Анализ избранного ряда пулковских астрометрических наблюдений главных спутников Урана: от сканов астронегативов до современных данных

© Д.А. Бикулова,[1] Н.В. Нарижная,[1] Т.А. Васильева[1]

[1]Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН,
196140 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ras1304@yandex.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 29 августа 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

По-прежнему остается актуальной проблема улучшения эфемерид главных спутников Урана на основе наземных астрометрических наблюдений. Представлены положения спутников Урана в системе каталога Gaia DR3, характеризующиеся внутренней точностью 20–50 mas для современных наблюдений, выполненных с помощью 40-cm пулковского телескопа в обсерватории Ассы-Тургень, и 80 mas для сканов фотопластинок Нормального астрографа (1919 и 1930 гг.), полученных с помощью комплекса NAROO (Парижская обсерватория). Анализ разностей O-C (Observed minus Computed — наблюденное минус вычисленное) для различных комбинаций моделей движения „планета+спутники“ показал признаки наличия систематических отклонений, которые могут объясняться несовершенством текущих эфемерид.

Ключевые слова: спутники Урана, астронегативы, эфемериды, модели движения.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64052.318-26

Построение эфемерид, отвечающих точности современных астрометрических измерений, требует учета взаимных резонансов, приливных взаимодействий и даже свойств недр планет и спутников [1]. В случае Урана и его главных спутников различия в комбинациях „планетная теория + спутниковая теория“ обнаруживают расхождения до 50 mas [2]. Это хорошо видно на рис. 1. Здесь рассматриваются разности прямых восхождений спутника Урана Оберона (U4) для комбинаций теорий DE441+Jacobson(2025) [3] минус INPOP19+Lainey(2015) ([4,5]). Ввиду сравнительно большого периода обращения Урана вокруг Солнца до сих пор нет хорошего покрытия всей орбиты высокоточными измерениями. Это объясняет расхождения планетных теорий для Урана порядка 100 mas. Плавное изменение разностей в пределах 20 mas (более 200 km) — это уже следствие систематических расхождений между наилучшими системами эфемерид самих главных спутников Урана.

Для понимания причины указанных различий нужны плотные и длительные ряды астрометрических измерений положений спутников. Космические наблюдения спутников (Gaia [6] и другие космические обсерватории) все еще являются эпизодическими, поэтому разумно активно использовать результаты наземных наблюдений.

Планета Уран и ее главные спутники являются объектами основной программы наблюдений, осуществлявшейся на телескопах Пулковской обсерватории на протяжении XX в. (первые снимки датированы 1919 г.). Наблюдения первой половины XX в. имели целью как можно точнее измерить положение планеты. Всего в период 1919–1940 гг. на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории (диаметр $D = 33$ cm, фокусное расстояние $F = 3467$ mm, рабочее поле 2×2 deg) получено 37 фотопластинок для Урана. Ввиду значительного блеска Урана чаще всего использовались короткие экспозиции (менее 10 min). В результате изображения спутников либо отсутствуют из-за малости экспозиции, либо их измерения затруднены. Оцифровка семи из этих фотопластинок выполнена с помощью системы NAROO (Парижская обсерватория) [7] (рис. 2).

В левой части рис. 3 показан фрагмент скана фотопластинки 1919 г. с изображением системы Урана. Наблюдатели в первой трети XX в. фокусировались на измерении положений самой планеты, а не ее спутников, и предпочли делать короткие выдержки, при которых изображения спутников либо не получались, либо не удавалось их измерить стандартными способами. Тем не менее на двух пластинках из семи удалось измерить положения для спутников U3 (Titania) и U4 (Oberon). Но даже такие единичные измерения, отнесенные к системе каталога Gaia DR3 [8], имеет смысл выполнять, так как они имеют высокую точность и расширяют временной интервал, на котором можно исследовать и улучшать модели движения планеты и спутников. Точность этих измерений оценивалась по контрольным звездам, которые выбирались вблизи изображений спутников, имели близкие значения блеска и измерялись также, как спутники.

Стандартные ошибки положений таких звезд оказались 76, 88 mas. Результаты измерений и значения (O-C) (Observed minus Computed — наблюденное минус вычисленное) относительно комбинации теорий INPOP19+Lainey(2015) приведены в таблице.

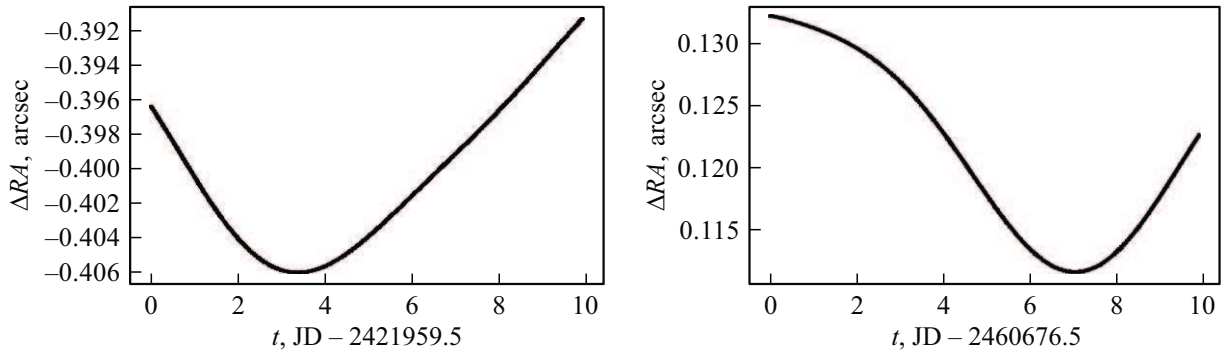


Рис. 1. Измерение разностей прямых восхождений Оберона (U4) между двумя современными версиями эфемерид спутников Урана: DE441+Jacobson(2025) минус INPOP19+Lainey(2015) на протяжении 10 суток. Слева — для эпохи 1919 г., справа — для 2025 г.

Положения спутников U3 (Titania) и U4 (Oberon), полученные в результате оцифровки двух пулковских пластинок с помощью комплекса NAROO (Парижская обсерватория)

Спутник	JD	RA, deg	DEC,deg	$(O\text{-}C)_{RA}$, arcsec	$(O\text{-}C)_{DEC}$, arcsec
U3	2422223.341049 1919-09-21T19:41:12	332.13169493	–12.30923059	–0.198	–0.227
U4	2426327.25144 1930-12-16T17:42:08	11.68839911	4.27893012	0.221	0.026

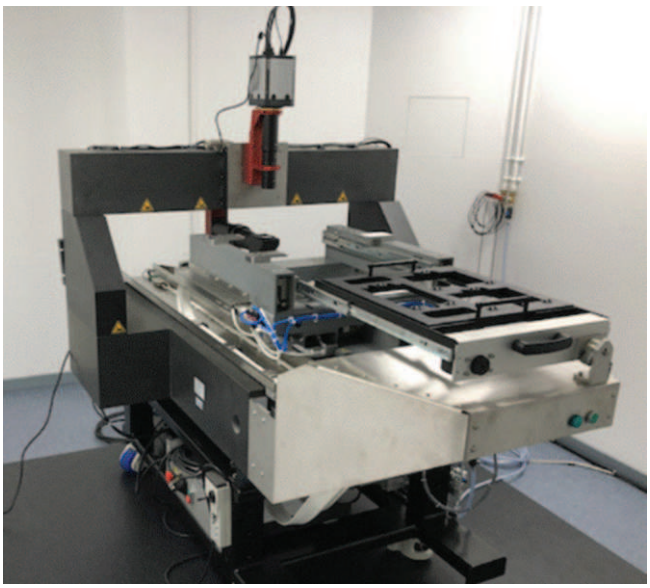


Рис. 2. Внешний вид измерительного комплекса NAROO (Парижская обсерватория).

Помимо архивных данных, в исследованиях задействован достаточно объемный (сотни измерений) ряд современных наблюдений. В настоящей работе представлены результаты наблюдений спутников Урана, полученные с помощью пулковского 40-cm телескопа ($D = 40$ cm, $F = 4$ m, рабочее поле 17×11 arcmin), установленного в обсерватории Ассы-Тургень (АФИФ, Казахстан) [9]. Эти наблюдения были выполнены в период с августа 2025 г. по январь 2026 г.

Фрагмент цифрового кадра, содержащего изображение системы спутников Урана на фоне звезд, показан на рис. 3 справа. Съемка выполнялась сериями из 20–50 кадров с временами накопления 5–10 s в фильтре R. Всего анализировалась 26 серий кадров. Построение PSF (Point Spread Function — функция рассеяния точки) по изображениям звезд с высокими SNR (Signal-to-Noise Ratio — отношение сигнал/шум) позволило эффективно аппроксимировать изображения звезд и спутников Урана, варьируя только уровень фона, величину потока и пиксельные координаты фотоцентра. Астрометрическая привязка к системе каталога Gaia DR3 [8] велась линейным методом редукции с контрольными звездами. Последние, как и в случае с обработкой сканов астронегативов, подбирались вблизи изображений спутников. Отсутствие значимых разностей O-C для таких контрольных звезд гарантировало высокое качество итоговых положений спутников Урана. Все данные измерений в виде csv-таблиц доступны в GitHub (https://github.com/ymax74/URANUSS).

Для каждого кадра вычислялись значения O-C для спутников. Величины стандартных ошибок таких рядов O-C в большинстве случаев лежат в пределах 20–50 mas. Эту оценку можно рассматривать, как комбинацию случайных ошибок и тех систематических ошибок, которые не представляется возможным учесть

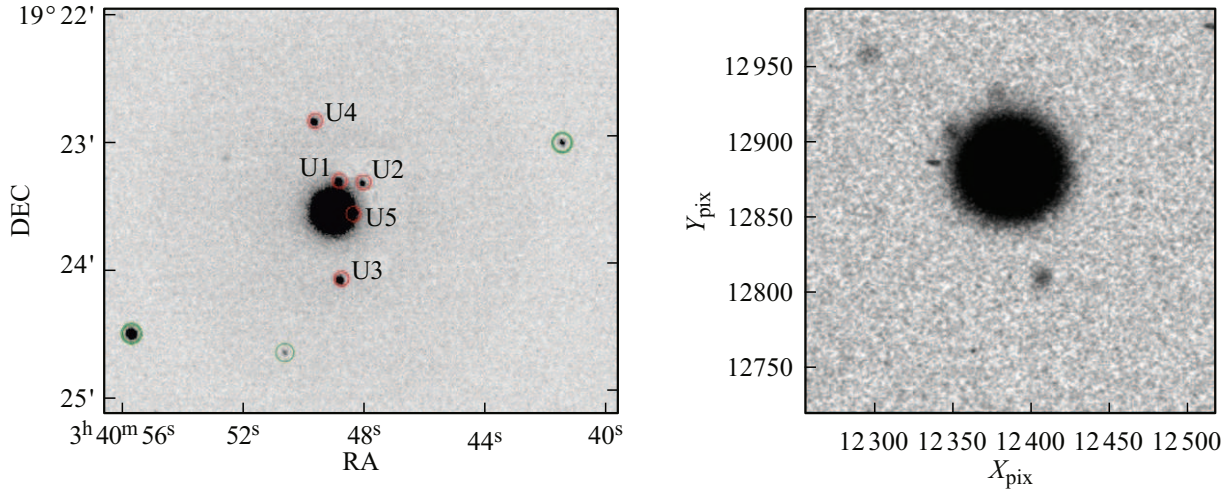


Рис. 3. Типичные изображения системы Урана в исходном материале данного исследования. Слева — астронегатив, снятый 21 сентября 1919 г. на пулковском Нормальном астрографе и оцифрованный с помощью системы NAROO (Парижская обсерватория), справа — фрагмент кадра с изображением системы Урана, снятого с помощью 40-cm пулковского телескопа обсерватории Ассы-Тургень (АФИФ, Казахстан) 6 января 2026 г.

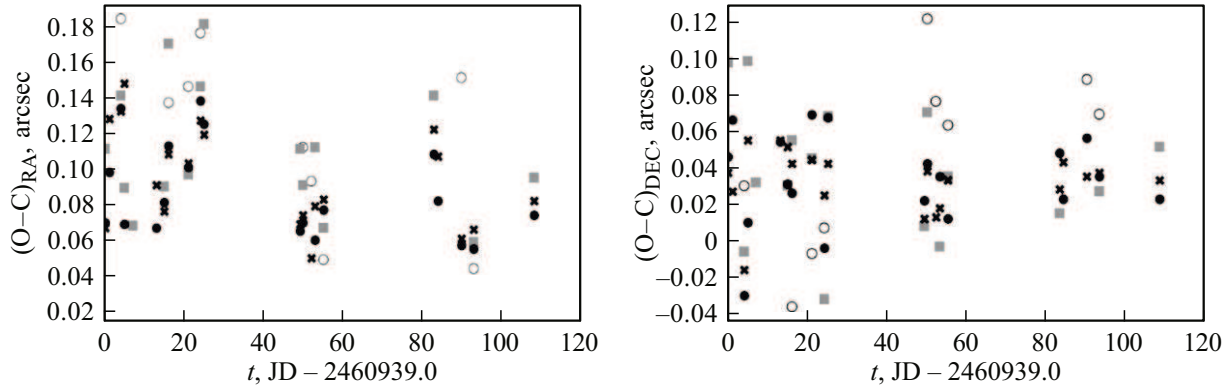


Рис. 4. Зависимость разностей O-C по прямому восхождению (слева) и по склонению (справа) от времени для наблюдений на 40-cm пулковском телескопе в обсерватории Ассы-Тургень. Пустые кружки демонстрируют разности для U1 (Ariel), квадратные метки для спутника U2 (Umbriel), кресты — для U3 (Titania) и черные кружки — для U4 (Oberon).

в данном случае. Аналогичные оценки точности координат получают разные авторы, выполняя аналогичные наблюдения. Например, в работе [10] выполнено почти две сотни измерений с оценкой точности 30 mas.

В дальнейшем анализе использовались средние значения координат для серий кадров. Оказалось, что значения O-C относительно комбинации эфемерид INPOP19+Lainey(2015) не превосходят 200 mas по прямому восхождению и 100 mas по склонению. Разности для соседних ночей хорошо согласуются между собой. Это видно из рис. 4, на котором показаны вариации O-C со временем.

Сравнение характерного хода разностей координат на рис. 1, 4 показывают сопоставимость O-C, полученных из наших измерений, и разностей теорий движения спутников. Обращает на себя внимание наличие слабо заметного систематического тренда для всех спутников. Применение линейной модели показывает величину коэффициента наклона $-0.241 + / - 0.114$ mas/day для разностей по RA (Right Ascension — прямое восхождение). С учетом объема выборки этот тренд значим при $p < 0.05$ (вероятность случайного появления такого значения $p = 0.037$ согласно распределению Стьюдента). Для разностей по DEC (Declination — склонение) тренд не значим. На интервале 120 суток разности по RA меняются почти на 0.03 arcsec, что сопоставимо с уровнем случайных ошибок измерений. О высокой точности наших измерений свидетельствует близость значений O-C в смежные ночи наблюдений. Главный вывод, который можно сделать из проведенных наблюдений и анализа, состоит в том, что точность наземных измерений уже достаточно высока, чтобы видеть несовершенство текущих моделей движения главных спутников Урана. Для единичных измерений первой

половины XX в. точность полученных координат чуть лучше 80 mas. Но и различие эфемерид для эпохи, отнесенной в прошлое на столетие, может достигать половины угловой секунды. Накопление значимого количества результатов наземных наблюдений, аналогичных представленным в настоящей работе, должно привести к появлению эфемерид следующего поколения.

Благодарности

Авторы благодарны коллегам из IMCCE и Парижской обсерватории, прежде всего Венсану Роберу (Vincent Robert) за возможность использовать измерительный комплекс NAROO в рамках программы Bourses Metchnikov. Séjours scientifiques de l'ambassade de France en Russie.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Н.В. Емельянов. *Динамика естественных спутников планет на основе наблюдений* (Фрязино, Век-2, 2019), 577 с.
[2] Д.А. Бикулова, С.В. Назаров, М.Ю. Ховричев. *Астрометрические наблюдения спутников Урана и Нептуна на телескопах ГАО РАН и КрАО РАН в 2020 г. Астрономия и исследование космического пространства: Всероссийская с международным участием научная конференция студентов и молодых ученых, посвященная памяти П.И. Захаровой* (Екатеринбург, Россия, 1–5 февраля 2021 г.), сб. научных тр. (Изд-во Уральского ун-та, Екатеринбург, 2021), с. 89–92.
[3] R.F. Jacobson, R.S. Park. Astronom. J., **169** (2), 65 (2025).
[4] A. Fienga, P. Deram, V. Viswanathan, A. Di Ruscio, L. Bernus, D. Durante, ... J. Laskar. *INPOP19a planetary ephemerides* (Doctoral dissertation, IMCCE, 2019)
[5] V. Lainey. Planetary and Space Science, **56** (14), 1766 (2008).
[6] D. Hestroffer, Z. Liu, J. Desmars, P. David. *Science of asteroids with Gaia astrometry and FPR release* (45th COSPAR Scientific Assembly. Held 13–21 July, 2024)
[7] V. Robert, J. Desmars, V. Lainey, J.-E. Arlot, A.-C. Perlbarg, D. Horville, J. Aboudarham, C. Etienne, J. Guérard, S. Ilovaisky, M.Y. Khovritchev, C. Le Poncin-Lafitte, A. Le Van Suu, C. Neiner, D. Pascu, L. Poirier, J. Schneider, P. Tanga, D. Valls-Gabaud. A&A, **652**, A3 (2021).
[8] Gaia Collaboration. A&A, **674**, A1 (2023). DOI: 10.1051/0004-6361/202243940
[9] М.Ю. Ховричев, А.А. Архаров, В.Ю. Ким, И.С. Измайлов. Известия Главной Астрономической Обсерватории в Пулкове, **227**, 58 (2022).
[10] X.Q. Fang, Q.Y. Peng, X. Lu, B.F. Guo. Planetary and Space Science, **260**, id.106085 (2025).