

Методика оцифровки астронегативов пулковской стеклотеки

А.М. Куликова^{1,*}, Н.В. Нарижная^{1,**}, Т.А. Васильева^{1,***}

¹ГАО РАН

* *e-mail*: agrippina@gaoran.ru

** *e-mail*: nnat@gaoran.ru

*** *e-mail*: gidrata@mail.ru

Аннотация

В данной работе представлен обзор методики оцифровки 877 пластинок из коллекции Пулковской стеклотеки и процесса получения положений наблюдаемых на них объектов. Астронегативы, использованные в данной работе, были сняты с помощью Нормального астрографа в Пулковской обсерватории в период с 1893 по 1941 гг. Для оцифровки была использована пулковская мобильная система оцифровки (MDD - Mobile Digitizing Device), обеспечивающая внутреннюю точность измерений астронегативов в 1 мкм. Масштаб получившихся сканов составил 1.0"/pix. С целью компенсации искажений камеры и надежной привязки определяемых на сканах положений объектов к системе Gaia были проведены калибровочные сканирования шаблонных пластинок с большим числом объектов в центре высокоточной астрономической оцифровки NAROO (Парижская обсерватория). Представлены результаты обработки части пластинок, содержащих изображения Урана и Нептуна. Точность полученных координат не хуже 50 mas в системе Gaia CRF. Характерные величины (O-C) относительно эфемериды EPM2017 меньше 100 mas. Это самые надежные измерения положений Урана и Нептуна на эпохи от 1890-х до 1940-х в современной опорной системе. Была создана база данных из fits-файлов, полученных в результате сканирования, создан [web-ресурс](#) для открытого доступа к оцифрованным астронегативам пулковской стеклотеки в формате, принятом для Virtual Observatory.

Введение

Целый пласт современных астрономических задач подразумевает изучение изменений положений и блеска объектов, происходящих на протяжении десятилетий или даже всего последнего столетия. К таким задачам относятся, например, уточнение орбит малых тел Солнечной системы (спутников планет и астероидов), поиск аномалий собственного движения звезд с целью выявления астрометрических двойных систем, изучение изменений блеска долгопериодических переменных, поиск астрофизических транзиентов и многие другие. Прогресс в указанных направлениях возможен путем анализа данных старых наземных

фотографических наблюдений, содержащих информацию о положениях и блеске астрономических объектов на наиболее ранние моменты времени.

Во многих относительно старых обсерваториях мира сохранились коллекции фотографических пластинок, и Пулковская обсерватория не является исключением среди них. Коллекция Пулковской стеклотеки насчитывает чуть более 48 тысяч фотографических пластинок, полученных на разных инструментах на протяжении периода времени с 90-х годов XIX века до конца XX столетия, из которых около тысячи составляют самый ценный материал: снимки неба, полученные в период с 1890-х годов до 1941 года. Стоит отметить, что при эвакуации обсерватории во время ВОВ, удалось спасти всего примерно 10% от довоенной стеклотеки. Состояние этих астронегативов с каждым годом ухудшается. Некоторые из них покрыты по краям грибком, на некоторых отслаивается эмульсия вследствие их «возраста» и всевозможных пертурбаций, связанных с их перемещением в течение военного времени. Перечисленные проблемы по возможности частично устранены (например, эмульсия на краях закреплена особым клеем).

Для решения упомянутых выше задач необходима высокоточная оцифровка астронегативов, а хрупкость таких носителей информации, как стеклянные пластинки с органической фоточувствительной эмульсией, требуют делать это в относительно сжатые сроки. В случае Пулковской стеклотеки первостепенной задачей стала оцифровка астронегативов довоенной эпохи.

За 2020-2022 гг. была завершена оцифровка всех 877 довоенных астронегативов Пулковской стеклотеки. Данные фотопластинки были отсняты на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории ($D/F = 33\text{см} / 3500\text{ см}$, рабочее поле $2^\circ \times 2^\circ$, масштаб близок к $60''/\text{мм}$). Данные пластинки содержат изображения ярких звезд, рассеянных и шаровых скоплений, туманностей, переменных звезд, белых карликов, новых звезд, двойных звезд, тел Солнечной системы. Также среди пластинок присутствуют снимки площадок Каптейна. Съемка этих участков неба выполнялась для измерения собственных движений звезд ради исследований в области звездной кинематики.

Для каждой пластинки были подготовлены мета-данные (информация о координатах центра снимка, моментах начала и конца экспозиций (с учетом поправок хронометра), дата наблюдений, условия наблюдений), необходимые для получения новых редуциций. Эти данные были извлечены из имеющихся записей вручную в электронные таблицы и затем записаны в соответствующие поля fits-файлов (исходная информация находится на самих пластинках, на упаковочных конвертах, в сохранившихся бумажных журналах наблюдений).

Наличие и сохранность полных и оригинальных мета-данных делает процедуру оцифровки имеющей смысл, давая возможность дальнейшего уточнения информации и исправления ошибок. Поэтому параллельно с остальной работой проводилась оцифровка самих журналов, чтобы сохранить в целостности всю имеющуюся в наличии информацию. Оцифрованы все сохранившиеся довоенные журналы наблюдений, хронологические каталоги и журналы приема сигналов точного времени. Качество их сохранности тоже требует особой осторожности в обращении, они сильно обветшали за почти 100 лет с момента начала записей. На рис. 1 представлен пример оцифровки первых страниц хронологического каталога наблюдений Нормального астрографа Пулковской обсерватории в период с 1895 по 1928 гг.

1 MDD – Пулковская система для быстрой оцифровки астро-негативов

Мировой опыт оцифровки астро-негативов предполагает несколько подходов к решению данной задачи. Наибольшую точность обеспечивают специализированные системы астро-номической оцифровки (например, комплекс NAROO в Парижской обсерватории (Robert et al., 2021)). Однако данное решение является весьма дорогостоящим. Кроме того, попытка создания такого комплекса в ГАО РАН привела бы к значительной задержке оцифровки на фоне деградации пластинок. Массовая и быстрая доставка астро-негативов в институты, располагающие подобными системами (например, в Королевскую обсерваторию Бельгии), не представляется возможной. В этой связи применение таких высокоточных систем в рамках данной работы было решено использовать для учета искажений камеры MDD и для единичных сканирований избранных астро-негативов. Стоит отметить, что для оцифровки астро-негативов до сих пор применяют планшетные сканеры (например, Glusman et al. (2022)). Такой подход является достаточно дешевым и быстрым. Однако, первый опыт применения этой методики в Пулковской обсерватории (Berezhnoi, 2013) показал, что неравномерность движения линейки сканера может вносить значительные искажения в цифровые изображения, и финальная точность определения координат небесных объектов оказывалась не намного выше той, что обеспечивали ручные измерения на машинах АСКОРЕКОРД.

В данный момент в Пулковской обсерватории для оцифровки астро-негативов применяется система, в основе которой лежит цифровая зеркальная камера с макро-объективом. Наш опыт использования широкоформатной камеры для съемки пластинок не является уникальным, есть и другие похожие работы (например, Lehtinen et al. (2018)), но калибровка сканов MDD при помощи шаблонов, оцифрованных с помощью NAROO или другой подобной техники, является отличительной чертой пулковского подхода. В предыдущих работах, данные для которых были получены с помощью MDD (Khovritchev et al., 2020; Khovritchev et al., 2021; Kiyeva et al., 2021), устройство системы и процесс оцифровки обсуждались схематично. В данной статье рационально уделить больше внимания техническим аспектам.

MDD (Mobile Digitizing Device, мобильная система оцифровки) создавалась в Пулковской обсерватории для того чтобы многократно повысить скорость сканирования астро-негативов при сохранении точности определения координат на уровне 1 мкм. Устройство MDD состоит из закрепленных на стене направляющих, к которым с помощью надежных кронштейнов прикреплены стеклянный предметный столик, размещенная над столиком цифровая зеркальная камера (Canon DS126201) с макро-объективом (Canon EF 100 mm f/2.8L Macro IS USM), а также из расположенного под столиком монитора, который обеспечивает равномерную засветку фона при оцифровке астро-негативов на просвет. Внешний вид MDD представлен на рис. 2.

Первые опыты оцифровки на MDD предполагали такое относительное положение предметного столика и камеры, при котором вся пластинка помещалась в рабочее поле камеры, и в итоге получались сканы с масштабом 0.026 мм/пиксель. При фокусном расстоянии Нормального астрографа ($F = 3.463 \text{ m}$) это давало масштаб около $1.6''/\text{pix}$.

Позже для повышения разрешения сканов астро-негативов Нормального астрографа предметный столик MDD был приподнят ближе к объективу фотокамеры, в результате



Рис. 2: Внешний вид MDD

чего масштаб составил $1.0''/\text{pix}$. Качество изображений звезд на пулковских пластинках при такой конфигурации предметного столика и камеры можно оценить с помощью рис. 3. Но при этом поле стандартного астронегатива Нормального астрографа, линейные размеры которого составляют 16×16 см, не помещается в поле зрения фотокамеры. Область сканирования составляет 6.7×10 см ± 0.5 см (зависит от параметров фокусировки камеры, которые варьируются в зависимости от толщины стекла конкретной пластинки). В результате каждая фотопластинка снималась в виде 6-7 фрагментов со взаимными перекрытиями. Результирующий скан шивался из таких фрагментов программно с использованием артефактов на пластинке в качестве опорных объектов.

2 Выявление астрономических объектов на сканах

Для определения надежных значений параметров WCS и внесения необходимых метаданных в результирующие fits-файлы в созданное для анализа сканов ПО были включены фрагменты кода, позволяющие автоматизировать распознавание звездных изображений и привязку пиксельных координат на скане к сетке экваториальных координат. Значительная часть астронегативов (247 из 877) содержит 2 и более экспозиции, что несколько усложняет процедуру автоматизированного их анализа. Однако большинство (630) имеют всего одну экспозицию, что позволило для решения этой задачи применить такие ресурсы как [SExtractor](#) (детектирование изображений объектов наблюдений и отделения их от артефактов) и [astrometry.net](#) (привязка пиксельных координат на скане пластинки к эква-

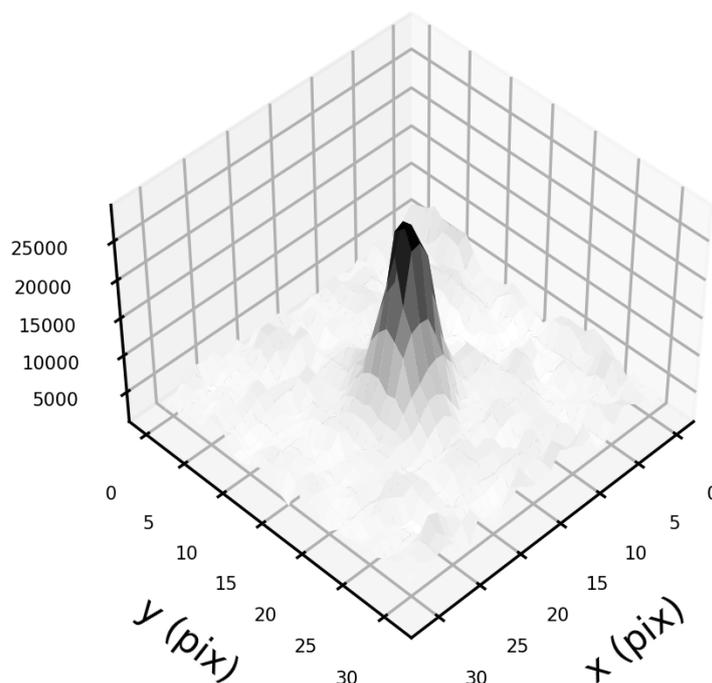


Рис. 3: Типичное распределение интенсивностей для изображения звезды 14.1^m на скане пулковского астронегатива, полученного на Нормальном астрографе Пулковской обсерватории (пластинка С717, 17 марта 1930 года). Характерная величина FWHM $\approx 5.2''$ (ширина на половине максимума). Экспозиция 30 минут

ториальной системе координат на небесной сфере).

Анализ же более «сложных» пластинок (содержащих несколько экспозиций и/или испорченных в силу физического и химического воздействия) требует более совершенного решения. Анализ современной литературы дает представление о методах решения этой проблемы. Достаточно перспективным кажется применение нейросетей для решения этих задач (Yang et al., 2022). Это определяет возможные перспективы развития данного исследования.

3 Измерение изображений звезд, спутников планет и астероидов на пулковских сканах

Для глубокого анализа астрономических изображений на цифровых носителях хорошо зарекомендовал себя метод Шейплет-декомпозиции (Refregier, 2003). Он позволяет получать высокоточные положения звезд (Khovritchев, Kulikova, 2015) и анализировать форму изображений (Khovritchев et al., 2018).

Этот метод позволяет представить изображение согласно соотношениям (1).

$$I(x, y) = I_b + \sum_{\substack{n_x + n_y \leq n_{max} \\ n_x, n_y}} c_{n_x, n_y} \cdot B_{n_x, n_y}(\beta, x, y, x_c, y_c) \quad (1)$$

Здесь $I(x, y)$ - исходное изображение (распределение интенсивностей по пиксельным ко-

ординатам x, y), I_b - уровень фона, c_{n_x, n_y} - вещественные коэффициенты, $B_{n_x, n_y}(\beta, x, y, x_c, y_c)$ - система ортогональных функций. Функция порядков n_x, n_y , которые являются целыми неотрицательными числами, может быть записана как произведение двух функций с разделением по координатам согласно x, y (2). Величину β можно интерпретировать как характерный размер изображения. Функция нулевого порядка ($n_x = n_y = 0$) фактически является двумерной функцией Гаусса, а знаменатель экспоненты как раз задает ширину «крыльев» графика этой функции. Величины x_c, y_c - искомые координаты фотоцентра центра изображения.

$$B_{n_x, n_y}(\beta, x, y, x_c, y_c) = \beta^{-1} \cdot \phi_{n_x} \left(\frac{x - x_c}{\beta} \right) \cdot \phi_{n_y} \left(\frac{y - y_c}{\beta} \right) \quad (2)$$

В свою очередь $\phi_n \left(\frac{x - x_c}{\beta} \right)$ удобно представить так, как это сделано в выражении (3). Для координаты y соотношение аналогичное.

$$\phi_n \left(\frac{x - x_c}{\beta} \right) = \beta^{-\frac{1}{2}} (2^n \sqrt{\pi} n!)^{-\frac{1}{2}} H_n \left(\frac{x - x_c}{\beta} \right) e^{-\frac{(x - x_c)^2}{2\beta^2}} \quad (3)$$

Здесь $H_n \left(\frac{x - x_c}{\beta} \right)$ - полином Эрмита порядка n .

Решение проблемы «измерения» изображения при помощи описанной декомпозиции можно осуществить по-разному. В нулевом приближении x_c, y_c - это просто «центр масс изображения». Нулевое приближение для β несложно получить из оценки FWHM (ширины на половине максимума) изображения звезды. Далее решаем систему (1) относительно c_{n_x, n_y} до тех пор, пока величина ошибки единицы веса не достигнет характерной величины шума изображения. При каждой итерации мы увеличиваем на единицу максимальный порядок разложения n_{max} .

Искомые координаты фотоцентра можно получить из формулы (4).

$$x_c = \sqrt{\pi} \beta^2 F^{-1} \sum_{n_x}^{odd} \sum_{n_y}^{even} \left((n_x + 1) 2^{2 - n_x - n_y} C_{n_x + 1}^{\frac{n_x + 1}{2}} C_{n_y}^{\frac{n_y}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} c_{n_x, n_y} \quad (4)$$

Здесь F - величина потока для изучаемого изображения, которая задается соотношением (5).

$$F = \sqrt{\pi} \beta \sum_{n_x, n_y}^{even} \left(2^{2 - n_x - n_y} C_{n_x}^{\frac{n_x}{2}} C_{n_y}^{\frac{n_y}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} c_{n_x, n_y} \quad (5)$$

Величины C_k^p в формулах (4) и (5) есть биномиальные коэффициенты из p по k . Вычисление y_c производится аналогично, even подразумевает суммирование по четным индексам, odd - по нечетным.

Преимущество такого подхода в том, что нет необходимости использовать алгоритмы минимизации для нелинейных функций. Рис. 4 демонстрирует поведение остаточных разностей при измерении звезды, изображение которой показано на рис. 3. Видно, что последовательное увеличение порядка модели ведет к полному «вычитанию» изображения звезды. На изображении остается только шумовая компонента.

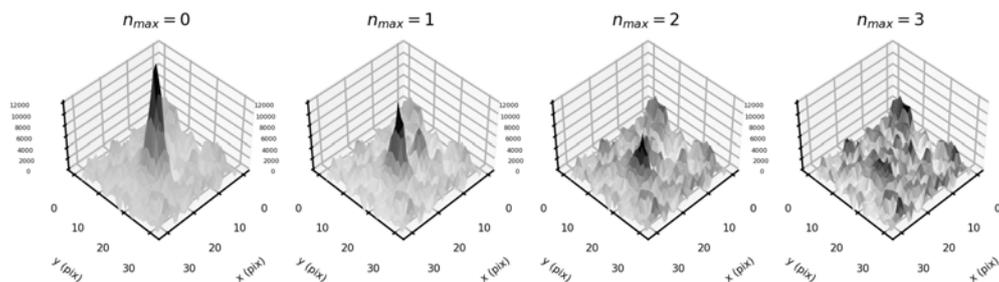


Рис. 4: Использование шейплет-декомпозиции для измерения изображений звезд. Здесь показана последовательность разностей между исходным изображением (рис. 3) и моделью, шейплет-декомпозициями с разным порядком разложения n_{max}

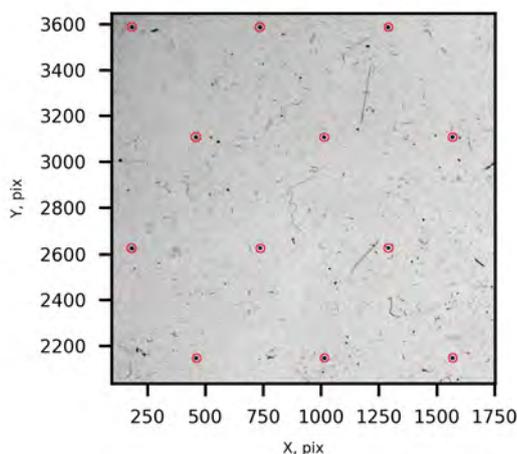


Рис. 5: Фрагмент скана калибровочной пластинки, служащей для корректировки искажений камеры MDD. Равномерная сетка реперных точек (отмечена на рисунке красными окружностями) позволяет оценить систематические искажения оптической системы MDD и учесть их на оцифрованных областях неба

4 Астрометрическая калибровка сканов

Объектив, используемый для оцифровки пулковских пластинок, обладает дисторсией. Для учета искажений камеры применяется метод внутренней калибровки с помощью шаблона – специальной пластинки с искусственной равномерной сеткой изображений. Каждая сессия оцифровки астронегативов начиналась и заканчивалась съемкой такого шаблона. Пример скана такого шаблона представлен на рис. 5. Такой подход позволяет учитывать изменения искажений системы «стол+камера» во времени.

Имеющиеся шаблоны ранее были измерены с помощью машины ROB-digitizer (Bereznoi, 2013). Кроме того, ряд пластинок с большим числом объектов (снимки рассеянных звездных скоплений) был оцифрован в центре высокоточной астрономической оцифровки NAROO (Парижская обсерватория). Сравнивая координаты меток шаблона и звезд на сканах MDD и NAROO, несложно найти параметры преобразования ($a_{i,j}$ в соотношении 6) от системы MDD к высокоточной системе NAROO. Мы используем полином пятого порядка ($n_{max} = 5$)

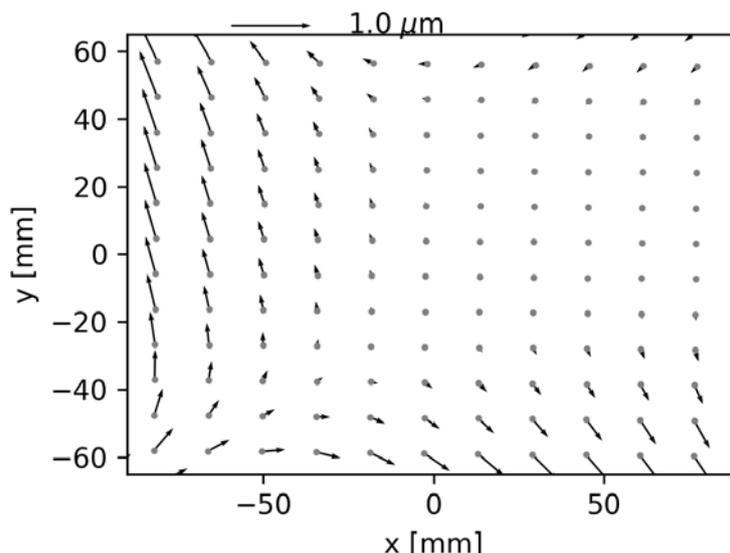


Рис. 6: Дисторсия сканов MDD относительно NAROO. Каждый вектор показывает разность координат звезды вида NAROO-MDD

в качестве модели связи 6. Экспериментально, при переборе различных порядков полинома, выяснилось, что для нашего объектива ошибки единицы веса соответствуют внутренней точности измерений именно при $n_{max} = 5$. Дальнейшее увеличение порядка полинома не ведет к значимому росту точности, при соблюдении условия, что число точек значимо больше числа неизвестных.

$$x_{NAROO} = \sum_{i,j}^{i+j \leq n_{max}} a_{i,j} x_{MDD}^i y_{MDD}^j \quad (6)$$

Коэффициенты этого полинома оцениваются методом наименьших квадратов. В результате после измерений положений звезд в системе MDD-скана несложно провести корректировку к системе NAROO. Такой способ учета дисторсии возможен благодаря тому, что объектив камеры NAROO имеет особую конструкцию (дисторсия практически отсутствует), а положение измерительного стола контролируется с помощью лазерного интерферометра. В итоге точность измерений NAROO достигает 0.06 микрометров (Robert et al., 2021). Это почти в 16 раз меньше уровня случайных ошибок при измерении посредством MDD. То есть систематические искажения координат при измерениях с помощью NAROO сильно меньше точности измерений, характерной для MDD. Рис. 6 дает представление о распределении разностей NAROO-MDD в зависимости от координат.

В дальнейшем, после коррекции за дисторсию, производилась астрометрическая редукция сканов. Координаты опорных звезд вычислялись на основе данных Gaia DR3 (с учетом собственных движений). На первом этапе использовалась линейная модель редукции (метод шести постоянных). После обработки сотен пластинок вышеописанным способом анализировались остаточные разности, которые позволили учесть искажения, которые вносил объектив Нормального астрографа. В итоге после всех преобразований вычислялись координаты интересующих нас объектов: спутников планет, астероидов, отдельных звезд.

5 Базы данных пулковской стеклотеки

Открытый доступ к астрономическим данным уже давно стал традиционным подходом к репрезентации результатов исследований. Например, сканы пластинок Паломарского обзора неба несложно получить на сайте [MAST](#). Колоссальный архив сканов пластинок, снятых обсерваториями Германии доступен с помощью ресурса [APPLAUSE](#). Речь идет о более чем 100 000 отдельных сканов 85 000 астронегативов. Но самый большой недостаток этой коллекции в том, что сканы получены с использованием обычных планшетных сканеров, что значительно обесценивает результаты этой огромной работы в астрометрическом контексте. По-сути нет возможности получить те точности измерений, которые нужны для того, чтобы материал можно было использовать для изучения динамики тел Солнечной системы или двойных звезд, анализа звездной кинематики. Но для поиска астрофизических транзиентов этот архив является бесценным источником данных.

То есть MAST по существу единственный в мире ресурс, предоставляющий доступ к ограниченному числу сканов фотопластинок требуемого качества оцифровки. В Пулковской обсерватории уже почти на протяжении десятилетия существует система [астрометрических баз данных](#). До недавнего времени здесь публиковались результаты астрометрических наблюдений (пулковские звездные каталоги, данные о движении компонент двойных звезд и их орбитальные параметры). Значительный объем данных из пулковской базы продублирован в [Страсбургском центре астрономических данных](#). Все изменилось в последние полтора года. Теперь, кроме результатов наблюдений и измерений в пулковской базе появился уникальный контент - [сканы фотографических пластинок, полученные в Пулковской обсерватории](#). На странице проекта можно указать параметры запроса (область неба по координатам и временной диапазон). Реакцией сервера на такой запрос станет предоставление ссылок на скачивание fits-файлов. Стоит обратить внимание на то, что это именно сырые сканы, снабженные всей необходимой сопутствующей информацией в общепринятом формате в рамках парадигмы Virtual Observatory. Этот архив постепенно наполняется (пока доступны только сканы астронегативов, полученные по программе исследований главных спутников Сатурна). Но в дальнейшем постепенно будут доступны все результаты оцифровки, будут добавлены инструменты, делающие работу с данными более удобной для специалистов. То есть будут доступны не только данные, но и инструменты для работы с ними.

6 Обзор результатов анализа сканов пластинок пулковской стеклотеки

Оцифрованные фотоматериалы Пулковской стеклотеки послужили ценным источником информации для ряда исследований. Например, в работе [Kiyeva et al. \(2021\)](#) исследовалось возмущение движения звезды ADS 9346, которое свидетельствовало о возможном наличии маломассивной второй компоненты в системе. Работа [Khovritchchev et al. \(2021\)](#) посвящена исследованию спутников Сатурна, в ходе которой были получены экваториальные координаты спутников с 1972 по 2007 гг. Важно отметить, что одним из результатов этой работы является обнаружение систематического тренда на уровне 10 mas в современной эфемериде главных спутников Сатурна. Дело в том, что создание современных теорий движения спутников требует учета деталей внутреннего строения спутников и самой планеты (вязко-

Таблица 1: Положения Урана и Нептуна в системе Gaia CRF по результатам оцифровки пластинок пулковской стеклотеки

planet	UTC	JD	RA (deg)	Dec (deg)	$(O-C)_\alpha$	$(O-C)_\delta$
					(arcsec)	
Uranus	1933-10-13T21:24:47.160	2427359.39221	24.8514450	9.679576	0.030	-0.198
Uranus	1933-12-12T18:04:15.280	2427419.25295	22.9617341	8.972565	-0.084	0.115
Uranus	1934-02-03T17:17:55.955	2427472.22079	23.2148681	9.103867	-0.056	-0.086
Uranus	1934-09-21T21:54:23.307	2427702.41277	29.6042881	11.489918	-0.155	0.077
Uranus	1936-02-16T16:32:12.830	2428215.18904	30.9763582	12.077230	-0.095	-0.262
Neptune	1899-02-04T21:23:26.283	2414690.39128	83.0646931	21.969938	-0.243	-0.084
Neptune	1903-03-03T18:27:17.395	2416177.26895	92.4637854	22.324430	-0.044	0.039
Neptune	1930-02-19T21:42:15.036	2426027.40434	155.4076732	10.943416	-0.039	-0.024
Neptune	1930-04-06T19:08:18.777	2426073.29744	154.3324433	11.352882	-0.053	-0.071
Neptune	1938-03-09T23:56:40.183	2428967.49769	171.8751604	4.754844	0.083	-0.057

сти вещества на разных глубинах). Особенности внутреннего устройства данных небесных тел проявляются в том, как они «откликаются» на приливные взаимодействия, во многом определяющие их орбитальную динамику. Тот факт, что совместный анализ двух больших и независимых наборов измерений координат спутников (пулковский ряд и ряд USNO) за почти 50 лет наблюдений показывает наличие систематических разностей, говорит о наличии особенностей строения Сатурна и спутников, которые не приняты во внимание на данном этапе.

Как мы видели только что, научная значимость измерений координат спутников планет на основе оцифровки астронегативов остается высокой в эпоху Gaia, наблюдений с борта космических аппаратов и радиолокации. Стоит обратить внимание, что для спутников Юпитера и Сатурна и самих планет все же доступна астрометрическая информация на современном уровне качества, которые затрагивают значительные временные отрезки (космические миссии, наблюдения телескопа Хаббла и т.д.). Для более далеких планет-гигантов имеет место быть дефицит регулярных современных наблюдений (пролеты Вояджеров, эпизодические наблюдения на телескопе Хаббла и больших телескопов на Земле (VLT)). Поэтому для Урана и Нептуна астрометрические измерения старых астронегативов приобретают очень важное значение. Разные планетные теории (DE NASA JPL, EPM (ИПА РАН), INPOP (IMCCE)) дают положения Урана и Нептуна, которые могут отличаться друг от друга на 20 - 40 mas. Поэтому одной из задач оцифровки ранних пластинок пулковской стеклотеки является определение положений этих планет в конце XIX - начале XX века в системе релизов Gaia. На данный момент выполнена пробная обработка части сканов. Результаты представлены в таблице 1.

Величины $(O-C)$ в этой таблице представлены относительно эфемериды EPM2017 (ИПА РАН). Видно, что в большинстве своем разности лежат в пределах ± 100 mas. Внутренняя сходимости измерений лучше 50 mas. Это самые точные измерения положений Урана и Нептуна для указанных эпох на текущий момент. После обработки всех данных можно будет сделать более полноценный анализ. Полученный результат гораздо ценнее данных, представленных в исследованиях, где старые наблюдения берутся из первоисточников и

корректируются к системе Gaia путем анализа систематических ошибок координат звезд старых звездных каталогов относительно Gaia, как это сделано, например, в работе Yuan et al. (2021).

Заключение

Возможность оцифровки и анализа астронегативов XIX-XX веков позволяет решить многие задачи в области небесной механики и звездной астрономии, актуальные и в настоящее время. Кроме этого, материал, хранящийся на пластинках, может содержать в себе еще не востребованную информацию, которая не будет потеряна и может быть извлечена позже. Из всего этого вытекает значимость работ посвященных созданию общедоступных архивов оцифрованных астронегативов. В рамках данной работы нами была разработана методика оцифровки и калибровки с привязкой к высокоточной системе оцифровки астронегативов NAROO (Парижская обсерватория). Оцифрован весь довоенный фонд Пулковской стеклотеки, состоящий из 877 астрономических фотопластинок, отснятых на Нормальном астрографе в Пулковской обсерватории, а также астрономические журналы наблюдений, хронологические каталоги и другие источники мета-данных фотографических пулковских наблюдений. С помощью шейплет-декомпозиции, примененной к сканам астронегативов Пулковского архива, были получены положения звезд, планет и их спутников на наиболее ранние периоды их наблюдений. База данных с результатами данной работы доступна на web-сайте ЛАЗА ГАО РАН в разделе «СТЕКЛОТЕКА» (pulddb.ru).

Благодарности

Работа выполнялась при финансовой поддержке Гранта РФФИ «Оцифрованная история неба на основе пулковской стеклотеки» в рамках научного проекта № 19-02-00843 А.

Список литературы

- Berezhnoi A. A.* A new reduction of digitized photographic plates with selected asteroids obtained with the normal astrograph of the Pulkovo Observatory from 1948 to 1990 // *Solar System Research*. V 2013. 47, 3. 203–212.
- Glusman Rowen, Boegen Lauren, Cerny William, Chapman Ali, Escapa Isaiah, Kron Richard G., Martinez Michael N., Muratore Amanda, Scott Audrey P., Yerkes Photographic Plate Digitization Team* . Digitization, Measurement, and Analysis of a 1905 Barnard Atlas Photographic Plate // *PASP*. IX 2022. 134, 1039. 094503.
- Khovrichev M. Yu., Apetyan A. A., Roshchina E. A., Izmailov I. S., Bikulova D. A., Ershova A. P., Balyaev I. A., Kulikova A. M., Petyur V. V., Shumilov A. A., Os'kina K. I., Maksimova L. A.* Searching for Binary Systems Among Nearby Dwarfs Based on Pulkovo Observations and SDSS Data // *Astronomy Letters*. II 2018. 44, 2. 103–118.
- Khovrichev M. Yu., Narizhnaya N. V., Vasil'eva T. A., Izmailov I. S., Kulikova A. M., Bikulova D. A.* Digitization of Astronegatives of the Pulkovo Glass Library: Positions of Saturn's Major

Satellites in the Period 1972-1982 in the Gaia DR2 System // Solar System Research. VIII 2020. 54, 4. 344–352.

Khovritchev M. Yu., Kulikova A. M. $\Delta \mu$ binaries among stars with large proper motions // Astronomy Letters. XII 2015. 41, 12. 833–847.

Khovritchev M. Yu., Robert V., Narizhnaya N. V., Vasilyeva T. A., Apetyan A. A., Bikulova D. A. Astrometric measurement and reduction of Pulkovo photographic observations of the main Saturnian satellites from 1972 to 2007 in the Gaia reference frame // A&A. I 2021. 645. A76.

Kiyaveva Olga V., Khovritchev Maxim Yu., Kulikova Agrippina M., Narizhnaya Natalya V., Vasilyeva Tatyana A., Apetyan Arina A. Does ADS 9346 have a low-mass companion? // Research in Astronomy and Astrophysics. XII 2021. 21, 11. 291.

Lehtinen K., Prusti T., de Bruijne J., Lammers U., Manara C. F., Ness J. U., Siddiqui H., Markkanen T., Poutanen M., Muinonen K. Digitization and astrometric calibration of Carte du Ciel photographic plates with Gaia DR1 // A&A. IX 2018. 616. A185.

Refregier Alexandre. Shapelets - I. A method for image analysis // MNRAS. I 2003. 338, 1. 35–47.

Robert V., Desmars J., Lainey V., Arlot J. E., Perlberg A. C., Horville D., Abouadarham J., Etienne C., Guérard J., Ilovaisky S., Khovritchev M. Y., Le Poncin-Lafitte C., Le Van Suu A., Neiner C., Pascu D., Poirier L., Schneider J., Tanga P., Valls-Gabaud D. The NAROO digitization center. Overview and scientific program // A&A. VIII 2021. 652. A3.

Yang Zhimin, Jia Peng, Yu Yong, Zhao Jianhai. Data processing pipeline for photo plates digital archives with deep neural networks // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. 12189. VIII 2022. 121891T. (Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series).

Yuan Ye, Li Fan, Fu Yanning, Chen Jian. The orbits of Triton and Nereid and the pole orientation of Neptune from Voyager, Hubble Space Telescope, and Earth-based astrometry in 1847-2020 // A&A. X 2021. 654. A66.

An astronegatives digitization method in the Pulkovo observatory glass library

A.M. Kulikova^{1,*}, N.V. Narizhnaya^{1,**}, T.A. Vasilyeva^{1,***}

¹The Central Astronomical Observatory of the Russian Academy of Sciences at Pulkovo

* *e-mail:* agrippina@gaoran.ru

** *e-mail:* nmat@gaoran.ru

*** *e-mail:* gidrata@mail.ru

2022

Abstract

This paper presents an overview of the methodology for digitizing 877 plates from the collection of the Pulkovo glass library and the process of obtaining the positions of the objects observed on them. The astronegatives used in this work were taken with the Normal astrograph at the Pulkovo Observatory in the period from 1893 to 1941. For digitization, the Pulkovo Mobile Digitizing Device (MDD) was used, which provides an internal measurement accuracy of astronegatives of 1 μm . The scale of the resulting scans was 1.0 arcsec/pix. In order to compensate for camera distortions and to reliably link the positions of objects determined on the scans to the Gaia system, calibration scans of template plates with a large number of objects were carried out at the NAROO high-precision astronomical digitization center (Paris Observatory). The results of the measurements of the astronegatives contained Uranian and Neptunian images are presented. The accuracy of obtained coordinates is about 50 mas in Gaia CRF. The typical values of the (O-C) relative to the EPM2017 ephemerides are less than 100 mas. These are the most robust measurements of Uranus and Neptune coordinates regarded to the epochs 1890s - 1940s in the modern reference system. A database was constructed from the resulting fits-files. The corresponding [web-resource](#) has been made for open access to the digitized astronegatives of the Pulkovo Observatory in the adopted Virtual Observatory format.