Lemmens, F Schmitz. Resident space object track reconstruction using a multireceiver radar system // Proc. 8th European Conference on Space Debris. ESA Space Debris Office, 2021.
- 5) Mehrholz Dieter, Leushacke Ludger, Flury Walter et al. Detecting, tracking and imaging space debris. 2002. URL: <https://api.semanticscholar.org/> CorpusID:44041214.
- 6) A Pastor, J Siminski, G Escribano et al. Early cataloguing of fragments from break-up events // Advances in Space Research. 2023. Vol. 71, no. 10. Pp. 4222–4238.
- 7) Sanad Ibrahim, Vali Zahra, Michelson David G. Statistical Classification of Remote Sensing Satellite Constellations // 2020 IEEE Aerospace Conference. 2020. Pp. 1–15.
- 8) Wang Dongfang, Li Fen. A machine learning method for the orbit state classification of large LEO constellation satellites // Advances in Space Research. 2023. Vol. 71, no. 3. Pp. 1644–1656.