



Почему важно определять положения галилеевых спутников Юпитера в системе *Gaia* на основе анализа астронегативов XX века?

Д.А. Бикулова¹, И.А. Балаяев¹, Н.В. Нарижная¹, Т.А. Васильева¹

¹ ГАО РАН

Поступила в редакцию 3 декабря 2025 / Принята к публикации 11 декабря 2025

Аннотация

Астрометрическая редукция сканов фотопластинок, полученных в ходе реализации программ по наблюдению системы Юпитера, позволяет определить экваториальные и/или относительные координаты галилеевых спутников Юпитера в системе каталога *Gaia* DR3. В XX веке такие наблюдения интенсивно велись во множестве обсерваторий ради построения адекватной теории их движения. В наши дни качество эфемерид галилеевых спутников определяется весьма точными измерениями с борта космических аппаратов, осуществлявших миссии к планете, и данными, полученными с помощью современных наземных и космических телескопов. Результаты фотографических наблюдений XX века привлекались при построении эфемерид, но с малыми весами и без строгой привязки к системе *Gaia*. Полученная точность эфемерид спутников на начало XX века лучше 0.1 угловой секунды, а на эпоху 1960-х – 1970-х лучше 0.01 секунды дуги. Поэтому возникает законный вопрос о целесообразности продолжения оцифровки соответствующих фотопластинок и последующей обработки данных. В этой небольшой статье мы постараемся представить свой вариант ответа, основываясь на коротком анализе сканов пулковских астронегативов, полученных с помощью Нормального астрографа Пулковской обсерватории.

ключевые слова: спутники планет, оцифровка, эфемериды, астрометрическая редукция

Введение

Проблематика построения и улучшения эфемерид тел Солнечной системы остается актуальной по целому ряду причин. С одной стороны совершенствование эфемерид на современном уровне точности наблюдений невозможно без привлечения сложных динамических моделей движения больших планет и их спутников, в которых учитываются все тонкие эффекты, включая те, что обусловлены особенностями их внутреннего строения. Таким образом исследования в данном направлении способствуют прояснению деталей физического строения тел Солнечной системы и более глубокому пониманию механизмов различных динамических эффектов (приливы, резонансы). С другой стороны – это продвижение в решении чисто прикладной задачи – навигации в Солнечной системе.

В течение последних 15-ти лет наблюдается качественный рост в построении моделей движения спутников больших планет. Удалось показать, что орбитальное движение этих тел невозможно рассматривать без учета приливного взаимодействия “спутник–планета” и “спутник–спутник”. Понятно, что проявления этих эффектов в наземных астрометрических измерениях не может быть большим даже на вековом интервале эпох (сотые доли угловой секунды). Вековые тренды, которые могут быть обусловлены диссипацией энергии орбитального движения, практически невозможно обнаружить на масштабе нескольких последних десятилетий, когда измерения

*e-mail:ras1304@yandex.ru

наиболее точны (до нескольких миллисекунд дуги). Именно это мотивирует исследователей обращать пристальное внимание на “архивные” астронегативы вековой давности.

Если эфемериды галилеевых спутников столь точны, то возникает вопрос о целесообразности продолжения оцифровки соответствующих астронегативов и дальнейшего анализа данных. Часть ответа можно найти в сравнительно свежей работе Robert, Pascu *et al.* 2025, авторы которой представляют результаты астрометрической редукции астронегативов с изображениями Юпитера и спутников, снятых в 1970-е – 1990-е годы с помощью 26-дюймового рефрактора USNO. Авторы доказывают, что внутренняя точность положений, которая может быть получена в среднем составляет 0.055 угловые секунды и декларируют пригодность этих данных для улучшения эфемерид Юпитера и спутников в контексте двух ближайших космических миссий к системе Юпитера (Juice and Europa Clipper).

В этой статье мы попытаемся проверить возможность использования пулковских данных, получаемых в результате оцифровки “архивных” наблюдений, для улучшения эфемерид галилеевых спутников. В качестве материала мы используем несколько сканов фотопластинок, снятых на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории в начале XX века и во второй половине прошлого столетия. Проведем анализ качества современных эфемерид в контексте оценок точности доступных результатов измерений положений галилеевых спутников на масштабе последних 120 лет, чтобы дать свой ответ на вопрос, вынесенный в заглавие.

1 Оцифровка астронегативов и дальнейшая обработка данных

1.1 Процедура оцифровки

Для оцифровки астронегативов пулковской стеклотеки используется измерительный комплекс MDD (Mobile Digitizing Device), который представляет собой камеру Canon DS126201 с макрообъективом Canon EF 100 mm f/2.8L Macro IS USM, закрепленную над измерительным столом. Астронегатив помещается на прозрачный измерительный стол. Подсветка осуществляется снизу с помощью LCD-монитора, расположенного на существенном расстоянии от измерительного стола, чтобы избежать неравномерности подсветки. Каждый астронегатив снимался несколько раз – фрагментами со взаимными перекрытиями. Более подробно процедура оцифровки и особенности устройства MDD описаны в работе Куликовой и др. (Kulikova, Narizhnaya, Vasilyeva, 2022).

В данной работе использованы астронегативы, полученные с помощью Нормального астрографа ($D = 33$ см, $F = 3467$ мм, размер пластиинок 16×16 см, масштаб почти 60 arcsec/mm). Всего в рамках работы было оцифровано 23 астронегатива.

Положение измерительного стола для оцифровки астронегативов с изображениями галилеевых спутников Юпитера было отрегулировано так, чтобы масштаб скана составлял 1 arcsec/pix. Это позволяло надеяться на достижение приемлемой астрометрической точности измерений при обеспечении достаточного размера рабочего поля, чтобы в нем оказывалось хотя бы несколько опорных звезд. Из-за высокого блеска Юпитера и галилеевых спутников время накопления обычно составляло от минуты до нескольких минут. Поэтому на астронегативах доступны изображения звезд до 10.5 – 11.0 звездной величины в зависимости от качества фотоэмulsionии.

Подбор времени накопления при оцифровке осуществлялся вручную таким образом, чтобы на гистограмме снимка не было отсчетов, отвечающих передержке.

Полученные сканы сохранялись в файлы во внутреннем формате CANON (.CR2) без сжатия. В дальнейшем исходные файлы преобразовывались в fits-формат, более удобный для астрономических приложений. Всего было получено 88 файлов. Из них интерес для нас представляли 82 фрагмента, содержащих изображения Юпитера и его спутников.

1.2 Выделение экспозиций

В ходе всей более чем вековой истории пулковских фотографических наблюдений Юпитера и его спутников посредством Нормального астрографа использовались разные стратегии съемки.



Рис. 1: Примеры фотопластинок снятых в 1932 и 1966 годах. С большой экспозицией (передержанным изображением Юпитера и спутников) и с использованием диафрагмы соответственно.

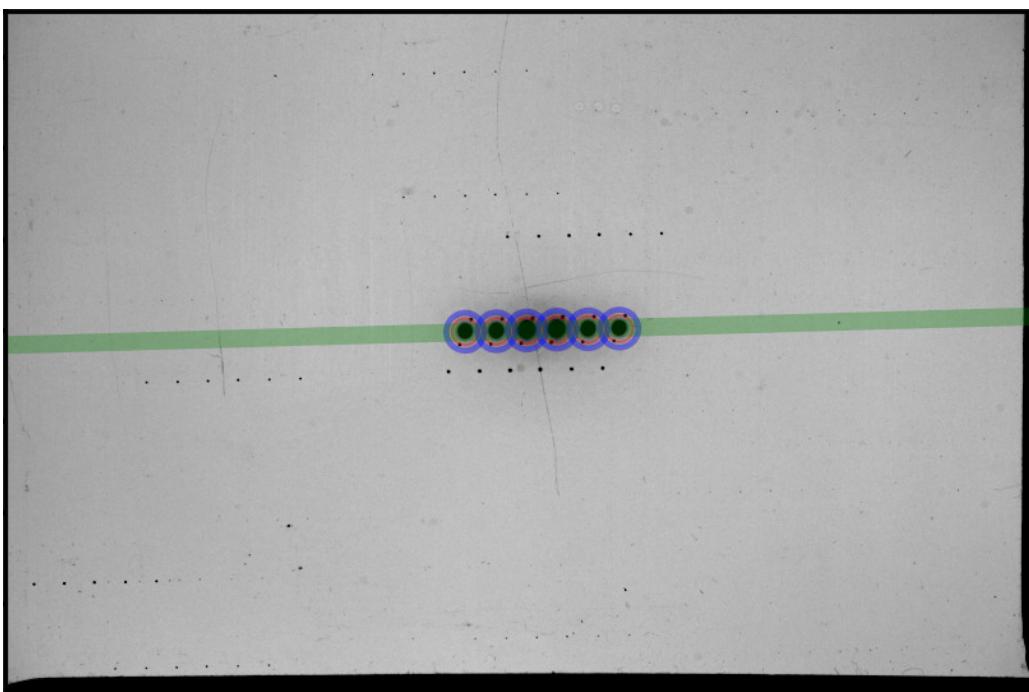


Рис. 2: Пример скана с выделенной цепочкой экспозиций Юпитера

В начальный период делались попытки получать астронегативы с большими экспозициями ради обилия опорных звезд, в том числе с использованием диафрагмы (рис. 1). Такие астронегативы оказались малопригодны для точных измерений и были исключены из обработки. Также в связи с особенностями описанного далее алгоритма, были исключены из работы астронегативы с одиночными экспозициями, их обработку авторы оставляют на будущее.

На рис. 2 показан скан одного из астронегативов, снятого в 1970-х годах. Можно видеть шесть экспозиций. Выделение экспозиций вручную (путем добавления координат соответствующих меток в заголовок fits-файла) требует времени и усилий. Оказалось, что намного эффективнее использовать такое известное приложение как SExtractor (Bertin, Arnouts, 1996), которое позволяет выделить все источники на изображении, которые характеризуются достаточным значением потока и с большой вероятностью являются именно астрономическими объектами, а не артефактами астронегатива (дефектами эмульсии, сколами, царапинами). Применение преобразования Хафа (Duda, Hart, 1972) дает возможность выделить изображения, расположенные вдоль прямых линий – дорожки экспозиций.

На рис. 2 зеленым цветом показана линия, отвечающая максимальному отсчету диаграммы Хафа. Хорошо видно, что данном кадре она соответствует последовательным изображениям

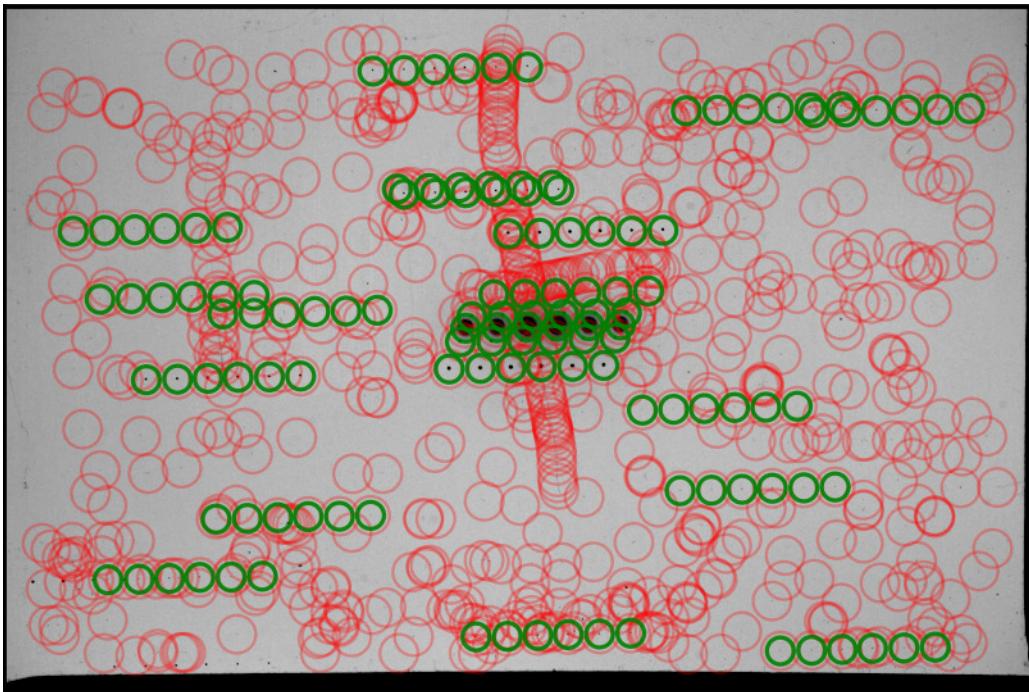


Рис. 3: Пример скана с выделенными цепочками экспозиций объектов. Красные метки отвечают всем “источникам”, найденным SExtractor. Зеленые – выявленным изображениям звезд, спутников Юпитера и самой планеты.

Юпитера. Этого достаточно, чтобы построить карту сдвигов между экспозициями и применить ее ко всем выделенным изображениям. В результате удается получить наборы изображений, разделенные по экспозициям. Пример такого выделения экспозиций представлен на рис. 3.

1.3 Отождествление звезд *Gaia* DR3 на сканах

Дальнейшая привязка к каталогу *Gaia* (отождествление звезд в каждом наборе) производилась с помощью стандартной процедуры с использованием пакета *astrometry.net* (Lang *et al.* 2012). Соответствующие данные (wsc-параметры) записывались в заголовки fits-файлов, что давало удобный с точки зрения дальнейшего измерения изображений способ “навигации” по скану. Формально wsc-параметры и есть результат астрометрической калибровки. Однако точность такой привязки невелика (секунды дуги), поэтому полученные параметры удобно использовать чтобы преобразовать экваториальные координаты звезд из каталога *Gaia*, исправленные за собственные движения на эпоху получения снимка, в пиксельные координаты. Это позволяет однозначно идентифицировать звезду на снимке и проводить точные измерения положений фотоцентров.

1.4 Измерение фотоцентров изображений звезд и спутников Юпитера

На рис. 4 показана типичная структура изображения Юпитера и спутников. Изображение планеты характеризуется сильной передержкой. Изображения спутников выглядят хорошо насыщенными.

На данном этапе мы попытались использовать довольно простую модель изображения $I(x, y)$ (I – величина отсчета на пикселе с координатами x, y), позволяющую аппроксимировать изображения всех объектов (и звезд, и Юпитера, и его спутников), посредством применения метода Левенберга-Марквардта. Ниже приведено выражение для использованной модели.

$$I(x, y) = I_{bkg} + \frac{I_{max}}{1 + e^{r^2+s}}$$

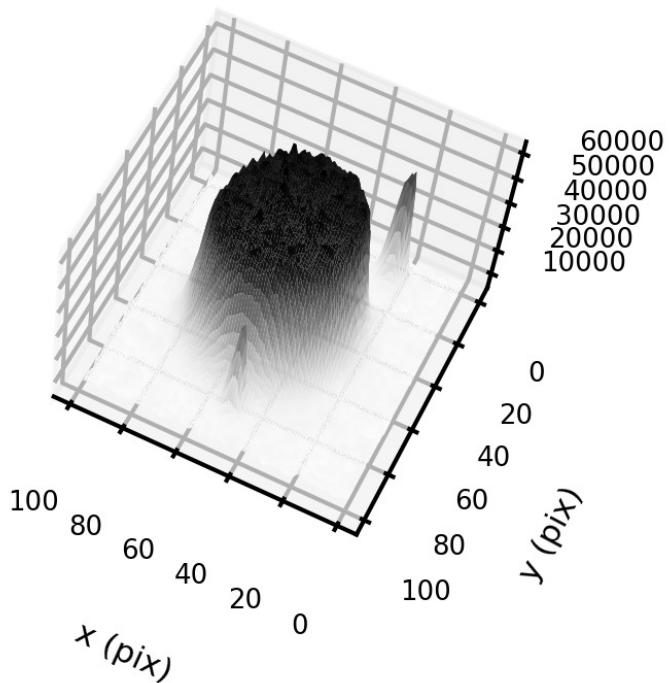


Рис. 4: Типичная структура изображения Юпитера и спутников на скане астронегатива, полученного с помощью MDD.

Здесь $r^2 = A(x - x_{ph})^2 + B(y - y_{ph})^2 + C(x - x_{ph})(y - y_{ph})$. В данном выражении A, B, C определяют форму изображения (эллипс, который имеет произвольное сжатие и ориентировку осей относительно осей пиксельных координат), I_{bkg}, I_{max} – величины уровня фона и максимального отсчета, отвечающего точке с координатами фотоцентра x_{ph}, y_{ph} . Величина s описывает ширину области передержки. Для звезд и спутников величина этого параметра незначима (она меньше уровня ошибок определения), для Юпитера этот параметр является весьма важным, так как хорошо приближает реальное, передержанное изображение с точностью до краевых эффектов проявления.

Визуализация модели и адекватности ее применения для аппроксимации реальных сканов представлены на рис. 5 и рис. 6. Типичные величины стандартных ошибок координат фотоцентров для таких изображений составляют 0.02 - 0.04 угловой секунды (с учетом масштаба сканов).

При оцифровке фотопластинок пулковской стеклотеки необходимо учитывать искажения (дисторсию) объектива сканера (MDD). Для этого с помощью комплекса NAROO (Robert, Desmars *et al.* 2021) были сделаны сканы нескольких пулковских шаблонов. Шаблон – это фотопластинка, на которой фотографическим путем нанесена сетка меток. NAROO – весьма точный инструмент, который позволяет получать точность координат меток до 0.06 микрометров. Внутренняя точность измерений нашей машины (MDD) составляет 1 микрометр. Смещения из-за дисторсии могут достигать величины до 3-5 микрометров. Поэтому оцифровка шаблона и измерение меток дает возможность получить параметры перехода от пулковского скана к системе NAROO. Это приводит к росту точности финальных данных в 3-5 раз (Khovritchev *et al.* 2021).

2 Результаты измерений

Всего удалось обработать 23 фрагмента, относящиеся к 6 фотопластинкам, снятым в 1974 году. Одна пластина, на которой сняты разные фазы покрытия Юпитером звезды HD 220035, датирована 19 сентября 1903 года. Именно факт покрытия и позволил сравнительно надежно

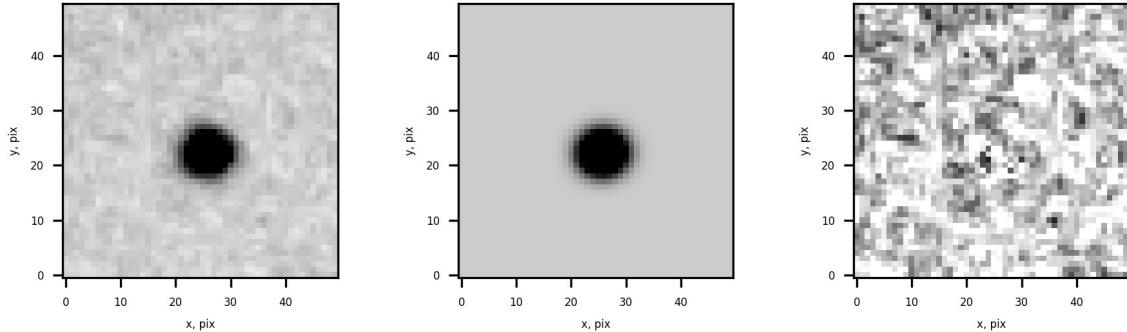


Рис. 5: Слева-направо показаны исходное изображение спутника Юпитера Ио, модельное изображение согласно приведенному в тексте выражению и разность “исходное изображение минус модель”.

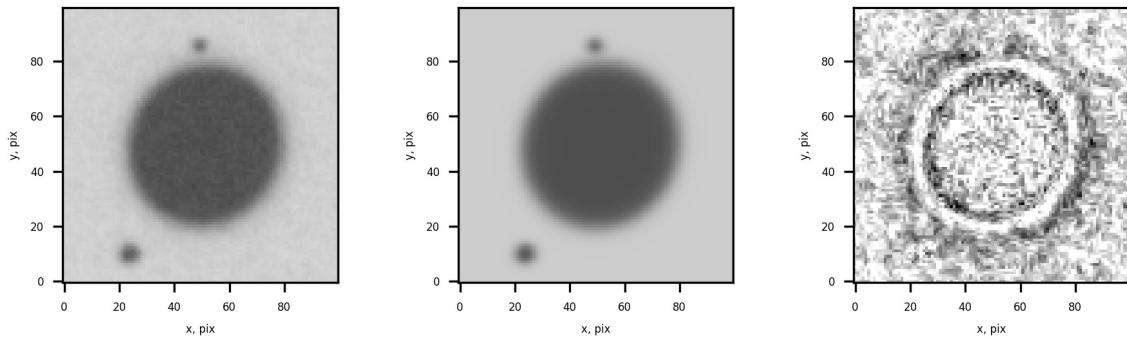


Рис. 6: Слева-направо показаны исходная комбинация близко расположенных изображений Юпитера, его спутника Европы и звезды HD220035, модельное изображение и разность “исходное изображение минус модель”. В этом случае моделью изображения была сумма изображений всех трех объектов. Данная конфигурация небесных объектов наблюдалась 19 сентября 1903 года.

датировать экспозиции, так как журналы наблюдений, увы, были потеряны в результате боевых действий на территории Пулковской обсерватории в годы Великой Отечественной войны.

В качестве примера таблица 1 содержит результаты измерений для фотопластинки 10440 из пулковской стеклотеки. Помещать все остальные данные в тексте не очень удобно и с точки зрения читателя, и тем более пользователя данных. Поэтому они доступны в соответствующем проекте на GitHub в виде csv-файлов¹.

В таблице 1 даются оценки точности по внутренней сходимости (σ_{RA} , σ_{DEC}). Они определяются как точностью аппроксимации изображений звезд и спутников, так и качеством привязки к каталогу *Gaia* DR3. Для индивидуальных экспозиций σ_{RA} , σ_{DEC} лежат в пределах 0.1 – 0.2 угловой секунды. Величины разностей (О-С) получены из сравнения комбинацией эфемерид DE441 (Park *et al.* 2021) и JUP365 (Jacobson, 2021), используемыми сервисом [NASA/Horizons](#). Как видно, разности могут иметь самые различные значения (по модулю вплоть до 0.4 угловой секунды).

Средние значения (О-С) для каждого из спутников для разных фотопластинок можно посмотреть в таблице 2. Видно, что внутренняя сходимость измерений получилась достаточно высокая: от 0.02 до 0.04 угловой секунды. В ряде случаев средние (О-С) для разных спутников сравнительно близки друг к другу. Это говорит о недоучтенных систематических ошибках координат, обусловленных недостатком опорных звезд (обычно менее 10 на пластинку) и значительной разностью блеска между звездами и спутниками. Поэтому наибольшая ценность этих данных заключается в относительных координатах вида “спутник минус спутник”. Это весьма близко к результату наших французских коллег, представленных в свежей работе Robert, Pascu *et al.* 2025.

К сожалению на данном этапе нам не удалось провести редукцию для самых интересных астронегативов, датированных началом XX века. Главная причина – отсутствие опорных звезд, так как ставка делалась на применение метода “след – масштаб”. Тем не менее, в нашем архиве обнаружилась уникальная фотопластинка PNA_A0697, которая содержит изображения, отвечающие серии снимков до, во время и после покрытия Юпитером звезды HD 220035. Измерение положений звезды относительно центра Юпитера и высокое качество эфемериды самой планеты позволили получить надежные оценки моментов отдельных экспозиций. Удалось обнаружить и изображения двух опорных звезд. К сожалению на многих старых фотопластинках имеются дефекты фотоэмulsionии, поэтому удалось измерить только сравнительно близкие к изображению планеты спутники. Разумеется здесь речь идет об относительных координатах “спутник минус Юпитер” (ξ , η). В таблице 3 приведены результаты измерений. В разностях заметен сдвиг (О-С) по склонению (вдоль оси η). По такой короткой серии измерений странно делать глобальные выводы. Поэтому целесообразно проанализировать другие доступные фотопластинки, полученные около 1900 года в разных обсерваториях. Есть еще ряд пулковских астронегативов, которые можно попытаться обработать в дальнейшем.

3 Точность эфемерид Юпитера и его галилеевых спутников для эпохи фотографических наблюдений

Итак мы убедились, что фотопластинки пулковской стеклотеки позволяют рассчитывать на получение серий относительных положений более-менее свободных от систематических ошибок для эпохи 1970-х годов на уровне точности 0.05 угловой секунды. Это, согласно мнению коллег Robert, Pascu *et al.* 2025, некий предел качества для такого рода данных. Из предыдущего раздела видно, что есть перспектива роста качества обработки сканов для ранних фотопластинок начала XX века. Для ответа на наш вопрос о пригодности полученных результатов измерений для совершенствования эфемерид, разумно как-то оценить точность теорий движения.

Формально это логично выполнить путем распространения ошибок данных, которые послужили основой для определения параметров эфемерид Юпитера и спутников. Практически это могут сделать только научные коллективы, разработавшие самые современные теории. Есть по

¹<https://github.com/ymax74/PulkovoGalileanSatelliteAstrometry>

меньшей мере три команды разработчиков, за которыми стоит научная традиция, подкрепленная десятилетиями исследований. Это ИПА РАН (теория EPM (Pitjeva *et al.* 2022)), IMCCE (планетная теория INPOP21 (Fienga *et al.* 2021), спутниковая NOE-5-2010-JUP (Lainey *et al.* 2009)) и NASA/JPL (планетная теория DE441 (Park *et al.* 2021) и спутниковая JUP365 (Jacobson, 2021)). Все они создавались на основе немного разных начальных данных о положениях, скоростях и массах тел Солнечной системы. Различные тонкие эффекты при их построении учитываются немного по-разному (например, влияние астероидов главного пояса). Поэтому просто сравнив эфемериды для разных моментов времени можно получить некоторую оценку точности координат, которая характеризует неопределенность положения небесных тел: в нашем случае Юпитера и его галилеевых спутников.

В предыдущем разделе теория движения Юпитера использовалась для привязки экспозиций к моментам времени. Выясним, насколько это корректная процедура для столь далекой эпохи (1903 год). На рис. 7 показаны разности координат барицентра Юпитера для первой половины XX века. Из этого сравнения понятно, что теории дают различие в положении на величину не более 0.01. Это примерно в 5 раз более высокая точность, чем мы можем достичь из измерений положения Юпитера по его изображениям на пластиинке. Поэтому наш подход с вычислением моментов экспозиций выглядит вполне оправданным.

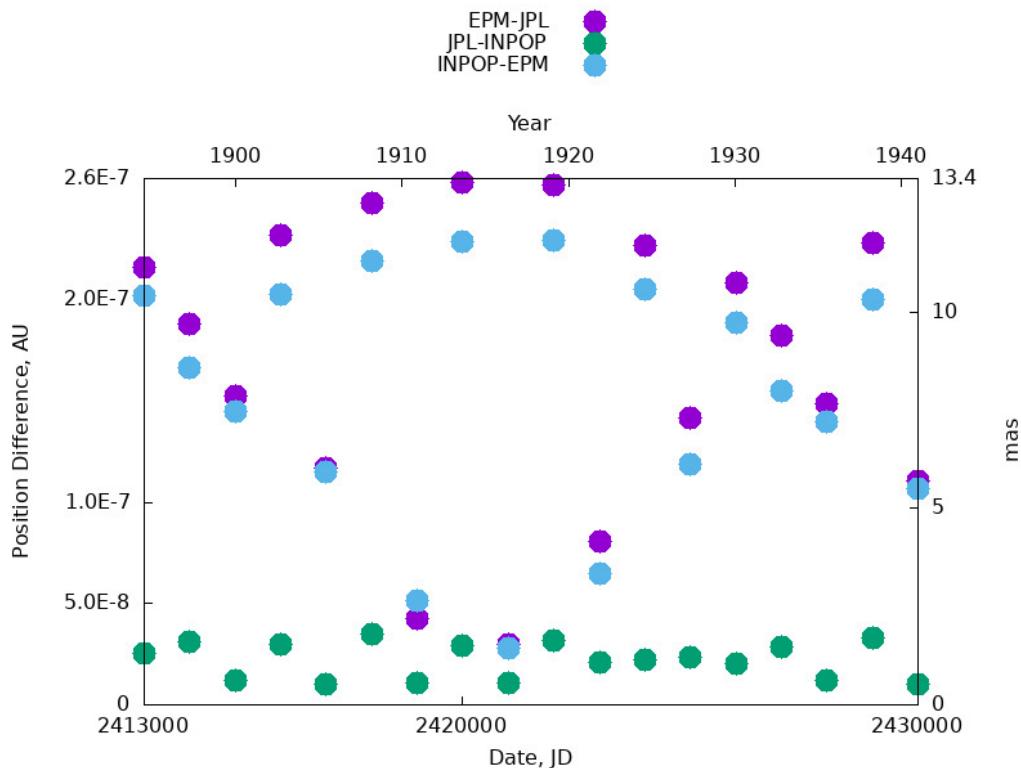


Рис. 7: Разности гелиоцентрического положения Юпитера, полученного из эфемерид EPM2021, JPL DE440, INPOP21a. Справа добавлена шкала соответствующей угловой разности в противостоянии

Интересно заметить, что разница между эфемеридами NASA/JPL (Park *et al.* 2021) и INPOP (Fienga *et al.* 2021) ещё меньше, но тут нужно иметь в виду, что в эфемеридах EPM (Pitjeva *et al.* 2022) учтена полная масса Главного Пояса (с помощью дискретного кольца). Для подтверждения мы провели численное интегрирование движения тел Солнечной системы с использованием фиксированного числа астероидов и с учётом полной массы Главного Пояса. В результате мы получили сопоставимую разницу. Таким образом, эфемериды EPM отличаются от INPOP и DE441 учётом важной составляющей Солнечной системы, и для нашей задачи следует считать их предпочтительными.

Для галилеевых спутников рассматривались теории GALSAT50 (Lieske, 1977), IAA2019 (Kosmodamianskii, 2009), JUP365 (Jacobson, 2021) и теория из работы NOE-5-2010-JUP (Lainey *et al.* 2009). Анализ данных рис. 8 позволяет увидеть, что разности в большинстве случаев не превышают 0.06 угловой секунды. Для спутника Ио, изображения которого часто трудно измерять из-за рассеянного света близкого Юпитера, для эпохи около 1900-го года разности доходят до 0.12 угловой секунды. Это весьма близко к оценкам точности координат спутников, которые получаются из анализа сканов астронегативов.

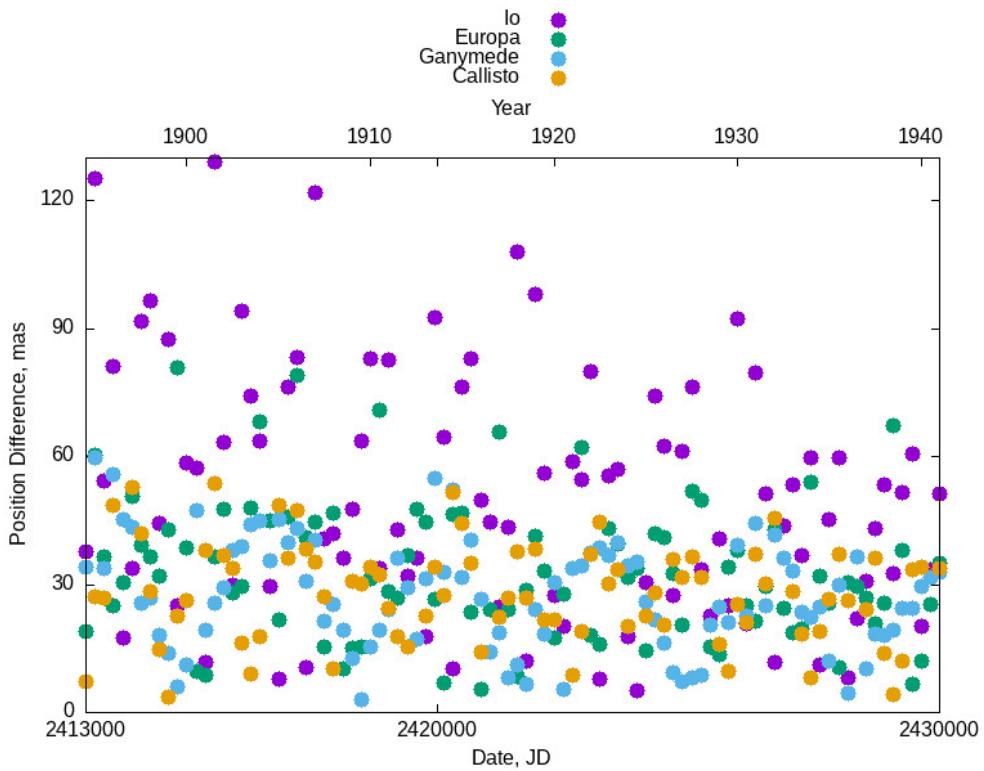


Рис. 8: Разности положений галилеевых спутников Юпитера, вычисленных посредством эфемерид JUP365 и NOE-5-2010-JUP

Для 1970-х – 1990-х годов расхождения разных эфемерид становятся очень малыми – менее 0.02 угловой секунды. Это заметно лучше внутренней точности измерений координат галилеевых спутников.

Таблица 1: Положения галилеевых спутников Юпитера в системе Gaia, полученные в результате оцифровки фотопластинки PNA_10440

sat	RA,deg	DEC, deg	σ_{RA}	σ_{DEC}	$(O-C)_{RA}$	$(O-C)_{DEC}$
arcsec						
UTC = 1974-08-20T22:40:12, JD = 2442280.444582						
J1	347.02250994	-7.10434822	0.118	0.152	0.036	0.042
J2	346.93075043	-7.14568852	0.117	0.152	0.002	0.149
J3	346.89610537	-7.16225343	0.116	0.152	-0.052	0.312
J4	347.10835266	-7.06066796	0.120	0.154	-0.062	0.043
UTC = 1974-08-20T22:42:11, JD = 2442280.445965						
J1	347.02234291	-7.10446823	0.081	0.150	0.225	0.006
J2	346.93067602	-7.14576108	0.079	0.149	0.236	0.104
J3	346.89603849	-7.16236370	0.079	0.149	0.316	0.167
J4	347.10831581	-7.06070346	0.084	0.152	0.164	0.060
UTC = 1974-08-20T22:44:41, JD = 2442280.447701						
J1	347.02202061	-7.10468859	0.095	0.151	0.109	-0.319
J2	346.93046508	-7.14589591	0.094	0.150	0.161	-0.129
J3	346.89577834	-7.16250234	0.093	0.149	0.137	-0.008
J4	347.10817796	-7.06083308	0.093	0.149	0.100	-0.227
UTC = 1974-08-20T22:47:40, JD = 2442280.449773						
J1	347.02164222	-7.10485345	0.101	0.117	-0.028	-0.336
J2	346.93020891	-7.14599286	0.101	0.117	0.032	-0.154
J3	346.89548648	-7.16263626	0.099	0.116	0.023	-0.095
J4	347.10801154	-7.06087310	0.099	0.116	0.041	-0.119
UTC = 1974-08-20T22:50:10, JD = 2442280.451509						
J1	347.02137119	-7.10488735	0.112	0.117	0.040	0.046
J2	346.93005243	-7.14597585	0.111	0.116	0.116	0.195
J3	346.89525916	-7.16264593	0.111	0.117	-0.039	0.159
J4	347.10789698	-7.06088360	0.111	0.116	0.061	0.023
UTC = 1974-08-20T22:52:10, JD = 2442280.452892						
J1	347.02108703	-7.10496522	0.172	0.144	-0.154	0.161
J2	346.92980691	-7.14601828	0.172	0.144	-0.225	0.258
J3	346.89504574	-7.16268920	0.172	0.143	-0.194	0.291
J4	347.10776756	-7.06084574	0.172	0.143	-0.080	0.339

Здесь и далее σ_{RA} и σ_{DEC} - величины стандартных ошибок экваториальных координат.

Таблица 2: Средние величины (O-C) для галилеевых спутников Юпитера и их стандартные ошибки для двух серий экспозиций на разных астронегативах

sat	$(O-C)_{RA} \pm SEM_{RA}$	$(O-C)_{DEC} \pm SEM_{DEC}$
arcsec		
фотопластиинка: PNA_10440		
J1	0.038 ± 0.022	-0.067 ± 0.035
J2	0.053 ± 0.027	0.071 ± 0.029
J3	0.032 ± 0.030	0.137 ± 0.027
J4	0.037 ± 0.016	0.020 ± 0.033
фотопластиинка: PNA_10507		
J1	-0.125 ± 0.015	0.135 ± 0.037
J2	-0.317 ± 0.022	0.262 ± 0.036
J3	-0.085 ± 0.010	0.383 ± 0.040
J4	-0.100 ± 0.009	0.279 ± 0.033

Здесь SEM (Standard Error of the Mean) - величины стандартных ошибок средних значений O-C.

Таблица 3: Положения галилеевых спутников Юпитера относительно планеты для фотопластиинки PNA_A0697

sat	ξ	η	ε_ξ	ε_η	$(O-C)_\xi$	$(O-C)_\eta$
arcsec						
UTC = 1903-09-19T20:32:11, JD = 2416377.35568						
J1	-111.045	-55.039	0.052	0.050	0.210	0.404
J4	64.971	50.532	0.054	0.052	0.047	0.205
UTC = 1903-09-19T20:40:17, JD = 2416377.36131						
J1	-112.961	-55.937	0.074	0.061	-0.309	0.082
J2	-37.413	-27.885	0.076	0.063	0.150	0.483
J4	66.239	51.184	0.074	0.061	0.062	0.246
UTC = 1903-09-19T20:49:24, JD = 2416377.36764						
J2	-39.897	-28.958	0.058	0.057	-0.007	0.454
UTC = 1903-09-19T20:56:14, JD = 2416377.37238						
J2	-41.861	-29.993	0.056	0.056	-0.251	0.248

4 Выводы

В заглавие этой работы вынесен вопрос о научной значимости оцифровки астронегативов с изображениями Юпитера и его галилеевых спутников в контексте совершенствования теорий движения спутников. Мы провели анализ нескольких пулковских фотопластинок, датированных 1974-м годом. Кроме того, оказалось возможным получить предварительные относительные координаты спутников для астронегатива 1903 года.

Мы показали, что методика оцифровки астронегативов и дальнейших измерений, разработанная в нашем научном коллективе (Khovritchev *et al.* 2021), позволяет проводить высокоточные измерения для системы Юпитера. Внутренняя сходимость соответствует общемировой практике в данной области астрономии (Robert, Pascu *et al.* 2025). В итоге в мировых базах данных и в результатах наших измерений содержатся относительные положения вида “спутник минус спутник” на уровне стандартных ошибок порядка 0.05 угловой секунды. Чуть более низкие точности ожидаются для снимков начала XX века.

Сопоставление с качеством эфемерид говорит о том, что вековые тренды в эфемериде обусловленные недоучетом каких-либо факторов, дающих постепенные сдвиги на масштабе столетия, если они есть, могут быть обнаружены в результате оцифровки астронегативов первой половины предыдущего столетия. Поэтому актуален поиск таких снимков в стеклотеках обсерваторий и накопление репрезентативного количества измерений.

Для более многочисленных фотопластинок 1970-х – 1990-х ситуация несколько иная. Учитывая то, что наблюдения по точности в пять раз уступают эфемериде, если что и можно обнаружить, так это периодические возмущения, которые могут иметь место на масштабе нескольких десятилетий. Для выявления таких эффектов целесообразно сравнивать разные наборы данных. Например, пулковского ряда и уже обработанных данных наблюдений в USNO (Robert, Pascu *et al.* 2025).

В недавнем прошлом такое сопоставление для главных спутников Сатурна уже имело успех (Khovritchev *et al.* 2021). Поэтому, отвечая на главный вопрос этой статьи, можно констатировать целесообразность проведения большой серии измерений всех пулковских фотопластинок с изображениями галилеевых спутников Юпитера. Такая серия астронегативов была получена с помощью пулковского 26-дюймового рефрактора и имеется в нашем распоряжении.

Список литературы

- Robert, V., D. Pascu, V. Lainey, J.-E. Arlot (2025). [NAROO program: Analysis of USNO Galilean observations 1967–1998](#). *Icarus*, 426, 116344.
- Kulikova, A. M., N. V. Narizhnaya, T. A. Vasilyeva (2022). [An astronegatives digitization method in the Pulkovo observatory glass library](#). *Publications of the Pulkovo Observatory*, 227, 86–99.
- Bertin, E., S. Arnouts (1996). [SExtractor: Software for source extraction](#). *A&AS*, 117, 393–404.
- Duda, Richard O, Peter E Hart (1972). [Use of the Hough transformation to detect lines and curves in pictures](#). *Communications of the ACM*, 15.1, 11–15.
- Lang, Dustin, David W. Hogg, Keir Mierle, Michael Blanton, Sam Roweis (2012). [Astrometry.net: Astrometric calibration of images](#). *Astrophysics Source Code Library*, record ascl:1208.001. ascl: [1208.001](#).
- Robert, V., J. Desmars *et al.* (2021). [The NAROO digitization center. Overview and scientific program](#). *A&A*, 652, A3.
- Khovritchev, M. Yu. *et al.* (2021). [Astrometric measurement and reduction of Pulkovo photographic observations of the main Saturnian satellites from 1972 to 2007 in the Gaia reference frame](#). *A&A*, 645, A76.
- Park, Ryan S., William M. Folkner, James G. Williams, Dale H. Boggs (2021). [The JPL Planetary and Lunar Ephemerides DE440 and DE441](#). *AJ*, 161.3, 105.
- Jacobson, R. A. (2021). [The Orbits of the Regular Jovian Satellites and the Orientation of the Pole of Jupiter](#). *personal communication to Horizons/NAIF*.
- Pitjeva, Elena, Dmitry Pavlov, Dan Aksim, Margarita Kan (2022). [Planetary and lunar ephemeris EPM2021 and its significance for Solar system research](#). B: *Multi-Scale (Time and Mass) Dynamics of Space Objects*. Под ред. Alessandra Celletti, Cătălin Galeş, Cristian Beaugé, Anne Lemaître. Т. 364. IAU Symposium, 220–225.
- Fienga, A. *et al.* (2021). [INPOP21a planetary ephemerides](#). *Notes Scientifiques et Techniques de l’Institut de Mécanique Céleste*, 110.
- Lainey, Valéry, Jean-Eudes Arlot, Özgür Karatekin, Tim van Hoolst (2009). [Strong tidal dissipation in Io and Jupiter from astrometric observations](#). *Nature*, 459.7249, 957–959.
- Lieske, J. H. (1977). [Theory of motion of Jupiter’s Galilean satellites](#). *A&A*, 56.3, 333–352.
- Kosmodamianskii, G. A. (2009). [Numerical theory of the motion of Jupiter’s Galilean satellites](#). *Solar System Research*, 43.6, 465–474.

Why is it significant to determine the positions of the Galilean satellites in the Gaia system by using data from 20th-century photographic plates?

D.A. Bikulova¹, I.A. Balyaev¹, N.V. Narizhnaya¹, T.A. Vasilyeva¹

¹ The Central Astronomical Observatory of the RAS at Pulkovo

Received 3 December 2025 / Accepted 11 December 2025

Abstract

The astrometric reduction of digitized photographic plates from various 20th-century programs investigating the Jupiter system allows us to determine the equatorial and/or relative coordinates of the Galilean satellites within the Gaia DR3 reference frame. During the 20th century, such observations were conducted intensively at numerous observatories to develop an accurate theory of the satellites' motion. Today, the quality of Galilean satellite ephemerides is driven by high precision measurements from planetary space missions and data from modern ground- and space-based telescopes. Although results from 20th-century photographic plates contributed to the present-day ephemerides, they were assigned low weights and were not accurately aligned with the Gaia system. Consequently, the accuracy of satellite ephemerides is better than 0.1 arcsecond for the early 20th century, improving to better than 0.01 arcsecond for the 1960s and 1970s. This raises a legitimate question: Is it still advisable to continue digitizing and processing data from the relevant photographic plates? In this brief article, we attempt to answer this question based on a preliminary analysis of scans of the Pulkovo Observatory astronegatives, obtained using the Normal Astrograph.

key words: planetary satellites, digitization, ephemeris, astrometric reduction