НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ
ВІДДІЛ ФІЗИКИ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ

ДОСЛІДЖЕННЯ З ФІЗИКИ ПЛАНЕТНИХ АТМОСФЕР ТА МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ, ЕКЗОПЛАНЕТ ТА ДИСКОВИХ СТРУКТУР НАВКОЛО ЗІР

Київ 2015

УДК 52

Відьмаченко А.П., Дєлєц О.С., Длугач Ж.М., Захожай О.В., Костогриз Н.М., Крушевська В.М., Кузнєцова Ю.Г., Мороженко О.В., Неводовський П.В., Овсак О.С., Розенбуш О.Е., Романюк Я.О., Шавловський В.І., Яновицький Е.Г. Дослідження з фізики планетних атмосфер та малих тіл Сонячної системи, екзопланет та дискових структур навколо зір. К.: 2015. 92 с.

Розглянуто історію та основні етапи становлення відділу фізики планетних систем Головної астрономічної обсерваторії Національної академії наук України. Відображено основну тематику дослідження відділу та наукові здобутки співробітників відділу.

ISBN 978-966-02-7836-3

© Головна астрномічна обсерваторія НАН України

© А.П. Відьмаченко, О.С. Дєлєц, Ж.М. Длугач, О.В. Захожай, Н.М. Костогриз, В.М. Крушевська, Ю.Г. Кузнєцова, О.В. Мороженко, П.В. Неводовський, О.С. Овсак, О.Е. Розенбуш, Я.О.Романюк, В.І. Шавловський, Е.Г. Яновицький, 2015

ЗМІСТ

1. Із історії відділу 5
2. Основні напрямки дослідження відділу 6
3. Наукове приладобудування 6
3.1. Автоматичний електрополяриметр 7
3.2. Електрофотометр слабких потоків 8
3.3. Двоканальний спектрофотометр 8
3.4. Астрономічний спектрополяриметр АСП («Планетний патруль») 9
3.5. Цифровий панорамний поляриметр 11
3.6. Ахроматичні фазозміщуючі пластинки (АФП) 12
3.7. Космічне приладобудування 13
3.8. Фур'є спектрометр 15
3.9. Автоматизація процесу обробки зображень 15
4. Телескопи та спостережні бази 16
5.Теоретичні дослідження 18
6. Результати спостережень планет, малих тіл Сонячної системи та їх інтерпретація 25
6.1. Земля 25
6.2. Венера 28
6.3. Марс 32
6.4. Юпітер 35
6.5. Сатурн 40
6.6. Кільця Сатурна 43
6.7. Уран і Нептун 43
6.8. Плутон 45
6.9. Місяць, супутники планет та астероїди 46
6.10. Нелінійна атмосферна оптика 50
7. Дослідження екзопланет біля зір Нашої Галактики 50
7.1. Співробітництво з Терскольською філією Інституту астрономії РАН (Північний Кавказ, Кабардино-Балкарія, РФ) і Міжнародним Центром астрономічних та медико-екологічних досліджень при Призидії НАНУ. 53
7.2. Співробітництво з Кримською астрофізичною обсерваторією 57
7.3. Співпраця з Астрономічним Інститутом Словацької АН 58
8. Розподіл енергії в спектрі фрагментуючих протозоряних дисків 59
8.1. Мотивація 60
8.2. Метод моделювання РЕС та синтетичних зображень 61
8.3. Результати моделювання 63

9. Співпраця з Національним технічним університетом України «КПІ» та Національним університетом України «Львівська політехніка» щодо вивчення впливу змін стратосферного аерозолю на погоду і клімат Землі 66
9.1. Актуальність проблеми 66
9.2. Як все починалось: Український молодіжний супутник УМС-1 68
9.3. Розробки апаратури 70
9.3.1. Лабораторний зразок 70
9.3.2. Макет бортового малогабаритного ультрафіолетового поляриметра (БМУФП) 72
9.3.3. Супутник – поляриметр (пошукова тема) 73
9.3.4. Бортовий малогабаритний панорамний поляриметр 73
9.3.5. Співробітництво із Пекінською компанією сучасних аерокосмічних технологій Китайської Народної республіки 75
10. Міжнародні зв’язки. Науково-організаційна робота. Наукові конференції, з’їзди, симпозіуми 77
11. Основні досягнення відділу 79
12. Поточні дослідження 81
13. Пам’ятні дати і відзнаки 88

1. ІЗ ІСТОРІЇ ВІДДІЛУ.

Планетні дослідження були започатковані у Головній Астрономічній Обсерваторії ще в середині 1950-х рр. Шалвою Георгійовичем Горделадзе, тодішнім заступником директора обсерваторії з наукових питань. Так, під час великого протистояння Марса в 1956 р. Ш.Г. Горделадзе разом з Е.А. Гуртовенком провели вимірювання інтегрального блиску цієї планети. Вони змогли констатувати аномальне підвищення яскравості Марса при малих кутах фази, і цим майже на десятиріччя упередили відкриття так званого ефекту опозиції для цієї планети.

У 1957 р. в «Астрономическом журнале» (т. 34, вип. 6) з'явилась їх стаття «Трехцветная колориметрия интегральной яркости Марса по наблюдениям 1956 г.», яка стала першою ластівкою у довгій низці подальших робіт голосіївських науковців у галузі планетних досліджень.

У 1958 р. до аспірантури ГАО була прийнята М.М. Миронова (для дослідження Місяця), в 1959 р. на роботу для досліджень з фізики планет було прийнято випускників Київського Державного університету ім. Тараса Шевченка В.В. Аврамчука й О.В. Мороженка. В 1960 р. з Харкова до ГАО запрошують учня М.П. Барабашова молодого кандидата фіз.-мат. наук Івана Кириловича Коваля. Завдяки його ініціативі в ГАО швидко згуртовується група молодих науковців, яка й розгортає планетні дослідження. І.К. Коваль активно сприяє залученню до роботи в ГАО випускників Харківського університету ім. Каразіна: подружжя Л.А. та О.І. Бугаєнків, Г.Т. та Е.Г. Яновицьких, пізніше В.Д. Кругова і В.Г. Парусімова. Згодом цей гурт дослідників оформлюється офіційно: у травні 1967 р. створюється структурний відділ фізики Місяця та планет (наказ по ГАО № 65 від 19 травня 1967 р.), який очолює І.К. Коваль.

У 1975 р, відділ отримав назву відділ фізики планет і його очолив О.В. Мороженко. У 1984 р. в межах відділу створюється структурна лабораторія теорії переносу випромінювання (наказ по ГАО № 71 від 21.06.84 р.), якою до кінця 1999 р. завідував Е.Г.Яновицький. В 1994 р. відділ перейменовано у відділ фізики тіл Сонячної системи (очолював О.В.Мороженко, а з 1999 р. А.П.Відьмаченко). У 1999 р. з відділу виокремилася лабораторія атмосферної оптики, яку очолював к.т.н. М.Г. Сосонкін, а з 2013 р. - д.ф.-м.н. Міленевський Г.П. З початку 2013 р. відділ перейменовано у відділ фізики планетних систем, який очолює А.П. Відьмаченко.

Слід зазначити, що за останні три десятки років у відділі працювали також спеціалісти з інших напрямів астрофізики (астроспектроскопії, змінних зір, космічних променів, комет). Але тут ми обмежились описом лише наукових результатів, які стосуються фізики планет, малих тіл Сонячної системи та екзопланет.

2. ОСНОВНІ НАПРЯМКИ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДДІЛУ

Основними нарямками наукової діяльності відділу є:

- Дослідження тіл Сонячної системи, змін в атмосферах планет та на їх супутниках
- Дистанційні методи дослідження вертикальної структури планетних атмосфер
- Розробка аналітичних і чисельних методів розрахунку переносу випромінювання в атмосферах планет і відбитого шорсткими поверхнями випромінювання та процесів розсіяння електромагнітного випромінювання середовищами, що складаються з морфологічно складних груп частинок
- Дослідження планетних систем навколо зірок Нашої Галактики і зірок с дисковими структурами методами фотометричних, спектральних і поляриметричних спостережень та чисельного моделювання
- Чисельне моделювання спектральних розподілів енергії в дискових структурах навколо зірок і субзірок
- Спектроскопія планет Сонячної системи, їх супутників, зір Нашої Галактики з екзопланетами та зірок з дисковими структурами
- Астрономічне приладобудування

3. НАУКОВЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ

З перших років існування в ГАО групи дослідників планет особлива увага приділялась науковому приладобудуванню, завдяки чому більшість спостережних результатів була отримана саме за допомогою виготовлених у відділі приладів. Головним чином розроблялись прилади для поляриметричних досліджень, коли вивчається не просто інтенсивність відбитого випромінювання, а всі або окремі компоненти так званого вектора Стокса *{I, Q, U, V}*, що значно розширює інтерпретаційні можливості. Цей напрямок роботи у відділі нерозривно пов’язаний з іменем О.І. Бугаєнка.

3.1. АВТОМАТИЧНИЙ ЕЛЕКТРОПОЛЯРИМЕТР.

У 1963 р. на базі оптико-механічного блоку заводського електрополяриметра АФМ-6 О.І. Бугаєнко створив автоматичний електрополяриметр системи Л.В. Ксанфомаліті. Система автоматичного регулювання підсилення фотоелектричного помножувача (ФЕП) стежила за тим, щоб середня інтенсивність вихідного сигналу ФЕП залишалась сталою при зміні світлового потоку в широких межах. Це дало можливість проградуювати амплітуду змінної складової частини сигналу (яка якраз і

відтворює поляризаційні властивості світла) безпосередньо у відсотках ступеня поляризації $P=Q/I$ і саме цю величину тоді знімали зі стрічки самописця.

Рис. 1. О.І. Бугаєнко біля електрофотометра слабких потоків.

Цей прилад дозволив значно скоротити процес обробки спостережень, але мало підвищив точність вимірювань. Крім того, він не розширив динамічний діапазон у бік слабких світлових потоків, оскільки у ньому електронний блок працював у режимі постійного струму та використовувалось повільне обертання поляроїда. Практика тодішніх спостережень показала, що використання частоти обертання поляроїда меншої за 30 Гц не дозволяє отримати похибку одного вимірювання меншу за 0.2 %. Причиною цього служать, з одного боку такі відомі ефекти як мерехтіння і турбулентне коливання зображень, а з іншого — квазіперіодичні зміни прозорості земної атмосфери та похибка гідування. Все це зумовило створення іншого приладу, який дістав назву

3.2. ЕЛЕКТРОФОТОМЕТР СЛАБКИХ ПОТОКІВ.

Для переходу через «шумовий бар'єр» було збільшено швидкість обертання поляроїда, який монтувався у порожнистому роторі синхронного двигуна, що робив приблизно 75 об/с. Якщо зважити на те, що оптична модуляція має швидкість у два рази більшу за механічну, то це майже повністю ліквідує шумовий вплив перелічених вище ефектів. А тому порогова чутливість приладу і точність вимірювань обмежувалась лише яскравістю небесного тіла і мала статистичний характер. Реєстрація вихідного сигналу здійснювалась у режимі підрахунку імпульсів. Місткість лічильників забезпечувала статистичну похибку одного вимірювання на рівні 0.2 %. А оскільки при спостереженнях проводились десятки одиничних вимірів, то реальна похибка вимірювання ступеня поляризації *P* була на рівні 0.05 %. Цей, унікальний на той час, прилад було створено колективом науковців у складі: О.І. Бугаєнко, Л.А. Бугаєнко, В.Д. Кругов та В.Г. Парусімов і введено у дію в 1967 р., тобто тоді, коли й було офіційно започатковано відділ фізики планет.

3.3. ДВОКАНАЛЬНИЙ СПЕКТРОФОТОМЕТР.

Проблеми вивчення фізичних властивостей атмосфер планет призвели до необхідності якимось чином зменшити приблизно на порядок похибку відносної спектрофотометрії молекулярних смуг поглинання, які спостерігаються у спектрах більшості планет. Оскільки тоді це було можливе лише при фотоелектричній реєстрації світлового потоку, то у 1969 р. Л.А. Бугаєнко та О.І. Бугаєнко виготовили двоканальний спектрометр низької роздільної здатності (~0.1 нм). Сканування спектру здійснювалось кроковим двигуном, а величину кроку можна було змінювати від 0.1 до 5 нм.

Спектрофотометрія з використанням одноканального приймача випромінювання має ту особливість, що кожний окремий інтервал спектру реєструється послідовно через певний проміжок часу. При цьому вимірювання інтенсивності сигналу в наступному інтервалі буде відтворювати не лише реальну зміну інтенсивності випромінювання у спектрі, але й ефекти, що пов'язані з мерехтінням та турбулентним коливанням зображення, змінами прозорості земної атмосфери та зенітної відстані світила, а також похибками гідування. Щоб мінімізувати вплив цих ефектів, крім вимірювального (спектрального) каналу, в спектрометрі використовувався ще й канал порівняння. Для цього безпосередньо за вхідною діафрагмою на оптичній осі під деяким кутом була встановлена частково відбиваюча (10 %) плоскопаралельна пластинка, яка через змінні інтерференційні світлофільтри спрямовувала недисперговане світло у канал порівняння. Інформація цього каналу повністю відтворювала зміни яскравості спостережуваного об'єкту

(які спричинювались вищезгаданими факторами) і використовувалась для відповідної корекції вимірювань спектрального каналу.

Досвід роботи з приладом показав, що коли спектрофотометрія провадилась у відносно вузьких ділянках спектру шириною 50-70 нм, а ефективна довжина хвилі інтерференційного фільтра каналу порівняння припадала приблизно на середину досліджуваної ділянки спектру, то згадана корекція настільки нівелювала вплив перелічених ефектів, що відносна похибка вимірювання навіть на краю диска планети не перевищувала одного відсотка. Була передбачена можливість роботи приладу в двох режимах. У першому з них експозиція встановлювалась постійною, а в згаданих каналах паралельно реєструвалась кількість накопичених у них імпульсів. Врахування впливу перелічених вище спотворюючих ефектів велося при обробці результатів спостережень. У другому режимі це врахування здійснювалось автоматично під час спостережень, а вимірювання у кожній окремій ділянці спектру провадилось з різними експозиціями, що визначались часом, за який у каналі порівняння накопичувалась заздалегідь задана кількість імпульсів.

3.4. АСТРОНОМІЧНИЙ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР АСП («ПЛАНЕТНИЙ ПАТРУЛЬ»).

Поляризаційні спостереження планет-гігантів показали, що у тих світлофільтрах, які припадали на молекулярні смуги поглинання ступінь поляризації завжди має більші значення, ніж у неперервному спектрі. Через це виникла потреба в розробці й виготовленні приладу, який дозволяв би вести спектрополяриметричні дослідження, тобто провадити вимірювання поляризаційних характеристик у різних довжинах хвиль (в режимі спектрометра). Такий прилад було виготовлено у 1982 р. й випробувано у 1983 р. (Л.А. Бугаєнко, О.І. Бугаєнко, О.Л. Гуральчук, О.С. Дєлєц, Й.Г. Кесельман, М.О. Мельников, Л.Є. Рагозіна, В.С. Самойлов та інші).

Оскільки оптична схема спектрополяриметра має ряд елементів, що можуть змінювати поляризаційні властивості випромінювання, а застосовувані приймачі останнього можуть бути чутливими до поляризаційних властивостей світла, то для мінімізації спотворюючого впливу монохроматора (оптико-механічного блоку спектрометра) було використано наступний тип поляроїдного модулятора.

Безпосередньо за вхідною діафрагмою у порожнистому роторі синхронного двигуна встановлювалась ахроматична фазозміщуюча пластинка (АФП), яка повертала площину поляризації падаючого світла. Модуляція інтенсивності здійснювалась встановленням безпосередньо перед монохроматором нерухомого поляроїда, площина поляризації якого була паралельна штрихам дифракційної ґратки. В залежності від того, який тип

поляризації світла необхідно вимірювати, встановлювались АФП з різними фазовими зміщеннями. Так, при дослідженні лінійно поляризованого світла (тобто перших трьох параметрів Стокса) використовувались 180-градусні АФП, а еліптично поляризованого — 127-градусні пластинки. Останнє забезпечувало одночасне вимірювання параметрів лінійної та колової поляризації з однаковою, вищезгаданим чином мінімізованою, похибкою.

Рис. 2. Спектрополяриметр «Планетний патруль» на 60-см телескопі в обсерваторії Санта Анна (Болівія).

В середині 1990-тих рр. А.П. Відьмаченко й П.В. Неводовський модернізували цей спектрополяриметр (АСП) з метою розширити спектральний діапазон в інфрачервону ділянку спектра. Було розроблено і виготовлено світлоприймальний пристрій, який складався з охолоджуваної фотометричної головки на базі двох фотопомножувачів з InGaAs-фотокатодом, які працюють в одноелектронному режимі і є чутливими в діапазоні довжин хвиль 330-1060 нм. Блок термостабілізації було зібрано на термобатареях з використанням ефекту Пельтьє і дозволяв охолоджувати фотоприймач в діапазоні температур від $+2^0$C до -20^0C з дискретністю 1^0 та стабілізувати вибрану температуру з точністю $\pm 0.5^0$.

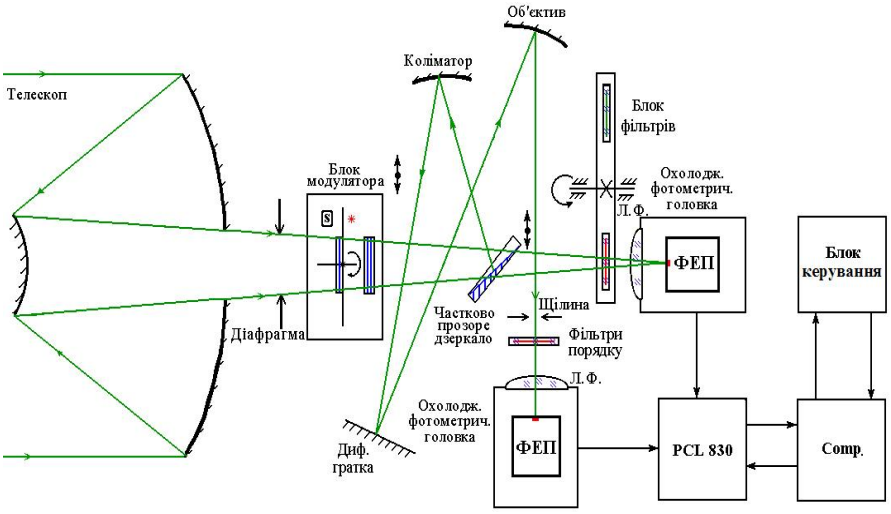


Рис. 3. Структурна схема Астрономічного спектрополяриметра.

Електронно-логічний блок і блок управління роботою всього приладу було замінено персональним комп'ютером з електронною платою PCL-830 та відповідним програмним забезпеченням. Режим роботи задавався з клавіатури персонального комп'ютера з відображенням всієї необхідної інформації на його дисплеї у відповідних вікнах різної глибини накладання.

3.5. ЦИФРОВИЙ ПАНОРАМНИЙ ПОЛЯРИМЕТР.

Астрономічний спостережний комплекс "Цифровий панорамний поляриметр" (ЦПП) (головний розробник О.С. Дєлєц) - результат тривалої цілеспрямованої роботи по створенню та освоєнню апаратури для панорамної поляриметрії, яка проводилась в ГАО НАНУ. Було створено оригінальну астрономічну установку з високочутливим приймачем «суперізокон» типу ЛИ-804 і оптико-механічним блоком, у склад котрого входить поляроїдний модулятор (аналогічний поляроїдному модулятору АСП, але великого розміру). Прилад призначено для реєстрації та обробки зображень у фокальній площині телескопа в режимах фотометрії і поляриметрії та забезпечує наступні технічні характеристики: спектральний діапазон 350-750нм; кадр розділяється на елементи з роздільною здатністю до 1024 елементів в лінії та 4096 ліній по полю; розмір робочого поля в фокальній площині (22x22) мм^2; повне поле 7.5x7.5 (кут. мінут) з роздільною здатністю 0.45"x0.45" на один елемент розкладання; кожен елемент в поточному кадрі розкладається на 256 градацій по інтенсивності з наступним вводом та

обробкою в ПЕОМ в режимах фотометрії та поляриметрії. Передбачена можливість накопичувати сигнал; а тому точність вимірювання лінійної поляризації ~ 0.3%; реєструються зірки до 17 зоряної величини; інформація записується у файли на ПЕОМ. Створено комплекс програм в операційних системах UNIX/MIDAS/ROMAFOT WINDOWS/IDL для обробки телевізійних кадрів з метою визначень позиційних і фотометричних характеристик зареєстрованих ЦПП об'єктів; забезпечена прив'язка отримуваних даних до точного часу.

3.6. АХРОМАТИЧНІ ФАЗОЗМІЩУЮЧІ ПЛАСТИНКИ (АФП).

На час конструювання АСП у світовій практиці вже був певний досвід розробки та виготовлення багатокомпонентних, тобто складених з кількох (не менше трьох) елементів, АФП. Проте у відділі цю роботу довелося починати з розробки теорії таких систем і алгоритмів їх обрахунку. Цю роботу також започаткував О.І. Бугаєнко. Він спрямував свої зусилля на модернізацію трьохкомпонентної, так званої панчаратнамівської системи, запропонованої індійським науковцем С. Панчаратнамом ще у 1956 р. Пізніше цю роботу продовжив В.А. Кучеров, який узагальнив її на довільне число елементів.

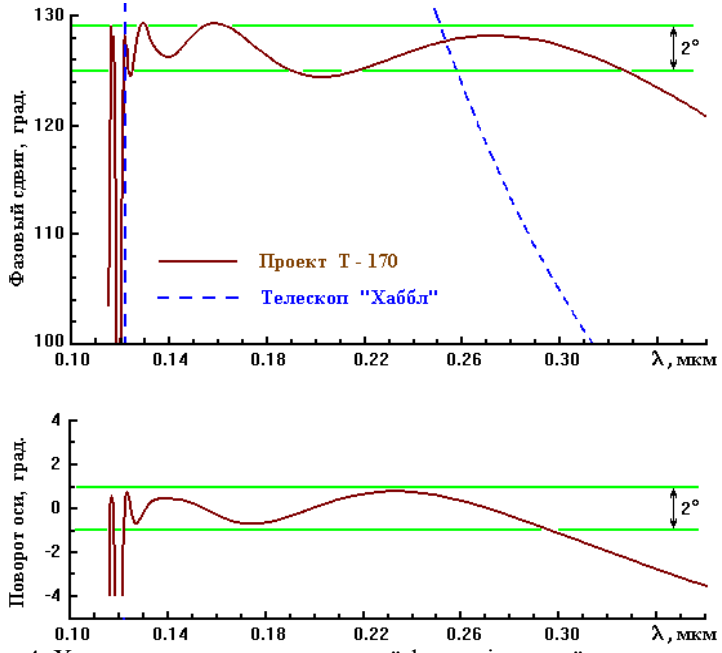


Рис. 4. Характеристики ахроматичної фазозміщуючої пластини.

На рисунку суцільна лінія - АФП В.А. Кучерова, а пунктиром - кращий із зарубіжних аналогів, який використовується на телескопі ім. Габбла. Перевага АФП, розробленої у ГАО, очевидна. Доцільно відзначити, що саме В.А. Кучеровим була показана можливість виготовлення АФП не з двох двояко заломлюючих матеріалів, а навіть з одного, і в тому числі, із розтягнутих плівок пропілена.

Деякі з розробок АФП були виготовлені в оптичному конструкторському бюро ГАО, яке очолював В.С. Самойлов. Вони використовуються з 1984 р. й чудово зарекомендували себе при астрономічних спостереженнях на високогірних спостережних базах ГАО (див. нижче) на горі Майданак (Республіка Узбекистан) та поблизу м. Таріха (Республіка Болівія). Цикл робіт В.А. Кучерова «Багатокомпонентні симетричні ахроматичні фазові пластинки» був відзначений медаллю за кращу роботу серед молодих науковців (Постанова Президії АН України від 11 лютого 1987 р.). Незважаючи на трагічну смерть В.А. Кучерова, роботи у цій галузі продовжує В.С. Самойлов.

3.7. КОСМІЧНЕ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ.

Перед підготовкою кожної нової космічної місії до планет Головна астрономічна обсерваторія НАНУ отримувала запрошення подавати ідеї проведення експериментів. В 1970-тих рр. були прийняті дві з них: 1) поляриметричне сканування марсіанського неба з поверхні планети для вивчення фізичних характеристик аерозольної складової марсіанської атмосфери за допомогою **скануючого поляриметра**; 2) розробка та виготовлення **активного нефелометра-поляриметра** для вивчення природи та структури хмарового шару атмосфери Венери.

Суть останньої з пропозицій зводилась до того, щоб на космічному апараті, що спускався в атмосфері Венери, встановити прилад для визначення елементів матриці розсіяння світла (вимірювач матриці розсіяння). За ідеєю О.І. Бугаєнка та О.В. Мороженка технічна реалізація методу активної поляриметрії зводилась до наступного. Середовище (атмосфера) освітлюється майже паралельним пучком повністю лінійно поляризованого світла у вузькому інтервалі довжин хвиль з різними заданими положеннями площини поляризації. Частина світла, що розсіялась середовищем певного об'єму, досліджується за допомогою фотополяриметричного пристрою, який вимірює інтенсивність та стан поляризації цього розсіяного світла в різних напрямках. Після обробки результатів вимірювань на основі відповідної теорії можна досить впевнено судити про фізичний стан та природу хмарового шару. Цей експеримент був підтриманий Інститутом прикладної математики АН СРСР. Був виготовлений макет приладу, але при черговій корекції програми, коли до програми КА „Венера-15 і -16” було включено ще

й задачі по дослідженню комети Галлея, - декілька чисто венеріанських експериментів, в тому числі й наш, - було вилучено.

В.С. Дегтярьов (один з учасників роботи над цим приладом) разом з колегами використав досвід його розробки та виготовив два лабораторних прилади: **вимірювач матриці розсіяння** та **Стокс-поляриметр**.

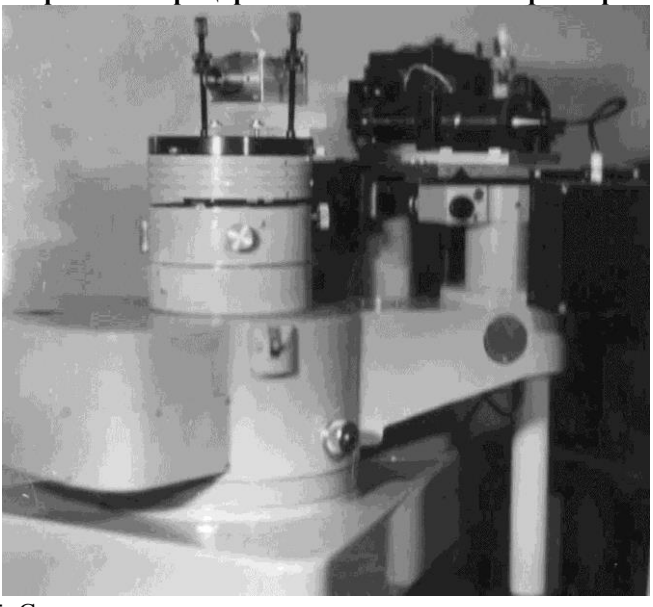


Рис. 5. Стокс-поляриметр.

Перший з них був призначений для автоматизованого швидкого вимірювання матриці розсіяння світла аерозольними середовищами. Готовий прилад був переданий замовникові — Науково-дослідному фізико-хімічному інституту ім. Л.Я. Карпова (Москва).

Стокс-поляриметр призначений для дослідження у лабораторних умовах поляризаційних властивостей світла, що розсіюється шорсткими поверхнями природного чи штучного походження (різного роду мінерали, порошки, рослини й т. п.). У зв'язку з відсутністю строгої теорії розсіяння світла шорсткими поверхнями такі лабораторні дослідження можуть бути часом єдиною основою для інтерпретації поляриметричних спостережень безатмосферних небесних тіл (астероїди, супутники планет; стосовно результатів — див. відповідний розділ цієї статті). Стокс-поляриметр забезпечив похибку вимірювання параметрів Стокса на рівні 0.001 %. Велика точність, а також високий рівень ступеня автоматизації обробки результатів спостережень зробив цей вимірювальний комплекс унікальним інструментом

серед приладів аналогічного типу, що застосовуються у світовій практиці. Зараз його передано в Астрономічну обсерваторію Харківського національного університету.

В кінці 1990-тих рр. було оголошено конкурс на проведення експериментів з борту Міжнародної космічної станції (МКС). О.В. Мороженко з колегами запропонували експеримент з моніторингу змін хімічного і аерозольного (для висот більше 30 км над рівнем моря) забруднення земної атмосфери, який вимагав виготовлення фур'є спектрометра на далеку інфрачервону (ІЧ) ділянку спектра та ультрафіолетового (УФ) спектрополяриметра. В подальшому цей експеримент вилився в спільний російсько-український проект „Планетний моніторинг" з борту МКС, який з української сторони реалізує ГАО НАН України, а з російської – Інститут космічних досліджень РАН. В даний час силами відділу фізики планетних систем та лабораторії атмосферної оптики ведуться роботи по розробці та виготовленню ультрафіолетового спектрополяриметру (СП УФ).

3.8. ФУР'Є-СПЕКТРОМЕТР.

У 1989 р. група співробітників відділу, очолювана М.Г. Сосонкіним, разом із співробітниками Інституту фізики напівпровідників Сибірського відділення АН СРСР й Інституту геохімії та аналітичної хімії ім. В. Вернадського АН СРСР започаткувала розробку бортового Фур'є-спектрометра для ділянки спектра 3-25 мкм. Був виготовлений лабораторний зразок. Він ліг в основу виконання Держзамовлення Кабінету Міністрів України на 1992 р. по впровадженню теплових методів екологічного моніторингу земної атмосфери на підставі спектроскопії у тепловій ділянці спектру. У рамках цієї роботи виготовлено охолоджуваний рідким азотом Фур'є-спектрометр для ділянки спектра 3-14 мкм з роздільною здатністю на рівні 2 $см^{-1}$.

3.9. АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ.

Ще у 1964 р. була виготовлена спеціальна приставка до мікрофотометра МФ-4 для автоматичного переводу почорнінь негативу у відповідні одиниці інтенсивності (Л.А. Бугаєнко, К.Ю. Скорик), за допомогою якої не лише співробітники ГАО НАНУ, але й інших обсерваторій СРСР протягом багатьох років обробляли спектрограми небесних тіл З 1969 р. В.Г. Парусімовим було розпочато розробку та виготовлення автоматичного комплексу для обробки зображень, яка в подальшому продовжувалась у Дослідному виробництв ГАО. На сьогодні цей комплекс успішно використовується при дослідженнях протяжних небесних об'єктів.

4. ТЕЛЕСКОПИ ТА СПОСТЕРЕЖНІ БАЗИ.

Тепер декілька слів про телескопи та місця їхнього розташування, де використовувались при спостереженнях прилади, про які йшла мова. Переважно спостереження тіл Сонячної системи провадились з малими, за сучасними мірками, телескопами.

Так, до 1973 р. таким інструментом був лише 70-см рефлектор АЗТ-2, встановлений у Голосіївському лісі. Зрозуміло, що астрокліматичні умови в Києві (втім, й в Україні в цілому) досить-таки погані. Це змусило прикласти багато зусиль для розміщення телескопів на спостережних базах, що належать іншим державам.

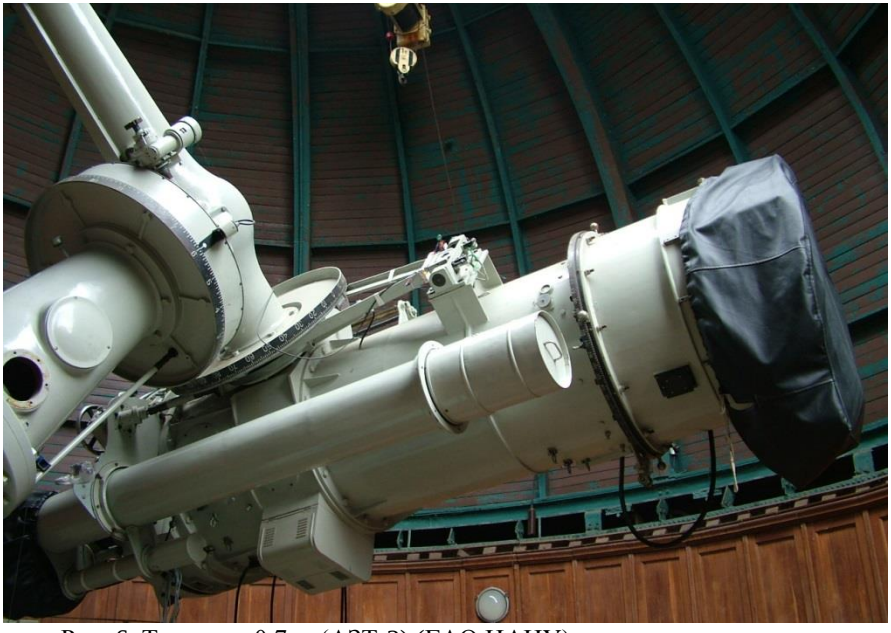


Рис. 6. Телескоп 0.7-м (АЗТ-2) (ГАО НАНУ).

Так, у 1975 р. на горі Майданак (Республіка Узбекистан), де особливо добрі астрокліматичні умови, був змонтований 60-см рефлектор фірми «Карл Цейс Йєна», який активно використовувався до 1993 р. У період підготовки космічних місій до комети Галлея за програмою РАПРОГ аналогічний телескоп було встановлено в радянсько-болівійській обсерваторії Санта-Анна поблизу м. Таріха (Болівія). Активні спостереження з його допомогою велись протягом 1986-1989 рр.

В 2012 р. по контракту з ДКА України було придбано телескоп Celestron 14″ (рис. 8, ліворуч), який астановлено на території ГАО НАН України. На ньому проводяться фотометричні спостереження з ПЗЗ-матрицею різних типів об’єктів: транзитних і не транзитних зоряних систем, що мають екзопланети; систем затемнюваних короткоперіодичних подвійних зір за програмою Міжнародного проекту DWARF; молодих зоряних скупчень в рамках проекту “The Young Exoplanet Transit Initiative (YETI)” тощо.

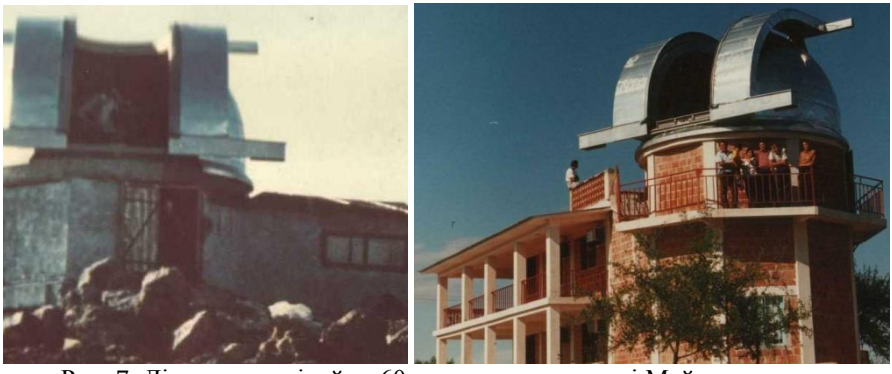


Рис. 7. Ліворуч - павільйон 60-м телескопа на горі Майданак; праворуч - павільйон 60-см телескопа в обсерваторії Санта Ана, м. Таріха (Болівія).

Рис. 8. Телескоп Celestron 14″ (ліворуч - в ГАО НАНУ, праворуч - в обсерваторії в Лісниках)

5. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Значна частина інформації, яку одержують астрофізики про природу небесних тіл, добувається з аналізу їхніх спектрів. В разі планет мова, як правило, йде про спектр відбитого ними сонячного світла. Зв'язок між спектром, що спостерігається, й параметрами, що визначають деякі фізичні властивості атмосфери та поверхні планети, дає теорія переносу випромінювання. Це — галузь прикладної математичної фізики, досягнення якої широко використовуються не тільки в астрофізиці, але й у геофізиці, фізиці нейтронів, акустиці й т. ін. Перш, ніж перейти до викладу основних досягнень з цього напрямку, вважаємо за доцільне для непідготовленого читача трохи роз'яснити деякі поняття згаданої теорії.

Сонячні фотони, потрапляючи в атмосферу планети, багаторазово розсіюються й поглинаються нею. Деякі з них в решті решт виходять з атмосфери та створюють спектр планети, що аналізується спостерігачем. Процес багаторазового розсіяння й поглинання світла в атмосфері описується досить складним інтегро-диференціальним рівнянням, яке зветься рівнянням переносу. Його розв'язок дає інтенсивність випромінювання, що виходить з атмосфери, в залежності від її фізичних властивостей. Останні входять у рівняння переносу у вигляді двох величин: ω — так зване альбедо однократного розсіяння, що характеризує поглинальні властивості елементарного об'єму атмосфери, та індикатриси розсіяння $\chi(\gamma)$, що описує розподіл за напрямками інтенсивності світла, розсіяного згаданим об'ємом, (γ — кут розсіяння). Коли величини ω й $\chi(\gamma)$ не залежать від оптичної глибини τ в атмосфері, то мова йде про перенос випромінювання в однорідному середовищі; якщо ж $\omega=\omega(\tau)$ та $\chi(\gamma)=\chi(\gamma,\tau)$, то говорять про перенос у неоднорідній атмосфері.

В свою чергу, якщо атмосфера крім газу містить ще й рідкі та тверді домішки (аерозолі), то застосування сучасних методів розрахунку дозволяє розрахувати величини $\tau=\tau(z)$ (z - геометрична глибина в атмосфері), $\omega(\tau)$ та $\chi(\gamma,\tau)$ в залежності від комплексного показника заломлення відповідної речовини $m(z)= n(z) - \kappa(z)$, радіуса $r(z)$, та функції розподілу за радіусами сукупності згаданих частинок. Якщо величина $m(z)$ відома для різних довжин хвиль світла (себто у різних ділянках спектру), то це, у принципі, дозволяє ототожнити речовину, з якої складається аерозоль, та визначити її розподіл з висотою та з'ясувати фізичні властивості атмосфери.

Тепер, мабуть, стає зрозумілою важливість для планетознавців розвитку та розробки методів теорії переносу випромінювання. Для цього у 1962 р., коли Е.Г. Яновицький вступив до аспірантури ГАО, І.К. Коваль звернувся з проханням до проф. Ленінградського університету, чл.-кор. АН СРСР (нині покійного) В.В. Соболева — астрофізика світового масштабу, визначного

фахівця саме з теорії переносу випромінювання, бути науковим керівником цього аспіранта,

Задача, яку поставив перед аспірантом В. В. Соболєв, була пов'язана з деякими аспектами теорії переносу випромінювання у неоднорідних плоских атмосферах (слід нагадати, що реальні атмосфери планет — суттєво неоднорідні) — на той час практично нерозвиненій галузі теорії. Поставлену задачу аспірант розв'язав, успішно захистив дисертацію, але продовжував працювати над проблемою протягом сорока років.

В результаті було сформульовано задачу Коші для коефіцієнтів відбивання та пропускання світла у анізотропно розсіюючій неоднорідній атмосфері і здійснено розділення кутових змінних, що суттєво спростило задачу. (Незалежно цей розв'язок у поодинокому випадку ізотропного розсіяння ($\chi(\gamma)=1$) одержав японський астрофізик С. Уено). Було сформульовано узагальнений принцип інваріантності для неоднорідних середовищ. Виявилось, що широко відомі принципи інваріантності Амбарцумяна та Чандрасекара є поодинокими випадками згаданого принципу. Це дозволило записати ряд важливих інтегральних співвідношень, а також інтегралів рівняння переносу (квадратичних за інтенсивністю), врешті-решт провести асимптотичне розділення змінних у проблемі знаходження поля випромінювання в оптично товстих та майже консервативно розсіюючих (для яких $1 - \omega(\tau) << 1$) атмосферах. У підсумку була розвинена строга аналітична теорія переносу випромінювання у неоднорідних атмосферах, що дозволило спростити розробку алгоритмів точного розрахунку поля випромінювання. У деяких поодиноких випадках були навіть одержані прості аналітичні формули.

Над згаданою проблемою працював у лабораторії теорії переносу випромінювання також М.М. Фомін. Він зокрема показав, що крайова задача знаходження факторів відбивання та пропускання світла слабко поглинаючою неоднорідною атмосферою може бути зведена до задачі Коші, що суттєво полегшує її розв'язок. Крім того він розробив алгоритм розрахунку поля випромінювання в атмосфері, що складається з будь-якої кількості неоднорідних шарів. На основі нестаціонарної теорії переносу випромінювання в однорідному шарі атмосфери він розробив теорію формування молекулярної смуги поглинання у багатошаровій атмосфері. Важливим досягненням була також розробка строгої теорії формування слабких ліній та смуг поглинання як в однорідних, так і в неоднорідних оптично товстих атмосферах. Цю роботу М.М. Фомін виконав спільно з Е.Г. Яновицьким.

Останній виконав також ряд важливих робіт в класичній галузі теорії переносу випромінювання, а саме — в теорії переносу в однорідних атмосферах. Зокрема були одержані прості наближені формули для

розрахунку φ - та ψ - функцій Амбарцумяна, через які виражаються інтенсивності випромінювання, що виходить через границі атмосфери. Були опубліковані докладні таблиці згаданих функцій, які знайшли широке застосування серед планетознавців. Крім того Е.Г. Яновицький ще в 1962 р. показав, що при ізотропному розсіянні рівняння переносу в термінах функції джерела має ядро Коші, що у випадку напівнескінченного середовища дозволяє одержати його точний аналітичний розв'язок (незалежно цей результат у більш загальному випадку анізотропного розсіяння одержав американський математик Т. Маллкін). Далі, у термінах інтенсивностей, була повністю розв'язана поставлена приблизно ще Чандрасекаром проблема визначення зв'язку задач про перенос випромінювання у плоскій атмосфері з так званою псевдозадачею, яка суттєво простіша (трохи раніше цей зв'язок у термінах функції джерела знайшов В. В. Соболєв).

Нарешті, було одержано новий клас квадратичних за інтенсивністю інтегралів рівняння переносу. Це дозволило одержати прості асимптотичні формули для інтенсивності випромінювання при майже консервативному розсіюванні ($1 - \omega << 1$). Наприклад, виявилось, що у цьому випадку величина потоку випромінювання на довільній оптичній глибині τ спадає за законом $\exp[- ((1-\omega)/(3-x_1))^{1/2} \tau]$, а повна кількість променистої енергії, що поглинається атмосферою півкулі планети, яка має довільну оптичну товщину τ, дається простою формулою: $4[(1-\omega)/(3-x_1)]^{1/2}$ th $[(1-\omega)/(3-x_1)]^{1/2} \tau_0/2]]$, де x_1 - перший член розкладу індикатриси розсіяння в ряд за поліномом Лежандра. Наявність простих строгих асимптотичних розв'язків таких складних задач була повною несподіванкою.

Не меншою несподіванкою стало також те, що, як з'ясувалось (1986 р.), класична форма рівняння переносу в однорідній атмосфері (цю форму рівняння у операторній формі можна записати так: $dI/d\tau=L_0[\tau]$, де L_0 певний лінійний інтегральний оператор) допускає також інше, альтернативне зображення, а саме, $I=d/d\tau L_1[I]$, де L_1, — також певний лінійний інтегральний оператор (це зображення рівняння було названо Q-формою рівняння переносу). Важливим також є те, що Q-зображення, як було показано у спільній роботі німецького астрофізика Г. Домке та Е.Г. Яновицького, має місце у випадку, коли розглядається більш загальний (векторний) випадок переносу поляризованого випромінювання. Нарешті, Q-форма дозволила записати простий алгоритм розрахунку поля випромінювання у багатошаровій атмосфері, що складається з довільного числа однорідних шарів, у випадку, коли кожен з них містить внутрішні джерела випромінювання (Е.Г. Яновицький, Ж.М. Длугач).

Слід підкреслити, що у наш час розв'язок задачі теорії переносу випромінювання навіть не може мислитись без застосування найсучасніших швидкодіючих ЕОМ. З 1972 р. Ж. М. Длугач та Е.Г. Яновицький вели роботу

по створенню та програмному втіленню ефективних чисельних методів розв'язку задач теорії переносу. Зокрема, був розроблений новий, дуже ефективний метод розрахунку коефіцієнта відбивання неполяризованого світла від напівнескінченної атмосфери, що знайшов широке застосування. Пізніше цей метод було узагальнено на випадок поляризованого випромінювання голландським астрофізиком В. де Роєм. Ж.М. Длугач успішно реалізувала розрахунок поля випромінювання у напівнескінченній атмосфері так званим методом подвоєння, запропонованим відомим петербурзьким астрофізиком В. В. Івановим, вперше докладно дослідила поведінку поля випромінювання у поверхневих шарах атмосфери. Нарешті, Е.Г. Яновицький у рамках відомого методу подвоєння шарів Ван де Хюлста запропонував простий безітераційний метод обчислення поля випромінювання усередині шару атмосфери довільної оптичної товщини, який реалізувала Ж. М. Длугач на ЕОМ. Зазначимо, що відповідні алгоритми розрахунку поля випромінювання були узагальнені на векторний випадок у спільних роботах Г. Домке та Е. Г. Яновицького. Алгоритми та програми обчислення коефіцієнта відбивання у цьому складному випадку (навіть у тому разі, коли верхні шари атмосфери суттєво неоднорідні) були створені М.І. Міщенком.

Основні результати багаторічних досліджень в галузі теорії переносу випромінювання, які були одержані Е.Г. Яновицьким і його колегами викладені у його монографії «Рассеяние света в неоднородных атмосферах», яка вийшла друком у видавництві ГАО НАН України у 1995 р. Пізніше в 1997 р. англомовний варіант цієї книги був надрукований у видавництві «Springer».

При розробці теорії переносу випромінювання в планетних атмосферах здебільшого доводиться враховувати, що розсіяння світла відбувається у хмарах, які складаються як з сферичних, так і з несферичних частинок різного розміру. Тому важливою стає розробка теорії та чисельних методів розв'язку проблеми розсіяння поляризованого випромінювання на таких частинках. Роботи у цьому напрямку започаткував ще у 1976 р. О.І. Бугаєнко. Він запропонував новий ефективний метод розрахунку матриці розсіяння світла для класичної задачі Мі, оснований на застосуванні узагальнених сферичних функцій.

Для вивчення фізичних властивостей планетних атмосфер важливими величинами є так звана ефективна оптична глибина формування лінії поглинання (τ_e), а також оцінка оптичної товщини τ_0^e шару атмосфери, в якому формується спостережуваний спектр планети. Був розроблений алгоритм знаходження τ_e. Для однорідної атмосфери показано, що він може бути зведений до розв'язку задач про дифузне відбиття, тобто знаходження коефіцієнта відбивання світла атмосферою. Докладно вивчено випадок найпростішої несферичної індикатриси розсіяння. Подано просту наближену

формулу для оцінювання τ_e (Е.Г. Яновицький, О.С. Овсак). Що стосується оцінки τ_0^e, то запропоновано визначати ефективну оптичну товщину τ_0^e шару у напівнескінченній атмосфері, в якому формується спостережний спектр планети, з рівняння, ліва частина якого являє собою відношення числа фотонів, що побували нижче рівня τ_0^e, до повного числа фотонів , відбитих середовищем у напрямку спостерігача, а права частина – відносна похибка відбивної здатності. Для індикатриси розсіяння Хеньї-Грінстейна та різних значень альбедо однократного розсіяння були розраховані розподіли τ_0^e вздовж екватору інтенсивності в опозицію (Е.Г.Яновицький).

Було розроблено програмне забезпечення для визначення вертикальної структури хмар в атмосферах планет-гігантів за даними спектральної залежності відбивної здатності центру видимого диска або ж інтегрального диска в контурах різних смуг поглинання метану. Програмне забезпечення базується на запропонованій у 1984 р. О.В. Мороженком медодиці відхилення реальної вертикальної структури від умови однорідності. Методика базується на визначенні ефективних оптичних глибин (О.С. Овсак).

Значно складнішою є проблема розсіяння світла на ансамблі несферичних частинок, якою займався М.І. Міщенко. Він здебільшого використовував так званий Т-матричний метод (метод Уотермана). Зокрема був розроблений ефективний метод розрахунку світлорозсіюючих властивостей ансамблю радіально-неоднорідних сферичних та хаотично орієнтованих несферичних частинок, який може бути використаний для коректної інтерпретації цілого ряду спостережень планет. Крім того було розроблено аналітичний метод розрахунку матриці екстинкції для несферичних міжзоряних частинок, аксіально орієнтованих у магнітному полі. Оскільки наявність у середовищі певною мірою орієнтованих несферичних частинок робить його анізотропним, М.І. Міщенко розвинув аналітичну теорію переносу поляризованого випромінювання в анізотропних плоскопаралельних атмосферах, що складаються з часток довільної форми та орієнтації. Були одержані рівняння додавання шарів і повний набір рівнянь інваріантного занурення, що дозволяє знайти параметри Стокса відбитого та пропущеного випромінювання у задач з паралельним зовнішнім потоком.

Нарешті, було вперше докладно вивчено перенос поляризованого випромінювання у анізотропному середовищі, що складається з повністю орієнтованих циліндричних частинок. Показано, що при освітленні середовища перпендикулярно осі частинок векторне рівняння переносу розщеплюється на кілька незалежних скалярних рівнянь, які допускають простий аналітичний розв'язок. Одержано основні рівняння та формули, які дозволяють повністю розв'язати задачу з паралельним зовнішнім потоком, було вперше одержано строгі кількісні оцінки впливу анізотропії середовища на параметри Стокса відбитого випромінювання (М.І. Міщенко,

Е.Г. Яновицький). Переліченими роботами по суті був започаткований розвиток нового напрямку теорії переносу випромінювання, а саме — аналітичної теорії переносу в анізотропних середовищах.

Однією з дуже складних задач класичної теоретичної фізики є проблема розсіяння світла шорсткою поверхнею, якою, зокрема, є тверда поверхня практично будь-якого тіла Сонячної системи. У лабораторії теорії переносу випромінювання розроблялись два напрямки теоретичного дослідження розсіяння світла безатмосферними небесними тлами (БНТ). Перший пов'язаний з дослідженнями впливу багаторазових відбивань світла нерівностями поверхні на формування спостережних, зокрема поляризаційних, характеристик випромінювання. Другий напрямок стосується вивчення одного з інтерференційних явищ, що виникають при відбиванні світла від поверхонь: так званого зворотного когерентного розсіяння, або ж слабкої локалізації фотонів. Його суть полягає у наступному. При розсіянні світла на, скажімо, двох близько розташованих частинках 1 і 2, промінь, відбитий спочатку частинкою 1, а потім 2, інший промінь, навпаки, відбитий спочатку частинкою 2, а потім 1, можуть залишити поверхню в одному й тому ж напрямку, але з деякою різницею фаз. Як показують розрахунки, ця різниця буде саме такою, що внаслідок інтерференції ці промені будуть підсилювати один одного, викликаючи збільшення яскравості у певному напрямку. Це підсилення буде особливо помітним у напрямку зворотного розсіяння, тобто у напрямку Сонця (в разі планет), та може бути однією з причин виникнення так званого «ефекту опозиції», про який ми вже згадували.

Роботу в першому напрямку започаткував Е.Г. Яновицький ще в 1969 р. Виходячи з гіпотези американських астрофізиків Б. Хапке та У. Ірвіна, що поверхні БНТ складаються із слабко ущільнених великих частинок, розміри яких у видимій ділянці спектру значно перевищують довжину світлової хвилі, було одержано просту формулу для розрахунку розподілу яскравості по дискам БНТ з урахуванням тіньового ефекту. При цьому було виправлено помилку, допущену У. Ірвіном при виведенні аналогічної формули, та скорочено кількість вільних параметрів від 5 до 2. Пізніше (1987 р.) Л.О. Колоколова звернулася до розробки теорії відбивання світла від шорстких поверхонь для значно складнішого випадку, а саме — дослідження поляризації випромінювання при відбитті. Вона суттєво узагальнила теорію, запропоновану раніше американським фізиком М. Вульфом, згідно з якою так звана від'ємна гілка поляризаційних фазових кривих БНТ при малих фазових кутах є наслідком „блокування" нерівностями поверхні променів, які розповсюджуються в певних напрямках, тобто тіньовий ефект для багатократно відбитого світла буде різним у різних напрямках, що впливає на величину та на положення площини поляризації. Перешкоди, пов'язані з розрахунками для багатократного розсіяння світла на елементах шорсткої поверхні на „повільних" ЕОМ, ініціювали обчислювальну методику, що

базувалася на теорії планування експерименту. За її допомогою Л.О. Колоколова виконала розрахунки, які були покладені в основу методів визначення діаметрів астероїдів (спільно з Е.Г. Яновицьким) та віку зразків з поверхні Місяця (1990 р.).

Теорія когерентного зворотного розсіяння або слабкої локалізації фотонів була узагальнена М.І Міщенком на векторний випадок (з урахуванням поляризації). Треба зазначити, що в основу теорії когерентного зворотного розсіяння закладено припущення, що частинки середовища знаходяться в дальній зоні розсіяння одна відносно іншої, тобто розсіююче середовище є достатньо розрідженим. Той факт, що цей ефект залучається для пояснення низки спостережень характеристик випромінювання, відбитого, наприклад, поверхнями тіл Сонячної системи, вимагає, окрім порівняння результатів розрахунків, проведених на основі теорії когерентного розсіяння, зі спостережними даними, також теоретичного обгрунтування можливості існування цього ефекту в нерозріджених середовищах. Таке обгрунтування було отримано розв'язанням чисельним методом рівнянь Максвелла для розсіюючих об'ємів з різною щільністю упаковки частинок. У 2010 р. Ж.М. Длугач спільно з співробітником Годардівського інституту космічних досліджень НАСА (Нью Йорк) М.І. Міщенком на основі аналізу результатів прямих чисельно точних розв'язків рівнянь Максвелла, виконаних за допомогою суперпозиційного *T*-матричного методу, вперше показали, що сукупність всіх ефектів, передбачених теорією переносу випромінювання і теорією когерентного зворотного розсіяння для розріджених середовищ, має місце і в разі нерозріджених розсіюючих об'ємів з щільністю упаковки, типовою для реголітних поверхневих шарів небесних тіл і штучних середовищ, що досліджувались у лабораторіях.

Про застосування перелічених теоретичних досліджень до вивчення фізичних властивостей БНТ та кілець Сатурна мова йтиме у подальших відповідних розділах цієї статті.

У відділі провадились також теоретичні дослідження у галузі динаміки атмосфер планет та їхніх супутників. Роботи цього напрямку започаткував О.Ф. Стєклов, який у 1974 р. вступив до аспірантури ГАО. Його науковим керівником (на прохання І.К. Коваля) погодився бути визнаний фахівець з динаміки планетних атмосфер Г.С. Голіцин (нині — академік РАН, директор Інституту фізики атмосфери РАН, Москва). Використовуючи теорію подібності, О.Ф. Стєклов дослідив ряд питань, пов'язаних з дисипацією атмосфер супутників планет-гігантів. Він оцінив максимально допустимі температури екзобази в атмосферах супутників, при перевищенні яких ці атмосфери дисипують. О.Ф. Стєклов та Г.С. Голіцин запропонували зокрема новий метод оцінки висоти турбопауз в атмосферах планет та супутників. Використання цих методів дозволило одержати характеристики вертикальної будови

атмосфер Марса, Венери, Юпітера, його супутників Іо й Ганімеда, а також Титана — супутника Сатурна. Приємно й важливо відзначити, що одержані оцінки висот турбопаузи на Марсі та Венері (123 і 139 км відповідно) були пізніше підтверджені безпосередніми вимірами, здійсненими на американських автоматичних міжпланетних станціях (АМС) «Вікінг-1» та «Вікінг-2» (120-140 км) «Піонер-Венера» (143 км). У березні 1979 р. О.Ф. Стєклова за цикл робіт «Дослідження з порівняльної метеорології атмосфер планет» постановою Президії АН УРСР було нагороджено премією та медаллю АН УРСР для молодих науковців.

Цікаві дослідження з динаміки атмосфери Юпітера виконав А.П. Відьмаченко. Він запропонував пояснювати добре відому «смугасту» структуру видимої поверхні планети збуреннями, які у гідродинаміці носять назву «вихори Тейлора». Це дозволило оцінити товщину газової атмосфери планети (16000 км, що становить приблизно 20 % радіуса Юпітера) та так званий коефіцієнт кінематичної в'язкості для крупномасштабного перемішування атмосфери *(K* < 1. 9 •10^{11} $см^2$ $с^{-1}$)». В іншій роботі, грунтуючись на теорії інерційних хвиль з довжиною порядку «радіуса Россбі», він показана принципову можливість утворення таких хвиль в атмосфері Юпітера, та незалежно оцінив коефіцієнт *K* ~ (0.6—5,7)-10^{11} $см^2$ $с^{-1}$, значення якого практично співпало з вищенаведеною оцінкою й певною мірою довело правомірність застосування запропонованих теорій до атмосфери Юпітера.

6. РЕЗУЛЬТАТИ СПОСТЕРЕЖЕНЬ ПЛАНЕТ, МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ЇХ ІНТЕРПРЕТАЦІЯ

6.1. ЗЕМЛЯ.

Донедавна вважалося, що головними причинами зменшення концентрації озону в стратосфері і глобального потепління на Землі являються, відповідно, зростання концентрації різних фреонів (особливо тих, які містять хлор) і теплично сприятливих газів (вуглекислий газ, метан та ін.). Проте в останні роки були запропоновані та обґрунтовані наближеними розрахунками не менш ефективні альтернативні причини таких змін. О.В. Мороженко висунув гіпотезу, згідно якої основним винуватцем зменшення об'ємної концентрації озону в стратосфері є не фреони, а збільшення оптичної товщини аерозолю на висотах більше 30 км, яка була підтверджена наближеними розрахунками спільно з А.В. Шавріною і О.А. Велесем. Як відомо, для утворення молекул озону необхідна наявність атомарного кисню. У верхніх шарах атмосфери Землі він утворюється в процесі реакції фотодисоціації молекул кисню. Коефіцієнт швидкості цієї реакції визначається формулою:

$$J = \int_0^{\lambda_0} E_0(\lambda) \cdot \exp\{-[\tau_g(\lambda) + \tau_a(\lambda)]/\mu_0\}\alpha_\lambda d\lambda$$

Тут $E_o(\lambda)$ - розподіл енергії в спектрі Сонця, $\tau_g(\lambda)$ і $\tau_a(\lambda)$ - газова і аерозольна компоненти оптичної товщі атмосфери, α_λ - монохроматичний коефіцієнт поглинання газів, μ_o - синус висоти Сонця над горизонтом. Зазвичай при розрахунках J для верхніх шарів земної атмосфери враховувалась тільки газова компонента, тобто робилося припущення, що $\tau_a(\lambda)$=0. Вищеназвані розрахунки, виконані для моделі непоглинаючих сферичних часток з дійсною частиною показника заломлення 1.33 і нормально-логарифмічним законом розподілу часток за розмірами при дисперсії розмірів 0.1, показали, що поява в стратосфері аерозолів із середніми геометричними значеннями радіусів часток 0.05 або 0.10 мкм зумовить зменшення концентрації стратосферного озону в підсонячній точці (μ_σ=1) на 10% при значеннях τ_a, відповідно, рівних 0.003 і 0.03 на довжині хвилі 1 мкм. Звідси слідує висновок, що роль фреонів при руйнуванні озонового шару може бути значно перебільшена.

Що стосується глобального потепління, то О.В. Мороженко звернув увагу на роль зростання поглинальної здатності земної поверхні. Легко перевірити, що спостережуване з 1970 по 1990 рр. збільшення глобальної температури Землі на $0.^o4$ може бути обумовлене зростанням поглинутої земною поверхнею сонячної енергії всього лише на 0.6 %. Причинами зменшення відбивної здатності поверхневого шару можуть бути, в меншій мірі, зміни відбивної здатності материків (через зменшення територій зайнятих лісами, сільгоспугіддями, вічними льодовиками і т.п.), та, в більшій мірі, зростанням забруднення водних басейнів. Для перевірки цієї ідеї необхідно проводити моніторинг глобальних змін на Землі. Врахування можливих наслідків глобального потепління і ослабленя потужності озонового шару змушує світову громадськість приймати міждержавні угоди про призупинення розвитку цих небезпечних явищ, які обмежують виробничу діяльність, а отже пов'язані з величезними фінансовими витратами. Тому, при їх прийнятті необхідно точно знати причини виникнення того чи іншого екологічного явища. Для цього необхідно отримувати високоточні спостережні дані про спектральні відбивні властивості земної кулі в цілому, які на сьогодні відсутні. Їх можна отримати тільки в тому випадку, коли стосовно Землі будуть застосовані астрофізичні методи досліджень. Для цього необхідна постановка комплексних спостережень з космічних станцій, винесених далеко за межі земної поверхні (наприклад, поверхня Місяця, чи одна з Лагранжевих точок), і які дозволять виконувати комплексні дослідження Землі "як зірки". На третій Всеукраїнській космічній конференції О.В. Мороженко та А.П. Відьмаченко

запропонували перелік таких досліджень. Необхідні дані можуть бути отримані за допомогою перерахованих нижче експериментів: 1) низькодисперсні (з роздільною здатністю 50-100 нм) спектрофотометричні виміри всього диску Землі в діапазоні довжин хвиль від 200 до 3000 нм при фазових кутах $0\text{-}180^0$ дозволять визначити спектральні значення видимого і сферичного альбедо. Для точного контролю за зміною ефективної температури $T_{еф}$ з часом погрішність цих оцінок не повинна перевищувати 0.1%. Для таких вимірів варто використовувати низькодисперсний спектрофотометр чи фільтровий фотометр із декількома приймачами випромінювання для перекриття необхідного спектрального діапазону. Через необхідність одержати фазову залежність блиску Землі спостереження можуть бути виконані з Місячної бази, але не з точок Лагранжа, в яких існує можливість проводити спостереження тільки при одному фіксованому значенні фазового кута; 2) для реєстрації кількості випромінюваної у відкритий космос теплової енергії і вертикального профілю температури необхідно виконувати радіометричні виміри в інфрачервоному діапазоні довжин хвиль 4-40 мкм як з Місячної бази, так і з Лагранжевої точки. Для цього можна використовувати низьодисперсний радіометр із декількома приймачами випромінювання, що дозволять перекрити весь необхідний спектральний діапазон; 3) для моніторингу за зміною хімічного складу атмосфери необхідно з Місячної бази або з точки Лагранжа L1 виконувати високодисперсну спектрофотометрію в діапазоні довжин хвиль від 1 до 15 мкм зі спектральною роздільною здатністю не гірше 2 $см^{-1}$; 4) для оцінки спектральних значень комплесного показника заломлення, параметрів функції розподілу за розмірами і оптичної товщини аерозолю у верхніх шарах земної атмосфери необхідно виконувати спектрополяриметричні вимірювання в діапазоні довжин хвиль 220-300 нм. Цей діапазон обраний з тих міркувань, що саме тут озоновий шар цілком відсікає вплив земної поверхні і навіть тропосфери на властивості відбитого випромінювання. Для таких спостережень необхідно оснастити Місячну базу простим ультрафіолетовим спектрополяриметром з дисперсією близько 5-20 нм. Точки Лагранжа тут не підходять із-за неможливості одержати фазову залежність поляризаційних властивостей відбитого від стратосфери випромінювання6 5) моніторингові вимірювання розподілу енергії в спектрі Сонця найкраще проводити в точці Лагранжа L1, яка розташована в півтора мільйонах кілометрів від Землі між Сонцем і нашою планетою. L1 дуже зручна для розміщення в ній дослідницької станції, оскільки розташована поза межами земної магнітосфери, дозволяє безперешкодно спостерігати за Сонцем і вимагає мінімального числа маневрів для того, щоб зберігати задану орбіту. Саме тут легше всього зорієнтувати станцію так, щоб одна її частина увесь час була звернена до Сонця (сонячні батареї і високодисперсний спектрометр), а інша - на Землю (ще один

високодисперсний спектрометр, описаний у пункті 3). Точка L1 стратегічно дуже важлива ще і тому, що знаходиться на лінії «Сонце-Земля» і ми зможемо безпосередньо реєструвати можливі зміни на Сонці і на нашій планеті, і саме ті, які можуть бути викликані варіаціями потоку сонячного випромінювання через зміну сонячної активності.

Земна атмосфера є головним джерелом різноманітних шумів при спробах реєстрації власних коливань блиску небесних об'єктів із астрономічних спостережень на наземних обсерваторіях. Для врахування осциляцій, що викликаються атмосферою Землі, А.П. Відьмаченко запропонував і виконав програму спеціальних досліджень патрулювання прозорості земної атмосфери в експедиції на горі Майданак (висота 2750м). Спостереження проводилися за допомогою спектрополяриметра, встановленого на 60-см телескопі фірми Карл Цейс (Йєна). В двох незалежних каналах (світло від зірки розділялось напівпрозорим дзеркалом) проводилося паралельне фотометрування в стандартному фільтрі "В" і в ділянці спектра, центрованій на довжину хвилі 555 нм. Час накопичування в обох каналах був однаковим, але дещо варіювався в різні ночі від 20 секунд до 1 хвилини. Результуюча статистична точність накопиченого сигналу складала 0.0003^m. В якості досліджуваного об'єкта була вибрана Полярна зірка, розташування якої на небосхилі залишається практично незмінним на протязі всього часу спостережень (декілька ночей в жовтні 1990, березні, квітні і липні 1991 року – по 6-8 годин безперервного патрулювання зірки). Спектральний аналіз цих результатів (з достовірністю краще 90%) показав наявність осциляцій прозорості атмосфери Землі з періодами 2.5, 3.6, 5.2, 8.9, 11.2, 16.5, 20.6, 48.0 і 107 хвилин. Сумарний спектр осциляцій блиску змінювався день від дня. Найстабільнішими були періоди 3.6 і 20.6 хвилин і з амплітудами, відповідно рівними $0.0008\text{-}0.004^m$ і $0.003\text{-}0.007^m$ в різні дні. Існування періодів 48 і 107 хвилин в чималій мірі залежить від наявності чи відсутності вітру в приземному шарі. Як бачимо, періоди зміни прозорості земної атмосфери є досить близькими до періодів внутрішніх гравітаційних хвиль атмосфери Землі.

6.2. ВЕНЕРА.

Ця планета є недостатньо зручною для спостерігачів. Зумовлено це її внутрішнім відносно Землі положенням у Сонячній системі, внаслідок чого вона спостерігається на невеликій кутовій відстані від Сонця. Певні труднощі становить також дуже велика її яскравість. Внаслідок цього науковці відділу практично не спостерігали Венеру, але активно займались інтерпретацією результатів спостережень, одержаних в інших установах.

Так, у 1972 р. Е.Г. Яновицький, одержавши строгу асимптотичну формулу для сферичного альбедо планети, проаналізував спостережні дані

У. Ірвіна для Венери. Він дійшов висновку, що в досить широкій ділянці неперервного спектру (0,6-1 мкм) атмосфера цієї планети в середньому практично не поглинає світла (тобто відбувається тільки його розсіяння).

Широке поле діяльності для співробітників лабораторії теорії переносу випромінювання відкрили у свій час дані, які були отримані внаслідок оптичних вимірювань, проведених на радянських (серія «Венера») і американських космічних апаратах (КА). Запорукою успіху такої роботи служив комплекс програм для строгих розрахунків різноманітних світлових характеристик, що був вже створений на той час (див. попередній розділ). Ґрунтуючись на вимірах розподілу освітленості з висотою для різних довжин хвиль, які були отримані КА «Венера-10» у 1976 р., Ж.М. Длугач та Е.Г. Яновицький вперше провели відповідні строгі розрахунки й одержали, що локальна оптична товщина хмарового шару дорівнює приблизно 50, а верхня його границя розташована на висоті приблизно 70 км над поверхнею планети. Суттєвим виявилось також те, що, як з'ясувалось, в атмосферах планет, зокрема Венери, існує так званий ефект максимуму. Він полягає в тому, що в слабкопоглинаючій оптично товстій атмосфері максимум освітленості (при досить високому положенні Сонця над горизонтом) досягається не на границі атмосфери, як здавалося б, а на деякій глибині. Цей ефект пізніше був підтверджений відповідними розрахунками голландського астрофізика Й. Ховеніра.

Була проведена також інтерпретація одержаних на КА «Венера-11 - 14» даних про світловий режим в атмосфері Венери, що дало можливість оцінити параметри атмосфери на різних висотах над поверхнею планети. Було також встановлено, що знайдені в процесі телевізійного експерименту на поверхні Венери зміни яскравості її поверхні (~25 %) викликані суттєвими локальними варіаціями оптичної товщини хмарового шару. Оскільки період цих варіацій і час вільного польоту КА в атмосфері були близькими (~1 година), то це робить дещо проблемною задачу оцінки властивостей атмосфери за оптичними вимірюваннями, які виконувались на КА (Ж.М. Длугач). Додамо до цього, що у 1983 р. за даними КА «Піонер-Венера» вперше було оцінено вертикальний розподіл коефіцієнта істинного поглинання в атмосфері для довжини хвилі 0.63 мкм (Е.Г. Яновицький).

За ініціативою останнього у 1987 р. була започаткована велика робота по з'ясуванню причин періодичних змін, які спостерігаються в спектрі Венери як в УФ-, так в близькій інфрачервоній ділянці спектру (у лініях поглинання CO_2) і які мають близький до чотирьох діб період. Відомо, що саме з такою періодичністю обертається навколо планети самий верхній хмаровий шар, і це явище носить назву суперротації атмосфери. Під час аналізу великої низки спостережень інтегрального блиску Венери, одержаних 1943 р. відомим французьким астрономом А. Данжоном у візуальній частині спектру, було встановлено з досить високим ступенем імовірності, що блиск

планети змінюється з періодом, близьким до чотирьох діб. Ця зміна може бути пояснена лише відповідною зміною оптичної товщини хмарового шару. А відтак, хмаровий шар має асиметричну форму, а оскільки його нижня межа розташована переважно на сталій глибині ~50 км, то асиметричність проявляється у зміні висоти верхньої границі (В.М. Клименко, М.М. Фомін, Е.Г. Яновицький).

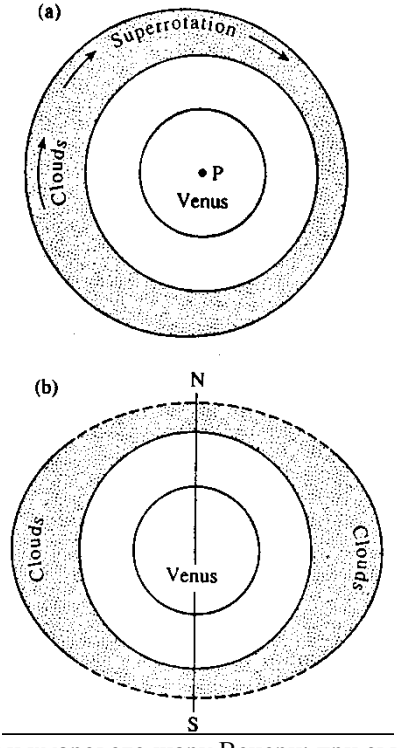


Рис. 9. Схема будови хмарового шару Венери: при екваторіальна ділянка (а) (вигляд з полюсу; проекція на картинну площину (б).

Для одержання кількісних оцінок змін оптичної товщини хмарового шару був проаналізований величезний спостережний матеріал відносно смуг поглинання CO_2, який одержали ще в кінці 60-х і на початку 70-х рр. відомі американські астрофізики подружжя Луїз та Ендрю Янг. Ґрунтуючись на строгих методах розрахунку еквівалентних ширин ліній поглинання (див. попередній розділ) в неоднорідній атмосфері та приймаючи реалістичну модель будови атмосфери Венери, М.М. Фомін і Е.Г. Яновицький знайшли, що оптична товщина хмарового шару з одного боку планети має в

середньому величину τ_x ~34, тоді як з другого — τ_n ~ 24 і висота його верхньої границі коливається від 68 до 76 км.

Відношення τ_x / τ_n ~ 1.4 повністю співпадає з приведеною вище оцінкою, за даними про коливання інтегрального блиску. При цьому коливання висоти верхньої границі повністю узгоджуються з відповідними поляризаційними спостереженнями, одержаними в короткохвильовій ділянці спектру. Слід зазначити, що наведені оцінки можна розглядати лише як верхню можливу межу вказаних змін. Отже, спостережні дані привели до відкриття глобальної горизонтальної регулярної неоднорідності хмарового шару Венери.

Е.Г. Яновицький у 1999 р. провів макроскопічний аналіз причин такого явища і його впливу на розуміння енергетики суперротації атмосфери. Того ж року Е.Г.Яновицький та Ж.М. Длугач продовжили вивчення спостережних коливань еквівалентної ширини W ліній R(0) смуг поглинання CO_2, та підтвердили приблизно 4-добовий період коливання W, а відтак – середньої оптичної товщини хмарового шару. Середній розмах коливань τ_a становить приблизно 3-4, а його максимальна величина за весь період спостережень сягала 7, що відповідало зміні верхньої межі хмарового шару від 75 до 70 км. Встановлено, що середня оптична товщина хмарового шару змінюється від 37 (на екваторі інтенсивності) до 25 (на широті 50^0), що відповідає зміні висоти верхньої кромки хмар від 75 до 67 км.

Додаткові підтвердження факту чотиридобових змін оптичних властивостей атмосфери Венери у широкому діапазоні довжин хвиль одержав також О.В. Мороженко, який в 1986 р. у Болівії провів спектрополяриметричні дослідження планети в діапазоні довжин хвиль від 0.33 до 0.76 мкм. Дослідження не тільки підтвердили наявність вказаної періодичності по всій ділянці спектру, але й дозволили зробити висновок, що, найімовірніше, вони обумовлені періодичними змінами оптичної товщини газо-аерозольної пелени надхмарового шару. Крім того було оцінено інтервал коливань оптичної товщини надхмарового туману, розміру його частинок і перепад зміни висоти верхньої межі хмарового шару.

У припущенні, що надхмаровий туман атмосфери Венери (для висот більше 66 км) є продовженням моди основного хмарового шару, О.В. Мороженко наближено промоделював вертикальний розподіл параметрів туману в турбулентній атмосфері. Було визначено: 1) на висоті 100 км відношення питомої ваги частинок до коефіцієнта турбулентного перемішування знаходиться в межах $(0{,}545...1{,}09)\cdot 10^{-5}$ г·см$^{-5}$·с; 2) має місце висотна стратифікація параметрів закону розподілу частинок за розмірами, що пояснює різницю в розмірах частинок, як оцінені за поляризаційними даними для темних і світлих деталей диска і 4-х добових змін ступеня поляризації для всього диску.

6.3. МАРС.

Як вже писалось на початку статті, спостереження саме цієї «червоної планети» започаткували планетні дослідження в нашій обсерваторії. Їх результати одразу поставили під сумнів існуючу на той час думку, що поверхня планети позбавлена помітних мікронерівностей. Цей висновок ґрунтувався на тому, що всі фотографічні вимірювання розподілу яскравості по диску у довгохвильовій частині спектру $\lambda > 0.5$ мкм (тобто там, де можна знехтувати впливом марсіанської атмосфери) вказували на його ламбертівський характер (себто, що розподіл яскравості пропорційний косинусу кута падіння світла). З 1963 до 1965 р. за ініціативою І.К. Коваля було проведено цикл робіт з вивчення закону розподілу яскравості по диску Марса. Програма спостережень передбачала одержання фотоелектричних сканів як диска планети, так і зорі. Це дозволило з'ясувати, що турбулентне мерехтіння зображення в земній атмосфері суттєво спотворює дійсний розподіл яскравості по диску, наближаючи його до ламбертівського (Л.А. Бугаєнко, О.І. Бугаєнко, І.К.Коваль, О.В. Мороженко). Статистична обробка кількох рядів спостережень залежності зоряної величини Марса від кута фази в різних довжинах хвиль дозволила О.В. Мороженку, Е.Г. Яновицькому і О.А. Рубашевському уточнити залежність між блиском планети і довготою її центрального меридіану. Пізніше аналогічний ефект був отриманий О.В. Мороженком для ступеня поляризації планети в спектральному інтервалі 0.316—0.800 мкм. Слід зазначити, що американські науковці подібну залежність спостерігали також в радіодіапазоні. Проте остаточний удар по гіпотезі, що поверхня Марса позбавлена мікрорельєфу, був нанесений у 1967 р., коли незалежно в Києві (Л.А. Бугаєнко, І.К. Коваль, О.В. Мороженко) та в США (Б. О'Лірі) підтвердили виявлений Вокульором у блиску Марсу так званий ефект опозиції, який притаманний сильно шорстким поверхням. Суть його полягає у різкому збільшенні яскравості планети (або деталі на її диску) при зменшенні кута фази α до нуля (α — це кут між напрямками на Сонце спостерігача з вершиною у центр планети; тобто при $\alpha \sim 0$ спостерігається повний диск планети чи Місяця).

Базуючись на даних про фазові залежності блиску Марсу та величину опозиційного ефекту Е.Г. Яновицький та О.В. Мороженко оцінили значення параметрів поверхневого шару Марса у різних ділянках спектру та побудували його оптичну модель. Це дозволяло оцінювати яскравість будь-якої ділянки на її поверхні за будь-яких умов освітлення. Це, зокрема, дозволило В.В. Ботвіновій розробити метод фотометричного дослідження рельєфу поверхні Марса.

Ще у 1962 р. О.В.Мороженко почав систематичні поляриметричні вимірювання ступеня поляризації $P(\alpha)$ всього диску в окремих ділянках

спектру: в протистоянні 1963 та 1965 рр. в інтервалі довжин хвиль 0.355-0.600 мкм, а в 1971 та 1973 рр. — 0.316-0.800 мкм. Основним результатом цих досліджень слід вважати виявлення зміни кута інверсії α_i, з довжиною хвилі у короткохвильовій частин спектру $\lambda < 0.5$ мкм), що було пояснено впливом атмосфери (α_i, — це той фазовий кут, при якому величина P змінює знак, а $P(\alpha_i) = 0$). За даними цих спостережень було визначено практично точне значення атмосферного тиску на поверхні планети, а також дійсну частину показника заломлення пилу (n_r = 1.5-1.6), середній радіус його частинок (~0.05 мкм) і оптичну товщину аерозольної складової атмосфери.

Поки що мова йшла про марсіанську атмосферу у стані її високої прозорості. Але іноді вона буває настільки сильно запилена, та було виявлено зменшення фотометричного контрасту деталей при переході від центра диску до його краю. За даними про поляризаційні та фотометричні властивості Марса у ці періоди, що носять назву періодів глобальних пилових бур, були визначені фізичні властивості пилових частинок (n_r ~ 1.59 ±0.01, а уявна частина комплексного показника заломлення для спектрального інтервалу 0.5—1.1 мкм n_i ~ $(3.8\pm0.5)\cdot10^{-4}$). Це значення комплексного показника заломлення дуже близьке до показника заломлення силікатів, тобто речовин, основною складовою яких є SO_2, що підтверджено експериментами на посадочних модулях американських космічних апаратів серії «Вікінг». Крім того з'ясувалось, що у період максимальної активності пилової бур 1971 р. середній геометричний радіус частинок пилу був не меншим за 8 мкм**,** тоді як на останніх стадіях — приблизно 1 мкм**.** Ці результати були одержані у спільній робот, що була виконана двома останніми авторами цієї статті, Ж.М. Длугач та відомим французьким астрономом О. Дольфюсом. Зазначимо, що вперше величину середнього радіуса пилових часток на стадії затухання пилової бурі в 1956 р. (приблизно 1.5 мкм) було отримано ще в 1962 р. І.К. Ковалем та О.В. Мороженком.

Варто додати, що під час Великого протистояння Марса у 1971 р. на 2-метровому телескопі Шемахінської астрофізичної обсерваторії (Азербайджан) були проведені фотографічні спостереження цієї планети з шістьма інтерференційними світлофільтрами (у діапазоні від 0.36 до 0.62 мкм). Їх наслідком став каталог фотометричних карт Марса, що вийшов друком у 1975 р. (А.Р. Гайдук, Н.Б. Ібрагімов, І.К. Коваль).

Несподівану загадку поставили оцінки оптичної товщини атмосфери Марсу у видимій ділянці спектра за даними спостережень Сонця та Фобоса з КА «Вікінг-1» та «Вікінг-2» з його поверхні. Виявилось, що вона в середньому становить 0.2-0.5. І це в період відсутності пилових бур! В той же час, як ми вже писали, наземні оцінки цієї величини у гіршому випадку не перевищували величини 0.1. Хто правий? Причина виявилася досить тривіальною: неправомірні використання моделі стабільної в часі прозорості

атмосфери. Хоча ці ж експерименти безпосередньо вказували на існування вранішніх і вечірніх туманів. О.В. Мороженком було показано, що коли при аналізі спостережень цього не враховувати, то одержуватимемо завищені, а у деяких випадках просто фіктивні, значення оптичної товщини.

Трохи пізніше було побудовано модель оптичних властивостей марсіанського аерозолю в спектральному діапазоні 220-730 нм (Ж.М. Длугач, О.В. Мороженко). Було також показано, що аналіз поляризаційних властивостей Марса в періоди високої прозорості його атмосфери в моделях сфероїдальних сильно витягнутих (з відношенням осей 2,0) частинок дуже малого розміру (з ефективним радіусом порядку сотих долей мікрона) призводить до зміни оцінок розміру частинок, оптичної товщини аерозоля і уявної частини показника заломлення приблизно у два рази. Крім того виявлено, що отримані за даними аналізу видимого альбедо диску Марса в період глобальної пилової бур спектральні значення уявної частини показника заломлення в моделі з помилковим вибором форми частинок будуть залежати від кута фази. Цей ефект запропоновано використовувати для вибору максимально достовірної форми частинок пиловаого шару (Ж.М. Длугач, М.І. Міщенко, О.В. Мороженко).

У 2003 р. Ж.М. Длугач і співробітниця Інституту космічних досліджень РАН О.В. Петрова знову повернулися до розгляду питання визначення оптичних характеристик аерозолю в періоди високої прозорості атмосфери Марса. На основі виконаних розрахунків вони дійшли висновку що наявні дані поляриметричних спостережень не дають можливості достовірно визначити показник заломлення та розмір частинок. Це пов'язано з тим, що ступінь лінійної поляризації однократно розсіяного світла для частинок з розміром меншим довжини хвилі, дуже слабко залежить від величини показника заломлення у інтервалі $1.3 \le n_r \le 1.6$ при кутах фази доступних при спостереженнях Марса з поверхні Землі. Чисельно було показано, що для оцінки оптичних властивостей аерозолю потрібна також достовірна інформація про відбивні властивості поверхні Марса в ультрафіолетовій та синій ділянках спектру.

Науковці відділу також брали участь в обробці матеріалів, що були одержані за допомогою космічних апаратів «Марс-3» та «Марс-5» (В.В. Ботвінова, О.І. Бугаєнко, І.К. Коваль). Дві роботи, присвячені дослідженню поверхні та атмосфери Марса, були відзначені бронзовими медалями ВДНГ СРСР (В.В. Ботвінова, О.В. Мороженко, Е.Г. Яновицький — у 1974 р.; Ж.М. Длугач, О.В. Мороженко. Е.Г. Яновицький — у 1978 р.).

6.4. ЮПІТЕР.

Це — найбільша планета з ряду так званих планет-гігантів, орбіти яких розташовані за орбітою Марса. Всі вони оточені потужними шарами хмар,

над якими розташована газова атмосфера. Вже перші спектральні спостереження Юпітера виявили в спектрі планети потужні смуги поглинання метану та аміаку, які, як це довгий час вважалось, формуються у надхмаровому шарі атмосфери. Детальні спектрофотометричні дослідження, проведені в у 1964—1966 рр. В.В. Аврамчуком, переконливо спростували цю думку й довели, що більша частина цих смуг поглинання формується у процесі багаторазового розсіяння світла у хмаровому шарі планети. Тому всі раніш виконані оцінки кількості того чи іншого газу, які ґрунтувались на моделі формування його смуг у надхмаровому шарі атмосфери, мусять бути повністю переглянуті.

Для коректного кількісного аналізу спектрофотометричних спостережень планет-гігантів необхідні дані про фізичні властивості аерозольних частинок, з яких складаються хмарові шари, та які можуть бути отримані лише з поляризаційних досліджень цих планет. Саме тому в 1971 та 1973 рр. О.В. Мороженко провів поляризаційні спостереження Юпітера у досить широкому діапазоні довжин хвиль від 0.32 до 0.8 мкм. Ґрунтуючись на цих спостереженнях О.В. Мороженко і Е.Г. Яновицький в 1973 р. в рамках моделі сферичної форми аерозолю та з наближеним урахуванням багаторазового розсіяння, оцінили дійсну частину показника заломлення хмарових частинок *(n* ~ 1.36) середнє геометричне їхніх радіусів (r_0 ~0.2 мкм). При цьому розглядалась найпростіша двошарова модель будови атмосфери: над напівнескінченним однорідним газо-аерозольним шаром розташований оптично тонкий суто газовий шар атмосфери. Це дозволило також оцінити атмосферний тиск на рівні границі хмарового шару (0.3±0.1 атм.). М.І. Міщенко повторно проаналізував ці спостереження вже з точним урахуванням багаторазового розсіяння та одержав близькі оцінки згаданих параметрів. Наприклад, за його оцінкою величина n_r~1.386. Оскільки у видимій частині спектру для рідкого аміаку n ~ 1.36, а для кристалічного — 1,42, то можна допустити, що верхній хмаровий шар на Юпітері складається саме з суміші частинок цієї речовини у двох зазначених фазових станах.

Нарешті, у 1976 р., О.В. Мороженко Е.Г. Яновицький довели, що усім поляризаційним, фотометричним та спектрофотометричним спостереженням, що існували на той час, досить добре відповідає найпростіша двошарова модель будови атмосфери Юпітера, та вперше достатньо строго знайшли відносну концентрацію метану та аміаку у надхмаровому шарі атмосфери — $(3.6\pm1.8)\text{-}10^{-3}$ та $(1.0\pm1.5)\text{-}10^{-4}$, відповідно; а також оцінили об'ємну концентрацію частинок аерозолю у хмаровому шарі *(*~ 10^3 $см^{-3}$). Таким чином, у верхніх шарах атмосфери Юпітера метану та аміаку надзвичайно мало, але й ця кількість спроможна давати у спектрі досить потужні смуги поглинання. Ці оцінки були згодом підтверджені іншими науковцями.

Треба зазначити, що оскільки більшість частинок в природі є несферичними, для коректної інтерпретації спостережень необхідно знати,

наскільки сильно можуть залежати оцінки характеристик планетного аерозолю від прийнятої моделі форми частинок. У 2004 р. на підставі результатів, отриманих з використанням *T*-матричного методу і строгого розв'язку векторного рівняння переносу випромінювання для розсіюючих середовищ, що складаються з частинок сферичної, сфероїдальної або циліндричної форми, Ж.М. Длугач та М.І. Міщенко підтвердили вплив форми частинок на оцінки показника заломлення і розміру, а також структури хмарного шару, які отримані з інтерпретації даних поляриметричних і фотометричних спостережень. Було зроблено висновок, що для коректного визначення мікрофізичних характеристик морфологічно складних хмарних частинок в атмосферах планет (ґрунтуючись на результатах дистанційного зондування) потрібні дані у широкому діапазоні фазових кутів.

Тепер декілька слів про спектрофотометричні дослідження планети. Дослідження ультрафіолетового поглинання в атмосферах Юпітера та Сатурна, започатковані ще в середин 60-х рр. В.В. Аврамчуком, провів у 1968-1975 рр. В.Д. Кругов. На їх основі він дійшов висновку, що УФ-поглинання, яке визначалось як відношення інтенсивностей I(λ0.33 мкм) / I(λ0.48 мкм)), для певної точки диску планети в середньому є величина стала. Зазначимо, що такі довготривалі й однотипні спостереження на одному й тому ж інструменті (АЗТ-2, ГАО АН України) були проведені вперше. У 1977-1980 рр. В.М. Клименко на горі Майданак у діапазоні довжин хвиль 0.37—0.725 мкм провів широкі дослідження відбивних властивостей деталей диску Юпітера й вперше знайшов залежність коефіцієнта яскравості згаданих деталей від фазового кута. Ще раніше (1972 р.) Л.А. Бугаєнко ретельно дослідила спектральну поведінку абсолютних значень коефіцієнта яскравості центрів диску Юпітера та Сатурна, а також яскравості усього диска Урана у досить широкому інтервалі довжин хвиль. Ці дослідження дають додаткову інформацію, якій мусять відповідати ті чи інші теоретичні моделі.

Вище ми писали, що найпростіша двошарова модель будови атмосфери Юпітера досить добре описує спостережні дані у неперервному спектрі. Але узгодження помітно погіршується у смугах поглинання. Справа в тому, що «крила» смуги (де поглинання найменше) формуються у більш глибоких атмосферних шарах, тоді як центр її — у більш високих. А тому, на форму смуги буде суттєво впливати вертикальна структура атмосфери. Але важко уявити собі, щоб хмаровий шар планети був би однорідним по вертикалі. Це суперечить простим теоретичним міркуванням про умови формування хмар на різних глибинах, що відрізняються між собою температурою та тиском.

Атмосфера не є також однорідною по горизонталі (щоб упевнитись у цьому, досить глянути на фотографію планети). А саме це припускалось при спробах розв’язати проблему вертикальної будови хмарового шару, себто оцінити оптичні властивості окремих шарів атмосфери, кількість яких

задавалась досить довільно. При цьому виникає ще й проблема неоднозначності оцінки фізичних параметрів кожного з шарів (оскільки параметрів дуже багато). Коротше кажучи, задача визначення вертикальної будови верхніх шарів атмосфери за даними наземних спостережень стає вельми складною, практично нерозв'язною.

Через це О.В. Мороженко в 1983 р. запропонував новий підхід до хоча б часткового розв'язання цієї проблеми: визначати не конкретну вертикальну структуру хмарового шару, а міру відхилення її від однорідної. Суть цієї ідеї зводиться ось до чого. Позначимо через *nl* кількість певного поглинального газу в шарі атмосфери протяжністю *l*, а через τ_s — відповідну розсіюючу складову ефективної оптичної товщини цього шару й розглядатимемо смугу поглинання цього газу, яка характеризується в заданій частот ν об'ємним коефіцієнтом поглинання k_ν (дані про цю величину відомі з відповідних лабораторних вимірювань). Тоді, як показує аналіз, залежність величини $\ln(nl/\tau_s)$ (її можна знайти із спостережних значень коефіцієнта яскравості ρ_ν у смузі шляхом певних теоретичних обрахунків) від $\ln m,l$) для однорідного шару атмосфери буде виглядати як пряма лінія, паралельна осі абсцис. Якщо ж атмосфера неоднорідна по вертикалі, то ця лінія буде йти під певним (у загальному випадку, змінним) кутом до згаданої осі. А відтак, міра відхилення цієї лінії від горизонталі буде характеризувати вертикальну структуру атмосфери.

Дуже суттєвим доповненням цієї ідеї була пропозиція О.В. Мороженка використовувати одночасно не тільки спостережні значення ρ_ν для певної точки на диску планети, але й одночасно вимірювати для тієї ж точки ступінь поляризації *P*. Ця ідея була реалізована разом з В.А. Кучеровим та М.І. Міщенком у спільній робот (1988 р.). Було показано, що для центра диска поглинаюча складова оптичної товщини газу $\tau_{0\nu}$ у надхмаровому шарі знаходиться за допомогою дуже простої формули:

$$\tau_{0\nu}=[\mu_0/(1+\mu_0)]\ \ln[P_c(\mu_0)/\{P_\nu(\mu_0)R_\nu(\mu_0)\}],$$

де μ_0 — косинус кута падіння світла; P_c й P_ν — ступінь поляризації, відповідно, для неперервного спектру і в центрі смуги поглинання; R_ν - залишкова інтенсивність у центрі смуги поглинання. Оскільки $\tau_{0\nu}=(nl)k_\nu$, то це дозволяє оцінити кількість поглинаючого газу в надхмаровому шарі та заздалегідь «роздягнути» хмаровий шар й аналізувати лише його.

Надзвичайно важливо, що при цьому не треба залучати будь-які гіпотези відносно горизонтальної структури атмосфери, бо метод використовує спостереження лише для однієї точки на диску. Ці методи були застосовані, зокрема для вивчення вертикальної структури так званої Екваторіальної зони (EZ) (світла смуга) та темної Північної екваторіальної смути (NEB).

Використовувались дані спостережень ρ_v та P_v, одержані у 1988 р. при практично максимальному кут фази α = 11.6° та 5°. Аналіз цих даних, зокрема, підтвердив раніше одержані дані про те, що перепад висот верхніх границь темних та світлих деталей становить приблизно 15 км**,** причому світлі знаходяться вище. На верхній границі хмарового шару в EZ атмосферний тиск становить 0.38 ±0.04 атм. Відносна концентрація метану та аміаку становить відповідно (1.5±0.2)-10~^{3} та (6.5±1.0) •10^{-5} у EZ й (5.2±0.8)10^{-5} у NEB.

З'ясувалось також, що хмарові шари EZ та NEB мають різну вертикальну структуру. Верхні шари NEB є неоднорідними з об'ємним коефіцієнтом розсіяння аерозолю, який зменшується з висотою згідно до барометричної формули, у якій шкала висот H_α =0.9H_g, де H_g — шкала висот для газу. Що ж стосується шару EZ, то отримані результати погоджуються з моделлю, у якій над спільним з NEB хмаровим шаром розташований ще й додатковий однорідний аерозольний шар оптичної товщини 2.5 (для 0.73 мкм). Зазначимо, що запропонований метод оптичного зондування атмосфери Юпітера, природньо, може бути застосований й до інших планет Сонячної системи. Слід сподіватись, що подальші роботи у цьому напрямку з залученням спостережень у багатьох смугах поглинання — від найслабших до найсильніших – дадуть набагато більше інформації відносно вертикальної будови верхніх шарів атмосфер планет, що досліджуватимуться.

На сьогодні О.В. Мороженко вперше розробив метод оцінки спектральних значень коефіцієнта поглинання метану з урахуванням теплових режимів планетних атмосфер за спостережними даними про спектральні значення геометричного альбедо.

За даними про спектральні значення відбивної здатності в контурах смуг поглинання метану на довжинах хвиль 619, 727 887 нм О.В. Мороженко, О.С. Овсак, П.П. Корсун вивчили зміну вертикальної структури хмарового шару Юпітера в період падіння на його видиму поверхню фрагмента „К" комети Шумейкера-Леві 9. Вони показали, що: 1) після падіння фрагмента величина коефіцієнта турбулетного перемішування збільшилась приблизно у два рази; 2) рівень з максимальним значенням об'ємного коіефіцієнта розсіяння хмарових частинок відповідає тиску в 1.3 бара; 3) має місце збільшення розміру частинок з глибиною, що знімає протиріччя в оцінках цього параметру, які отримані з аналізу даних про ступінь лінійної і колової поляризації. Доцільно відмітити, що при спуску зонда КА „Галліео" в атмосферу Юпітера максимальне значення об'ємного коефіцієнта розсіяння аерозольних частинок було знайдено на рівні з тиском в 1,25 бара. Крім того О.В. Мороженко показав, що аналіз даних про інтенсивність деталей комбінаційного розсіяння в спектрах планет-гігантів дозволяє незалежно визначати граничні межі для відношення об'ємних коефіцієнтів розсіяння

аерозоля і газа, а також альбедо однократного розсіяння в неперервному спектрі.

Використавши програму проведення математичного спектрального аналізу фотометричних рядів по методу максимальної ентропії до даних за період 1862-1991 рр. А.П. Відьмаченко отримав, що в змінах інтегрального блиску Юпітера з вірогідністю краще 99% існує період із значенням T=22.5 (+1.6,-1.2) років, що близько до тривалості Хейлівського магнітного циклу сонячної активності. Крім того, ці ж дані вказують на наявність вікових змін зоряної величини Юпітера з можливим значенням періоду майже 180 років. Тобто, проведений аналіз змін інтегрального блиску Юпітера у візуальній ділянці спектра із часом показує на значно більший вплив саме Хейлівського магнітного циклу сонячної активності на процеси в атмосфері Юпітера, які відбуваються на рівні формування верхньої границі хмарової системи планети. Також було виявлено прояв подвоєного значення орбітального періоду (23.9 року), самого орбітального періоду (11.88 року) і періоду сонячної активності (11.1 року). До того ж, було підтверджено існування значення періодичності T=3.4 роки в зміні фотометричних характеристик атмосфери Юпітера, що можуть бути пояснені суперпозицією двох пар вищеназваних частот.

А.П. Відьмаченко запропонував використовувати відношення відбивної здатності Південної і Північної Тропічних зон (STrZ, NTrZ), які найчастіше всього почергово стають найяскравішими областями на диску, у якості індексу активності процесів, що відбуваються в атмосфері Юпітера. Виконаний аналіз спостережних даних за період понад 45 років показав існування циклічності в довгоперіодичних коливаннях даного фактора активності півкуль планети з періодом ~11.86 років, який точно співпадає з періодом обертання Юпітера навколо Сонця. Така періодична зміна яскравості в різних півкулях планети вказує на те, що в атмосфері цієї планети відбувається періодична глобальна перебудова всієї системи циркуляції, структури хмарових шарів і надхмарового туману. Тобто вказує на існування сезонної перебудови в атмосфері Юпітера.

А.П. Відьмаченко показав, що спостереження за змінами хмаротворчої діяльності є добрий засіб для реєстрації різноманітних коливальних процесів оптичних характеристик в атмосферах планет за дистанційними спостереженнями. Для спостережного відкриття таких варіацій він виконав спеціальні комплексні спостереження і розробив відповідне програмне забезпечення для виявлення періодичних складових у фотометричних рядах астрономічних даних. Оскільки величина вертикальної швидкості переміщення повітряних мас в атмосфері Юпітера є визначальною при вивченні коливальних процесів у хмаротворчій діяльності на планеті, то А.П. Відьмаченко і О.Ф. Стєклов оцінили її, розглянувши рівняння неперервності атмосфери в безрозмірному нормовано-критеріальному

вигляді. Це дозволило аналітично виразити характерні масштаби шуканих величин через універсальні параметри подібності Голіцина. Суміщення способу критеріальних рівнянь і способу обезрозмірювання нормуванням та використання наближення "нестискуваності" газу дозволило отримати, що вертикальні швидкості в атмосферах планет в середньому в стільки раз менші горизонтальних значень, в скільки раз добуток швидкості звуку на лінійну швидкість обертання планети менший від квадрату першої космічної швидкості. Значення вертикальної швидкості переміщення повітряних мас в атмосфері Юпітера, вирахуване при значеннях 25-150м/с, складає w_o=(10-50) см/с, що є цілком достатнім для можливості реєстрації коливань хмаротворчої діяльності по запропонованому А.П. Відьмаченком вище способу. Із математичного спектрального та періодогрмного аналізу спостережних рядів даних по електрофотометрії Юпітера і Сатурна двома незалежними методиками з вірогідністю краще 90% було виявлено коливання блиску окремих ділянок диску Юпітера і Сатурна, які по величині співпадають із значеннями власних коливань їх атмосфер. Для цього А.П. Відьмаченко розробив спеціальну методику спостережень, яка дозволила йому розділити осциляції прозорості атмосфери Землі і коливання блиску небесних об'єктів. Значення періодів складають Т=103 і 142 хвилин (для Юпітера) та 137 і 179 хвилин (для Сатурна).

6.5. САТУРН.

Сатурн також оточений потужною атмосферою, яка за своїм хімічним складом вельми близька до Юпітерової. Так само як і в останній, в атмосфері Сатурна спостерігаються смуги поглинання метану та аміаку. Проте питання про наявність останнього в газоподібному стані в атмосфер планети викликало суперечки. Лише після ретельних спостережень, проведених у 1969—1971 рр. зі згаданим вище двоканальними спектрометром, Л.А.Бугаєнко разом з О.В.Мороженко та науковим співробітником Кримської астрофізичної обсерваторії Л.С. Галкіним остаточно виявили смугу поглинання аміаку (λ0.645 мкм) у спектрі Сатурна. Значно пізніше В.В. Аврамчук та аспірантка Г.І. Кармелюк спромоглись виділити у цій смузі навіть окремі обертальні лінії.

Спектрофотометричні дослідження молекулярних смуг поглинання в атмосфері Сатурна також показали, що вони формуються переважно у хмаровому шарі планети. Тому й для Сатурна головною проблемою стало вивчення фізичних характеристик хмарових частинок, що, як ми вже писали, неможливо зробити без проведення поляризаційних спостережень. Вони й були виконані у спектральному діапазоні 0.32—0.8 мкм у 1969—1973 рр. О.І. Бугаєнком, Л.С. Галкіним та О.В. Мороженком.

О.В. Мороженко, Е.Г. Яновицький, О.І. Бугаєнко та Ж.М. Длугач (1975 р.) визначили значення середнього радіусу r_0 =1±0.1мкм і величину n_r = 1.33—1.44. Варто зазначити, що в пізнішій робот (1981 р.) французьких науковців Р. Сантера та О. Дольфюса було одержано приблизно таке ж значення радіусу при n_r ~1.44. Ця величина досить близька до відповідного значення n_r для кристалічного аміаку (1.42).

Для значення n_r = 1.42 та r_0 ~ 1 мкм були розраховані фазові криві Сатурна (без кілець), які показали, що для спектрального діапазону λ0.5-0.9 мкм має місце так званий зворотний фазовий ефект (для $5° < \alpha < 10°$). Нагадаємо, що цей термін був введений американськими науковцями Л. Вайтхіллом Дж. Хансеном у 1973 р. стосовно Венери. Суть цього ефекту полягає в збільшенні (на певному проміжку кута фази) геометричного альбедо планети з зростанням α і пояснюється відповідною поведінкою «задньої частини» індикатриси розсіяння. Тому приємною несподіванкою було відкриття А.П. Відьмаченком цього ефекту для Сатурна, який він спостерігав під час «зникнення» кілець, тобто в період, коли їхні площини розташовувались вздовж променя зору спостерігача. Крім того, він одержав розподіл яскравості по диску в 13 ділянках спектру від 0.32 до 0.79 мкм.

Ґрунтуючись на цих спостереженнях, А.П. Відьмаченко та О.В. Мороженко дійшли висновку, що верхній оптично тонкий газовий шар атмосфери Сатурна має на рівні границі хмарового шару тиск 0.2±0.1 атм., а хмарові частинки мають об'ємну концентрацію приблизно 20 $см^{-3}$, тобто хмаровий шар на Сатурні суттєво менш щільний, ніж на Юпітер. О.В. Мороженко Е.Г. Яновицький також оцінили, що у надхмаровому шарі Сатурна концентрація метану приблизно у 100 разів більша, ніж аміаку.

Спостереження О.І. Бугаєнка та Л.С. Галкіна лімбових деталей диска Сатурна в діапазоні довжин хвиль 0.36—0.75 мкм (1970 р.) вказали на невідповідність положення площини поляризації для приекваторіальних районів моделі сферичних часток, а тому О.І. Бугаєнко висловив думку про наявність у верхніх шарах атмосфери орієнтованих несферичних часток. Проте ця думка була лише викладена в доповіді на зібранні Комісії з фізики планет (м. Горький, 1971 р.). У 1973 р. О.В. Мороженко розширив спектральний інтервал довжин хвиль до 0.316 мкм. Він показав, що для центру диска Сатурна при λ< 0.400 мкм площина поляризації також не відповідає моделі сферичних часток і що в довжині хвилі 0.316 мкм практично відсутня фазова залежність поляризації. Лише після цього факт наявності орієнтованих часток в верхніх шарах атмосфери був викладений в роботах О.І. Бугаєнка та О.В. Мороженка.

У 1982 р. А.П. Відьмаченко, О.Ф. Стєклов та М.Ф. Міняйло запропонували оригінальний метод виявлення сезонних змін в атмосфері Сатурна шляхом розрахунку відношення яскравостей зон у північній та

південній півкулях планети на відповідних широтах у моменти осіннього та весняного рівнодень. Те, що такі зміни можуть бути, випливало з того простого факту, що екватор Сатурна нахилений до площини екліптики на 26.5°, а відтак на цій планеті, як і на Землі, у кожній півкулі спостерігатимуться пори року. В результаті відповідних розрахунків за даними спостережень у метанових смугах поглинання та ультрафіолетовому діапазоні була прослідкована чітка протифазність двох хвиль відношень яскравості для моментів рівнодень 1966 та 1980 рр., яка довела реальність існування сезонних змін.

А.П. Відьмаченку вдалося показати, що у всіх планет існують певні критичні точки на орбіті, поблизу яких відбувається різка зміна оптичних характеристик, і спостереження протягом часу менше 1/8 орбітального періоду дозволяють виявити зміни оптичних властивостей планети і встановити, що саме сезонні варіації опромінення планети Сонцем будуть причиною існуючих змін. Це твердження він перевірив аналізом розподілу метанового поглинання вздовж центрального меридіану Сатурна в 1965 і 1967рр. при сатурноцентричному схилені Сонця $B=+5^o$ і $B=-5^o$, відповідно; тобто за один земний рік до моменту рівнодення і через один рік після нього. В 1965р. кільцями закривалася частина південної екваторіальної області в діапазоні широт від -1^o до -7^o, а в 1967р. частина північної екваторіальної області в діапазоні від $+1^o$ до $+7^o$. Тому проводилося порівняння результатів тільки для широт $>7^o$. Збудувавши відповідні профілі відношень поглинання в смузі CH_4 при 619нм окремо для центральної глибини R_N/R_S і для еквівалентної ширини W_N/W_S, А.П. Відьмаченко отримав антифазну сезонну хвилю в зміні поглинання в помірних областях і в полярних районах Сатурна. Причому, в полярних регіонах антифазність проявляється набагато помітніше і основний внесок в існування антифазності дають варіації центральної глибини: для R_N/R_S антифазна хвиля існує і в полярних районах, і в помірних областях, тоді як антифазна сезонна зміна еквівалентної ширини спостерігається переважно тільки в полярних районах. Тобто, спостережувана антифазність у варіаціях поглинання метану вздовж центрального меридіану засвідчила про те, що навіть такої малої зміни нахилу осі обертання планети в картинній площині, що відбулася на Сатурні з 1965 по 1967рр., було достатньо для реєстрації сезонних змін в його атмосфері.

6.6. КІЛЬЦЯ САТУРНА.

Кільця Сатурна — найбільш екзотичний об'єкт Сонячної системи — мають дуже складну структуру. Система кілець складається з цілої низки цих об'єктів. Їх прийнято позначати великими літерами латинської абетки: A, *B, C* т. д., відлічуючи ззовні. У 1975 р. В.Д. Кругов провів фотометричні

спостереження західних та східних «вушок» кілець *A* та *B* Сатурна. Він виявив, що для кільця *B* західне «вушко» завжди яскравіше за східне, причому відношення цих яскравостей не залежить від довжини хвилі. Яскравість західного «вушка» кільця *A* також завжди вища, ніж східного (для $\lambda < 0.75$ мкм). У той же час для кільця *A* у відношенні цих яскравостей існує сильна залежність, особливо в УФ - частині спектру. Можливо, що ця різниця зумовлена впливом тіні від планети, в яку потрапляють частинки кілець, коли останні обертаються навколо Сатурна.

Цікаву роботу виконали М.І. Міщенко та Ж.М. Длугач (1991 р.). Вони, виходячи з теорії слабкої локалізації фотонів (див. розділ «Теоретичні дослідження» цієї статті), розрахували опозиційний ефект для шару частинок розміром 0.1-1 мкм і показали, що ширина й амплітуда опозиційних піків, які спостерігаються для кілець Сатурна та деяких високоальбедних астероїдів, узгоджуються з цими теоретичними розрахунками. А як відомо, саме пилинки таких розмірів вкривають частинки кільця *B* Сатурна й призводять до появи так званих «спиць». Цій же проблемі присвячена стаття (1992 р.) Л.О. Колоколової та М.І. Міщенка й американського фізика М. Вульфа. В подальшому М.І. Міщенко застосував механізм слабкої локалізації фотонів для пояснення вузького піку від'ємної поляризації, яка була експериментально виявлена в лабораторіях при дослідженні розсіяння світла дрібними частинками, а також при спостереженнях кілець Сатурна.

У 2008 р. Ж.М. Длугач та М.І. Міщенкко проаналізували результати радарних поляризаційних спостережень кілець Сатурна на довжині хвилі 12.6 см. У рамках моделі плоскопаралельного шару, що складається із хаотично орієнтованих чебишевських частинок, з урахуванням ефектів поляризації, багаторазового та когерентного зворотного розсіяння порівняли результати розрахунків і вимірювань та виявили, що частинки кілець мають форму, близьку до сферичної з дрібномасштабною шорсткістю поверхні, значення ефективного радіуса частинок в межах 4 – 10 см, а оптична товщина кілець дорівнює приблизно 2 – 3 або навіть перевищує ці значення.

6.7. УРАН І НЕПТУН.

Ці планети також відносяться до класу планет-гігантів, а відтак, оточені потужними атмосферами. До недавнього часу про аерозоль та його розподіл з висотою в атмосферах цих планет було мало що відомо. Припускалось, що верхній хмаровий шар у цих планет складається з краплинок рідкого метану. Слід зазначити, що температура газу на рівні хмарового шару дорівнює приблизно 100 К. Раніш за спектральними спостереженнями в інфрачервоній ділянці спектру було встановлено, що аерозоль в атмосфері Урана мусить бути дрібним, а Нептуна — крупним. Але більш конкретно оцінити радіуси

частинок тоді не вдалось, тим більше не було нічого відомо про вертикальну будову хмарових шарів.

За результатами спостережень про інтенсивність деталей комбінаційного розсіяння у спектрі Урана Костогриз Н.М. виявила зміни відношеня оптичних товщин аерозолю і газу з часом, які обумовлені сезонними змінами на планеті через суттєвий нахил осі обертання до площини орбіти

У 1990 р. М. С. Дементьєв та О.В. Мороженко виконали роботу, яка ґрунтувалась на методиці вертикального дистанційного оптичного зондування хмарових шарів (вона описана нами вище, в розділі «Юпітер»). Побудувавши відповідні графіки залежностей $\ln(\alpha_\nu/\sigma_0)$ від $\ln(k_\nu)$ (де α_ν та σ_0 —об'ємний коефіцієнт поглинання у частотах молекулярної смуги та об'ємний коефіцієнт розсіяння у неперервному спектрі відповідно) для смуг поглинання метану CH_4 0.486, 0.543, 0.619 та 0.727 мкм, було виявлено суттєву нелінійність цих залежностей. А відтак, у цих планет має місце значна неоднорідність хмарових шарів. Внаслідок аналізу автори дійшли висновку, що атмосфери цих планет складаються, як мінімум, з двох хмарових шарів, причому в верхніх шарах атмосфери відношення об'ємних концентрацій газу до аерозолю швидко росте з глибиною.

В 1992 р. М.С, Дементьєв вперше запропонував на основі аналізу спостережних даних про інтенсивність деталей комбінаційного розсіяння і метанових смуг поглинання – методику оцінювати відносну концентрацію аерозольних частинок і їх розміри. Виявилось, що одержані таким чином оцінки концентрації аерозолю слабо залежать від радіуса частинок. Тим не менше вдалось оцінити, що середній радіус частинок в верхніх шарах атмосфери Урана становить 0.3 ±0.1 мкм.

Крім того, було виявлено, що глибина комбінаційних ліній та смуг поглинання метану змінюються з часом. Ці варіації викликані, в основному, змінами вмісту аерозолю в атмосфері Урана. В 1963—1973 рр. його атмосфера була практично вільна від аерозолю, а до 1983 р. вміст аерозолю суттєво зріс. Внаслідок зростання хмарності візуальна яскравість Урана збільшилась на 12 %. Можливо, зростання концентрації аерозолю викликане атмосферними припливами, які виникають під дією припливних сил Сонця (адже ексцентриситет орбіти Урана досить значний).

М.С. Дементьєв дослідив також різного роду зміни, які відбуваються в атмосфері Нептуна (1989 р.). Він виявив, що крім 12-річних періодичних коливань концентрації аерозолю спостерігаються також й значно більш короткоперіодичні коливання. Наприклад в смузі поглинання метану 0.619 мкм зміни від 4 до 10 % з періодом, близьким до 3 діб. Це було приписано викликаним супутником Тритоном атмосферними припливами. Підгрунтям для цього стало те, що інтенсивність в смузі поглинання сягала максимуму в моменти найбільшого видимого кутового віддалення супутника від планети.

З аналізу даних про інтенсивність молекулярних смуг поглинання метану в діапазоні довжин хвиль від 441 до 887 нм і деталей комбінаційного розсіяння О.В. Мороженко визначив імовірні значення середнього геометричного радіуса частинок (0,049±0.005 мкм для Урана і 0.069 ±0.07 мкм для Нептуна (за нормально-логарифмічного розподілу частинок за розмірами при дисперсії частинок 0.1) і величину дійсної частини показника заломлення 1.33). Разом з О.С. Овсаком було визначено імовірні зміни відносної концентрації метану з глибиною для Урана і Нептуна.

6.8. ПЛУТОН, МІСЯЦЬ, СУПУТНИКИ ПЛАНЕТ ТА АСТЕРОЇДИ.

У всіх цих об'єктах є спільна риса: вони практично позбавлені атмосфери (крім Титана — супутника Сатурна), тому будемо звати їх безатмосферними космічними тілами (БКТ).

У перші роки роботи в ГАО планетної групи досить значна увага приділялась вивченню Місяця. М.М. Миронова (1964 р.) провела велику роботу по вивченню спектрофотометричних властивостей багатьох деталей місячної поверхні. Зокрема, вона виявила люмінесцентне світіння кратера Аристарх поблизу довжини хвилі 0.425 мкм. У ті ж роки В.В. Аврамчук вперше провів поляриметричні дослідження деталей його поверхні в восьми фільтрах спектрального діапазону 0.35-0.6 мкм. Він довів, що залежність між максимальним ступенем поляризації $P_{макс}$ і альбедо A відповідної ділянки на поверхні не є лінійною, як вважали деякі дослідники. Суттєвим моментом цього дослідження було також те, що точка інверсії фазової кривої деталей місячної поверхні у всьому дослідженому спектральному діапазоні не залежить від довжини хвилі. Як ми пам’ятаємо, саме цей ефект, підтверджений лабораторними дослідженнями різноманітних земних зразків, послугував основою для О.В. Мороженка щоб розробити новий метод оцінки тиску марсіанської атмосфери.

У 1963-1970 рр. велась робота з вивчення рельєфа місячної поверхні. Фотометричним методом були побудовані гіпсометричні карти «морських» ділянок видимої сторони Місяця (І.К. Коваль, В.В. Ботвінова, Л.Р. Лісіна, М.М. Миронова).

В 1969 р. О.В. Мороженко і Е.Г. Яновицький, в рамках описаної в розділі „теоретичні дослідження” моделі проаналізували спостережні дані про фазову залежність блиску Місяця та визначили ступінь пористості місячного ґрунту, альбедо однократного розсіяння і індикатрису розсіяння частинок. Вперше було показано, що відсутність потемніння краю диска в опозицію зумовлене не великою пористістю поверхневого шару, а малим значенням альбедо однократного розсіяння.

В 1976 р. вперше були проведені поляриметричні спостереження галілеєвих супутників Юпітера у широкому діапазоні довжин хвиль (0.39-

0.69 мкм) (В.В. Ботвінова, В.А. Кучеров), які на Іо виявили різницю між структурою поверхонь «веденої» та «ведучої» сторін.

У подальшому були проведені також спектроскопічні спостереження цих супутників, аналіз спектрів яких показав наявність поки що неототожнених депресій. При цьому була підтверджена наявність депресії в ділянці спектру 0.5—0.6 мкм, яка характерна для сірки (В.В. Аврамчук, Л.Р. Лісіна).

В 1978—1983 рр. продовжувались дослідження фотометричних особливостей галілеєвих супутників Юпітера. Вперше вдалось спостерігати ці супутники при майже нульовому фазовому куті ($\alpha \sim 0.2°$). Це дозволило не тільки ретельно дослідити ефект опозиції цих супутників, але й виявити його залежність від довжини хвилі (В.В. Аврамчук, В.І. Шавловський). Провадились також спостереження Діони та Реї — супутників Сатурна (В.В. Аврамчук, Л.Р. Лісіна).

Ще на початку двадцятих років минулого сторіччя Ліо на фазовій залежності ступеня поляризації відбитого магнієвим екраном світла поблизу нульового фазового кута знайшов досить потужний пік від"ємної поляризації, на що тривалий час ніхто не звертав увагу. Приблизно так же поступив і О.В. Мороженко, коли в 1986 р. в Болівії провів вимірювання ступеня поляризації галілеєвих супутників Юпітера в системі *UBV* при фазовому куті $\alpha \sim 0.4°$ та досить велике його значення (приблизно 0.3-0.4 %) за площини поляризації 135°. У 1987 р. аналогічні результати отримав грузинський науковець Р. Чігладзе (Абастуманська астрофізична обсерваторія).

Тільки після того, як М.І. Міщенко в 1992 р. наближеним математичним моделюванням показав, що на фазових кутах менше 1° ефект когерентного розсіяння або слабкої локалізації фотонів може утворювати опозиційний поляризаційний ефект, спостерігачі також почали звертати свою увагу малим значенням фазового кута. Дещо пізніше можливу наявність поляризаційного і фотометричного ефектів, які зумовленні когерентним зворотним розсіянням, підтвердили Ж.М. Длугач та М.І. Мщенко строгим розв'язанням макроскопічних рівнянь Максвела.

Значна увага прділялась дослідженням малих тіл Сонячної системи. Ще в 1960-тих рр. О.А. Рубашевький запропонував новий метод визначення діаметра Плутона за спостереженнями тісного зближення з зорями, та провів перші поляризаційні спостереження. В 1978 р. В.В. Аврамчук, В.А. Кучеров та Л.Р. Лісіна разом з співробітниками Кримської астрофізичної обсерваторії на телевізійному устаткуванні останньої провели фотометричні дослідження Плутона в системі UBV та встановили, що його поверхня має досить унікальну комбінацію високої відбивної здатності (приблизно 50 %) з майже

нейтральним кольором (в фо¬тометричній систем UBV). Крім того, виявили систематичне ослаблення блиску планети в фільтрі V (приблизно 0.01^m за рік.

Ця робота була продовжена в 1988 р. В.В. Аврамчуком та В.І. Шавловським разом із співробітниками Інституту астрофізики АН Таджикистану. За спостереженнями в широкосмуговій фотометричній системі UBVRI було встановлено однакову залежність відбивної здатності від довжини хвилі для світлих і темних деталей поверхні Плутона; а різниця альбедо цих утворень сягає 50-70 %. Крім того, було знайдено, що ослаблення блиску Плутона у фільтрі V з 1978 по 1988 рр. відбувалось з меншою амплітудою. Можливо, це пов'язано з тим, що в 1989 р. Плутон досяг перигелію (тобто найменшої відстані до Сонця), внаслідок чого ослабилось танення метанового снігу.

Дослідження астероїдів (В.В. Аврамчук, А.М. Довгопол, Л.Р. Лісіна), як правило, виконувалась у співдружності з колегами Харківської астрономічної обсерваторії. В 1986 р. в Болівії М.М. Кисельовим і О.В. Мороженком виконали поляризаційні спостереження астероїда Веста, які виявили залежність ступеня поляризації від довготи центрального меридіану, що підтвердило наявність на астероїді деталей різної природи.

Тепер трохи зупинимось на інтерпретаційних роботах, що ґрунтувались на теоретичних та лабораторних дослідженнях, які велися переважно у лабораторії теорії переносу випромінювання (див. відповідні розділи цієї статті). Ми вже дещо розповіли про астероїди, коли вели мову про кільця Сатурна. В рамках теоретичної моделі шорсткої поверхні, що була розроблена Л.О. Колоколовою (1987 р.), були розраховані не тільки поляризаційні фазові криві, що досить добре співпадали з тими, які спостерігаються для БКТ, але й пояснені усі встановлені численними спостереженнями астероїдів та місячної поверхні емпіричні кореляційні залежності між поляризаційними та фотометричними характеристиками цих об'єктів. Ця робота мала безпосереднє застосування. Зокрема Л.О. Колоколова разом з Е.Г. Яновицьким запропонували новий метод визначення діаметрів астероїдів за характеристиками гілки від'ємної поляризації, а також метод оцінки віку місячних деталей.

Подальше розширення цієї моделі розсіяння світла шорсткою поверхнею на випадок дослідження повного вектора Стокса дозволило проінтерпретувати результати лабораторних вимірювань цього вектора для аналогів ґрунтів космічних тіл, виконаних В.С. Дегтярьовим. Зокрема, вдалося довести, що виникнення колової поляризації при розсіянні світла сильно поглинаючими роздрібненими поверхнями (скажімо, як у Місяця) є наслідком багаторазових відбивань світла. В рамках цієї теорії можна також дослідити залежність колової поляризації від структури поверхні, показників заломлення та поглинання речовини, яка є ймовірною складовою частиною

БКТ. Зокрема, ґрунтуючись на власних численних лабораторних вимірюваннях, В.С. Дегтярьов вперше показав, що колова поляризація має високу чутливість до присутності вільного металу в складі поверхні, а відтак, при певних умовах вимірювання колової поляризації можуть дати можливість визначити навіть кількісний вміст металу в сумішах з силікатами. А це дуже важливо стосовно з'ясування природи багатьох астероїдів, оскільки до останнього часу не існувало надійних методів дистанційного виявлення металів у складі поверхонь цих об'єктів.

Вище згадувалось, що на фазових залежностях ступеня поляризації точка інверсії розділяє фазові ділянки, в яких положення площини поляризації відрізняється на 90°. Підсвідомо припускали, що зміна орієнтації поляризації відбувається стрибком. В той же час ще в 1964 р. О.В. Мороженко показав, що під час вимірювання лабораторних зразків при підході до точки інверсії починається більш-менш плавний поворот площини поляризації, що знайшло остаточне підтвердження в аналогічних роботах В.С. Дегтярьова. Більш того, останній показав, що інтервал фазових кутів, де проходить переорієнтація площини поляризації, різний для зразків різної природи. Поки що вказаний спостережний факт не знайшов теоретичного пояснення.

При поляриметричних спостереженнях планет епізодично велись спостереження і інших небесних тіл, і в першу чергу – комет. Так, ще в 1969 р. Л.А. Бугаєнко з колегами вперше в Радянському Союзі провели поляриметричні вимірювання світла комети Бенета в окремих ділянках спектра інтервалу довжин хвиль 350-750 нм, які вирізались інтерференційними фільтрами, а також, в моделі сферичних частинок зробили спробу визначити величину дійсної частини показника заломлення і розмір частинок. Дещо пізніше аналогічні спостереження були проведені для комети Когоутека. Вже в 1980 р. О.В. Мороженко на основі аналізу всіх існуючих на той час спостережних даних про спектрофотометричні і поляризаційні властивості комет запропонував гіпотезу, що аерозольні частинки кометних атмосфер мусять бути несферичними, пухоподібними, великими і орієнтованими. В наукових колах ця ідея знайшла настільки великий супротив, що автору навіть було відмовлено в її публікації в „Письма в астрономический журнал". Саме тому вона побачила світ лише в збірнику доповідей Міжнародної наради з дослідження комет (Будапешт, 1982 р.).

В 1986 р. вперше було достовірно зареєстровано (похибка була значно меншою від ступеня поляризації) колову поляризацію світла комети Галлея, а також показано, що в точці інверсії ступінь поляризації не рівна нулю і одночасно спостерігаються приблизно рівні за величиною параметри Q і U Стокса (О.В. Мороженко, М.М. Кисельов, О.Л. Гуральчук).

Закінчуючи цей розділ, зупинимось на цікавій та дуже екзотичній гіпотезі О.Ф. Стєклова, яка була запропонована ним у 1980 р. Ґрунтуючись на роботах американських астрофізиків Г. Консолманьо та Дж. Льюїса, він дійшов висновку, що фізичні умови в глибинах крижаних супутників Юпітера (Ганімеда, Каллісто, Європи) придатні для існування життя (!), а саме: під товстою (50—250 км) крижаною корою цих супутників є шар води завтовшки 100—800 км, під яким вже знаходиться силікатне ядро; на верхній границі водяного шару температура становить приблизно 0 °С, а тиск близький до того, який існує в земних океанах на глибині приблизно 10 км, де, як відомо, існують навіть досить складні живі організми. Аналіз сучасних уявлень про виникнення життя, проведений Л.О. Колоколовою, показав, що у внутрішніх водних басейнах супутників Юпітера є умови не тільки для існування, але навіть для зародження життя. Таким чином було показано, що існує можливість наявності принципово нового виду біосфер, що формуються у підповерхневих замкнутих водних басейнах небесних тіл, значною складовою частиною яких є вода (деякі супутники Юпітера та інших планет-гігантів, під поверхнею Марса, всередині ядер комет й великих крижаних астероїдів). Таким чином О.Ф. Стєклов і Л.О. Колоколова подали докази можливості існування життя всередині Галілеєвих супутників Юпітера задовго до того, як до цієї ж ідеї прийшли Чиба (Chyba) із співавторами після ретельних досліджень Європи за допомогою космічного апарату „Galileo” (1997 р.).

6.9. НЕЛІНІЙНА АТМОСФЕРНА ОПТИКА

об’єднує явища, зумовлені залежністю оптичних параметрів середовища від інтенсивності світла. Застосування законів нелінійної оптики до дослідження атмосферних характеристик почало поширюватися після перших лідарних досліджень атмосфери Землі. Вони показали, що після проходження потужного лазерного випромінювання через земну атмосферу на шляху променя виникали ефекти, які не можна пояснити в рамках класичної атмосферної оптики: 1) збільшення і зменшення поглинання в земній атмосфері при проходженні через неї потужного лазерного пучка; 2) поява комбінаційних частот на шляху променя (сума і різниця частоти лазера і власних частот атмосферних молекул); 3) поява на шляху променя кратних частот. Вищеназвані явища пов’язують з потужним лазерним випромінюванням. Але дослідження показують, що нелінійні оптичні ефекти в газових середовищах можуть проявлятися і при незначних інтенсивностях. Прикладом цього є присутність комбінаційного розсіяння в атмосферах планет-гігантів. А.П.Відьмаченко і Н.М. Михальчук виконали аналіз спектрів Юпітера і Сатурна, отриманих Каркошкою при спостереженнях на Європейській Південній Обсерваторії в липні 1993 і в липні 1995 рр.

Оскільки планетна атмосфера досить мінлива, то в кожний наступний момент часу інтенсивності окремої лінії будуть дещо відмінні. В даних спектрах реєструвалися коливально-обертальні молекулярні лінії метану, які зливаються в досить широкі молекулярні смуги.

Особливо значні зміни з часом спостерігаються в смугах метану. Після обробки цих спостережних даних за допомогою розробленої ними програми та аналізу отриманих результатів було знайдено, що досить сильні варіації мають місце і на довжинах хвиль, які точно відповідають подвійним частотам сильних смуг метану. Тобто, в спектрах планет-гігантів крім комбінаційного розсіяння показано існування ще одного нелінійного ефекту – такого як генерація другої гармоніки. І його необхідно враховувати при визначенні оптичних характеристик газово-аерозольного та хімічного складу планетних атмосфер.

7. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКЗОПЛАНЕТ БІЛЯ ЗІР НАШОЇ ГАЛАКТИКИ.

Враховуючи розміри Нашої Галактики і ґрунтуючись на законах теорії імовірності, можна зробити висновок, що Сонячна система не повинна бути унікальною у Всесвіті. Проте тільки у жовтні 1995 року група швейцарських астрономів повідомила про відкриття перших 8 планет, що обертаються навколо зірок сонячного типу. Тому останнім часом одним з провідних напрямків планетології став пошук позасонячних планет. Основними методами їх пошуку є астрометричний і фотометричний, а також мікролінзування.

Деякі з дослідників висловлювали припущення про можливий вплив руху планет на тривалість циклу сонячної активності. При цьому, особлива увага приділялася вивченню взаємодії між головними планетними тілами в Сонячній системі, дослідженню впливу цих змін у русі планет на динаміку Сонця і, як результат цього, на розвиток сонячних плям і на активність Сонця в цілому. Так, в Сонячній системі 98% моменту імпульсу приходиться на частку орбітального руху чотирьох планет-гігантів. Зокрема, 11-літній період може бути ототожнений з відносним рухом найбільш масивної пари Сонячної системи Юпітер-Сатурн.

На квітень 2014 р. вже відомо 1783 планети навколо 1105 зірок, у тому числі навколо 460 зірок відкрито по 2 і більше планет з масою, що всього у кілька разів перевищує масу Землі та менше ніж 13.6 мас Юпітера.

При дистанційних спостереженнях планети, яка обертається по еліптичній орбіті навколо центрального світила, її блиск буде значно змінюватися в залежності від фазового кута. Просторова індикатриса відбитого видимим шаром планети-гіганта світла в неперервному спектрі визначається, в основному, оптичними властивостями аерозолів і функцією розподілу за розмірами часток, з яких складається хмаровий шар на рівнях

формування випромінювання. А.П. Відьмаченко та В.М. Крушевська припустивши, що параметри атмосфер екзопланет схожі з аналогічними характеристиками для Сатурна, - розрахували спектральні розподіли яскравості по диску планети для значень фазового кута в інтервалі від 0^0 до 170^0 і по цих даних визначили відносну зміну інтегрального блиску планети, що обертається навколо центральної зірки. Результати оцінок показали, що для деяких із близько 100 зоряних систем є реальна можливість зробити реконструкцію орбітальної фазової кривої. Це дозволяє уточнити значення кута нахилу площини орбіти до картинної площини і в деяких випадках може майже в 6 разів збільшити оцінку істинної маси екзопланети.

Майже вся інформація про екзопланети на сьогодні отримана із точних вимірювань радіальних швидкостей їх центральних світил. Проте єдине спостереження транзиту позасонячної планети-гіганта (ППГ) по диску зорі HD209458 дозволило визначити її відношення «маса-радіус». Для розрахунку зоряної величини ППГ А.П.Відьмаченко, В.М. Крушевська і Ю.Г. Кузнєцова враховували вищенаведене відношення, фізичні параметри Юпітера (його візуальну и абсолютну зоряні величини, геометричні розміри, масу, альбедо і т.п.), відношення «маса-радіус» для сферичного тіла і потім «переносили» це тіло на відповідну відстань від спостерігача і від центральної зорі. Розраховані таким чином візуальні величини таких планет мають значення $25.1\text{-}12.8^{m}$.

А.П. Відьмаченко та В.М. Крушевська виконали аналіз просторового розподілу зірок, біля яких виявлені планетні тіла. Аналіз взятих з каталогу Hipparcos даних для зірок спектральних класів A0 - M9 з візуальними зоряними величинами яскравіше 8.1^{m}, які знаходяться на відстанях R<50.1 парсек, дозволив зробити наступні висновки: 1) планети знайдено біля ~5% досліджуваних зірок; 2) близько половини з них – це зірки спектрального класу G. Вказуючи на цей факт, багато дослідників роблять висновок, що планети варто шукати переважно біля зірок даного спектрального класу. На нашу думку, отриманий результат швидше за все викликаний тим, що більше половини з досліджуваних зірок – це саме G-зірки; 3) зірки з планетами розташовуються на небі не рівномірно: вони практично відсутні у широкій області між 90° і 150° довготи і від -20^0 до $+90^0$ широти. Виділяються також ще три великі зони, у яких практично відсутні зірки з планетами: перша має границі 80° і 260° довготи та розташовується нижче 45° південної широти; друга лежить у межах 0° і 250° довготи і знаходиться вище 50° північної широти; третя має границі 0° і 50° довготи і займає область від південного до північного полюса, за винятком кількох зірок у вузькій екваторіальній області; 4) що стосується частки зірок із планетами щодо загального числа зірок, то можна відзначити, що планети мають зірки зі спектральними класами від F0 до M4; особливо виділяються три підкласи – G0, G5 і F8; 5) більше 80% відкритих на сьогодні зірок із

планетами – яскравіші 8^m і знаходяться вони на відстанях ближче 50 парсек. Переважна більшість відкритих на сьогодні екзопланет - це планети-гіганти, подібні до Юпітера чи Сатурна.

Цей факт є потенційно придатним для проведення багатофакторного аналізу можливого гравітаційного впливу основних планетних складових на активність центральних світил. Тим більше, що для переважної їх більшості періоди обертання планет складають від 2-3 земних діб до кількох тижнів. Тобто, у досліджуваних екзопланетних системах такого роду гравітаційний вплив повинен був би проявитися набагато сильніше, ніж у Сонячній системі, оскільки масивні планети знаходяться там набагато ближче до центральної зірки, ніж Юпітер і Сатурн до Сонця.

Сонячна активність може характеризуватися інтенсивностями сильних хромосферних ліній, таких як H_α, H_β, H і K Ca I. Тому А.П. Відьмаченко та Ю.Г. Кузнєцова запропонували використовувати ці спектральні лінії для дослідження періодичних змін активності центральних зір екзопланетних систем. За допомогою куде-ешеле спектрометра (розробник приладу - Ф. Мусаєв, САО) на 2-метровому дзеркальному телескопі, встановленому на піку Терскол, вони отримали ряд спектральних спостережень вищенаведених зірок сонячного типу з екзопланетами у діапазоні довжин хвиль 360-860 нм.

Такі спостереження становлять інтерес для виявлення певних змін у системі «зірка-планета» за допомогою аналізу довгоперіодичних часових залежностей їх випромінювальних характеристик і повинні допомогти відповісти на запитання про можливий гравітаційний вплив планет на активність центрального світила.

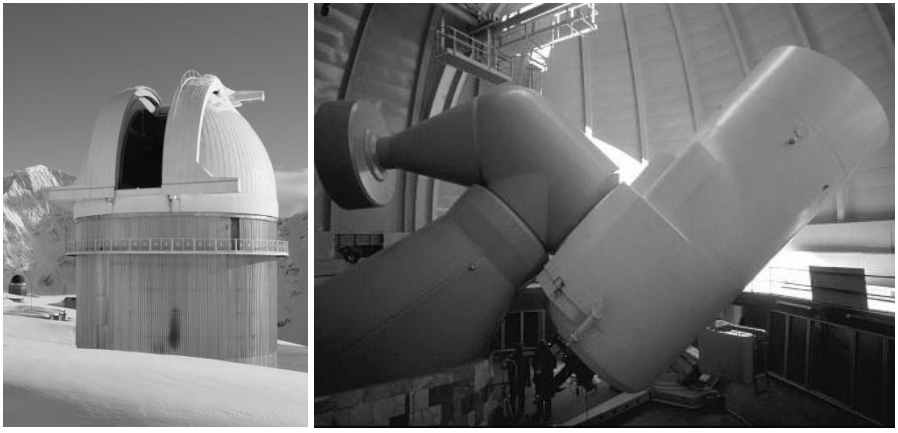


Рис. 10. Башта 2-метрового телескопу (ліворуч) і сам 2-метровий дзеркальний телескоп Zeiss-2000 (праворуч) обсерваторії на піку Терскол

У даний час співробітники відділу приймають активну участь у багатьох міжнародних наукових проектах. Така співпраця сприяє поглибленню зв'язків між різними науковими інститутами, коли кожен учасник проекту бере на себе відповідальність за виконання окремої частини роботи, і це дозволяє суттєво зекономити час і прискорює отримання кінцевих наукових результатів.

7.1. Співробітництво з Терскольською філією Інституту астрономії РАН (Північний Кавказ, Кабардино-Балкарія, РФ) і Міжнародним Центром астрономічних та медико-екологічних досліджень при Призидії НАНУ.

Співробітництво ведеться з 2001 р. в рамках проектів «Фотометричні, спектральні і поляриметричні дослідження планет-гігантів та їх супутників, малих тіл Сонячної системи та зір з екзопланетами», а також «Дослідження фізичних характеристик і хімічного складу зір методами спектроскопії високої роздільної здатності» (Кузнєцова Ю.Г., Андрєєв М.В., Відьмаченко А.П., Крушевська В.М.)

Спектральні спостереження проводяться на 2-метровому дзеркальному телескопі Zeiss-2000 з використанням куде-ешеле спектрометра високої роздільної здатності (R = 45000, 120000), фокус у системі ломаного куде складає 72 м, розмір робочого поля - 5′.

За роки співробітництва отримано велику кількість спостережного матеріалу. Так, ведеться багаторічний спектральний моніторинг планет-гігантів Сонячної системи Урана й Нептуна за програмою дослідження вертикальної структури атмосфер цих планет з урахуванням комбінаційного розсіяння світла на молекулах водню; досліджуються зміни геометричного альбедо хмарових поверхонь планет Сонячної системи, вибраних супутників; отримано спектри ряду зірок з екзопланетами. Останні, наприклад, демонструють наявність емісійних піків в ядрах хромосферних ліній H&K Ca II, і це підтверджує зроблений нами раніше висновок про наявність хромосферної активності в екзопланетних системах, викликаних впливом з боку планет-гігантів.

На рис. 11 представлено зміни інтенсивності вказаних ліній в спектрах екзопланетної системи HD189733 під час транзиту. Виявлено центральні емісії в ядрах хромосферних ліній Ca II H&K, які є індикаторами хромосферної активності.

Протягом 2007-2012 рр. проводився спектральний моніторинг поведінки зоряної системи Epsilon Aurigae. Ця система є довгоперіодичною затемнюваною подвійною системою, що знаходиться на відстані 625 пс від Сонця. Первинний компонент системи – зоря-гігант F-класу, що має масу близько 15 сонячних мас та діаметр близько 150 сонячних; вторинний

компонент – це протопланетний диск, що має діаметр близько 1500 сонячних, масу близько 14 сонячних мас і температуру 500 К. В середині диска за непрямими даними спостережень знаходяться два дискретних об'єкти, які, імовірно, можуть бути системою двох зір або двома планетами-газовими гігантами. Зоря затемнюється величезним газо-пиловим диском з періодом 27.1 року і таке затемнення продовжується два роки.

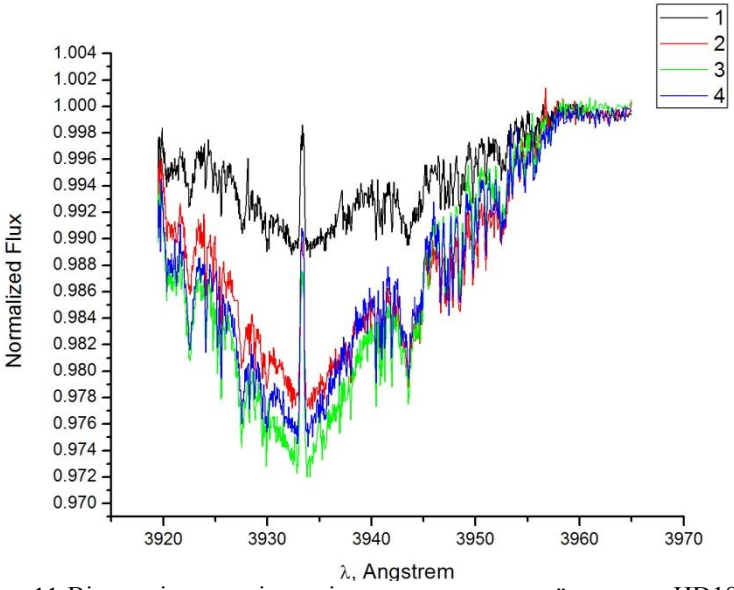


Рис. 11 Відносні нормалізовані спектри транзитної системи HD189733 в області хромосферних ліній К CaII. Часові зміни протягом транзиту.

Нами досліджувалися довго- та короткоперіодичні варіації деяких спектральних ліній. Наприклад, лінія атомарного водню Hα визначена в поглинанні із суттєвими змінами профілю ядра лінії; знайдено сині та червоні емісійні взаємно-несиметричні крила лінії Hα. Виконана Кузнєцовою Ю.Г. і Андрєєвим М.В. інтерпретація їх походження показала, що її червоне крило вказує на наявність газу поза зорею, а синє крило – вказує на існування радіальних вихідних потоків, які характеризують нестабільність в зорі.

Фотометричні спостереження проводяться на малих телескопах Zeiss-600, Meade-14" та Celestron-11" (рис. 13), які оснащені ПЗЗ-матрицями та BVRI-фільтрами системи Джонсона. Ці спостереження ведуться Андрєєвим М.В. і Кузнєцовою Ю.Г. в рамках досліджень транзитних екзопланетних систем, змін хромосферної активності зір, які мають екзопланетні системи, і подвійних зоряних систем, які можуть мати екзопланети.

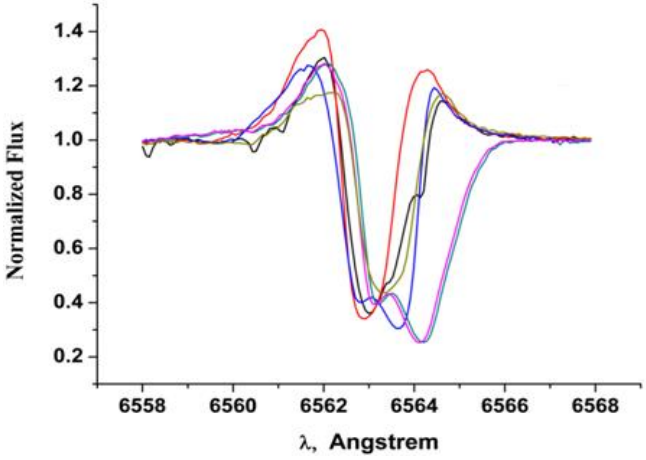


Рис. 12. Варіації профілів лінії Hα в спектрах ε Aur, отриманих перед затемненням, на початку затемнення та під час затемнення за різні дати з 2008 по 2010 рр.

Але найбільше уваги приділяється дослідженню так званих **транзитних екзопланетних систем**, коли екзопланета проходить по видимому диску центральної зорі; при цьому реєструється невелике зменшення блиску системи. Звичайно, такі зменшення яскравості дуже малі і у випадку, наприклад, проходження «нашого» Юпітеру на тлі Сонця - зменшення буде складати близько 1%, а те ж саме для Землі – лише 0.01% від загального сонячного потоку. Причому для Юпітера таке явище мало б місце лише один раз за майже 12 років.

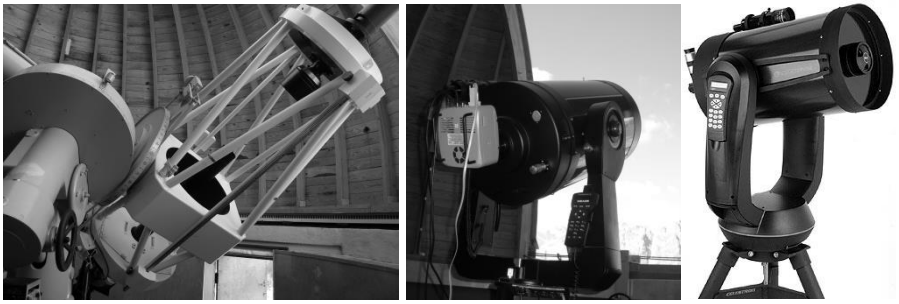


Рис. 13. Зліва - направо показано телескоп Zeiss-600 системи Кассегрена, телескоп Meade системи Шмідта-Кассегрена з діаметром дзеркала 14" і телескоп Celestron NexStar GPS системи Шмідта-Кассегрена з діаметром дзеркала 11" (обсерваторія піку Терскол)

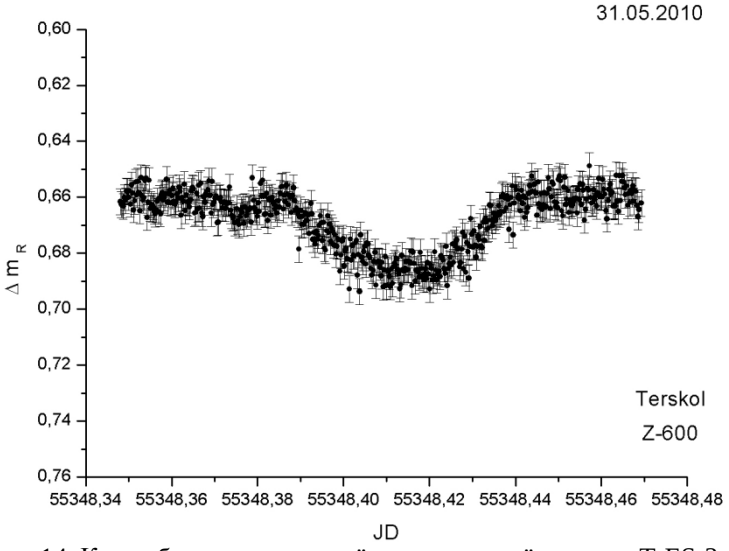


Рис. 14. Крива блиску транзитної екзопланетної системи TrES-3

Проте дослідниками було відкрито значну кількість екзопланет, що знаходяться на дуже близьких до центральної зорі орбітах. При цьому вони дуже швидко обертаються навколо своїх зір, мають високу температуру видимої поверхні і тому їх назвали «гарячі Юпітери». А в таких системах імовірність опинитися в площині спостереження набагато вища.

Одна з отриманих нами кривих блиску за спостереженнями транзитної екзопланетної системи TrES-3 наведена на рис. 14.

7.2. Співробітництво з Кримською астрофізичною обсерваторією

Фотометричні спостереження проводяться на телескопі К-380 системи Кассегрена діаметром дзеркала 38 см (рис. 15), який оснащений ПЗЗ-матрицею та BVRI-фільтрами системи Джонсона. Тут отримані багаторічні ряди фотометричних даних для зірок з транзитними та не транзитними екзопланетами.

За цими даними знайдено, що екзопланети з масами близько декількох юпітеріанських і невеликими піввісями викликають появу хромосферної активності у центральної зорі. Для всіх досліджуваних екзопланетних систем знайдено періодичні зміни яскравості. Після проведення періодограмного аналізу знайдено, що в межах похибок їх значення відповідають орбітальним періодам екзопланет, визначеним іншими авторами методом радіальних швидкостей.

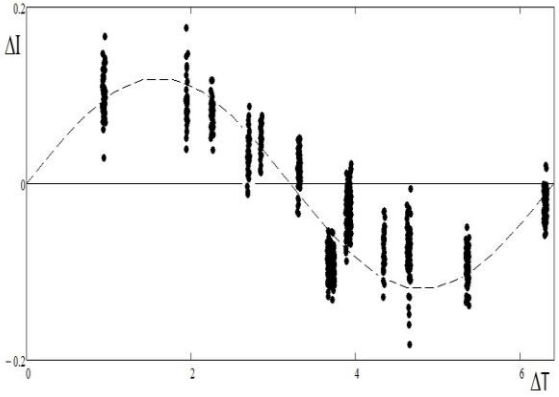


Рис. 15. Телескоп К-380 системи Кассегрена діаметром 38 см (КрАО)

Рис. 16. Фазова крива екзопланетної системи HD168746, згорнена з орбітальним періодом планети T = 6.403 діб

Ми асоціюємо вказані періодичності саме із хромосферною активністю цих батьківських зір, оскільки варіації яскравості фіксувались у фільтрах B та R, в діапазонах чутливості яких знаходяться лінії Ca II H&K і Hα, які є індикаторами хромосферної активності зір.

Рис. 16 демонструє фазову криву екзопланетної системи HD168746, згорнену з орбітальним періодом планети T=6.403 діб в R-фільтрі (Кузнєцова Ю.Г., Крушевська В.М., Відьмаченко А.П. Андрєєв М.В.).

7.3. Співпраця з Астрономічним Інститутом Словацької АН.

Предметом такої співпраці є дослідження зір з транзитними екзопланетами та подвійні зорі. За цією тематикою було отримано кілька міжнародних і українських грантів для виконання спільних наукових проектів, серед яких можна виділити такі:

- дослідження транзитної системи WASP-10,
- вивчення зоряних спалахів у взаємодіючих подвійних зорях,
- дослідження подвійної системи V501Aur,
- пошук додаткових тіл у системах подвійних зір.

Останній проект є міжнародною програмою, в якій одночасно бере участь велика кількість обсерваторій. Проект має назву **“The DWARF project: Eclipsing binaries - precise clocks to discover exoplanets”.**

В рамках проекту проводиться спостережна кампанія з пошуку планет навколо систем затемнюваних подвійних зір. Вона охоплює більше 20 обсерваторій північної півкулі і в ній задіяно телескопи з розміром головного дзеркала від 25 до 200 см. Мета даного проекту є пошук періодичностей у зміщенні моментів мінімумів затемнень компонентів систем на основі високоточного визначення часу цих мінімумів.

У разі виявлення таких періодичностей у тієї чи іншої подвійній зорі проводиться їх подальше дослідження за програмами, що дозволяють визначити основні фізичні параметри третього тіла у такій системі. Для проекту спеціально було відібрано біля 50 короткоперіодичних систем, які можна поділити між собою на: 1) маломасивні подвійні з K- та/або M-карликами, 2) короткоперіодичні гарячі субкарлики з M- компонентами, 3) системи з білим карликом.

В цьому проекті приймають участь такі співробітники нашого відділу: Андрєєв М.В., Романюк Я.О., Крушевська В.М. та Кузнєцова Ю.Г. В її обов'язки входять фотометричні спостереження вибраних подвійних зірок та обробка отриманих даних. Спостереження проводяться на телескопах Celestron 14" ГАО НАН України в Лісниках та в Києві, а також на вже згаданих телескопах Zeiss-600, Meade 14", Celestron 11", які знаходяться на піку Терскол. За півтора сезони проведено понад 150 сетів спостережень більшої частини програмних зір. На рис. 17 наведено криву блиску головного і вторинного мінімуму подвійної затемненої системи BX Tri.

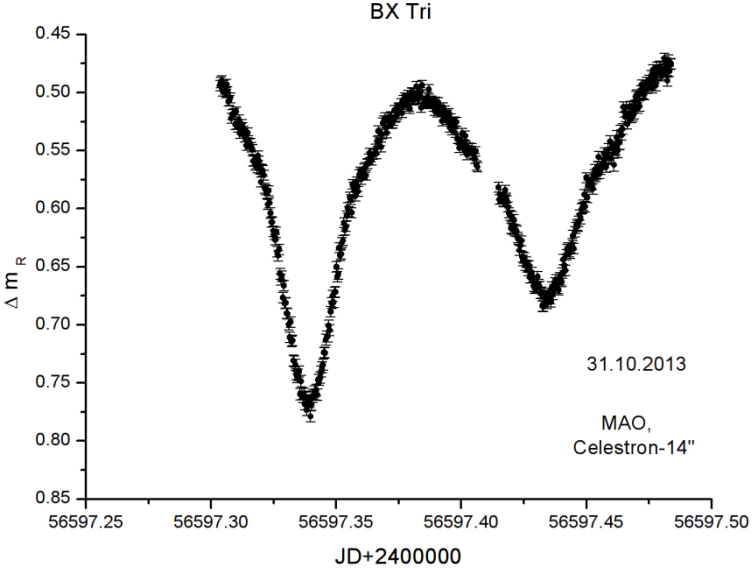


Рис. 17. Крива блиску подвійної зорі BX Tri.

Ще один спільний науковий проект, який стосується дослідження подвійних зір на предмет виявлення біля них інших тіл, проводиться нашим відділом спільно зі співробітниками Державного інституту ім. Штернберга. Згідно відповідного договору, він носить назву «Пошук планет навколо затемнюваних подвійних зір методом таймінгу та транзитним методом». Від вищезгаданого проекту DWARF даний проект відрізняється наявністю іншого методу пошуку додаткових тіл, а також тим, що список обраних подвійних зір включає більш «тісні» пари зірок. До складу робочої групи проекту входять Крушевська В.М., Кузнєцова Ю.Г., Відьмаченко А.П. На даному етапі до наших обов'язків покладена обробка великої кількості фотометричних спостережних даних, отриманих на телескопах в обсерваторіях КрАО та на горі Майданак (Республіка Узбекистан).

Співробітники відділу Крушевська В.М., Кузнєцова Ю.Г., Романюк Я.О. та Андрєєв М.В входять до складу робочої групи «Спостереження на малих телескопах екзопланет, тіл Сонячної системи та інших об'єктів», в рамках якої ведуться дослідження хромосферної активності зір з екзопланетами, зір з транзитними екзопланетами та проводиться міжнародна програма пошуку екзопланет в системах тісних подвійних зір «DWARF project».

8. Розподіл енергії в спектрі фрагментуючих протозоряних дисків

О.В. Захожай (ГАО НАН України) у співпраці з Е. Воробйовим (Інститут астрофізики Віденського університету) та М. Данхамом (Астрономічне відділення Єльського університету) провела комплексні дослідження схильних до фрагментації протозоряних дисків на ранніх стадіях зореутворення. У результаті їм вдалося знайти спостережні прояви, які можуть однозначно вказувати на наявність масивних фрагментів у протозоряних дисках, які можуть бути попередниками планет-гігантів і коричневих карликів. Такі прояви з'являються при побудові теоретичних спектральних розподілах енергії та на синтетичних зображеннях дисків (які можуть бути отримані з Великою міліметровою антеною Атакама, ALMA), спираючись на числені гідродинамічні моделі формування диска та його еволюції Воробйова і Басу.

8.1. Мотивація

Кінець 20-го століття ознаменувався одним з найцікавіших астрономічних відкриттів всіх часів – спостережне підтвердження позасонячних планет (екзопланет) на орбіті відносно близьких зір та відкриття і спостереження коричневих карликів. Кількість екзопланет незабаром досягне двох тисяч. Більшість з них нагадують крижані і газові гіганти Сонячної системи. Коричневі карлики також регулярно

відкриваються і досліджуються, але на сьогоднішній день немає консенсусу щодо їх утворення.

Як теоретичне моделювання так і дані спостережень вказують на те, що планети виникають у газопилових протозоряних дисках, які формуються навколо молодих зір і субзір. Одна з двох конкуруючих теорій формування планет пророкує, що наймасивніші планети, з масою Юпітера чи дещо більшою, формуються в результаті гравітаційної нестійкості з подальшою фрагментацією у зовнішніх частинах протозоряних дисків (наприклад, моделі Джонсона та Гаммі 2003, Босса 2008, Воробйова та Басу 2010). Такі планети-гіганти дійсно спостерігалися на орбіті зір (наприклад, у Фомальгаута і HR8799) на відстанях у кілька десятків або навіть сотень астрономічних одиниць. Таким чином, однозначне виявлення масивних і гарячих фрагментів в протозоряних дисках може стати однозначним підтверженям фрагментації диска як життєздатної теорії формування планет.

Коричневі карлики є ще одним прикладом загадкових об'єктів, які можуть формуватися за сценірієм фрагментації диска, якщо фрагменти перевищують за масою межу горіння дейтерію на позначці 15 мас Юпітера.

На жаль, ці фрагменти важко детектувати напряму безпосередньо через їх невеликий розмір (кілька десятків астрономічних одиниць), навіть з найпотужнішими телескопами. Помітним винятком є Велика міліметрова антена Атакама ALMA, що знаходиться в Чилі. Однак, враховуючи високі витрати і спостережне навантаження на цьому телескопі, є доцільним виконати попередній пошук фрагментів з іншими непрямими методами. Один з таких методів базується на розрахунках теоретичних спектральних розподілів енергії (РЕС) з використанням результатів чисельних гідродинамічних моделювань протозоряних дисків. РЕС є розподілом потоку випромінювання в широкому діапазоні електромагнітного спектру та є одним з основних джерел інформації про протозорі та їх диски.

8.2. Метод моделювання РЕС та синтетичних зображень

В якості основи для побудови РЕС, ми використовуємо чисельні гідродинамічні моделі молодих зоряних об'єктів Воробйова та Басу. У цих моделях систему з диском зручно розділити на три складові частини: акрецююча протозоря, внутрішній диск і «зовнішній диск + оболонка». Фізичні властивості протозорі розраховані з використанням зоряної еволюції Шабріє та Бараффе. Зовнішній диск та оболонка (далі - зовнішній диск) простягається від 20 до кількох тисяч астрономічних одиниць (а.о.) Поверхнева щільність і температура зовнішнього диску розраховувались за допомогою чисельного гідродінамічного моделювання. При цьому внутрішній диск, розтошований до відстані в 20 а.о., виключався з моделювання, а його параметри розраховувались приблизно з використанням

звичайної моделі газопиловіих дисків.

Для моделювання РЕС від системи необхідно знати залежність густини потоку F_ν від частоти ν. Нижче більш детально наведені основні ідеї та рівняння.

1) *Протозоря*

Протозоря забезпечує значний внесок в РЕС на коротших довжинах хвиль. Густина потоку випромінювання від протозорі розраховується в припущенні спектру випромінювання абсолютно чорного тіла з ефективною температурою T_{eff}^*:

$$F_\nu^* = \frac{\pi R_*^2}{d^2} B_\nu(T_{eff}^*), \qquad (1)$$

де R_* це радіус протозорі, T_{eff}^* визначається акреційною та фотосферною світностями (L_{acr} та L_{ph}, відповідно) як

$$T_{eff}^* = \left(\frac{L_{acr} + L_{ph}}{4\pi R_*^2 \sigma} \right)^{1/4},$$

де σ - стала Стефана-Больцмана. Радіуси та світності використовуються з моделей зоряної еволюції (Шабріє та Бараффе, 2000).

2) Зовнішній диск

Ми використовували розв'язання одновимірного рівняння переносу випромінювання для разрахунку потоку випромінювання F_ν^d що надходить з поверхні зховнішнього диску

$$F_\nu^d = \frac{S\cos\omega}{d^2} B_\nu(T_{eff}) \left(1 - e^{-\Sigma\kappa_\nu \sec\gamma}\right), \qquad (2)$$

де $B_\nu(T_{eff})$ - функція Планка, d - відстань до системи, κ_ν - непрозорість, S та γ - це площа фізичної поверхні та кут нахилу кожного елементу поверхні зовнішнього диску, ω – кут нахилу зовнішнього диску. Поверхнева щільність Σ та ефективна температура T_{eff} – розраховувались із чисельного гідродінамічного моделювання.

3) Внутрішній диск

Внутрішній диск у нашій моделі вводиться для зручності гідродінамічних розрахунків. Динаміка газу внутрішнього диску не обчислюється, але внесок до загального РЕСу від цієї області може бути істотним. Для разрахунків використоувалась екстраполяція радіальної

поверхневої щільності газу та розподілу ефективної температури від внутрішнього краю диска (20 а.о.) аж до внутрішнього радіусу диску на відстані близько 0.1 а.о. Фактичне значення для внутрішнього радіусу диска розраховується від «радіуса сублімації пилу», для розрахунку якого використовувалася світність протозорі. Зокрема, ми використовуємо наступні співвідношення для симетричної поверхневої щільності газу і розподіл ефективної температури внутрішнього диску:

$$\Sigma_{sc}(r) = \Sigma_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-p}, \quad (3)$$

$$T_{sc}(r) = T_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-q}, \quad (4)$$

де Σ_0 та T_0 – типові значення для поверхневої щільності газу та температури на внутрішньому краї, які обрані таким чином, щоб отримати найкраще узгодження з модельованими радіальними профілями Σ та T_{eff} зовнішнього диску. Для степеневих показників використовувалися запропоновані Беквізом і Воробйовим типові значенна для випромінюючих та в'язких дисків: q = 0.5-0.7 та p = 1.0-1.5.

Загальний потік РЕС - це сума індивідуальних внесків від протозорі, внутрішнього і зовнішнього дисків.

Синтетичні зображення також моделювались спираючись на вищенаведений алгоритм, але замість того щоб разрахувати інтегральний потік від усього диску, ми розрахували потоки від кожного просторового пікселя, який в наших розрахунках дорівнює 5 а.о. × 5 а.о.

8.3. Результати моделювання

Результати чисельного моделювання вказують на те, що вивчення профілю спектрального розподілу енергії дозволяє нам встановити наявність масивних фрагментів у протозоряному диску. На рис. 18 наведено приклад РЕС системи з початковою масою 1.22 $M_{\rm Sun}$, віком 0.09-0.13 млн років (з моменту формування протозорі), яка розташована у картинній площині на відсттані 250 пк від спостерігача.

Різні лінії відображають внески до сумарного РЕС (безперервна лінія) від різних частин системи: точкова лінія — центральна протозоря, пунктирна і пунктирно-точкова лінії — внутрішня (< 20 а.о.) і зовнішня (> 20 а.о.) частини диску.

Ця система у різному віці має гарячі фрагменти на відстанях приблизно 50-160 а.о. від протозорі.

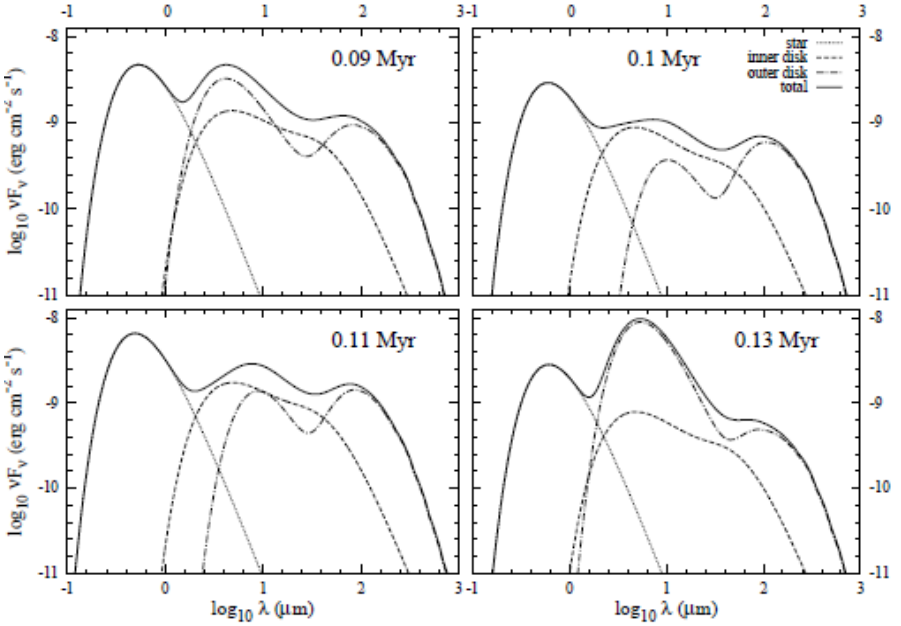


Рис. 18. Спектральний розподіл енергії системи з фрагментуючим диском, розташованої у картинній площині, з початковою масою 1.22 M_{Sun} та віком 0.09-0.13 млн. років (Воробйов та ін. 2013). Різні лінії відображають внески до сумарного РЕС (безперервна лінія) від різних частин системи: точкова лінія — центральна протозоря, пунктирна і пунктирно-точкова лінії — внутрішня (< 20 а.о.) і зовнішня (> 20 а.о.) частини диску.

Маса та температура (середнього плану) цих фрагментів варіюються у межах 32-64 M_{Jup} та 1180-1600 K відповідно.На наявність масивних фрагментів вказує додатковий максимум у РЕС на довжині хвилі 5-10 мкм. Для порівняння на рис. 19. наведено приклад РЕС системи з початковою масою 0.74 M_{Sun}, з аналогічним віком – 0.12-0.16 млн років (з моменту формування протозорі), яка не має гарячих фрагментів. Ця система розташована також у картинній площині.

Було вивчено можливість детектування гарячих фрагментів у протозоряних дисках прямим методом за допомогою інтерферометричних спостережень Великої міліметрової антени Атакама (ALMA).

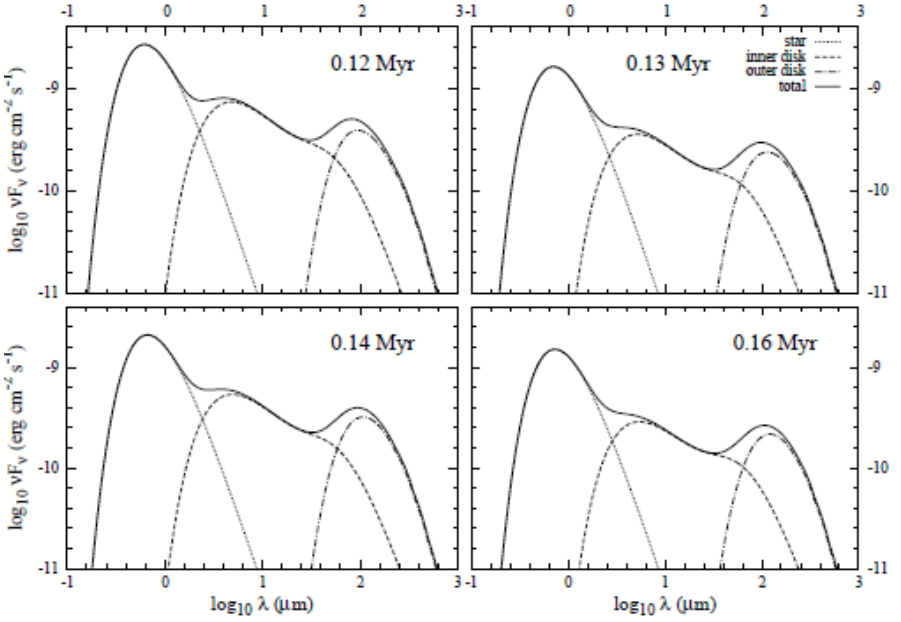


Рис. 19. Те ж саме що на рис. 18, але для системи з диском що не фрагментує, з початковою масою 0.74 M_{Sun} та віком 0.12-0.16 млн. років.

Для цього, по-перше, були згенеровані синтетичні зображення, використовуючи метод розроблений для розрахунків PEC, але замість сумування по усім просторовим положенням, було розраховано інтенсивність кожного пікселя декартових координат з просторовим розділенням 5 а.о. Потім використовуючи програмне забезпечення CASA (http://casa.nrao.edu/) були змодельовані синтетичні зображення для 1 години спостережень ALMA на частотах 230 та 345 ГГц.

Результати моделювань синтетичних зображень для системи з фрагментуючим диском (розташованого у картинній площині на відстані 250 пк від спостерігача) наведені на рис. 20 і 21 у логарифмічній та лінійній шкалах, відповідно. На обох рисунках: перший ряд — це карти поверхневих густин (чорні стрілочки вказують на наймасивніший фрагмент диску), середній та нижній ряди — це синтетичні зображення з ALMA на частотах 230 та 345 ГГц, відповідно. З впевненістю можна говорити про те що більшість фрагментів, а також спіральні структури, можуть бути детектовані з використанням всього однієї години інтегрованих спостережень з ALMA.

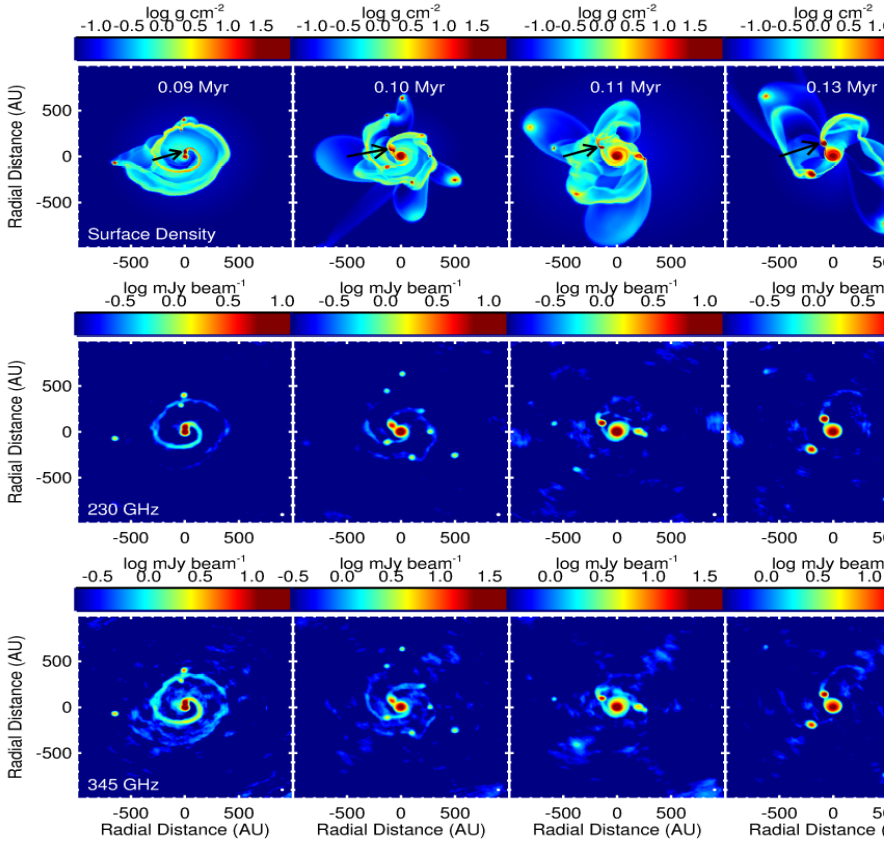


Рис. 20. Верхній ряд — карти поверхневих густин розміром 2000 на 2000 а.о. у різному віці з моменту формування протозорі (Захожай та ін. 2013). Чорні стрілочки вказують на наймасивніші фрагменти в системі. Середній та нижній ряди — синтетичні зображення з ALMA на частотах 230 та 345 ГГц, відповідно. Розмір пучка вказано білим кольором у нижньому лівому куті кожного зображення

Винятком є фрагмент системи у віці 0.09 млн років, який розташований на відстані менше ніж 50 а.о. від протозорі: він зливається з піком від центральної протозорі. Перенасичену лінійну шкалу доцільно використовувати для детектування менш масивних фрагментів. На рис. 21 жовтими стрілочками вказано на наймаломасивніші фрагменти (2.0-3.5 M_{Jup}), які дозволятиме детектувати ALMA.

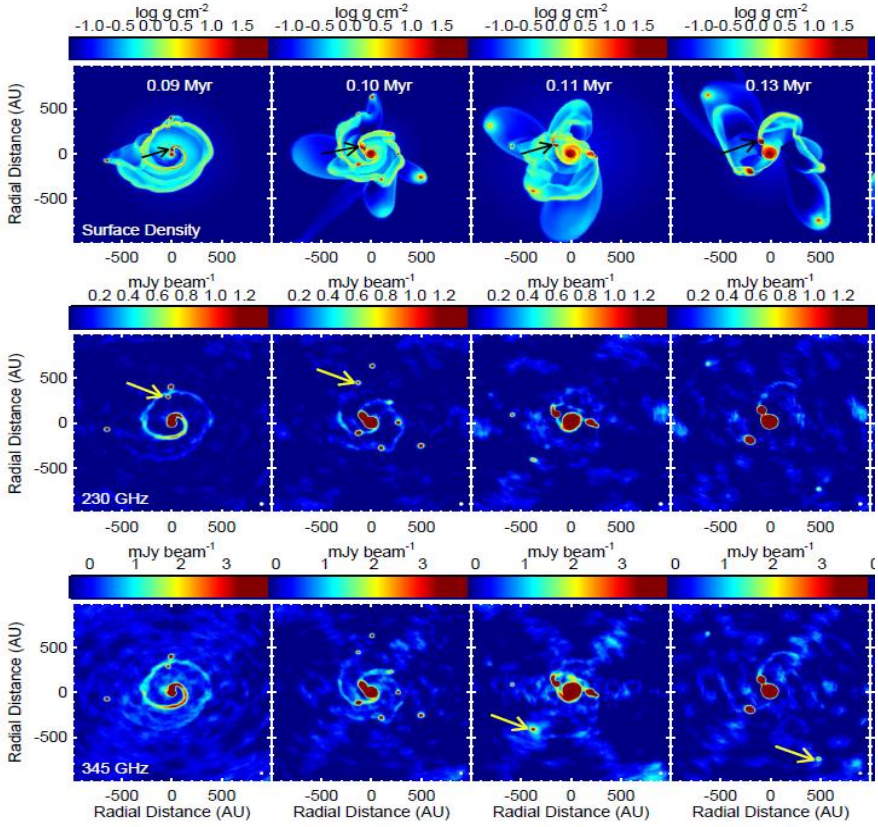


Рис. 21. Те ж саме що на рис. 20, але зображення представлені у лінійній шкалі.

9. СПІВПРАЦЯ З НАЦІОНАЛЬНИМ ТЕХНІЧНИМ УНІВЕРСИТЕТОМ УКРАЇНИ «КПІ» ТА НАЦІОНАЛЬНИМ УНІВЕРСИТЕТОМ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» ЩОДО ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІН СТРАТОСФЕРНОГО АЕРОЗОЛЮ НА ПОГОДУ І КЛІМАТ ЗЕМЛІ

9.1. Актуальність проблеми.

Клімат Землі змінюється за рахунок нелінійної взаємодії процесів, що протікають в атмосфері, океані, кріосфері, біосфері, на поверхні континентів, а також за рахунок зовнішніх впливів. Щоб зрозуміти причини цих змін і створити умови для їхнього прогнозування, дуже важливо проводити

неперервні й скоординовані спостереження клімату. Такий моніторинг вимагає інтегрального підходу до організації спостережень за атмосферою, океаном і поверхнею Землі. Тому глобальна система спостережень є комплексною і складається із засобів спостережень, розміщених на різних континентах, морських судах, плаваючих буях, зондах, літаках, супутниках тощо. У рамках існуючих міжнародних програм ведеться велика робота з організації збору цих даних, їхньої архівації і забезпеченню вільного доступу до них [http://www.global-climate-change.ru/index.php/ru/issledovaniya-klimata/39-data-about-climate-research-in-rf/96-2010-10-27-09-48-30].

Відомо, що варіації погоди й клімату на Землі залежать від температурного балансу планети, викликаного надходженням випромінювання від Сонця й випроміненого Землею в космічний простір. Зміни коефіцієнтів пропускання атмосфери і відбивання (в тому числі поверхнею Землі) є визначальними в порушенні цього балансу. Варіації газової та аерозольної складових атмосфери також вносять значний вклад у зміну цього балансу. Особливе місце в атмосфері займає стратосфера і її озоновий шар, що захищає Землю від жорсткого ультрафіолетового випромінювання. У 1985 р. вперше було відмічене різке зменшення концентрації озону в стратосфері над Антарктикою; це явище одержало назву «озонової діри». Вміст озону в атмосфері менший 0.0001%. Однак саме він повністю поглинає жорстке ультрафіолетове (УФ) сонячне випромінювання на довжині хвиль $\lambda<280$ нм і значно ослабляє вплив так званого УФ-Б, що також завдає серйозної шкоди живим організмам.

Так, зменшення концентрації озону на 1% веде до збільшення інтенсивності жорсткого ультрафіолету на поверхні Землі на 2%. Руйнування озону відбувається через вплив ультрафіолетової радіації, космічних променів, сполук азоту, хлору, брому, фторхлорвуглеводнів тощо. Діяльність людини також призводить до руйнування озонового шару: реактивна авіація, запуски космічних ракет, викиди шкідливих речовин і тепличносприятливих газів. Дослідження цих явищ дасть можливість побудувати модель утворення й руйнування молекул озону над різними ділянками земної кулі, що дозволить більш вірогідно визначати механізм появи озонових дір, а, отже, і розробляти й приймати на Міжнародному рівні більш обґрунтовані рішення щодо запобігання цьому катастрофічному явищу. Найбільш інформативними тут є супутникові методи вивчення. Їх перевагою є систематичність і довгостроковість дослідження.

Важливу роль у формуванні теплового режиму і потужності озонового шару відіграє стратосферний аерозоль (на висоті більше 30 км). Про їх оптичну товщину на цих висотах відомо завдяки спектрофотометричним дослідженням. У той же час залишається маловивчена його природа (дійсна частина показника заломлення) і функції розподілу часток за розмірами. Серед дистанційних методів поляризаційні вимірювання дозволяють

найбільше коректно визначити ці характеристики. Головна астрономічна обсерваторія НАН України разом з Національним технічним університетом України «КПІ» та Національним університетом «Львівська політехніка» протягом 2005 - 2014 р. ведуть спільні роботи зі створення бортових поляриметрів для дослідження стратосферного аерозолю з орбіти штучного супутника Землі (ШСЗ). У результаті було створено макет бортового малогабаритного поляриметра для дослідження стратосферного аерозолю з орбіти ШСЗ.

9.2. Як все починалось: Український молодіжний супутник УМС-1.

Оскільки аерозоль відіграє важливу роль у проблемі глобального потепління, то вже у 1990-тих рр. для вивчення його характеристик НАСА запропонувало використовувати поляриметричні спостереження Землі з борту штучного супутника Землі (ШСЗ) на довжинах хвиль більшк 0,3 мкм, де поляриметричні характеристики формує не лише атмосфера, але й поверхня. О.В, Мороженко, який з такою проблемою стикався при аналізі поляризаційних спостерень Марсу, вказав на неспроможність спостережень у цій ділянці спектру для отримання достовірних оцінок параметрів аерозолю. Тому у 2004 р. він запропонував космічний експеримент (КЕ) «Вивчення фізичних характеристик стратосферного аерозолю на висотах більше 30 км в атмосфері Землі» за допомогою ультрафіолетового поляриметра на довжинах хвиль менше 0,3 мкм.

Відзначимо, що вибір цієї ділянки спектру зумовлювався тим, що тут потужний озоновий шар практично повністю поглинає падаюче сонячне випромінювання. А тому повністю відсікає внесок не лише поверхні, але й тропосферного аерозолю на поляризаційні характеристики відбитого Землею випромінювання. Тому спостережні значення ступеня поляризації відбивної здатності формуються лише газово-аерозольним середовищем на висотах більше 30 км; саме через це вони придатні для визначення фізичних характеристик цього середовища.

В той час Національний центр аерокосмічної освіти молоді ім. О.М. Макарова (НЦАОМ) разом з НКА України оголосили конкурс молодіжних проектів в рамках тематики «Український молодіжний супутник УМС-1». У відділі ми вирішили залучити молодь і прийняти участь у цьому заході. В першу групу цієї тематики входили: Мороженко О.В. – керівник і ідеолог теми; Неводовський П.В. – відповідальний виконавець; і члени групи: Неводовський Є. П., Фоменко В.О., Синявський І.І., Костогриз Н.М. Цією групою за встановленою формою були підготовлені відповідні пропозиції проекту до постановки КЕ. Конкурс проводився в декілька етапів за різними напрямками: платформа УМС-1, корисне навантаження УМС-1, наземний сегмент УМС-1, системи керування та збору інформації УМС-1. Всього було

подано більше 100 проектів, а через півроку до захисту дійшли 24 проекти, з яких 5 вийшли у фінал. Фінальній захист проектів проводився на базі Національного центру управління та випробування космічних засобів (НЦУВКЗ). Експертами виступали висококваліфіковані представники НКА України, ІКД НАН України, КБ «Південне». Очолював цей захід О.П. Федоров, перебуваючи на посаді Начальника управління космічних наукових досліджень та телекомунікаційних систем НКА України.

Рис. 22. Український молодіжний супутник УМС-1

Від ГАО НАН України з доповідями представлення та захисту проекту «Вивчення фізичних характеристик стратосферного аерозолю на висотах більше 30 км в атмосфері Землі» під шифром «Аерозоль» виступили Мороженко О.В. (науковий керівник проекту) та Неводовський П.В. (відповідальний виконавець проекту). За напрямком «корисне навантаження для УМС-1» ми зайняли перше місце і отримали Грамоту та медаль від НКА України і 3 заохочувальні путівки на школу-семінар з космічних досліджень для молоді, куди було направлено Неводовського Є. П., Костогриз Н.М. і Синявського І.І. Також було отримано «Добро» від НКА України та НЦАКМ України на виконання цього проекту.

Розуміючи складності та труднощі, які виникнуть при виконанні космічного проекту, ми почали формувати молодіжний авторський колектив, який би міг виконати таку складну задачу. В цей час Мороженко О.В. запропонував Неводовському П.В. очолити цей напрям роботи, а сам залишився головним консультантом. Після багатьох консультацій і нарад склався колектив з представників трьох установ: ГАО України (Неводовський П.В.), Національний технічний університет України «КПІ» (Гераймчук М.Д., Збруцький О.В.) та Національний університет «Львівська політехніка» (Івахів О.В.). Це дало можливість забезпечити залучення до роботи як висококваліфікованих фахівців, так і студентську молодь.

На офіційному рівні все це було підкріплено укладанням договорів про науково-технічну співпрацю між Головною астрономічною обсерваторією НАН України (відділ фізики планетних систем, координатор с.н.с., к.ф.-м.н.

Неводовський П.В.), Національним технічним університетом України «КПІ» (приладобудівний факультет, координатор зав. каф. ПБФ д.т.н. проф. Гераймчук М.Д. і факультет аерокосмічних систем, координатор д.т.н. проф. Збруцький О.О.) та Національним університетом «Львівська політехніка» (кафедра «прилади точної механіки», координатор зав. каф. ПТМ д.т.н. проф. Івахів О.В.)

Рис. 23. Учасники фінального захисту конкурсних проектів УМС-1 в Євпаторійському центрі далекого космічного зв'язку. 2004 р.

9.3. Розробки апаратури

9.3.1. Лабораторний зразок

На першому етапі спільно було створено лабораторний макет ультрафіолетового поляриметра (УФП). Велика увага при його розробці була приділена вибору фотоприймача. Теоретичні розрахунки показали, що цей приймач повинен мати достатньо великий динамічний діапазон, високу чутливість до корисного сигналу та бути «сонячно сліпим». Також космічна галузь накладала обмеження на масо-габаритні параметри приладу. Тому після проведення детальних розрахунків та аналізу бази даних на існуючі приймачі за базовий приймач було вибрано японський фотопомножувач R1893 фірми «HAMAMATSU» (Японія), який є сонячно-сліпим (160-320 нм), має високий коефіцієнт підсилення $1{,}5 \cdot 10^5$, малі масо-габаритні розміри. Але для придбання імпортного фотоприймача R1893 окрім виділення немалих коштів на прилад, слід було ще й провести тендер на його закупку. Гроші нам допоміг отримати директор ГАО НАН України академік Я.С. Яцків,

включивши нашу тему, як розділ великої космічної тематики ДКАУ під шифром «Астро».

Умови проведення тендеру на придбання передбачали проведення низки процедур, щодо пошуку конкурентних фірм, які можуть здійснити таку поставку, оголошення і проведення конкурсу вщодо виконання роботи на таку поставку тощо. Вдалося це зробити аж черех 2 роки.

На базі закуплених унікальних комплектуючих нами було розроблено і створено блок реєстрації корисного сигналу для нашого ультрафіолетового поляриметра (розробники Неводовський П.В., Фоменко О.О., Неводовський Є.П. Дєлєц О.С., ГАО НАН України)

Рис. 24 Монтаж та наладка каналу реєстрації корисного сигналу

Представники Національного технічного університету «КПІ» (Зінченко В.П., Гераїмчук М.Д., Зінченко С.В.) запропоновали для розробки системи збору, обробки та передачі інформації (СЗОПІ) застосувати бортовий комп'ютер РС-104. Такий прилад було закуплено, налагоджено та установлено в нашій апаратурі. Конструкцію оптико-механічного блоку (ОМБ) приладу розробляв Міндюк Я.Л. У результаті було розроблено і виготовлено лабораторний зразок двоканального УФП за схемою, показаною на рис. 25.

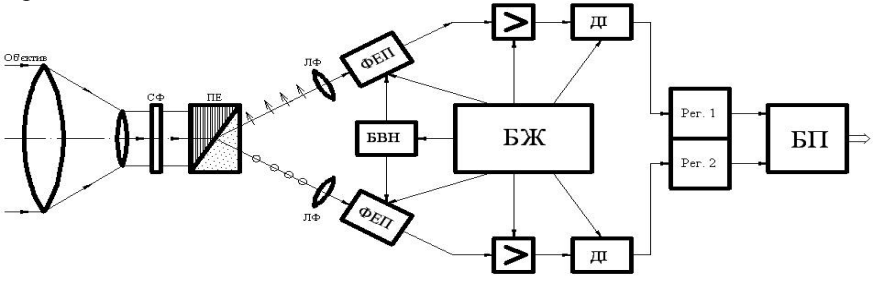


Рис. 25. Функціональна схема двоканального статичного поляриметра: СФ – світлофільтр; ПЕ – елемент поляризації; ЛФ – лінза Фабрі; ФЕП - фотопомножувач; ДІ – дискримінатор імпульсів; Рег.1, Рег.2. – регістри – лічильники; БВН – блок високої напруги; БЖ – блок живлення; БП – блок прийому та перетворення інформації.

Він дав змогу перевірити працездатність роботи, ідеологію приладу і проаналізувати роботу окремих вузлів приладу.

Його розробниками були: Неводовський П.В., Фоменко О.О., Неводовський Є.П., Дєлєц О.С.– ГАО НАН України; Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Зінченко С.В., Міндюк Я.Л., Штефюк Г.В., Харитонов Д.В. - НТУ України «КПІ»).

9.3.2. Макет бортового малогабаритного ультрафіолетового поляриметра (БМУФП)

Надалі авторський колектив розпочав другий етап розробки УФП. Аналіз досліджень створеного лабораторного макету двоканального УФП дозволив підготувати для нього нову досконалішу схему (розробник Неводовський П.В. – ГАО НАН України). Оптична схема була розроблена представниками НТУ України «КПІ» (Куреньов Ю.П., Сергунін В.Б.) Нова схема потребувала розробки обертового поляризаційного модулятора. Він був створений на базі мініатюрного п'єзо-двигуна з порожнистим ротором (розробник Петренко С.Ф. - НТУ України «КПІ»). Також велика робота була проведена з розробки і створення блоку керування цим модулятором у різних режимах (розробники Івахів О.В., Гринько Ю. Б., НУ «Львівська політехніка»). Конструкцію ОМБ УФП розробили Сергунін Б.В., Гераїмчук М.Д., НТУ України «КПІ». Ще одним напрямком цієї роботи була розробка та дослідження опорного стабільного джерела випромінювання, необхідного для калібрування та юстування УФП (розробник Генкін О.М., представник НТУ України «КПІ»). У результаті такої кропіткої і багатопланової роботи вдалося створити діючий макет бортового малогабаритного ультрафіолетового поляриметра БМУФП (рис. 26).

БМУФП - це точковий одноканальний ультрафіолетовий поляриметр із обертовим поляризаційним елементом.

Рис. 26. Макет малогабаритного космічного поляриметру УФП

Тут у якості поляризаційного елементу використається призма Глана, яка обертається мініатюрним п'єзодвигуном. Приймачем випромінювання є «сонячно-сліпий» малогабаритний фотопомножувач R1893 фірми «HAMAMATSU» що працює в режимі підрахунку фотонів.

Розроблена схема й компактність конструкції дозволила створити космічний прилад вагою 0,8 кг і об'ємом оптико-механічної частини - 0,33 л, що дозволяє встановлювати його на будь-який мікросупутник. Зараз проводяться роботи щодо його налагодження та дослідження створеної апаратури.

9.3.3. Супутник – поляриметр (пошукова тема)

В 2006 р. НТУ України «КПІ» почав розробку свого університетського мікросупутника (МС) з терміном аванпроекту до кінця 2006 р. Листом академіка НАН України М.З. Згуровського на ім'я академіка НАН України Я.С. Яцківа нам було запропоновано прийняти участь у цій роботі.

Концепція побудови МС в НТУ України «КПІ» кардинально відрізнялась від тієї, яку у свій час запропонував Дніпропетровськ для УМС-1. Тому у нас виникла ідея створити космічний поляриметр як єдиний прилад, не поділяючи його на платформу і корисне навантаження, такий собі «супутник-поляриметр». Суттєвою перевагою такого приладу, який розроблявся під одну задачу, була можливість об'єднати однакові за функцією вузли. Це дозволяє зменшити енерго-масо-габаритні характеристики приладу, а також більш диференційовано підходити до розробки окремих вузлів, підвищуючи їх якість за рахунок обмеження непотрібних нам функціональних можливостей. Участь у цій роботі давала нам змогу об'єднати зусилля в зв'язку з обмеженими економічними ресурсами для створення цього приладу і на практиці пройти весь цикл космічного експерименту. Така цікава робота була затверджена в ГАО НАН України як пошукова науково-дослідна робота під назвою «Розробка технічних пропозицій на УФ-поляриметр для мікросупутника НТУ України „КПІ"».

Виконавці теми від ГАО НАН України: Неводовський П.В., Мороженко О.В., Неводовський Є.П.; від НТУ України: Збруцький О.О., Рижков Л.М., Щербіна Є.С. Нами була показано можливість створення такого приладу як «супутник-поляриметр КПІ» і підготовлено відповідні технічні пропозиції. Протягом 2006 р. така робота була виконана в повному обсязі.

9.3.4. Бортовий малогабаритний панорамний поляриметр

Перспективною була робота з розробки бортового малогабаритного панорамного поляриметра (БМПП). Метою цієї роботи було створити

апаратуру, здатну з борту ШСЗ отримувати поляризаційні зображення у широкому спектральному діапазоні.

Вперше ця робота була подана нами на конкурс проектів, який відбувався в Національному центрі аерокосмічної освіти молоді ім. О.М. Макарова (НЦАОМ) м. Дніпропетровськ у рамках конференції «Людина і космос» у 2009 р. За цю розробку авторський колектив проекту «Вивчення фізичних характеристик атмосферного аерозолю за допомогою панорамного космічного поляриметра» був удостоєний грамоти (керівник проекту - Неводовський П.В.; головний консультант - Мороженко О.В.; виконавці від ГАО НАН України - Неводовський Є П., Пєтухов В. М., Дєлєц О.С., Фоменко О.О., Карбівський В.Л.; від НТУ України «КПІ» - Гераїмчук М.Д., Збруцький А.В. (рис. 27.)

Рис. 27. Зліва - направо: Грамота за активну участь у конкурсі проектів молодіжного супутника (2008-2009), два Патенти на корисну модель, Інтелектуальна власність ГАО НАН України і Національного технічного університету «КПІ» - автори Гераїмчук М.Д., Неводовський П.В., Неводовський Є.П.

В процесі роботи з розробки лабораторного двоканального УФП виникло кілька проблем, розв’язання яких вилилось у написання та захисту двох патентів. Обидва патенти відносяться до фундаментальної тематики «Космічні дослідження атмосфери Землі». В рамках цієї роботи при розробці двохканального статичного вузькосмугового фільтрового поляриметра виникла проблема узгодження потоків в залежності від зміни довжини хвилі у вузькому спектральному діапазоні. Ця задача була вирішена завдяки розробці спеціального пристрою спектральної селекції, яка і була захищена патентом.

Пат. України на корисну модель № 61989 МПК G01J 1/04 (2006.01). Статичний вузько смуговий фільтровий поляриметр / Гераїмчук М.Д., Неводовський П.В., Неводовський Є.П. // Заяв. 29.12.2010; Опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15 (рис. 27, посередині)

Далі при розробці космічної апаратури для дистанційного дослідження атмосфери з орбіти Землі виникла необхідність створення малогабаритного бортового ультрафіолетового поляриметра, який би за своїми масогабаритними властивостями узгоджувався з технічними характеристиками мікросупутників. Рішення одного з варіантів при розробці цієї складної задачі також було підтверджено отриманням патенту (рис. 27, праворуч).

Пат. України на корисну модель № 64267 МПК G01J 1/04 (2006.01). Бортовий статичний поляриметр / Гераїмчук М.Д., Неводовський П.В., Неводовський Є.П. // Заяв. 29.12.2010; Опубл. 10.11.2011, Бюл. № 21

Обидва патенти були отримані як інтелектуальна власність ГАО НАН України і Національного технічного університету «КПІ» в співвідношенні 50%x50%.

При розробці бортового малогабаритного ультрафіолетового поляриметра в межа тематики було проведено і проаналізовано багато розробок різних вузлів і блоків та накопичено щодо розробки такої апаратури. Тому природно, що провідні фахівці ГАО НАН України, НТУ України «КПІ» та НУ «Львівська політехніка», які були залучені до цієї роботи, виклали свій досвід у вигляді відповідної монографії, яка стала підгрунтям для розробки наступних аналогічних приладів (*М.Д.Гераїмчук, О.М.Генкін, О.В.Івахів, Ю.П.Куреньов, О.В.Мороженко, П.В.Неводовський, С.Ф.Петренко. ЕЛЕМЕНТИ І СИСТЕМИ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. Монографія, К.: ЕКМО. 2009.- 188 с.*).

9.3.5. Співробітництво із Пекінською компанією сучасних аерокосмічних технологій Китайської Народної республіки

У 2011 р. каф. ПБ Національного технічного університету України «КПІ» розпочала низку переговорів з Пекінською компанією сучасних аерокосмічних технологій (Beijing Aerospace Times Optical-Electronic Technology Co., Ltd). Їх метою було створення спільного навчально-наукового центру сучасного приладобудування «Нові датчики і вимірювальні системи» та проведення організації перепідготовки співробітників даної компанії в галузі сучасного приладобудування й інформаційних технологій на основі робіт кафедри приладобудування, ознайомлення з можливостями навчання китайських аспірантів і студентів, проведення переговорів про науково - технічне співробітництво. ГАО НАН України (Неводовський П.В., Відьмаченко А.П., Берцик П.П.) також приймала участь в цих заходах і

внесли свою частку при їх проведенні. Так, у процесі переговорів директор даної компанії Ванг Вей виявив підвищену зацікавленість щодо можливої підготовки спільного проекту між Пекінською компанією сучасних аерокосмічних технологій, ГАО НАН України та НТУ України «КПІ» з контролю забруднення навколишнього середовища над територією Китаю за допомогою мікросупутників поляриметричним методом. У 2012 - 2013 рр. факультет аерокосмічних систем Національного технічного університету України «КПІ» та ГАО НАН України приймали делегації Шеньянського аерокосмічного університету Китайської Народної Республіки. Неводовський П.В. зробив відповідну презентацію та прочитав курс лекцій «Оптичні дослідження космічного простору» для представників делегацій.

За час спільної роботи Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Національний технічний університет України «КПІ» і Національний університет «Львівська політехніка» спільно приймали участь конференціях, виставках, семінарах різних рівнів:

1) Постійно діюча Міжнародна виставка «Технопарк Національного технічного університету України «КПІ»»: А) УФ - поляриметр – 2007 р. Б) Швидкодіючий світлодіод з широким спектром та високою температурною і часовою стабільністю - 2010р.

2) Харбін (Китайська Народна Республіка): УФ-поляриметр - 2009р.

3) Виставка на міжнародній конференції:«Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» 2008 р. - Проект «Мікросупутник Землі з дослідження стратосферного аерозолю»

Рис. 28 Косуль Н.М., Гераймчук М.Д., Неводовський П.В. на виставці на міжнародній конференції «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» у 2008 р. Представлення проекту «Мікросупутник Землі з дослідження стратосферного аерозолю».

З 2005 р. проводяться практично щорічні спільні семінари за темою: «Вивчення впливу змін стратосферного аерозолю на погоду та клімат Землі». Щорічно по кілька студентів НТУ України «КПІ» проходили виробничу практику на базі ГАО НАН України, а також захищали Бакалаврські і магістерські роботи за тематикою космічного приладобудування.

10. МІЖНАРОДНІ ЗВ'ЯЗКИ. НАУКОВО-ОРГАНІЗАЦІЙНА РОБОТА. НАУКОВІ КОНФЕРЕНЦІЇ, З'ЇЗДИ, СИМПОЗІУМИ.

Зрозуміло, що в науці, а надто в астрономії, практично неможливо вести плідну наукову роботу без достатніх контактів із зарубіжними колегами. Тому протягом усього часу існування відділу його співробітники в міру сил та можливостей намагались підтримувати зв'язки зі своїми зарубіжними колегами. Так, значною подією у науковому житті відділу став Міжнародний симпозіум з фізики Місяця та планет, що відбувся в Києві (жовтень 1968 р.). На ньому були присутні 19 іноземних науковців з США, Англії, Франції, Болгарії, Польщі та Японії. Це дозволило познайомитись особисто з такими провідними планетознавцями як О. Дольфюс (Франція), Б. Хапке, Т. Оуен, У. Ірвін (США) та ін. Усього було заслухано приблизно 90 доповідей та повідомлень.

Деякі зарубіжні науковці не обминали можливості відвідати ГАО. Так, неодноразово тут бували такі відомі астрофізики, як Т. Герельс (США) та О. Дольфюс. В 1981 р. на короткий час приїздило подружжя науковців з США Луїз та Ендрю Янг (вони уславились, зокрема, тим, що вперше висунули гіпотезу, яка пізніше підтвердилась, що хмари на Венері складаються з водного розчину сірчаної кислоти). У 1991 р, був в ГАО й виступив з лекцією американський астрофізик М. Вульф. А останнім часом вже неодноразово приїздив американський астрофізик українського походження Теодор Костюк, з яким встановились плідні дружні стосунки.

Особливо тісні та дружні відносини склалися між Е.Г. Яновицьким та німецьким астрофізиком, визначним спеціалістом з теорії переносу поляризованого випромінювання Г. Домке. Вони неодноразово провадили взаємні ділові візити, наслідком чого стала публікація спільних наукових робіт.

Про певне міжнародне визнання наукового доробку відділу свідчать так факти. О.В. Мороженко за визнанням Кембріджського міжнародного біографічного центру (Англія) став «Людиною року» («Man of Yeaг»), 1992 р. У 1990 р. М.І Міщенко був обраний членом Академії електромагнетизму США (терміном на 5 років).

Він же з 1991 р. став членом редколегії міжнародного журналу "Journal of Electromagnetic Waves and Applications", а Е.Г. Яновицький з 1992 р. обіймав таку ж посаду у міжнародному журналі "Journal of Quantitative

Spectroscopy and Radiative Transfer". Нарешті, у 1994 р. Л.О. Колоколова обрана дійсним членом Нью-Йоркської Академії Наук.

Значне місце в діяльності відділу зайняла робота з створення в Республіці Болівія спостережної бази, а далі — і спостереження там. Був одержаний великий обсяг спостережних даних, який став підґрунтям для низки подальших наукових публікацій. Проте співробітники, що працювали в Болівії, не тільки проводили спостереження, але й активно контактували з тамтешньою науковою громадськістю, приймали екскурсантів, читали науково-популярні лекції, виступали по радіо та на телебаченні і т.п. За такого роду активну діяльність А. П. Відьмаченко був обраний членом-кореспондентом Академії наук Республіки Болівія (1987 р.)

Практично одразу ж після обрання в 1975 р. О.В. Мороженка Головою Робочої групи Астроради СРСР „Планети земного типу" ним була зініційована робота з розробки Всесоюзної Програми „Планетний патруль СРСР", яка пізніше була доопрацьована і в 1985 р. затверджена Бюро загальної фізики і астрономії АН СРСР як Всесоюзна комплексна програма досліджень планет і астероїдів наземними засобами на період 1986-2000 рр. Незважаючи на те, що ці програми не були підкріплені відповідним фінансуванням, однак вони стимулювали розробку і виготовлення малої серії описаного вище Астрономічного спектрополяриметра, закупки кількох 60-сантиметрових рефлекторів фірми Карл Цейсс, які були встановлені на горі Майданак (Республіка Узбекистан), на піці Терскол в Приельбруссі та в Республіці Болівія на обсерваторії Санта Анна. Крім того О.В. Мороженко став ініціатором проведення Всесоюзних нарад «Поляриметричний метод в астрофізиці». Було проведено чотири наради: селище Кацивелі (Крим) (1983 р.), м. Гагри (Грузія, 1985 р.), селище Абастумані, Абастуманська астрофізична обсерваторія АН Грузії (Грузія) (1987 р.), і нарешті, Ленінград (Пулково) (1990 р.). Такі наради дозволили до деякої міри згуртувати науковців, що займалися поляризаційними дослідженнями, й виробити певну стратегію подальшої роботи.

У 2003 р. Головна астрономічна обсерваторія та КрАО виступили від України співорганізаторами проведення під егідою НАТО з 20.09.03 по 03.10.03 в м. Ялта міжнародної наукової конференції "Поляриметрія при дистанційних вимірюваннях" (NATO Advanced Study Institute on Photopolarimetry in Remote Sensing" http://www.giss.nasa.gov/~crmim/Ukraine/k2003.htm) та з 04.10.03 по 10.10.03 в м. Києві міжнародної робочої зустрічі "Техніка та прилади для дистанційних вимірювань: міжнародне співробітництво" (Workshop on "Remote Sensing Techniques and Instrumentation: International Cooperation" - http://www.giss.nasa.gov/~crmim/Ukraine/kiev.htm). Активну участь у її підготовці та проведенні взяли участь і співробітники відділу А.П. Відьмаченко та Ж.М. Длугач.

Треба також зазначити, що на протязі вже багатьох років триває плідна співпраця Ж.М. Длугач з бувшим співробітником відділу, а нині провідним науковим співробітником Годдардівського інституту космічних досліджень НАСА у Нью Йорку М.І. Міщенко. Результати спільних досліджень, викладених вище, широко відомі в світі.

Можливо (а швидше - напевне), ми не були цілком об'єктивними при розстановці наголосів при викладенні тих чи інших наукових досягнень відділу за роки його існування, оскільки ми були безпосередніми свідками й учасниками усіх подій. Єдине, на що доводиться розраховувати, так це на те, що час усе поставить на належні МІСЦЯ.

11. ОСНОВНІ ДОСЯГНЕННЯ ВІДДІЛУ

- Розроблено теорію переносу випромінювання в неоднорідних атмосферах (Яновицький Е.Г.) 1995 рік – у видавництві ГАО НАН України вийшла друком монографія Е.Г.Яновицького «Рассеяние света в неоднородных атмосферах». 1997 рік – у видавництві „Springer" вийшов англомовний переклад монографії Е.Г.Яновицького «Рассеяние света в неоднородных атмосферах» (рис. 29, ліворуч)
- Із дослідження варіацій оптичних характеристик і фізичних параметрів атмосфер планет-гігантів вперше виявлено існування сезонної перебудови в атмосферах Юпітера та Сатурна, прояв Хейлівського магнітного циклу Сонячної активності і наявність вікових змін абсолютної зоряної величини Юпітера з періодом 180 років (Відьмаченко А.П.) Отримано авторське свідоцтво на винахід ахроматичної фазової пластинки (В.А. Кучеров, В.С. Самойлов, О.І. Бугаєнко) (рис. 29, справа).
- Створено перший у світі електрополяриметр з підрахунком фотонів (О.І. Бугаєнко, Л.А. Бугаєнко) (рис. 1)

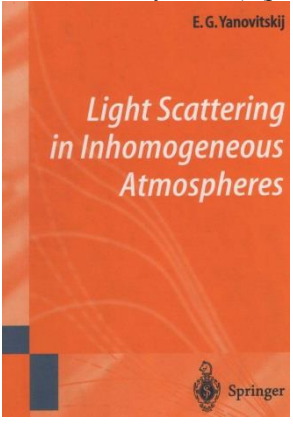
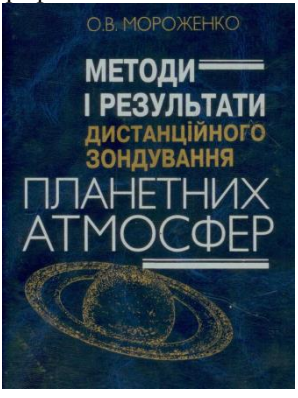
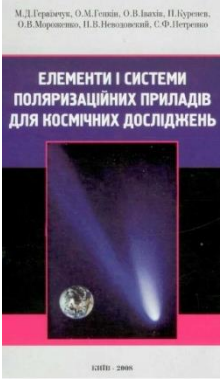


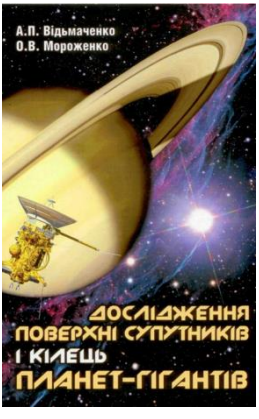
Рис. 29.

- Створено двоканальний спектрополяриметр - "Планетний патруль" (рис. 2)
- Доведено існування газоподібного аміаку в атмосфері Сатурна і встановлена наявність орієнтованих частинок у верхніх шарах приекваторіальних регіонів Сатурна (О.І.Бугаєнко, О.В.Мороженко)
- Створено лабораторний вимірювач вектора Стокса випромінювання, відбитого шорсткими поверхнями (рис. 5)
- Зареєстровано асиметрію хмарових шарів Венери (Яновицький Е.Г., Клименко В.М.)
- Зареєстровано припливи в атмосфері Нептуна, викликані найближчим супутником - Тритоном (О.В. Мороженко, М.С. Дементьєв)
- Показано розрахунками, що переміщення в атмосфері планет-гігантів газу і аерозолю з вертикальною швидкістю w=(0.1-0.5) м/с визначає потужність видимих хмар і тому впливає на їх характеристики яскравості (А.П. Відьмаченко)
- Запропонована і реалізована на практиці методика спостережень та їх обробки, котра дозволила вперше зареєструвати власні коливання воднево-гелієвих атмосфер Юпітера (Т=103 та 142 хв.) і Сатурна (Т=137 та 179 хв.) (Відьмаченко А.П.)
- Дано пояснення унікальної поведінки яскравості та поляризації, що спостерігається для низки безатмосферних тіл Сонячної системи. Використано ефект когерентного зворотного розсіяння для пояснення формування опозиційного ефекту яскравості у деяких тіл Сонячної системи (М.І. Міщенко, Ж.М. Длугач)
- На основі чисельно точного розв'язку рівнянь Максвелла підтверджено можливість існування фотометричного і поляризаційного опозиційних ефектів, викликаних ефектом когерентного зворотного розсіяняня, в середовищах з достатньо великою щільністю упаковки частинок, що дозволяє пояснити результати спостережень, отримані для ряду високоальбедних безатмосферних тіл Сонячної системи (зокрема, астероїдів 44 Ніса і 64 Ангеліна, супутника Європа, кілець Сатурна) (Ж.М. Длугач, М.І. Міщенко).
- Створено комплекси обчислювальних програм для розрахунку характеристик одноразового розсіяння світла частинками різної форми, розв'язку скалярного та векторного рівнянь переносу випрмінювання в середовищах різної оптичної товщини та розрахунку характеристик, обумовлених когерентним зворотним розсіянням (М,І. Міщенко, Ж.М . Длугач).
- За участю співробітників відділу міжнародною командою дослідників відкрито екзопланету WASP-10C (В.М. Крушевська)

- За даними багаторічних спостережень тіл Сонячної системи в багатьох обсерваторіях світу були відкриті нові ефекти і вперше визначені деякі фізичні характеристики аерозолю в атмосферах Марса, Юпітера і Сатурна (Мороженко О.В.)
- Науковці відділу брали участь в обробці матеріалів, одержаних за допомогою космічних апаратів «Марс-3» та «Марс-5»
- Створено макет малогабаритного бортового космічного поляриметра УФП для дослідження аерозолю земної стратосфери (рис. 24) (Неводовський П.В., Гераїмчук М.Д.).
- За темою «Розробка УФ-поляриметра» отримано два патенти на винахід статистичного вузько смугового фільтрового поляриметра та бортового статичного поляриметра (рис. 27) (Неводовський П.В., Гераїмчук М.Д., Неводовський Є.П.)
- У 2004-2014 рр. співробітниками відділу підготовлено і опубліковано чотири монографії і кілька навчальних посібників (рис. 30)







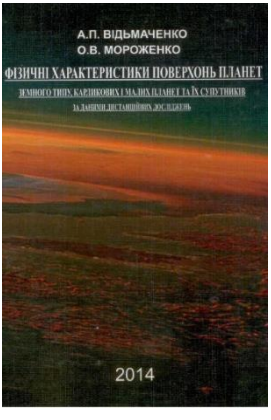


Рис. 30

12. ПОТОЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

• Розроблено ефективний і простий метод дистанційного дослідження параметрів атмосфер планет-гігантів, який дозволяє:

1) визначати кількість поглинаючого газу (Nl) у надхмаровому шарі по вимірюванню ступеня лінійної поляризації в центрі смуги поглинання (P_v) і в неперервному спектрі та залишкової інтенсивності в центрі смуги поглинання (R_v) (Мороженко О.В., Міщенко М.І., Кучеров В.А.);

2) виявляти відхилення реальної структури хмар планет-гігантів від умови однорідності із аналізу спостережних даних про розподіл інтенсивності в контурах смуг поглинання метану (Мороженко О.В.)

• Показано, що основною причиною зменшення концентрації стратосферного озону може бути збільшення ослаблення аерозолями у верхніх шарах земної атмосфери (Мороженко О.В., Шавріна А.В., Велесь О.А.)

• Висунуто та обґрунтовано гіпотезу, що глобальне потепління на Землі зумовлене збільшенням не лише кількості тепличносприятливих газів, але й забрудненості вод світового океану (Мороженко О.В.)

• Розроблено комплексну програму автоматичного визначення характеру зміни оптичної товщини аерозолю та відношення оптичних товщин аерозолю і газу з глибиною в атмосферах планет-гігантів. Метод базується на аналізі спектрофотометричних спостережень смуг поглинання метану лише в одній точці диска планети і не вимагає використання будь-яких припущень чи наперед заданих моделей вертикальної структури хмарових шарів (Овсак О.С.)

• Аналіз спектральних значень геометричного альбедо диска Юпітера чітко вказує на наявність окремих хмарових шарів (стрілками показані проміжки між ними), що передбачалося відповідним моделюванням та було виявлено зондом КА Галілео. На рис. 31 показано прояви шарової структури в залежності відношення аерозольної і газової розсіювальних складових ефективної оптичної глибини атмосфери Юпітера у смугах поглинання атмосферного метану з центрами на 887.2 нм, 864.0 нм. (Овсак О.С.)

• Показано, що серед опосередкованих методів визначення розмірів астероїдів: поляризаційний (за нахилом гілки додатної поляризації) дає похибку до 30%; тепловий (за інтенсивністю випромінювання на 10 і 20 мкм) – до 50%, а за максимальним значенням від'ємної поляризації – до 100%. Для підвищення достовірності перших двох методів необхідно враховувати тип астероїдів та відмінності фазових залежностей їх блиску, які можна розраховувати в модифікації Ірвіна-Яновицького тіньового механізму Хапке, у якій між альбедо одноразового розсіяння ω та прозорістю частинок κ існує такий зв'язок $\kappa=(1-\omega)^{0,25}$ (Мороженко О.В., Відьмаченко А.П.)

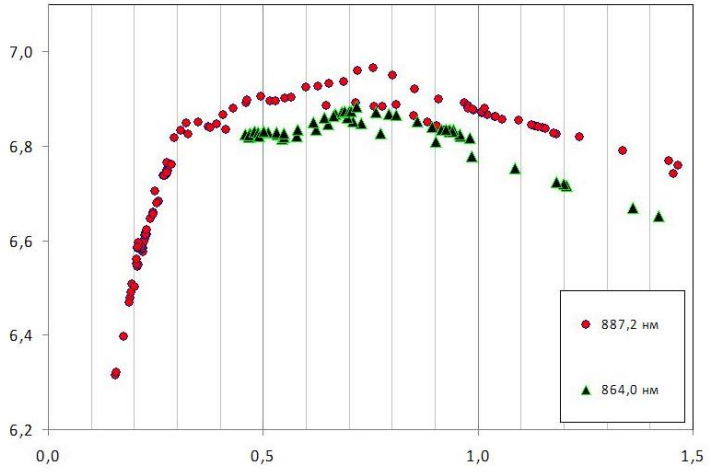


Рис. 31

• Показано, що поляризаційні спостереження Землі з космічного апарату в спектральному інтервалі λ>300 нм не дозволяють ефективно визначати фізичні характеристики аерозолю через неможливість коректно розділити внесок атмосфери і поверхні, та через неможливість отримати спостережні дані про фазові залежності ступеня поляризації P(ψ,L,α) і відбивної здатності ρ(ψ,L,α), які відповідали б умові оптичної однорідності системи «атмосфера+поверхня». Спостереження при λ<300 нм більш сприятливі через те, що сильно поглинаючий озоновий шар робить практично невидимими і поверхню, і тропосферу, які є дуже неоднорідними за своїми оптичними властивостями. Тому сканування вздовж окремих широтних поясів дозволить отримати квазіоднорідні залежності другого параметра Стокса Q(α) (при U(α)=0), придатні для оцінки фізичних характеристик стратосферного аерозолю і виявлення їх зміни в горизонтальній площині і з часом (Мороженко О.В., Відьмаченко А.П., Неводовський П.В.)

• Із багаторічних рядів фотометричних даних для зір з транзитними та не транзитними екзопланетами знайдено, що зміни в лініях H&K Ca II та Hα (які є індикаторами хромосферної активності зір) відповідають орбітальним періодам екзопланет; рис. 16 демонструє фазову криву системи HD168746 в R-фільтрі, згорнену з орбітальним періодом планети T=6.403^{d} (Кузнєцова Ю.Г., Крушевська В.М., Відьмаченко А.П. Андрєєв М.В.)

• Отримано спектри зір з екзопланетами за допомогою куде-ешеле спектрометра на 2-м телескопі обсерваторії піку Терскол, які демонструють наявність емісійних піків у лініях H&K Ca II, що підтверджує висновок про наявність хромосферної активності в екзопланетних системах, викликаних

впливом планет-гігантів (рис. 11) (Кузнєцова Ю.Г., Крушевська В.М., Мацяка О.М.).

- Ведеться багаторічний (з 2001 р.) спектральний моніторинг планет-гігантів Сонячної системи Урана і Нептуна за програмою дослідження вертикальної структури атмосфер цих планет з урахуванням комбінаційного розсіяння світла (Кузнєцова Ю.Г., Крушевська В.М., Відьмаченко А.П., Костогриз Н.М.)
- Розроблено програму для моделювання кривих блиску транзитів (рис. 14) та розрахунків основних параметрів транзитних екзопланет (тривалість транзиту $\mathbf{T_{dur}}$, радіус планети $\mathbf{R_p}$, нахил орбіти $\boldsymbol{i}$, ексцентриситет орбіт e) методом Монте-Карло на основі фотометричних спостережних даних, проведено розрахунки для ряду екзопланетних систем (Кузнєцова Ю.Г., Крушевська В.М., Мацяка О.М.).
- Співробітники відділу входять до складу робочої групи «Спостереження на малих телескопах екзопланет, тіл Сонячної системи та інших об'єктів», в рамках якої ведуться дослідження хромосферної активності зір з екзопланетами, зір з транзитними екзопланетами та проводиться міжнародна програма пошуку екзопланет в системах тісних подвійних зір «DWARF project»". На рис. 17 наведено криву блиску головного та вторинного мінімуму подвійної затемненої системи BX Tri (Крушевська В.М., Кузнєцова Ю.Г., Романюк Я.О., Андрєєв М.В).
- Проведено спектральний моніторинг унікальної довгоперіодичної (27.1 років) затемнюваної системи Epsilon Aurigae, яка складається із зорі-гіганта спектрального класу F і газопилового протопланетного диска в 2007-2012 рр.; спостереження охоплюють унікальний момент дворічного затемнення в 2009-2011 рр.

Досліджено довго- та короткоперіодичні варіації ряду спектральних ліній: на рис. 12 показано варіації профілів лінії Hα, отриманих перед, на початку та протягом затемнення; зареєстровано зміни в синьому та червоному емісійних взаємонесиметричних крилах лінії Hα; червоне крило є показником наявності газу навколо зорі, а синє крило вказує на радіальні вихідні потоки, що характеризують нестабільність в зорі (Кузнєцова Ю.Г., Андрєєв М.В.)

- В ГАО НАН України встановлено телескоп Celestron 14″ (рис. 8), де проводяться спостереження транзитних і не транзитних екзопланетних систем, систем затемнюваних подвійних зір тощо (Крушевська В.М, Кузнєцова Ю.Г., Відьмаченко А.П., Андрєєв М.В.)
- В обсерваторії Лісники на українському монтуванні WS240GT встановлено Київський Інтернет Телескоп (рис. 8) - автоматизований телескоп, обладнаний автогідом та захистом від роси; спостереження

проводяться спільно з астрономічною обсерваторією Київського національного університету імені Т. Шевченка (Романюк Я.О.)

- Вивчаються властивості поляризованого випромінювання, розсіяного середовищами, що складаються з частинок різної форми, деякі приклади з яких наведено на рис. 32 (Длугач Ж.М.)

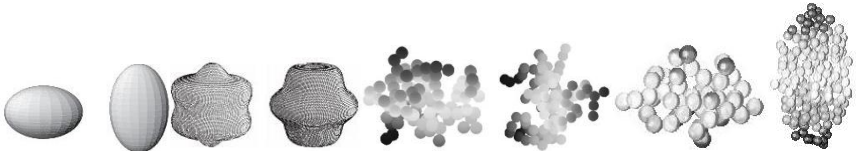


Рис. 32. Приклади розглянутих форм частинок.

- Для аналізу ефектів, викликаних впливом мікроскопічних нерівностей поверхні частинки, розсіюючої електромагнітне випромінювання, запропоновано та досліджено нову модель у вигляді мікроскопічних пилинок, що випадковим чином вкривають поверхню частинки з розміром порядку довжини хвилі світла. Використання розробленого алгоритму та обчислювальної програми для генерування такої складової частинки, а також суперпозиційного *T*-матричного методу дозволило отримати кількісні оцінки впливу аналізованого типу нерівностей на різні оптичні характеристики складової частинки (рис. 33). Зокрема, зроблено висновок, що злипання пилинок сажі з мінеральною частинкою більшого розміру може призвести до істотної зміни оптичних властивостей частинки. Цей результат може бути корисним при аналізі даних дистанційного зондування, а також при дослідженні впливу аерозолів на клімат Землі (Длугач Ж.М.)
- Вивчено спостережні прояви різних стадій еволюції протопланетних дисків по спектральному розподілу енергії в спектрі та синтетичних зображеннях протозорі з фрагментуючим диском. На наявність масивних фрагментів вказують додаткові максимуми на довжині хвилі 5-10 мкм, інтенсивність яких змінюється з часом. Детально вивчено вплив ненульового кута нахилу на розподіл енергії в спектрі (рис. 9, 10) (Захожай О.В.)
- В рамках спільного україно-німецького проекту розроблено метод спектральної різниці для визначення маси першої і другої маломасивної компоненти навколо зорі спектрального класу М. Для його реалізації потрібно провести спостереження в близькій інфрачервоній області (фільтр К) з $\lambda/\Delta\lambda \approx \sim 50000$ на інструменті CRIRES (VLT) (Костогриз Н.М.).
- В 1982 р. Розенбуш О.Е. вперше обгрунтував висновок, що SV Sge є зорею пониженої світимості з $M_V = -2.5^m$. У 1987 р. такі зорі розділили на групи слабких і яскравих зір із змінністю типу R Coronae Borealis. В 2013 Яковиною Л.А., Розенбушем О.Е., Павленком Я.В. і Камінським Б.М.

виконане моделювання розподілів енергії в спектрах цього типу, що підтвердило понижену світимість SV Sge: M_V~0^m або M_{bol}~-1.5^m. Аналіз спектрів високої роздільної здатності у 2013 р. показав відсутність або крайню слабкість міжзоряних ліній натрію, що дало підставу для висновку про можливо ще нижчу світимість SV Sge аж до M_V~$+2^m$ (Розенбуш О.Е.)

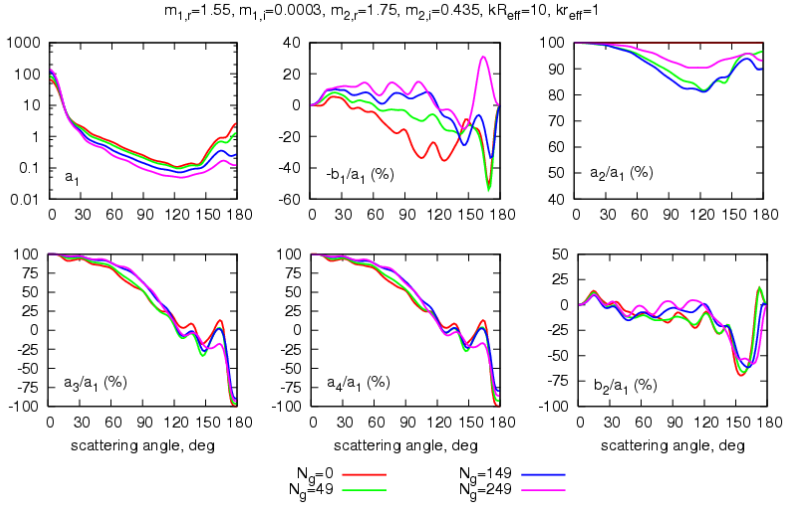


Рис. 33. Елементи матриці одноразового розсіяння для сферичної мінеральної частинки з прилиплими до неї сферичними пилинками сажі.

- Ведуться роботи з налаштування та дослідження макету УФП (рис. 34) (Неводовський П.В., Дєлєц О.С., Фоменко О.О.).

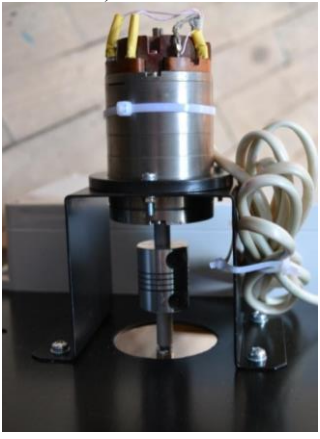


Рис. 34, 35

• Проведено модернізацію телескопу АЗТ-2 (рис. 6). На прямих осях схилення та прямого сходження встановлено датчики кута повороту типу ВТ–5 для автоматичного наведення телескопу на небесні об'єкти (рис. 35) (Шавловський В.І.)

• Із фотоелектричних наземних спостережень в λ=0.540 мкм при сонячних фазових кутах α≈0-12 град. (рис. 36) отримані параметри Хапке w, g, h для ведучої і веденої півкуль супутника Юпітера Калісто. Цей набір параметрів добре описує і повні фазові функції обох півкуль Калісто, отриманих при космічних спостереженнях КА «Voyager» в діапазоні α≈8-140 град. Модельні криві показані неперервною (ведуча півкуля) і пунктирною (ведена півкуля) лініями. На рис. 37а приведено загальний набір відбивної здатності Калісто для λ=0.540 мкм як функція орбітального фазового кута; на рис. 37б приведено спостережні дані для кількох фіксованих інтервалів сонячного фазового кута і відповідні модельні криві (Шавловський В.І.)

• Із моделювання отримані оцінки ефектів поляриметрії, які можуть виникнути при проходженні планет і плям по диску зорі. З'являючись на зорях вони «ламають» сферичну симетрію. На рис. 38 показано величину ефекту, який в загальну поляризацію вносять плями і проходження планети по диску зорі (Костогриз Н.М.)

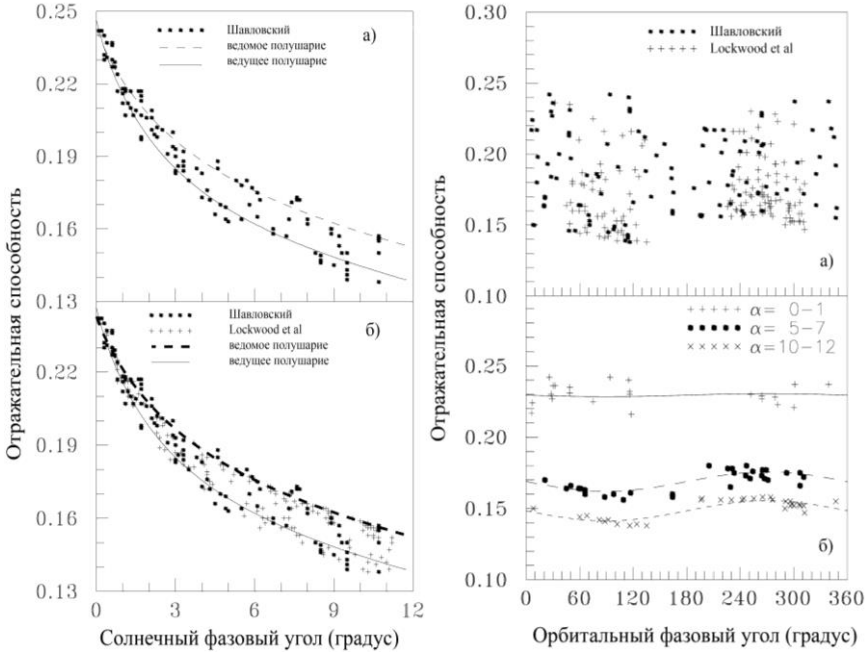


Рис. 36, 37

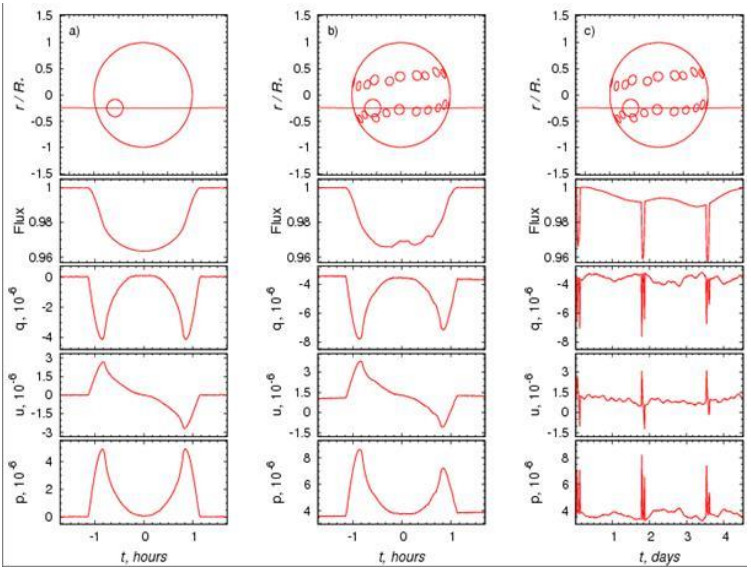


Рис. 38.

13. ПАМ'ЯТНІ ДАТИ І ВІДЗНАКИ.

1974 рік – В.В. Ботвінова, О.В. Мороженко, Е.Г. Яновицький нагороджені бронзовою медаллю Виставки досягнень народного господарства СРСР.

1978 рік – Ж.М. Длугач, О.В. Мороженко. Е.Г. Яновицький нагороджені бронзовою медаллю Виставки досягнень народного господарства СРСР.

1979 рік – О.Ф. Стєклов удостоєний премії і медалі Президії АН УРСР для молодих вчених за роботу по порівняльній метеорології атмосфер планет і супутників.

1982 рік – В.М. Клименко нагороджено Грамотою Президії АН УРСР за цикл робіт з спектрофотометричних спостережень планет.

1987 – В.А. Кучеров нагороджений медаллю для молодих вчених Президії АН УРСР за цикл робіт "Багатокомпонентні симетричні ахроматичні фазові пластинки".

1987 – А.П. Відьмаченко обраний членом-кореспондентом Академії наук Республіки Болівія.

1993 – М.І. Міщенко, О.В. Мороженко, Е.Г.Яновицький удостоєні премії АН України м. М.П. Барабашова за цикл робіт "Поляризація випромінювання атмосферами планет та хмарами міжзоряного пилу".

1994 – Л.О.Колоколова обрана дійсним членом Нью-Йоркської Академії Наук (США).

2003 – О.В. Мороженко, Е.Г.Яновицький в авторському колективі інших співробітників ГАО НАН України удосоєні Державної премії України в галузі науки й техніки.

2009 – А.П. Відьмаченко обраний дійсним членом Академії наук вищої школи України.

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ
ВІДДІЛ ФІЗИКИ ПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ

Відьмаченко А.П., Дєлєц О.С., Длугач Ж.М., Захожай О.В., Костогриз Н.М., Крушевська В.М., Кузнєцова Ю.Г., Мороженко О.В., Неводовський П.В., Овсак О.С., Розенбуш О.Е., Романюк Я.О., Шавловський В.І., Яновицький Е.Г. Дослідження з фізики планетних атмосфер та малих тіл Сонячної системи, екзопланет та дискових структур навколо зір // К.: ВАІТЕ, 2014. 90 с.