

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«КРАМСКАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РАН»**

**Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей среды
им. Б. В. Всесвятского**

**Номинация: «Астрономия и
изучение космического
пространства»**

**Тема: Исследование долготной зависимости поляризации спутника
Юпитера Ио**

Работу выполнил:
Дьяченко Герман Геннадьевич,
учащийся 11 класса МБОУ «СОШ
№2» г. Симферополя, ГБОУ ДО РК
«МАН «Искатель»

Научный руководитель:
Киселев Николай Николаевич,
Главный научный сотрудник
ФГБУН «КрАО РАН»,
руководитель лаборатории малых
тел Солнечной системы
ФГБУН «КрАО РАН»

г. Симферополь - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Глава I. Поляризация.....	5
Глава II. Поляриметр.....	8
Глава III. Наблюдения и обработка данных.....	15
Глава IV. Долготная зависимость поляризации Ио.....	18
Глава V. Дискуссия и Выводы.....	20
Список литературы.....	22
Приложение 1.....	24
Приложение 2.....	25

ВВЕДЕНИЕ

Спутник Ио — наименьший из лун Юпитера галилейской группы. Это уникальный объект, на котором находится около четырехсот вулканов. Спутник вызывает особый интерес у исследователей. Из всех небесных тел Солнечной системы, вулканическая деятельность, похожая на земную, наблюдается на данном спутнике Юпитера. Извержения вещества из недр наблюдаются и у некоторых других спутников, но в виде криовулканов – выбросов льда и воды.

Ио расположен очень близко к Юпитеру. Влияние мощной гравитации планеты-гиганта и ее магнитного поля, значительно превышающей ее влияние на другие галилеевы спутники, приводит к сильнейшей в Солнечной системе вулканической активности. В результате поверхность Ио покрыта вулканическими образованиями. Она постоянно обновляется за счет извержений десятков активных вулканов, выбрасывающих лаву, состоящую в основном из расплавленной серы, ее соединений и силикатов, что приводит к разнообразным цветам поверхности. Наблюдения с помощью космических аппаратов «Вояджер» и «Галилео» показали, что из-за динамичного характера вулканизма на Ио, его поверхность могла меняться со временем в масштабе лет и даже месяцев. Высокое геометрическое альbedo, $\rho_v = 0,63$, и низкие температуры из-за каменистого материала указывали на отложения инея на поверхности Ио.

Поляриметрические наблюдения Ио проводятся уже длительное время, но всё равно остаются еще вопросы, требующие изучения. Например, можно ли выявить степень однородности поверхности спутника (альbedo, структуры) по изучению свойств рассеянного света на разных долготах? А Ио, в виду своей вулканической активности с постоянным изменением поверхностного слоя, удобен для достаточно быстрого сравнительного изучения.

Следует отметить, что Ио, для изучения долготной зависимости поляризации, удобен, ведь он находится в приливном захвате и всегда повернут к Юпитеру одной стороной.

Актуальность работы заключается в получении новых характеристик поверхности спутника Юпитера Ио. Это одна из задач решения фундаментальной проблемы – происхождение и эволюция Солнечной системы.

Гипотеза – будет ли меняться степень поляризации света, отраженного локальными участками поверхности Ио, в связи с его вулканической активностью.

Цель работы – исследовать долготную зависимость поляризации спутника Ио.

Для достижения цели исследования были поставлены следующие **задачи**:

- Изучить информацию о поляриметрии, как об одном из эффективных методов исследования небесных тел.
- Провести собственные наблюдения спутника Юпитера Ио с помощью двуканального поляриметра, установленного на 2.6-м телескопе в Крымской астрофизической обсерватории.
- Обработать наблюдения Ио, полученные в КрАО и на 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол.
- Построить долготные зависимости поляризации Ио и сравнить их с результатами, имеющимися в литературе.
- Сделать выводы о проделанной работе.

Объект исследования – спутник Юпитера Ио.

Методы исследования – поляриметрические наблюдение, построение долготных зависимостей поляризации и их анализ.

ГЛАВА I. ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Физические характеристики небесных тел изучаются посредством анализа свойств пришедшего от них излучения. Свет обладает волновыми свойствами, описываемыми системой уравнений для электрического и магнитного полей. Полными характеристиками излучения являются интенсивность и параметры поляризации. Последние характеризуют степень асимметрии в распределении электрических векторов и направление их максимальных колебаний (линейная поляризация) и/или вращения (эллиптическая/круговая поляризация). Векторные характеристики электромагнитной волны можно измерить с помощью специальных устройств (поляроиды, призмы, фазовые пластинки), на основе которых конструируются поляриметры. Тем самым появляется возможность изучить полные характеристики излучения. Причем чувствительность поляризационных характеристик к физическим свойствам изучаемых объектов иногда значительно эффективнее спектрофотометрических свойств излучения. С этой целью развиваются методы и приборы поляриметрических измерений.

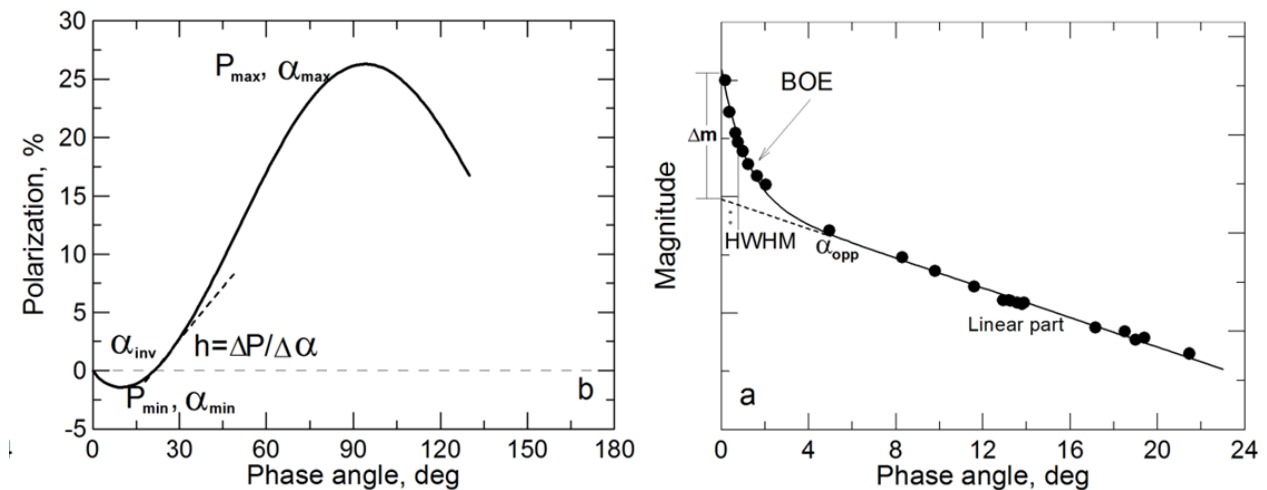


Рис. 1. Стандартная зависимость степени поляризации от фазового угла. Стандартная зависимость интенсивности от фазового угла.

Поляризацию звездного света впервые наблюдали астрономы Уильям Хилтнер и Джон С. Холл в 1949 году. Впоследствии Джесси Гринштейн и

Левретт Дэвис-младший разработали теории, позволяющие использовать данные поляризации для отслеживания межзвездных магнитных полей. Несмотря на то, интегрированном тепловое излучение от звезд, обычно не заметно поляризовано в источнике, рассеяние на межзвездной пыли может наложить на поляризацию света звезд на больших расстояниях. Чистая поляризация в источнике может возникнуть, если сама фотосфера асимметрична, из-за поляризации конечностей.. Плоская поляризация звездного света, генерируемого самой звездой, наблюдается для Ар-звезд (пекулярных звезд типа А).

И круговая и линейная поляризация от солнечного света была измерена. Круговая поляризация в основном обусловлена эффектами пропускания и поглощения в сильно магнитных областях поверхности Солнца. Другой механизм, вызывающий круговую поляризацию, - это так называемый «механизм выравнивания по ориентации». Свет континуума линейно поляризован в разных местах на лицевой стороне Солнца (поляризация лимба), хотя в целом эта поляризация отменяется. Линейная поляризация в спектральных линиях обычно создается анизотропным рассеянием фотонов на атомах и ионах, которые сами могут быть поляризованы этим взаимодействием. Линейно поляризованный спектр Солнца часто называют второй солнечный спектр. Атомная поляризация может быть изменена в слабых магнитных полях с помощью эффекта Ханле. В результате поляризация рассеянных фотонов также изменяется, обеспечивая диагностический инструмент для понимания звездных магнитных полей.

Поляризация также присутствует в излучении когерентных астрономических источников из-за эффекта Зеемана (например, гидроксильные или метанольные мазеры).

Большие радиодолы в активных галактиках и радиоизлучение пульсаров (которое, как предполагается, иногда может быть когерентным) также демонстрируют поляризацию.

Помимо предоставления информации об источниках излучения и рассеяния, поляризация также исследует межзвездное магнитное поле в нашей галактике, а также в радиогалактиках посредством вращения Фарадея. В некоторых случаях бывает сложно определить, какая часть фарадеевского вращения приходится на внешний источник, а какая локальна для нашей собственной галактики, но во многих случаях возможно найти другой далекий источник поблизости в небе; таким образом, сравнивая источник-кандидат и источник ссылки, можно распутать результаты.

Поляризация космического микроволнового фона (СМВ) также используется для изучения физики очень ранней Вселенной. СМВ демонстрирует 2 компонента поляризации: поляризацию В-моды (без дивергенции, как магнитное поле) и Е-моды (без завихрений, только с градиентом, как электрическое поле). ВИСЕР2 телескоп расположен на южном полюсе помог в обнаружении В-режиме поляризации в СМВ. Поляризационные моды реликтового излучения могут дать больше информации о влиянии гравитационных волн на развитие ранней Вселенной.

Крымские астрофизики Н. М. Шаховской и Ю. С. Ефимов были одними из первых исследователей свойств поляризованного излучения различных астрофизических объектов и внесли огромный вклад в развитие поляриметрических методов, а также в создание поляриметрических приборов. В 1961 г. Н. М. Шаховской и Н. А. Димов создали первый поляриметр Крымской астрофизической обсерватории (КрАО). Для получения независимых от изменений яркости измерений поляризации у быстропеременных объектов прибор был изготовлен с вращающимся со скоростью 1 об/с модулятором (поляроид). Результаты, полученные с этим поляриметром, были

впечатляющими. Н. М. Шаховской открыл переменную поляризацию излучения затменно-двойных звезд типа β Lyr, что отражено Т. Герельсом в хронологии выдающихся поляриметрических событий. С участием Ю. С. Ефимова, в 1969 в КрАО был создан поляриметр с оптимальной, с точки зрения подавления атмосферных эффектов, частотой модуляции (33 об/с). Этот прибор, с несколькими существенными модернизациями долгое время использовался на 2.6м телескопе ЗТШ. Однако, поляриметр, даже в последней модификации, оставался одноканальным, с $\sim 50\%$ потерей света на призме Франка–Риттера, невысокой квантовой эффективностью ФЭУ-136. Его дальнейшая модернизация была невозможна, что сделало актуальной задачу создания нового прибора.

В 2018 г в Крымской астрофизической обсерватории были построены два апертурных поляриметра «POLSHAKH», предназначенных для использования с 2.6-м телескопом КрАО и 2-м телескопом обсерватории Пик Терскол. Настоящая работа была выполнена на основе результатов наблюдений с этими инструментами, которые описаны в Главе 2.

ГЛАВА II. ПОЛЯРИМЕТР

В основу принципа измерения параметров поляризации положена схема, состоящая из непрерывно вращающейся с высокой частотой четвертьволновой (или полуволновой) пластинки, с последующим расщеплением света на две ортогонально поляризованные компоненты с помощью призмы Волластона. Принципиальная блок-схема созданных поляриметров показана на рис. 2, где отмечены основные узлы и оптические элементы. Основные различия поляриметров 2.6-м телескопа КрАО и 2-м телескопа Обсерватории Пик Терскол связаны с разными относительными отверстиями – $f/16$ и $f/8$, соответственно.

Для удобства работы с поляриметрами и их обслуживания была выбрана конструктивная схема, состоящая из отдельных узлов, каждый из которых по своим направляющим устанавливается в корпус прибора. Повторяемость установки узлов составляет не менее 0.1 мм, что обеспечивает сохранность юстировки оптических элементов поляриметров.

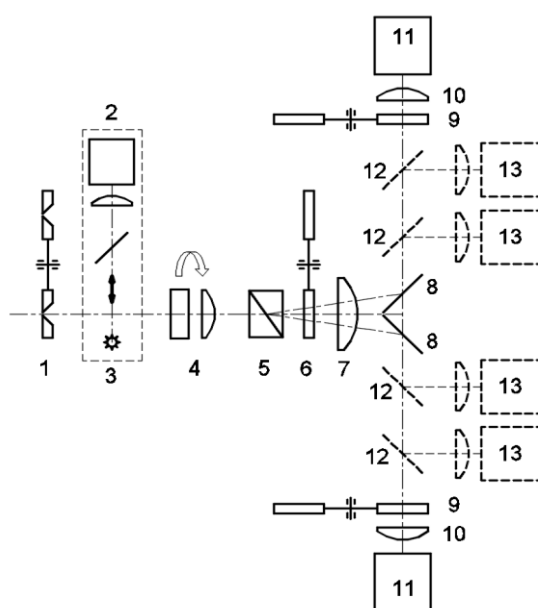


Рис. 2. Принципиальная блок-схема двухканальных поляриметров, установленных на 2.6-м телескопе ЗТШ КрАО и 2-м RCC телескопе Обсерватории Пик Терскол (МЦАМЭИ). 1 – турель с входными диафрагмами на 5 позиций; 2 – узел подмотра диафрагм; 3 – эталонный источник; 4 – вращающаяся четвертьволновая (или полуволновая) пластинка с линзой поля (модулятор); 5 – призма Волластона; 6 – турель нейтральных фильтров на 5 позиций; 7 – коллективная линза; 8 – отклоняющие зеркала; 9 – турель со сменными светофильтрами на 8 позиций; 10 – линзы Фабри; 11 – фотоумножители. Пунктиром показаны дихроичные фильтры (12) и приемники излучения (13) для расширения возможностей поляриметра в будущем.

Блок диафрагм (рис. 2: 1). На входе поляриметра находится турель с четырьмя круглыми диафрагмами, изготовленными из диэлектрического материала. Пятое пустое гнездо служит для поиска и предварительной установки объекта. Поле диафрагм подсвечивается с регулируемой яркостью. Линейные и угловые размеры диафрагм приведены в таблице 1. Турель диафрагм с приводом от

шагового двигателя обеспечивает воспроизводимость повторной установки диафрагмы с точностью ± 0.1 мм.

Таблица 1. Размеры входных диафрагм в поляриметрах КрАО и Обсерватории Пик Терскол

Поляриметр 2.6-м телескопа ЗТШ (f/16)		Поляриметр 2-м RCC телескопа (f/8)	
Диаметр, мм	№/Диаметр, угл. сек	Диаметр, мм	№/Диаметр, угл. сек
1	5/5	0.4	2/5
2	4/10	0.8	3/10
3	3/15	1.2	4/15
6	2/30	2.4	5/30
22.5 (пустое гнездо)	1/112	22.5 (пустое гнездо)	1/290

Устройство подсмотра (рис. 2: 2). Узел подсмотра диафрагм, состоит из ПЗС камеры Meade DSI II, объектива и механизма ввода-вывода с оптической оси отклоняющего зеркала. Устройство совмещено с эталонным источником света, излучение которого перебрасывается на вход прибора при введенном зеркале подсмотра. Устройство подсмотра позволяет контролировать положение наблюдаемого объекта в диафрагме. Изображение объекта в поле зрения искателя и в диафрагме выводится на экран компьютера. Поле зрения устройства подсмотра около 2 угловых минут в фокальной плоскости телескопа.

Блок фазовых пластинок (модулятор) (рис. 2: 4). Этот блок состоит из электродвигателя постоянного тока с полым валом и встроенным датчиком угла его положения. К валу двигателя крепится съемный узел с суперхроматическими четвертьволновой или полуволновой фазовыми пластинками APSAW с покрытием MgF_2 (изготовлены В. С. Самойловым, ГАО НАНУ) и линзой поля. Размещение линзы поля во вращающемся узле фазовой пластинки позволяет избежать влияния на измерения паразитных фазовых сдвигов в стекле линзы, расположенной перед поляризационным анализатором.

Конструкция приборов позволяет оперативно проводить смену фазовых пластинок без снятия поляриметров с телескопов. Диаметр пластинок составляет 20 мм, а световой диаметр – 18.5 мм, Воспроизводимость ориентации пластинки относительно вала двигателя при повторной установке не хуже 0.1° . Зависимости фазовых сдвигов пластин от длины волны показаны на рис. 2 (а, b). Частота вращения фазовой пластинки составляет около 30 Гц. Сигнал встроенного датчика положения ротора поступает на контроллер прибора, который обеспечивает синхронное интегрирование сигнала в пределах 16-ти секторов по 11.25° на каждые пол-оборота ротора.

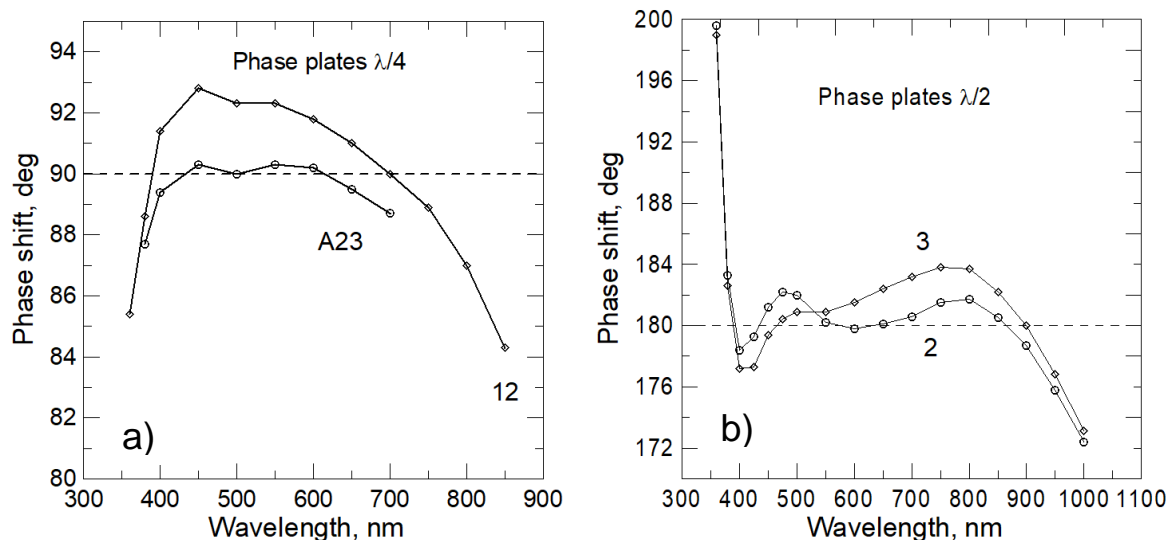


Рис. 3. Зависимость фазового сдвига от длины волны: а) – пластинки $\lambda/4$ (A23 – КрАО, 12 – Терскол); б) – пластинки $\lambda/2$ (2 – КрАО, 3 – Терскол).

Блок призмы Волластона (рис. 2: 5). Кальцитовая призма Волластона расщепляет пучок на два луча с ортогональными колебаниями электрических векторов. Световой диаметр призм составляет 20 мм, угол расхождения лучей 20° . С учетом работы в широком диапазоне температур, призмы Волластона не склеены, а помещены в герметичные капсулы, наполненные иммерсионным маслом.

Турель с нейтральными фильтрами (рис. 2: 6). Нейтральные фильтры используются для наблюдений программных объектов и поляриметрических стандартов ярче $\approx 7^m$. Пропускание нейтральных фильтров показано на рис. 3.

Линза-коллектив и отклоняющие зеркала (рис. 2: 7, 8). Линза-коллектив сопрягает фокальную плоскость телескопа и линзы Фабри и уменьшает расходимость пучков до уровня, приемлемого для интерференционных фильтров. Разделитель пучков, состоящий из двух плоских зеркал, направляет свет в "красный" и "синий" блоки поляриметра. Каждый из блоков состоит из турели светофильтров на восемь позиций, линзы Фабри и фотоумножителя. Между зеркалами и турелями имеются установочные места для дихроичных фильтров, которые могут быть использованы для увеличения числа каналов регистрации до шести (по три детектора на блок).

Турель фильтров (рис. 2: 9). Турели имеют восемь позиций для установки светофильтров диаметром 1 дюйм.

Нормированные кривые пропускания UBVR_I фильтров ("красный" канал) и UVV фильтров ("синий" канал) представлены на рис. 4 и 5, соответственно

Фотоумножители (рис. 2: 11). Приемником излучения в "красном" канале служит фотоумножитель НАМАМАТСУ R943-02 с системой термоэлектрического охлаждения Photocool TE-206TSRF. Фотоумножитель при рабочем напряжении питания 1800 В и при температуре -10° имеет темновой ток ~ 10 имп/сек. Приемником излучения в "синем" канале служит неохлаждаемый фотоумножитель ЕМІ 6556В, который при рабочем напряжении питания 1400 В и температуре $+10^\circ$ имеет темновой ток ~ 5 имп/сек.

Оптическая схема двухканального поляриметра приведена на рис. 6.

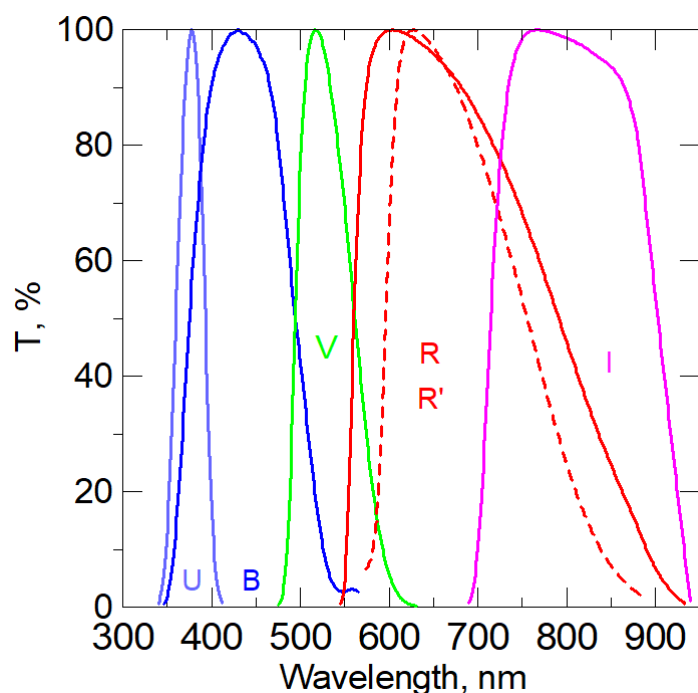


Рис. 4. Нормированные кривые пропускания фотометрических полос "красного" канала с учетом спектральной чувствительности фотоумножителя Hamamatsu R943-02: UBVR'I – полосы пропускания фильтров, используемых в поляриметре КрАО; UBVR'I – полосы пропускания фильтров, используемых в поляриметре Обсерватории Пик Терскол.

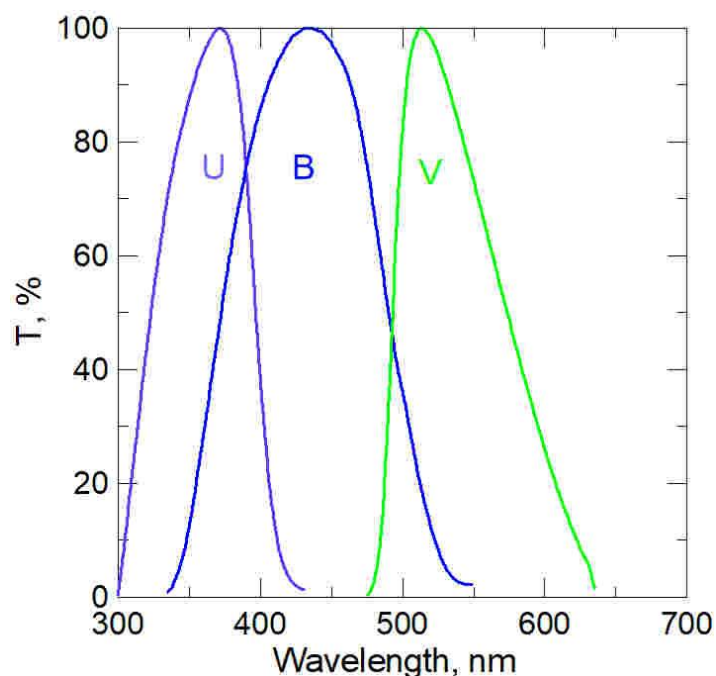


Рис. 5. Нормированные кривые пропускания UVB фильтров "синего канала" с учетом спектральной чувствительности фотоумножителя EMI 6556 B и прозрачности атмосферы.

Система управления и регистрации состоит из специально разработанной платы контроллера, с установленными на ней микроконтроллером ATmega 162, и тремя микроконтроллерами ATmega 48, программного обеспечения микроконтроллеров, программы управления на ПК с ОС Windows. Связь контроллера с ПК осуществляется посредством гальванически развязанного преобразователя интерфейсов RS-232/RS-422.

Контроллер обеспечивает счет импульсов ФЭУ отдельно в каждом из 16 секторов положения фазовой пластинки (строб) и измерение длительности каждого строба с точностью 0.5 мкс (каждый из ATmega 48 является счетчиком для двух каналов регистрации). Контроллер позволяет осуществлять счет импульсов от шести ФЭУ одновременно, с учетом возможной модернизации прибора с увеличением числа каналов. Мертвое время счетчиков импульсов не более 50 нс. Время накопления сигнала задается в пределах от одного оборота фазовой пластинки (около 30 мс) до 20 секунд (всегда целое число оборотов). В конце периода накопления на ПК передаются для каждого из активных каналов регистрации по 16 трехбайтовых отсчетов накопленных импульсов и 16 общих для всех каналов отсчетов суммарной длительности стробов каждого сектора.

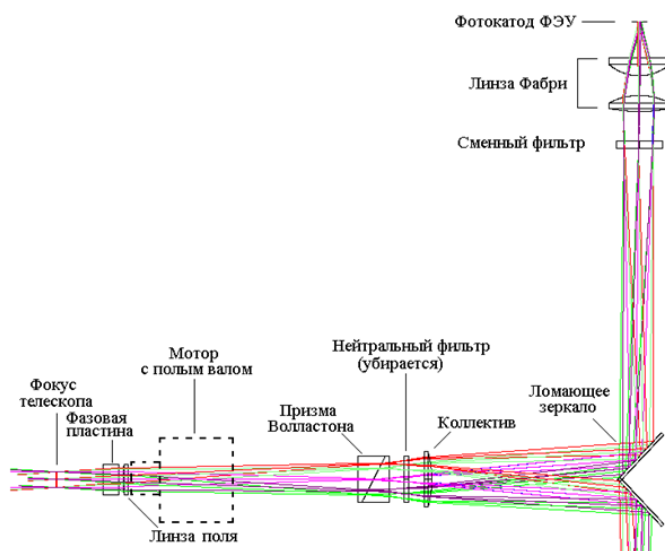


Рис. 6. Оптическая схема двухканального поляриметра. После ломающих зеркал показан только один из двух симметричных блоков.

Контроллер также обеспечивает управление турелью диафрагм, подсветкой диафрагм, тремя турелями фильтров, устройством ввода/вывода зеркала подсмотра, запуск и остановку двигателя модулятора. Программа на ПК под ОС Windows представляет пользователю возможность управления всеми механизмами с помощью контроллера, запись данных измерений в файл и предварительную обработку данных наблюдений.

ГЛАВА III. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ

Наблюдения спутника Ио проводились в период лето – начало осени 2023г. на Зеркальном Телескопе имени Г.А. Шайна в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Крымской астрофизической обсерватории РАН» на поляриметре, описанном в предыдущей главе.

Вместе с Ио наблюдались другие программные объекты (астероиды, кометы, другие спутники Юпитера и Сатурна). Кроме того, проводились наблюдения звезд-стандартов с известной большой поляризацией и малой поляризацией, необходимых для калибровки аппаратуры. После наступления сумерек, наблюдатель вместе с оператором телескопа открывают купол, и подключают оборудование. По достижении температурного баланса подкупольного помещения с окружающей средой (это делается, чтобы избежать искажения изображения), оператор открывает зеркало ЗТШ. Астрономы же подготавливают координаты тех объектов, которые можно будет наблюдать на протяжении ночи, включают все нужные программы (управления поляриметром: смена фильтров, диафрагма, период записи сета; калибровка искателя телескопа; программа слежения и ведения объекта, микроподводка). Координаты объекта предоставляются оператору, который по ним наводит телескоп и передает управление телескопом.

Стандартная процедура наблюдений объектов состоит из измерений, выполняемых по схеме: фон неба – объект – объект – ... – объект – фон неба. Для ярких объектов, с большим отношением скорости счета импульсов от объекта к скорости счета импульсов от фона неба (n_{obj}/n_{bg}), достаточно одного - трех измерений. По такой схеме проводились наблюдения Ио. Получаемые данные в двух каналах записываются в два файла *Ch1.txt (фильтры красного канала) и *Ch2.txt (фильтры синего канала). После окончаний наблюдений оборудование выключается, все данные переносятся на флеш-карту и в последствии обрабатываются.

Ио, как было сказано ранее находится в приливном захвате, т.е. всегда повернут к Юпитеру одной стороной. Это дает возможность наблюдать долготную зависимость. По мере движения спутника вокруг своей планеты его долгота будет изменяться, что отображено на рис. 3.

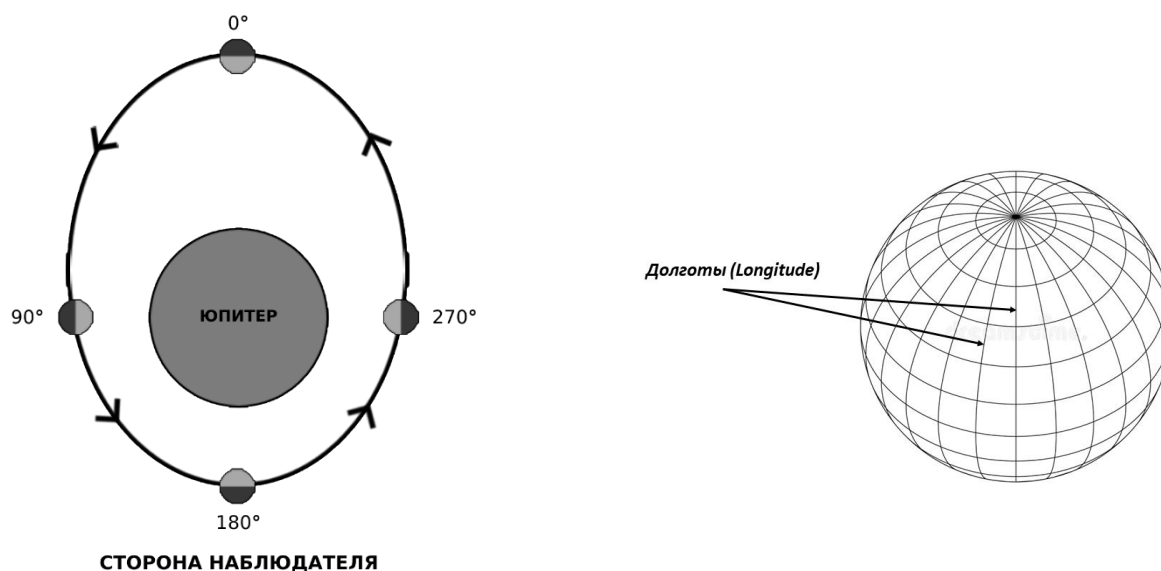


Рис.7. Изменение долготы Ио в зависимости от его орбитального положения. Обозначение долготы поверхности планет.

Первичная обработка происходит в программе **Neored_lp** (см. рис. 4), главной задачей является убрать точки, которые сильно отклоняются от общего тренда, тем самым убираются случайные ошибки. Данные за одну ночь включают в себя все объекты, использованные фильтры с выводом двух каналов. Точки выбиваются в параметрах **Q** и **U**.

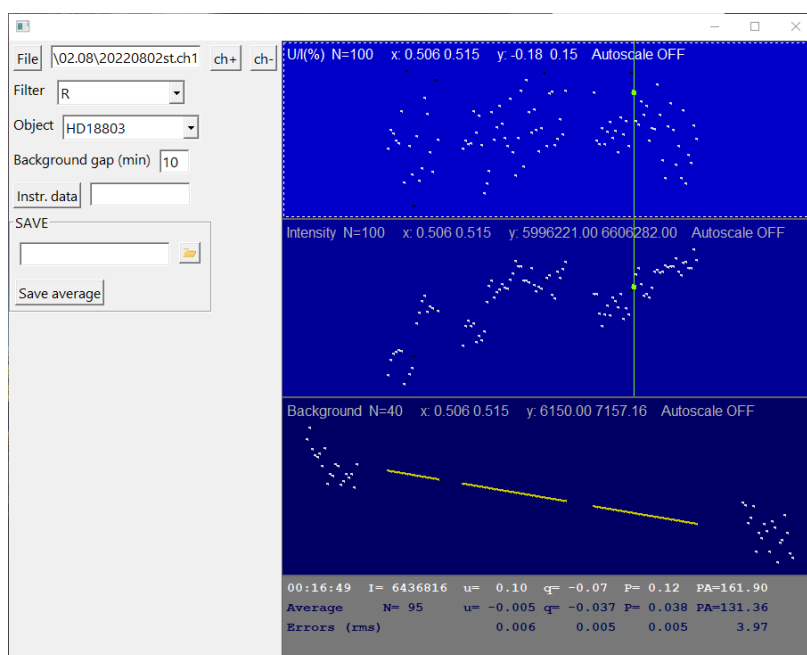


Рис. 8. Рабочее окно программы первичной обработки **Neopol Ip**. Нижняя панель – измерения фона неба (точки) и его линейная аппроксимация (прямая линия). Средняя панель – накопленные импульсы от звезды-стандарта HD 18803. Верхняя панель – вычисленные величины степени поляризации звезды-стандарта HD 18803 (параметр Стокса U). Наблюдения проведены в фильтре R.

Результаты измерений далее обрабатываются в программе **Grapher**. Звезды с нулевой и большой поляризации обрабатываются отдельно. В результате получают данные по инструментальной поляризации и нуль пункту позиционных углов поляриметра. Все полученные данные потом используются для обработки программных объектов, в случае данной работы – спутника Ио.

ГЛАВА IV. ДОЛГОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИО

Общий вид фазовой зависимости поляризации Ио в узких фильтре показан на рис 9.

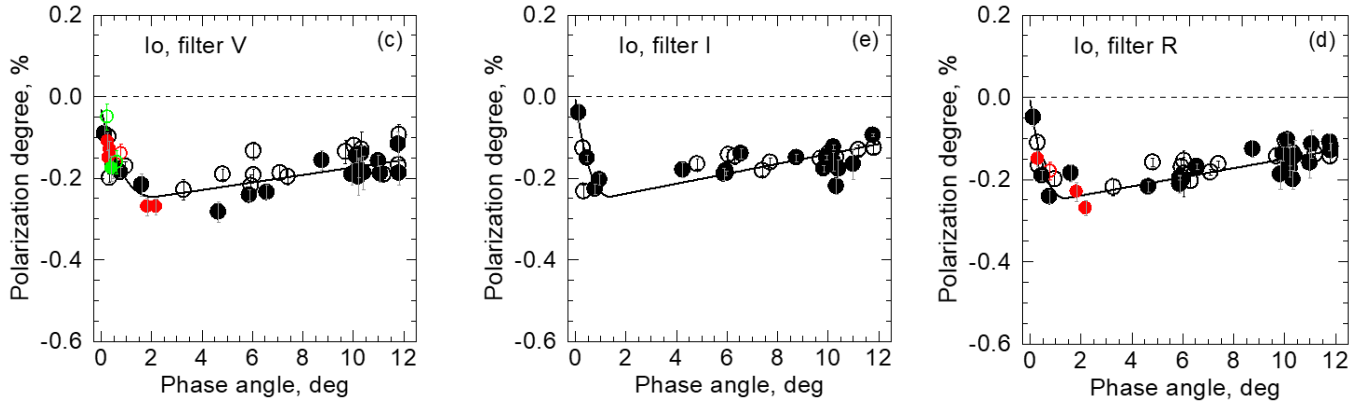


Рис. 9. Фазовая зависимость поляризации Ио в узких фильтрах (R, I, V), полученная по наблюдениям на 2.6-м телескопе КрАО и 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол в 2019 – 2023 гг.

В области фазовых углов $\approx (3 - 12)^\circ$ степень поляризации меняется линейно, но разброс точек превышает ошибки наблюдений. Это может быть результатом, что наблюдаемая степень поляризации спутника зависит не только от фазового угла α , но и от долготы L . То есть, можно предположить, что $P_r = P(\alpha, L) = P(\alpha) + P(L)$. Если отражательные свойства поверхности спутника однородны, то $P(L) = const$ или равна 0, и изменение P_{obs} связано только с фазовым углом. Чтобы найти $P(L)$, надо учесть фазовую зависимость, то есть $P(L) = P_{obs} - P(\alpha)$. В работе (Kiselev et al., 2024) именно такой метод был применен для нахождения долготной зависимости поляризации Ио. Но учет фазовой зависимости может быть не точен и ошибки фазовой зависимости могут исказить долготную зависимость поляризации. Поэтому в данной работе были выбраны наблюдательные данные для разных долгот, но в узком диапазоне фазовых углов, где можно полагать, что фазовая зависимость постоянна. Эти данные представлены на рис. 10.

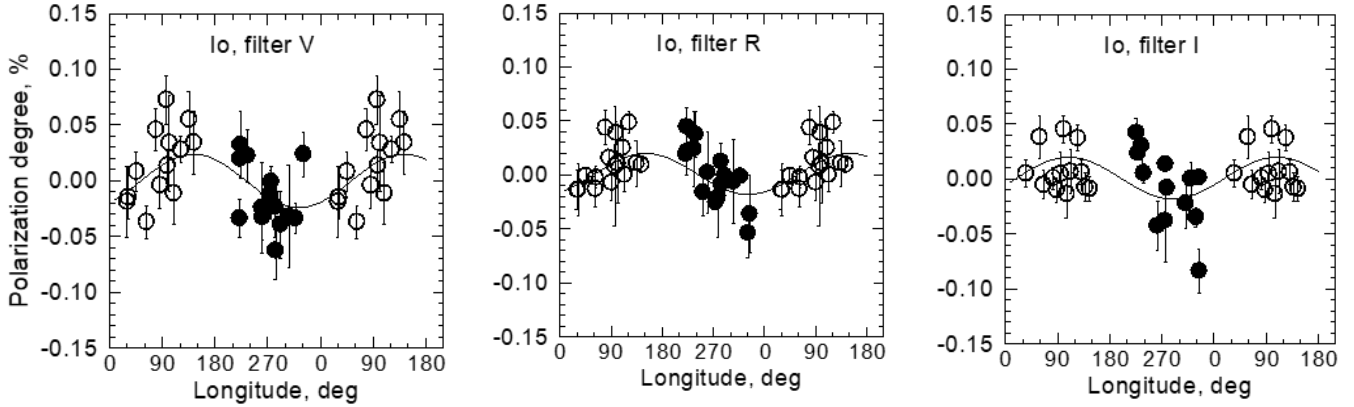


Рис. 10. Степень поляризации Ио в узком диапазоне фазовых углов ($10 - 12^\circ$) в узких фильтрах (R, I, V) в зависимости от долготы поверхности. Синие значки получены для ведущего полушария ($0^\circ \leq L \leq 180^\circ$). Красные значки получены для ведомого полушария ($180^\circ \leq L \leq 360^\circ$).

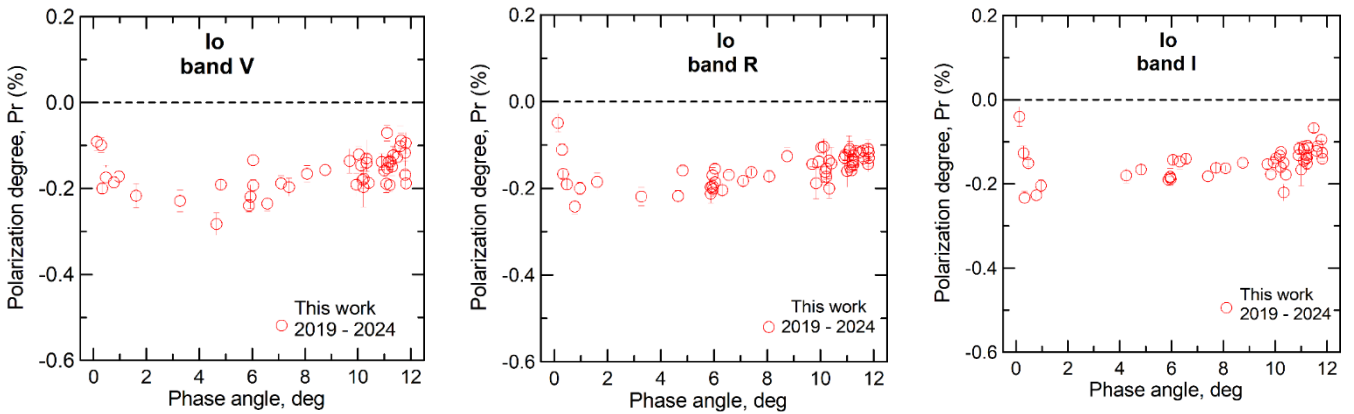


Рис. 11. Фазовая зависимость поляризации Ио в узких фильтрах (R, I, V), полученная по наблюдениям на 2.6-м телескопе КраО и 2-м телескопе обсерватории Пик Терскол в 2019 – февраль 2024 гг.

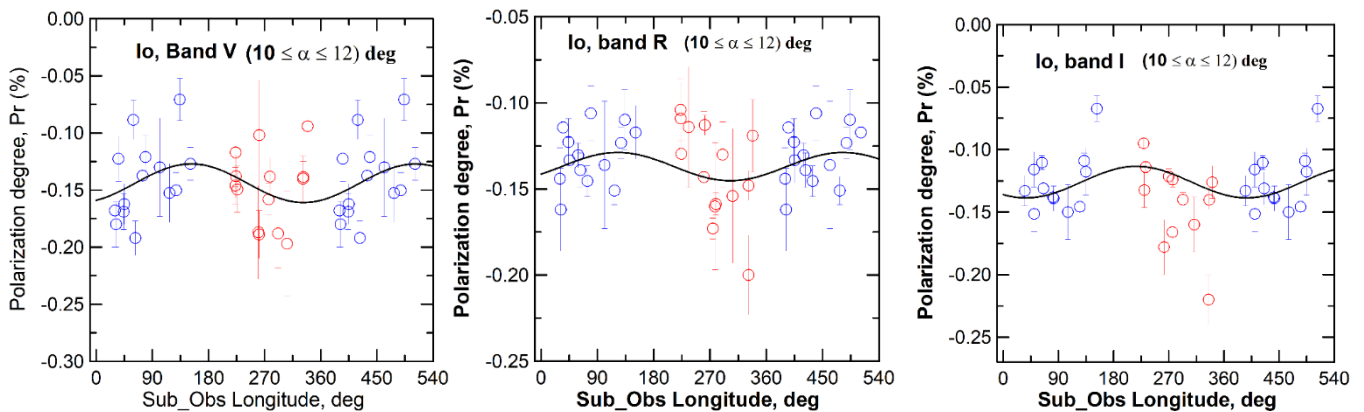


Рис. 12. Степень поляризации Ио в узком диапазоне фазовых углов ($10 - 12^\circ$) в узких фильтрах (R, I, V) в зависимости от долготы поверхности. Синие значки получены для ведущего полушария ($0^\circ \leq L \leq 180^\circ$). Красные значки получены для ведомого полушария ($180^\circ \leq L \leq 360^\circ$), учитывая данные 2023-2024 гг.

Очевидно, что степень поляризации меняется по поверхности Ио. Максимальная амплитуда изменений степени поляризации составляет около 0.07%. Эти изменения могут быть вызваны альбедными и/или структурными особенностями локальных областей поверхности спутника.

В качестве первого приближения, мы приняли, что наблюдаемое изменение степени поляризации описывается выражением:

$$P(L) = P1 + P2*\sin(L - L_o),$$

где $P1$ – среднее значение степени поляризации на фазовых углах $10^\circ \leq \alpha \leq 12^\circ$. $P2$ – половина амплитуды долготной зависимости поляризации, L – долгота поверхности спутника для наблюдателя, L_o – долгота поверхности, где долготная зависимость отсутствует. Параметры $P1 = -0.137$, $P2 = 0.012$, $L_o = 51.8^\circ$ были найдены по программе **ORIGINPRO**.

На самом деле изменение поляризации с долготой может иметь произвольную функциональную зависимость. Поэтому синусоидальная зависимость «сглаживает» реальное изменение поляризации с долготой.

ГЛАВА V. ДИСКУССИЯ И ВЫВОДЫ

В обзоре Веверка (*Veverka "Polarimetry of satellites 1977"*) приведены данные о долготных зависимостях поляризации Ио, которые наблюдали Зельнер и Градье (*Zellner and Gradie, 1975, не опубликовано*).

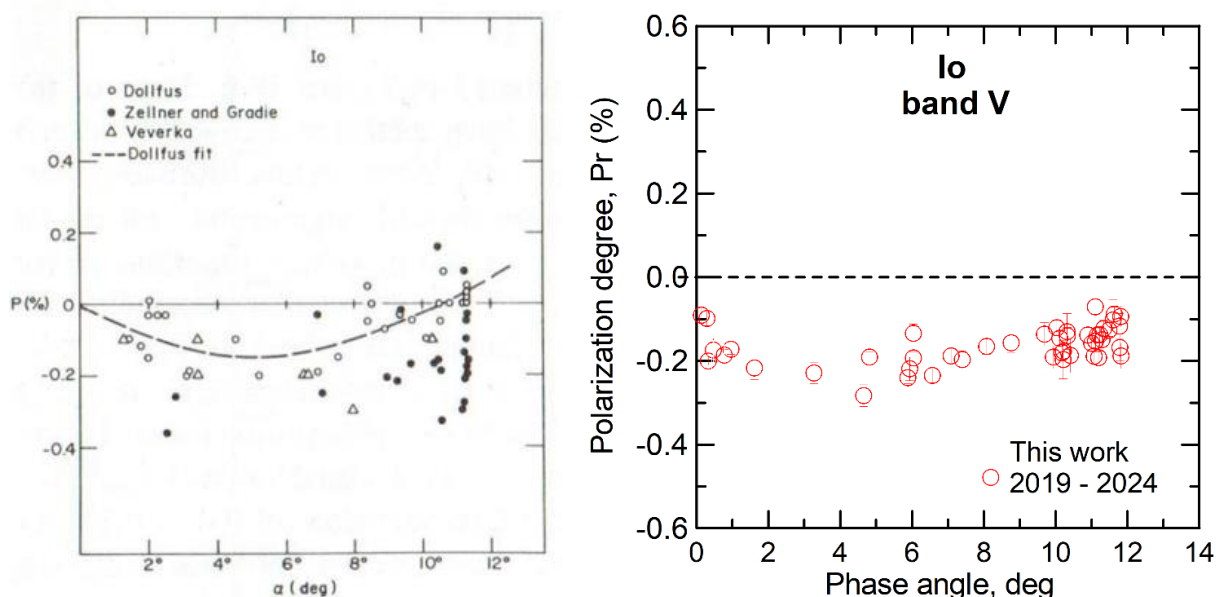


Рис 6. График взят из работы Веверка, 1977 в сравнении с графиком данных КрАО, Терскол 2019-2024 в одном масштабе.

Согласно Veverka (1977), Zellner & Gradie (1975) отметили, что в узком диапазоне фазовых углов около 11° имеет место значительное рассеяние точек до (0.4 - 0.5) %, что может быть связано с долготной зависимостью поляризации. Отрицательная ветвь наиболее глубока вблизи $L = 160^\circ$ и наиболее мелкая вблизи $L = 300^\circ$.

Наши наблюдения показывают, что рассеяние точек на ФЗП около 11° составляет $\sim 0.1\%$. Максимальная амплитуда долготной зависимости поляризации, обнаруженная нами $\approx 0.1\%$. Кроме того, отрицательная ветвь наиболее глубока вблизи $L = 330^\circ$ и наиболее мелкая вблизи $L = 152^\circ$, то есть заметно отличаются от данных Зельнера и Градье.

Отметим, что даже максимальная амплитуда долготной зависимости поляризации **0.07%**, обнаруженная нами, почти на порядок меньше того, что наблюдали Зельнер и Градье (до 0.4 - 0.5%) в 1975 г. Известно, что на поверхности Ио располагается около 400 вулканов, из которых около двух десятков действующих. Можно предположить, что вулканическая активность Ио меняется со временем и вулканы неравномерно расположены на поверхности. Это может объяснить значительное различие в амплитуде долготной зависимости Ио, наблюдаемое Зельнером и Градье и нами.

Выводы:

- Проведены и обработаны поляриметрические наблюдения Ио в узком диапазоне фазовых углов;
- Установлено, что степень поляризации Ио зависит не только от фазового угла, но и от долготы поверхности;
- Получена долготная зависимость поляризации Ио, с амплитудой гораздо меньше, чем получена ранее Зельнером и Градье
- Сделано предположение, что значительное различие в амплитудах долготных зависимостей Ио, наблюдаемые Зельнером и Градье и нами, связано с тем, что вулканическая активность Ио меняется со временем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

N. Kiselev, A. Leppäläc, V. Rosenbush, K. Muinonen, L Kolokolova, A. Savushkin, N. Karpov. New Polarimetric Data for the Galilean satellites: Io and Ganymede Observations and Modeling. (принята к печати, Planetary Science Journal, 2024)

Zellner, B. & Gradie, J., 1975, AJ, 81, 262

Veeverka, J. 1977, in IAU Coll. Proc. 28, Planetary Satellites, ed. J. A. Burns (Tucson, AZ: Univ. Arizona Press), 210

Polarimetric Observations of Jupiter's Moons : Europa, Io, Ganymede / A. A. Savushkin, N. N. Kiselev, V. K. Rosenbush, N. V. Karpov // Lunar and Planetary Science Conference, 53rd, held 7–11 March, 2022 at The Woodlands, Texas. – [The Woodlands, Texas], 2022. – id. 2289. – (LPI Contribution ; No. 2678).

«Двухканальные фотоэлектрические поляриметры Крымской астрофизической обсерватории и Обсерватории пик Терскол: принципиальная схема, конструкция и результаты первых наблюдений»

Д. Н. Шаховской, Н. Н. Киселев, А. В. Долгополов, К. А. Антонюк, В. К. Розенбуш, Ю. С. Иванов, Н. В. Карпов, В. К.Тарадий, С. В. Колесников, А. А. Савушкин, А. В. Рябов, А. В. Таран.

Поляриметрия малых тел Солнечной системы / Н. Н. Киселев // Астрономия : познание без границ : Всероссийская астрон. конф. (ВАК – 2017), Ялта, Крым, 17–22 сентября 2017 г. : сб. тез. – [Ялта], 2017. – С. 26.

Поляриметрия Галилеевых спутников Юпитера около оппозиции в 2012–2014 гг. / С. Зайцев, Н. Киселев, В. Розенбуш, С. Колесников и др. // Вісник

Київського ун-ту. Сер. Радіофізика та електроніка. – 2014. – Вип. 1–2 (20-21). – С. 49–51.

<https://spaceworlds.ru/solnechnaya-sistema/planeta-jupiter/io-sputnik.html>

https://translated.turbopages.org/proxy_u/en-ru.ru.c06a0680-639b43cc-8181bd8e-74722d776562/https/en.wikipedia.org/wiki/Polarization_in_astronomy

<http://www.astronet.ru/db/msg/1188548>

Приложение 1

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
Object	mode	filter	diaf	N	date(evn.)	time(UT)	Px=q	sig	Py=u	sig	q_ins	sig q	u_ins	sig u	q_obs	sig	u_obs	sig
1	lo	/2	R	3	104/8/1/2023	60158.488	0.084	0.005	0.087	0.005	0.008	0.009	0.005	0.001	0.076	0.0102956	0.082	0.0050990
2	lo	/2	R	4	35/8/3/2023	60160.494	0.105	0.007	0.085	0.005	0.008	0.009	0.005	0.001	0.097	0.0114018	0.08	0.0050990
3	lo	/2	R	4	121/8/16/2023	60173.532	0.105	0.005	0.101	0.005	0.008	0.01	0.016	0.005	0.097	0.0111803	0.085	0.0070711
4	lo	/2	R	4	121/8/17/2023	60174.557	0.079	0.006	0.075	0.007	0.008	0.01	0.016	0.005	0.071	0.0116619	0.059	0.0086023
5	lo	/2	R	4	81/8/23/2023	60180.490	0.078	0.006	0.1	0.006	-0.001	0.007	0.024	0.006	0.079	0.0092195	0.076	0.0084853
6	lo	/2	R	4	73/8/24/2023	60181.429	0.102	0.006	0.095	0.006	-0.001	0.007	0.024	0.006	0.103	0.0092195	0.071	0.0084853
7	lo	/2	R	4	350/8/25/2023	60182.486	0.096	0.005	0.103	0.005	-0.001	0.007	0.024	0.006	0.097	0.0086023	0.079	0.0078102
8	lo	/2	R	4	152/8/26/2023	60183.459	0.138	0.004	0.102	0.003	-0.001	0.007	0.024	0.006	0.139	0.0080623	0.078	0.0067082
9	lo	/2	R	4	534/8/27/2023	60184.476	0.086	0.004	0.119	0.003	-0.001	0.007	0.024	0.006	0.087	0.0080623	0.095	0.0067082
10	lo	/2	R	4														
11																		
12	lo	/2	V	3	106/8/1/2023	60158.488	-0.08	0.008	-0.124	0.01	0.01	0.01	-0.002	0.004	-0.09	0.0128062	-0.122	0.0107703
13	lo	/2	V	4	49/8/3/2023	60160.494	-0.088	0.015	-0.1	0.015	0.01	0.01	-0.002	0.004	-0.098	0.0180278	-0.098	0.0155242
14	lo	/2	V	4	125/8/16/2023	60173.532	-0.057	0.012	-0.07	0.012	0.033	0.015	-0.016	0.038	-0.09	0.0192094	-0.054	0.0398497
15	lo	/2	V	4	328/8/17/2023	60174.527	-0.207	0.056	-0.262	0.068	0.033	0.015	-0.016	0.038	-0.24	0.0579741	-0.246	0.0693397
16	lo	/2	V	4	95/8/23/2023	60180.490	-0.071	0.013	-0.077	0.015	0.024	0.013	0.028	0.013	-0.095	0.0183848	-0.105	0.0198494
17	lo	/2	V	4	76/8/24/2023	60181.429	-0.078	0.013	-0.11	0.012	0.024	0.013	0.028	0.013	-0.102	0.0183848	-0.138	0.0176918
18	lo	/2	V	4	92/8/25/2023	60182.451	-0.082	0.009	-0.096	0.013	0.024	0.013	0.028	0.013	-0.106	0.0158114	-0.124	0.0183848
19	lo	/2	V	4	101/8/26/2023	60183.455	-0.075	0.009	-0.083	0.009	0.024	0.013	0.028	0.013	-0.099	0.0158114	-0.111	0.0158114
20	lo	/2	V	4	47/8/27/2023	60184.433	-0.091	0.022	-0.097	0.019	0.024	0.013	0.028	0.013	-0.115	0.0255539	-0.125	0.0230217

band	q	sig	u	sig	ch
U	0,0465	0,0505	-0,0305	0,0505	2
B	0,0226667	0,012	-0,032	0,0126667	2
V	0,0236	0,0154	-0,0188	0,016	2
R	0,00825	0,00725	-0,00125	0,00675	1
I	0,00175	0,00775	-0,01975	0,0085	1

Приложение 2.

График долготной зависимости поляризации Ио в соответствии с картой его поверхности.

