

МРНТИ 29.19.03

<https://doi.org/10.26577/RCPH.2023.v84.i1.010>

А.К. Акылбаева , Д.Ю. Соколов , А.У. Алдияров , О.Ю. Голиков ,
Л.И. Карымсакова , Д. Е. Ережеп* 

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: darhan_13@physics.kz

АНАЛИЗ ДООСНАЩЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНОГО ВАКУУМНОГО КРИОГЕННОГО СПЕКТРОФОТОМЕТРА

В работе рассмотрена модернизация методики исследования астрофизических льдов и холодных межзвездных пылей. Приведен экспериментальный метод физического моделирования при помощи вакуумной криогенной установки. Подробно рассмотрены узлы универсального вакуумного криогенного спектрофотометра где необходимо произвести модернизацию, дооснащение для последующего улучшения измерительных возможностей при проведении научных исследований. Получены ИК-спектры полистирола на спектрометрах ИКС-29 и ФСМ 2203, результаты полученных характеристических полос поглощения сравнивались со значениями эталонного спектра полистирола, рассчитана расширенная неопределенность. Для оценки точности результатов измерений в работе был произведен расчет расширенной неопределенности согласно методике калибровки ИК-спектрометра. Неопределенность градуировки шкалы волновых чисел определяли методом прямых измерений, как разность между значением волнового числа, соответствующим максимальной ординате линии поглощения стандартного образца пленки полистирола. В работе проведен анализа выполненного дооснащения универсальной вакуумной криогенной спектрофотометра были сняты спектры N_2O , полученных при температуре 16 К в диапазоне волновых чисел ИК-спектрометров от 370 до 4200 $1/cm$ с обозначением соответствующих полос поглощения. Проведённые в данной работе исследования направлены на повышение точности измерений, что гарантирует и улучшает качество научных исследований.

Ключевые слова: астрофизические льды, вакуумная криогенная техника, полистирол, дооснащение, модернизация.

А. Ақылбаева, Д. Соколов, А. Алдияров, О. Голиков, Л. Қарымсакова, Д. Ережеп*

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Универсалды вакуумды криогенді спектрофотометрді жаңғырту әдістері

Осы ұсынылған жұмыста астрофизикалық мұз бен суық жұлдызаралық шаңды зерттеу әдістемесін жаңғырту қарастырылған. Вакуумды криогенді қондырғыны қолдану арқылы физикалық модельдеудің тәжірибелік әдісі ұсынылған. Әмбебап вакуумды криогендік спектрофотометрдің тораптары ғылыми зерттеулерде өлшеу мүмкіндіктерін кейіннен жетілдіру үшін модернизациялау, қайта жабдықтау қажет болған жағдайда егжей-тегжейлі қарастырылады. Полистиролдың ИҚ-спектрлері ИҚС-29 және ФСМ 2203 спектрометрлерінде алынды, алынған сипаттамалық сіңіру жолақтарының нәтижелері полистиролдың эталондық спектрінің мәндерімен салыстырылды және кеңейтілген белгісіздік есептелді. Өлшеу нәтижелерінің дәлдігін бағалау үшін біз ИҚ-спектрометрді калибрлеу процедурасына сәйкес кеңейтілген белгісіздікті есептедік. Толқын саны шкаласын калибрлеудің белгісіздігі стандартты полистирол пленка үлгісінің сіңіру сызығының максималды ординатасына сәйкес келетін толқын санының мәні арасындағы айырмашылық ретінде тікелей өлшеулер арқылы анықталды. Бұл жұмыста әмбебап вакуумды криогендік спектрофотометрді қайта жабдықтаудың аяқталуына талдау жүргізілді. N_2O спектрлері алынды, 16 К температурада 370-ден 4200 $1/cm$ -ге дейінгі ИҚ-спектрометрлердің толқындық сандық диапазонында белгілеуімен алынды. сәйкес абсорбция жолақтары. Бұл жұмыста жүргізілген зерттеулер ғылыми зерттеулердің сапасына кепілдік беретін және жоғарылататын өлшемдердің дәлдігін арттыруға бағытталған.

Түйін сөздер: астрофизикалық мұз, вакуумдық криогендік жабдық, полистирол, қайта құру, жаңғырту.

A. Akylbayeva, D. Sokolov, A. Aldiyarov, O. Golikov, L. Karamysova, D. Yerezhep*

Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: darhan_13@physics.kz

Analysis of the retrofitting of a universal vacuum cryogenic spectrophotometer

The paper considers the modernization of the methodology for studying astrophysical ice and cold interstellar dust. An experimental method of physical modeling using a vacuum cryogenic installation is presented. The nodes of the universal vacuum cryogenic spectrophotometer where it is necessary to modernize, retrofit for the subsequent improvement of measuring capabilities in scientific research are considered in detail. The IR spectra of polystyrene were obtained on the IRS-29 and FSM 2203 spectrometers, the results of the obtained characteristic absorption bands were compared with the values of the reference spectrum of polystyrene, and the expanded uncertainty was calculated. To assess the accuracy of the measurement results, we calculated the expanded uncertainty according to the IR spectrometer calibration procedure. The wavenumber scale calibration uncertainty was determined by direct measurements as the difference between the wavenumber value corresponding to the maximum ordinate of the absorption line of a standard polystyrene film sample. In this work, an analysis of the completed retrofitting of a universal vacuum cryogenic spectrophotometer was carried out. N₂O spectra were taken, obtained at a temperature of 16 K in the wave number range of IR spectrometers from 370 to 4200 1/cm with the designation of the corresponding absorption bands. The studies carried out in this work are aimed at improving the accuracy of measurements, which guarantees and improves the quality of scientific research.

Key words: astrophysical ice, vacuum cryogenic equipment, polystyrene, retrofit, modernization.

Введение

В астрофизике слово «лед» относится к любым летучим веществам, которые могут быть заморожены из газовой фазы при $T < 273$ К. Льды присутствуют в различных средах как в Солнечной системе, так и в межзвездной среде. В Солнечной системе льды присутствуют на поверхности спутников внешних планет, в транснептуновых объектах (таких как Плутон) и в кометах.

В настоящее время считается, что поверхности холодной межзвездной пыли обеспечивают основные места для синтеза сложных молекул в межзвездной среде. Ледяные мантии таких холодных межзвездных пылей состоят из смеси молекул, которые могут обрабатываться различными энергетическими частицами (например, УФ-фотоны, космические лучи и т.п.), приводящие к образованию еще более сложных молекул. Большинство этих синтезированных молекул позже высвобождаются в газовую фазу в результате термической десорбции, что позволяет идентифицировать их чаще всего с помощью микроволновой и миллиметровой спектроскопии. Однако если синтезированная молекула не возгоняется даже при более высоких

температурах (скажем, около 300 К), то на существующей поверхности пыли остается осадок, который затем может быть подвергнут дальнейшей обработке. На сегодняшний день большая часть экспериментальной работы была сосредоточена на понимании химического состава ледяных мантий и остатков, которые остались после энергетической обработки, и, насколько нам известно, физическая структура остатков, которые синтезируются на месте, были изучены и исследованы лишь частично [1–3].

Считается, что среди различных молекул, которые, как известно, населяют межзвездные ледяные зернистые мантии, CO₂ является одним из наиболее распространенных видов, оценочная численность которого составляет 20–30% по сравнению с H₂O [4]. Лед CO₂ также широко распространен в пределах Солнечной системы, возможно, наиболее известен он в полярных ледяных шапках на Марсе [5, 6], а также в кометном материале [7, 8]. Лед CO₂ также был обнаружен как поверхностный компонент нескольких внешних спутников Солнечной системы, включая ледяные спутники Юпитера, Сатурна и Урана (например, [9–17]). Учитывая эту космическую вездесущность, неудивительно, что холодной межзвездной пыли и астрофизических льдов является актуальным

предметом интенсивных исследований.

Одним из методов изучения и исследования холодной межзвездной пыли и астрофизических льдов является их физическое моделирование при помощи вакуумной криогенной техники [18–21]. Метод криовакуумной конденсации образцов при низких и сверхнизких температурах является одним из эффективных путей получения холодной межзвездной пыли и астрофизических льдов в различных контролируемых структурно-фазовых состояниях. Так, метод физической газовой конденсации широко используется для исследования свойств материи при низких и сверхнизких температурах, таких как плотность, поляризуемость, оптические характеристики, а также при решении широкого круга задач астрофизических и астрохимических исследований [22–24]. Важным является также и то, что образованные пленки криовакуумных конденсатов ряда веществ обладают рядом уникальных свойств, получение которых невозможно путем замораживания из жидкой фазы, даже если скорость замораживания будет достаточно высокой.

Бурное развитие отраслей криофизики, криотехники и криотехнологий требует постоянного совершенствования и модернизации имеющегося научно-испытательно оборудования для физического моделирования космического пространства. Существующий универсальный вакуумный криогенный спектрофотометр [23, 24]

(далее – УВКС) модернизируется в силу объективной необходимости. Модернизация является важным направлением сохранения и повышения эффективности проведения актуальных исследований. Необходимость модернизации связана с процессом повышения точности результата измерений предъявляемая к УВКС в период проведения научных исследований. Неуклонное развитие альтернативных источников излучения, появление ИК-спектрометров с более высокой чувствительностью получения спектров, появление анализаторов с высокой разрешающей способностью дают возможность улучшать качество выполняемых исследований и повышения их точности. Для успешного развития данного направления имеется методологическое и информационное обеспечение, позволяющее определить наилучший вариант модернизации исходя из имеющихся ресурсов и оценить качество выполненных работ. В статье описан подход к структурному анализу и оценке качества технологии модернизации с использованием имеющейся базы данных.

Оборудование и методика

Модернизация УВКС обуславливается необходимостью доукомплектования и дооснащения основного (установленного) оборудования.



Рисунок 1 - Схема УВКС после проведения дооснащения

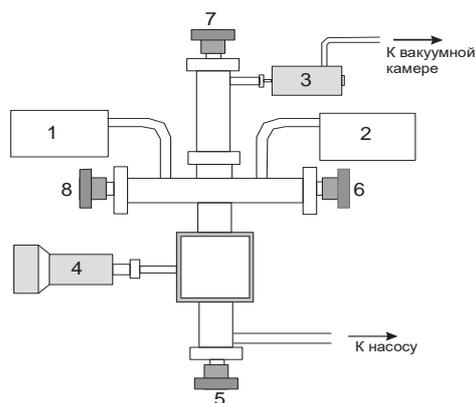
Дооснащение УВКС спектрофотометром ФСМ 2203 проводилась в целях расширения его диапазона, уменьшения погрешности и улучшения спектрального разрешения, которая

позволяет наиболее точно разделять две близко расположенные спектральные линии. Фурье-спектрометр предназначен для регистрации и исследования оптических спектров в

инфракрасной области, а также для количественного анализа и контроля качества вещества. Максимальная чувствительность достигается при использовании сменных детекторов и источников ИК излучения для рабочих областей спектра.

Система обработки данных, реализованная на базе совместимого персонального компьютера, обеспечивает автоматическое измерение спектров, включая управление всеми системами спектрометра и оптимизацию режимов измерения, сохранение результатов измерений в базе данных, тестирование математическую обработку спектральных данных, работу со спектральной базой данных, графическое представление спектров на дисплее.

Следующим этапом доукомплектования УВКС было усовершенствование узла для ввода веществ (газов) в вакуумную камеру является низкая чувствительность кранов натекательной системы и механический принцип работы. В систему подготовки матричного газа входят дополнительные узлы натекательной системы, схема которой показана на рисунке 2.



1 – исследуемый газ «1»; 2 – исследуемый газ «2»; 3 – натекатель; 4 – баратрон; 5, 6, 7, 8 – краны

Рисунок 2 – Принципиальная схема системы газоподготовки исследуемых веществ

Установка анализатора Extorr XT1000 на узле натекателя позволяет наиболее точно определить молекулярный состав вещества (газа), который в дальнейшем будет конденсироваться на подложке в вакуумной камере. Анализатор Extorr XT1000 представляет собой квадрупольный анализатор остаточных газов, в котором установлен усовершенствованный датчик типа Пирани и ионизационный датчик высокого вакуума с термокатодом. Датчик Пирани измеряет уровень вакуума, используя

теплопроводность газовой среды. В ионизационном датчике используется ионизация остаточных газов электронным ударом для измерения ионных токов, характеризующих давление. В анализаторе используются прецизионные механические конструкции электроники для измерения ионных токов, характеризующих парциальные давления остаточных газов в вакуумной камере. Датчик пирани начинает измерять давление уже при атмосферном давлении, ионизационный датчик – при нормальном давлении 10^{-2} Торр, а квадруполь начинает функционировать при номинальном давлении 10^{-4} Торр. Ввиду того, что возможность термокатада испускать электроны ограничена, ионизационный датчик измеряет суммарные давления до значения 2×10^{-9} Торр, а квадруполь может измерять парциальные давления значительно ниже 2×10^{-11} Торр.

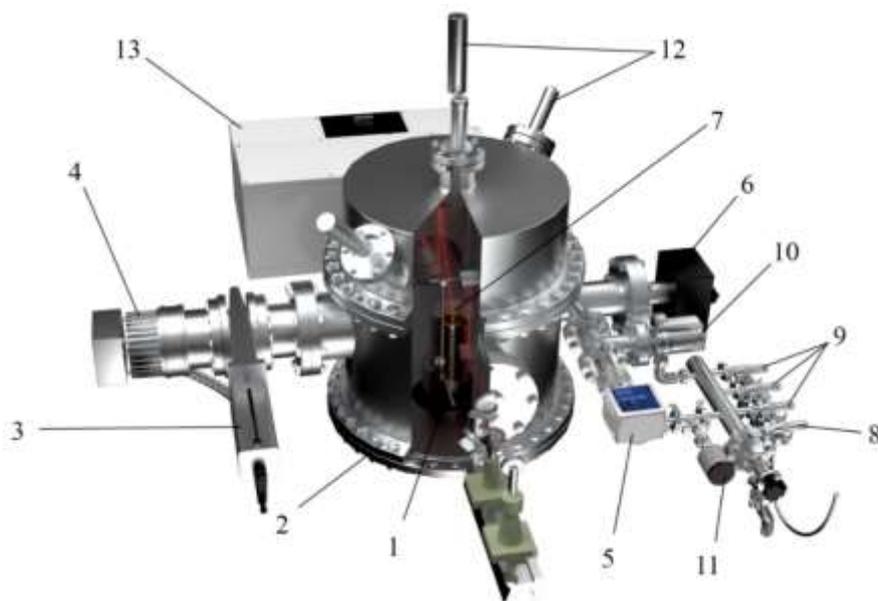
В связи с появлением окислительных пятен на поверхности подложки, что вносило значительный вклад в погрешность результата измерений толщины пленки, было принято решение заменить напыление подложки тонкой пленкой золота с чистотой 99,99 %. Преимущества золота в том, что оно не реагирует с водородом, азотом, фосфором, углеродом, щелочью и большинство минеральных кислот на золото не действуют.

Описание установки после дооснащения

УВКС, приведенный на рисунке 3, находится на физико-техническом факультете, кафедре теплофизики и технической физики в лаборатории криофизики и криотехнологий. Основным узлом установки является микрокриогенная машина (1) системы Гиффорда-Мак-Магона с рабочей температурой от 10 К до 300 К. Микрокриогенная машина расположена в центре вакуумной камеры (2). Вакуумная камера представляет собой цилиндр диаметром 430 мм и высотой 420 мм, изготовленный из нержавеющей стали марки 1X18H10T. Подложка (7), на которой конденсируются молекулы исследуемых веществ, крепится на верхнем низкотемпературном фланце микрокриогенной машины Гиффорда-Мак-Магона. Она изготовлена из бескислородной меди марки «М00» и покрыта тонкой пленкой золота с чистотой 99,99 %. Охлаждаемые рабочие поверхности подложки и фланцев микрокриогенной машины Гиффорда-Мак-Магона защищены алюминиевым кожухом для предотвращения «паразитной» конденсации паров исследуемых веществ на них.

Вакуумная система установки состоит из высоковакуумного турбомолекулярного насоса (3) типа Turbo-V-301 Navigator в паре со спиральным форвакуумным насосом (на рисунке не указан) серии SH фирмы «Agilent» производства США. Турбомолекулярный насос с

камерой сопряжен с полнопроходным шиберным вакуумным затвором (4) CFF-100. Выбор данной системы обоснован тем, что они обеспечивают получение высокого, чистого (безмасляного) вакуума в камере. В результате чего в камере достигается предельный вакуум $P = 10^{-10}$ Торр.



1 – рефрижератор; 2 – вакуумная камера; 3 – турбомолекулярный насос; 4 – шиберный вакуумный затвор; 5 – датчик давления; 6 – масс-спектрометр; 7 – подложка; 8 – система пробоподготовки; 9 – игольчатые натекатели; 10 – высокоточный натекатель; 11 – барратрон; 12 – двухлучевый лазерный интерферометр; 13 – FTIR

Рисунок 3 – Эскиз экспериментальной установки

Измерение вакуума в камере осуществляется при помощи широкодиапазонного вакуумметра типа VSM77DL компании «Thyatron» производства Германия. Дополнительно к этому, для точного молекулярного анализа остаточных газов в камере и для анализа состава газовых смесей, используется квадрупольный масс-спектрометр типа XT100 Series RGA «Extorr» производства США.

Лазерный интерферометр (12) установки используется для определения скорости роста, толщины и коэффициента преломления тонких пленок криовакуумных конденсатов исследуемых веществ. Лазерный интерферометр состоит из источников излучения полупроводниковых лазеров с длиной волны $\lambda=406$ нм и фотоэлектронного умножителя типа P25A фирмы «Sens-Tech» с оптическим диапазоном измерений (длин волн) от 250 до 650 нм.

Оптические спектры исследуемых веществ в инфракрасном спектральном диапазоне регистрируются при помощи ИК-Фурье-спектрометра (13) типа ФСМ 2203 фирмы «ИНФРАСПЕК» производства РФ. Оптический спектральный диапазон измерения составляет 370-7800 1/см с максимальным спектральным разрешением 0,125 1/см. При этом отношение сигнал/шум составляет более чем 60000 у.е.

Температура подложки измеряется с помощью полупроводникового термодатчика DT-670 и контролируется при помощи пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) – термоконтроллера типа LS325 фирмы «LakeShore» производства США. Калибровочные данные термодатчика DT-670 приведены в Таблице 1. Рабочий температурный диапазон термодатчика составляет от 1,4 К до 500 К с погрешностью $\pm 0,5$ К.

Таблица 1 – Сравнительный анализ спектрофотометров

№	Наименование	Характеристики спектрофотометров		
		ФСМ 2203	ИКС-29	
1	Рабочая область спектра, см ⁻¹	от 370 до 7800	от 400 до 4200	
2	Спектральное разрешение, см ⁻¹	0,125	1	3
3	Абсолютная погрешность градуировки шкалы волновых чисел, см ⁻¹	±0,02	±0,15	±0,1

Результаты и обсуждение

После проведения дооснащения и модернизации УВКС, был проведен сравнительный анализ результатов измерений. Был снят спектр стандартного образца полистирола, результаты которого представлены на рисунке 4. Результаты сравнивались по характеристическим пикам, как видно из приведенного рисунка 4 спектр полученный ИКС-29 смещен от характеристических пиков больше, чем спектр полученный ФСМ 2203, полученные значения приведены в таблице 2.

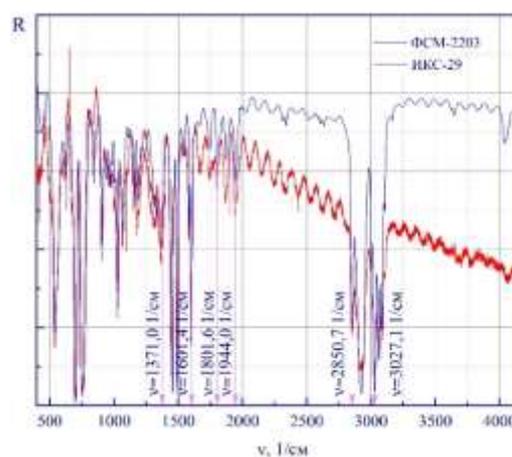
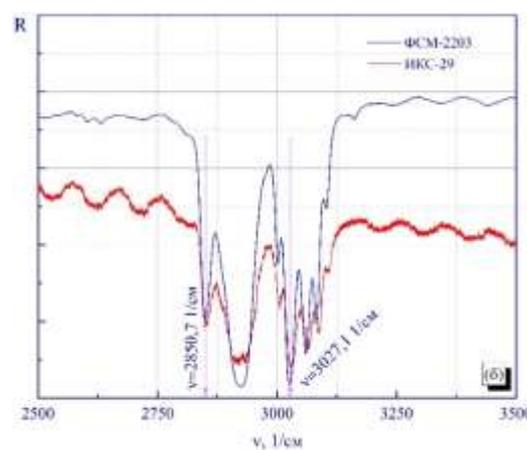
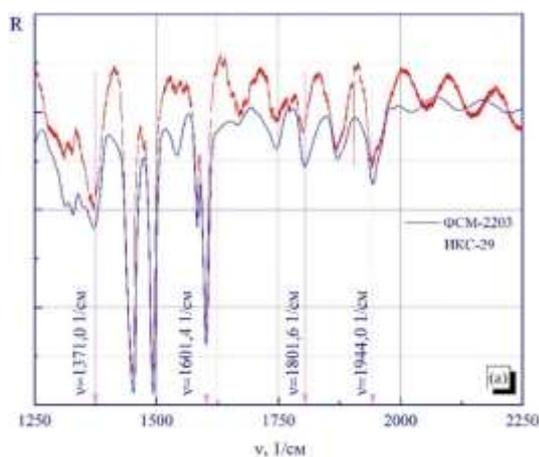


Рисунок 4 – ИК-спектры полистирола в диапазоне частот от 400-4200 1/см



(а) – диапазон 1250-2250 1/см; (б) – диапазон 2500-3500 1/см

Рисунок 5 – ИК-спектры полистирола

Таблица 2 – Полученные значения характеристических полос поглощения

Номер характеристической полосы поглощения	Значения волнового числа стандартного образца полистирола на ИКС-29, ν_i , 1/см	Значения волнового числа стандартного образца полистирола на ФСМ-2203, ν_j , 1/см	Значение эталонного, действительного волнового числа, $\nu_{эт}$, 1/см
65	3026,6	3027,0	3027,1
66	2851,5	2850,3	2850,7
67	1943,9	1943,8	1944,0
68	1800,7	1801,0	1801,6
69	1600,7	1601,3	1601,4
70	1372,0	1371,4	1371,0

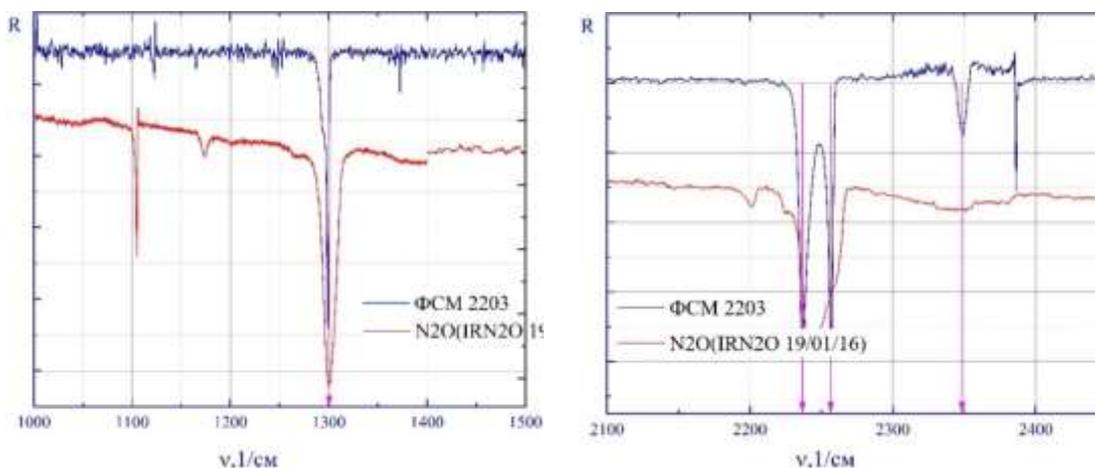
Для оценки точности результатов измерений был произведен расчет расширенной неопределенности согласно методике калибровки ИК-спектрометра.

Неопределенность градуировки шкалы волновых чисел определяют методом прямых измерений, как разность между значением волнового числа, соответствующим максимальной ординате линии поглощения стандартного образца пленки полистирола определяемым при помощи калибруемого спектрофотометра и действительным значением волнового числа, соответствующим максимальной ординате той же линии, взятым из приложения №1 источника [25]. Выбирая линии или полосы поглощения для каждого диспергирующего элемента в начале, середине и конце спектрального диапазона определяют по шкале волновых чисел в момент записи линий поглощения.

Исходя из рисунка 5, в таблице 2 представлены значения волнового числа, соответствующей максимальной ординате линии поглощения полистирола, которые определяются с помощью калибруемого спектрофотометра и действительным значением волнового числа, соответствующим ординате той же линии. На

основании составленной методики калибровки была проведена калибровка спектрометра, на каждой полосе поглощения. Произведя расчет по методике калибровки, расширенная неопределенность результата измерений спектрометра ИКС-29 составила $U \approx 1,5$ 1/см, спектрометра ФСМ 2203 составила $U \approx 1$ 1/см при доверительной вероятности $k=95$ %.

Для дальнейшего проведения анализа выполненного дооснащения УВКС были сняты спектры N_2O , полученных при температуре 16 К в диапазоне волновых чисел ИК-спектрометров от 370 до 4200 1/см с обозначением соответствующих полос поглощения, рисунок 6. Полученные результаты разбили на интервалы диапазонов рассматриваемых частот. Если сравнить спектрометр ФСМ 2203 со спектрометром ИКС-29, то у второго наблюдается значительное уширение полос поглощения. Так как метрологические характеристики разрешающей способности спектрометра ФСМ 2203 выше, это позволяет разделить близко расположенные полосы на частотах 2237 и 2257 1/см на две узкие, что повышает научный потенциал.



(а) – диапазон 1000-1500 1/см; (б) – диапазон 2100-2500 1/см

Рисунок 6 – ИК-спектры N_2O полученных при температуре осаждения 16 К

Заключение

На сегодняшний день все больше научных исследований посвящается вопросам изучения холодной межзвездной пыли и астрофизических льдов. Все исследования возможны при физическом моделировании на вакуумной криогенной технике. Непрерывное развитие отраслей криофизики, криотехники и криотехнологий требует постоянного совершенствования и модернизации имеющегося

научно-испытательно оборудования для физического моделирования космического пространства, для получения более точных результатов научных исследований.

Таким образом после проведенного структурного анализа, было принято решение расширить диапазон получения ИК-спектра, уменьшить вклад неопределенности результата измерений спектрометра и улучшить спектральное разрешение, которое позволяет наиболее точно разделять близко расположенные

спектральные линии. Так же было проведено дооснащение УВКС анализатором Extorr XT1000, которое позволило наиболее точно определить молекулярный состав исследуемого вещества (газа), который конденсировался на подложке в вакуумной камере. Крайним этапом модернизации была замена напыления подложки тонкой пленкой золота с чистотой 99,99 %, на которую конденсируется исследуемый газ.

Проведение таких мероприятий гарантируют и улучшают качество научных исследований, повышают точность измерений и помогают лучше интерпретировать полученные результаты.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстана (грант № AP15473758).

Литература

- 1 Palumbo, M.E.; Baratta, G.A.; Leto, G.; Strazzulla, G. H bonds in astrophysical ices. // *J. Mol. Struct.* – 2010. – V. 972. – P. 64–67.
- 2 Huels, M.A.; Parenteau, L.; Bass, A.D.; Sanche, L. Small steps on the slippery road to life: Molecular synthesis in astrophysical ices initiated by low energy electron impact // *Int. J. Mass Spectrom.* – 2008. – V. 277. – P. 256–261.
- 3 Domaracka, A.; Seperuelo Duarte, E.; Boduch, P.; Rothard, H.; Ramillon, J.M.; Dartois, E.; Pilling, S.; Farenzena, L.S.; da Silveira, E.F. Infrared study of astrophysical ice analogues irradiated by swift nickel ions. *Nucl. Instruments Methods Phys Res. Sect. B Beam Interact. with Mater // Atoms* – 2010. – V. 268. – P. 2960–2963. Öberg, K.I. Photochemistry and Astrochemistry: Photochemical Pathways to Interstellar Complex Organic Molecules // *Chem. Rev.* – 2016. – V. 116. – P. 9631–9663.
- 4 Phillips, R.J.; Davis, B.J.; Tanaka, K.L.; Byrne, S.; Mellon, M.T.; Putzig, N.E.; Haberle, R.M.; Kahre, M.A.; Campbell, B.A.; Carter, L.M.; et al. Massive CO₂ Ice Deposits Sequestered in the South Polar Layered Deposits of Mars // *Science*. – 2011. – V. 332. – P. 838–841.
- 5 Manning, C. V.; Bierson, C.; Putzig, N.E.; McKay, C.P. The formation and stability of buried polar CO₂ deposits on Mars // *Icarus*. – 2019. – V. 317. – P. 509–517.
- 6 Filacchione, G.; Raponi, A.; Capaccioni, F.; Ciarniello, M.; Tosi, F.; Capria, M.T.; De Sanctis, M.C.; Migliorini, A.; Piccioni, G.; Cerroni, P.; et al. Seasonal exposure of carbon dioxide ice on the nucleus of comet 67P/Churyumov-Gerasimenko // *Science*. 2016. – V. 354. – P. 1563–1566.
- 7 Läuter, M.; Kramer, T.; Rubin, M.; Altwegg, K. Surface localization of gas sources on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko based on DFMS/COPS data. *Mon. Not. R. // Astron. Soc.* – 2018. – V. 483. – P. 852–861.
- 8 McCord, T.B.; Carlson, R.W.; Smythe, W.D.; Hansen, G.B.; Clark, R.N.; Hibbitts, C.A.; Fanale, F.P.; Granahan, J.C.; Segura, M.; Matson, D.L.; et al. Organics and Other Molecules in the Surfaces of Callisto and Ganymed // *Science*. – 1997. – V. 278. – P. 271–275.
- 9 McCord, T.B.; Hansen, G.B.; Clark, R.N.; Martin, P.D.; Hibbitts, C.A.; Fanale, F.P.; Granahan, J.C.; Segura, M.; Matson, D.L.; Johnson, T. V.; et al. Non-water-ice constituents in the surface material of the icy Galilean satellites from the Galileo near-infrared mapping spectrometer investigation. // *J. Geophys. Res. Planets.* – 1998. – V. 103. – P. 8603–8626.
- 10 Hibbitts, C.A.; McCord, T.B.; Hansen, G.B. Distributions of CO₂ and SO₂ on the surface of Callisto // *J. Geophys. Res. Planets.* – 2000. – V. 105. – P. 22541–22557.
- 11 Hibbitts, C.A. Carbon dioxide on Ganymede // *J. Geophys. Res.* – 2003. – V. 108. – P. 5036.
- 12 Buratti, B.J.; Cruikshank, D.P.; Brown, R.H.; Clark, R.N.; Bauer, J.M.; Jaumann, R.; McCord, T.B.; Simonelli, D.P.; Hibbitts, C.A.; Hansen, G.B.; et al. Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer Observations of Iapetus: Detection of CO₂ // *Astrophys. J.* – 2005. – V. 622. – P. L149–L152.
- 13 GRUNDY, W.; YOUNG, L.; SPENCER, J.; JOHNSON, R.; YOUNG, E.; BUIE, M. Distributions of H₂O and CO₂ ices on Ariel, Umbriel, Titania, and Oberon from IRTF/SpEX observations // *Icarus*. – 2006. – V. 184. – P. 543–555.
- 14 Cartwright, R.J.; Emery, J.P.; Rivkin, A.S.; Trilling, D.E.; Pinilla-Alonso, N. Distribution of CO₂ ice on the large moons of Uranus and evidence for compositional stratification of their near-surfaces // *Icarus*. – 2015. – V. 257. – P. 428–456.
- 15 Sori, M.M.; Bapst, J.; Bramson, A.M.; Byrne, S.; Landis, M.E. A Wunda-full world? Carbon dioxide ice deposits on Umbriel and other Uranian moons. // *Icarus*. – 2017. – V. 290. – P. 1–13.
- 16 Combe, J.-P.; McCord, T.B.; Matson, D.L.; Johnson, T. V.; Davies, A.G.; Scipioni, F.; Tosi, F. Nature, distribution and origin of CO₂ on Enceladus // *Icarus*. – 2019. – V. 317. – P. 491–508.
- 17 Rahul, K.K.; Shivakarhik, E.; Meka, J.K.; Das, A.; Chandrasekaran, V.; Rajasekhar, B.N.; Lo, J.-I.; Cheng, B.-M.; Janardhan, P.; Bhardwaj, A.; et al. Residue from vacuum ultraviolet irradiation of benzene ices: Insights into the physical structure of astrophysical dust. *Spectrochim // Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* – 2020. – V. 231. – P. 117797.

18 Luna, R.; Millán, C.; Santonja, C.; Satorre, M.Á. Triple test under high vacuum conditions to control the reliability of thin ice film accretion and desorption for astrophysical applications // *Vacuum*. – 2009. –V. 83. –P. 942–948.

19 Mifsud, D.V.; Kaňuchová, Z.; Ioppolo, S.; Herczku, P.; Traspas Muiña, A.; Field, T.A.; Hailey, P.A.; Juhász, Z.; Kovács, S.T.S.; Mason, N.J.; et al. Mid-IR and VUV spectroscopic characterisation of thermally processed and electron irradiated CO₂ astrophysical ice analogues // *J. Mol. Spectrosc.* – 2022. – V. 385. –P. 111599.

20 Rocha, W.R.M.; Pilling, S.; Domaracka, A.; Rothard, H.; Boduch, P. Infrared complex refractive index of N-containing astrophysical ices free of water processed by cosmic-ray simulated in laboratory. *Spectrochim // Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.* – 2020. – V. 228. –P. 117826.

21 Drobyshev, A.; Aldiyarov, A.; Nurmukan, A.; Sokolov, D.; Shinbayeva, A. Structure transformations in thin films of CF₃-CFH₂ cryodeposits. Is there a glass transition and what is the value of T_g? // *Appl. Surf. Sci.* – 2018. –V. 446. – P. 196–200.

22 Sokolov, D.Y.; Yerezhep, D.; Vorobyova, O.; Ramos, M.A.; Shinbayeva, A. Optical Studies of Thin Films of Cryocondensed Mixtures of Water and Admixture of Nitrogen and Argon // *Materials*. – 2022. – V. 15. – P. 7441.

23 Sokolov, D.Y.; Yerezhep, D.; Vorobyova, O.; Golikov, O.; Aldiyarov, A.U. Infrared Analysis and Effect of Nitrogen and Nitrous Oxide on the Glass Transition of Methanol Cryofilms // *ACS Omega*. – 2022. – V. 7. – P. 46402–46410.

24 Алдияров, А.У.; Акылбаева, А.К.; Соколов, Д.Ю.; Стржмечный, Ю.М. Методы совершенствования измерений в области ИК-спектрометрии. // *Вестник Satpayev University*. – 2019. –V2. – P. 372-377.

References

- 1 M.E. Palumbo, G.A. Baratta, G. Leto, G. Strazzulla, *Journal of Molecular Structure*, 972, No.1–3, 64–67 (2010).
- 2 M.A. Huels, L Parenteau., A.D. Bass, L.Sanche, *International Journal of Mass Spectrometry*, 277, 1–3, 256–261 (2008).
- 3 A. Domaracka, et.al., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268, 19, 2960–2963 (2010).
- 4 R.J. Phillips, et.al., *Science*, 332, 6031, 838–841 (2011).
- 5 C.V. Manning, et.al., *Icarus*, 317, 509–517 (2019).
- 6 G. Filacchione, et.al., *Science*, 354, 6319, 1563–1566 (2016).
- 7 M. Läter, et.al., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 483, 852-861 (2018).
- 8 T.B. McCord, et.al., *Science*, 278, 5336, 271–275 (1997).
- 9 McCord T.B., et.al., *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103, E4, 8603–8626 (1998).
- 10 C.A. Hibbitts, *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105, E9, 22541–22557 (2000).
- 11 C.A. Hibbitts, *Journal of Geophysical Research*, 108, E5, 5036 (2003).
- 12 B.J. Buratti, *The Astrophysical Journal*, 622, 2, L149–L152 (2005).
- 13 W. Grundy, et.al., *Icarus*, 184, 2, 543–555 (2006).
- 14 R.J. Cartwright, *Icarus*, 257, 428–456 (2015).
- 15 M.M. Sori, et.al., *Icarus*, 290, 1–13 (2017).
- 16 J.-P. Combe, *Icarus*, 317, 491–508 (2019).
- 17 K.K. Rahul, et.al. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 231, 117797 (2020).
- 18 R. Luna, C. Millán, C. Santonja, M.Á. Satorre *Vacuum*, 83, 6, 942–948 (2009).
- 19 D. V.Mifsud, et.al., *Journal of Molecular Spectroscopy*, 385, 111599 (2022).
- 20 W.R.M. Rocha, et.al. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 228, 117826 (2020).
- 21 A. Drobyshev, A. Aldiyarov, A. Nurmukan, D. Sokolov, A. Shinbayeva *Applied Surface Science*, 446, 196–200 (2018).
- 22 D.Y. Sokolov, D. Yerezhep, O. Vorobyova, M.A. Ramos, A. Shinbayeva, *Materials*, 15, 21, 7441 (2022).
- 23 D.Y. Sokolov, D. Yerezhep, O. Vorobyova, O. Golikov, A.U. Aldiyarov, *ACS Omega*, 7, 50, 46402–46410 (2022).
- 24 A.U. Aldiyarov, A.K. Akylbaeva, D.Y. Sokolov, Yu.M. Strzhmechny, *Bulletin of Satpayev University*, 2, 372-377 (2019). (in Russ).