

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 543.271.08; 543.272; 551.510.522; 551.511.6

**БРУЧКОВСКИЙ**  
**Илья Игоревич**

**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ  
АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА С МНОГООСЕВОЙ  
ГЕОМЕТРИЕЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ МАЛЫХ ГАЗОВЫХ  
СОСТАВЛЯЮЩИХ АТМОСФЕРЫ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Минск, 2020

Научная работа выполнена  
в Учреждении Белорусского государственного университета  
"Национальный научно-исследовательский центр мониторинга озоносферы"

Научный руководитель - **Красовский Александр Николаевич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры теоретической физики и  
астрофизики Белорусского государственного  
университета.

Официальные оппоненты: **Лысенко Сергей Александрович**,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
директор ГНУ «Институт природопользования  
НАН Беларуси»;

**Стельмах Георгий Фомич**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
доцент кафедры физической оптики и прикладной  
информатики Белорусского государственного  
университета.

Оппонирующая организация - **ГНУ «Институт физики им. Б.И. Степанова  
НАН Беларуси».**

Защита состоится 02 октября 2020 года в 14:00 на заседании совета по  
защите диссертаций Д 02.01.10 при Белорусском государственном университете  
по адресу: г. Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета),  
ауд. 407. Телефон учёного секретаря: 209-57-09.  
Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке  
Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» августа 2020 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций

А.Ф. Романов

## ВВЕДЕНИЕ

В механизме воздействия солнечной активности на стратосферу двуокись азота  $\text{NO}_2$  является промежуточным звеном. Различают естественную и антропогенную компоненты  $\text{NO}_2$ . Естественная компонента проявляет себя в стратосфере в озоновом цикле. Антропогенная компонента по своей абсолютной величине может превосходить естественную на два порядка, в основном образуется в тропосфере в результате окисления окиси азота  $\text{NO}$ .  $\text{NO}_2$  относится к малым газовым составляющим (МГС), характеризуется влиянием на репродуктивную функцию человека, мутагенной и канцерогенной активностью и является одним из сильнейших загрязнителей атмосферы.

Информация о высотном распределении концентрации  $\text{NO}_2$  весьма актуальна, так как она связана с особенностями циркуляции атмосферы, что открывает возможности для моделирования процессов переноса воздушных масс, выявления источников загрязнений и путей их распространения, валидации спутниковых данных. Информацию о высотном распределении МГС можно получать при помощи зондов, либо методами дистанционного зондирования. Ни один из существующих методов не способен обеспечить определение профиля искомой МГС во всем диапазоне высот с хорошим пространственным и временным разрешением.

Метод многоосевой дифференциальной абсорбционной спектроскопии (MAX-DOAS) позволяет восстанавливать профили МГС в течение светового дня, при этом точность восстановления профиля МГС сильно зависит от аэрозольно-облачного состояния атмосферы, а также от опико-электронных характеристик измерительного прибора.

В Беларуси основное число наблюдений на станциях мониторинга осуществляется с использованием отбора проб воздуха, при этом отсутствуют приборы, позволяющие проводить мониторинг вертикального распределения МГС в течение светового дня пассивным дистанционным бесконтактным методом. Потребность в создании аппаратно-программного комплекса для дистанционного зондирования МГС, данные которого могут быть обработаны как зенитным сумеречным методом, так и методом MAX-DOAS, определили необходимость выполнения настоящего диссертационного исследования.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа выполнена в рамках утвержденных научных тем в НИИЦ МО БГУ в соответствии с утвержденными научными плановыми госбюджетными заданиями в 2010-2017 гг.:

**1.** НИР "Исследование влияния природных и антропогенных факторов на ультрафиолетовый климат Республики Беларусь и определение биологически эффективных доз ультрафиолетовой радиации для составления долгосрочных прогнозов воздействий ультрафиолета", 2006-2010 г., № г.р. 20065104;

**2.** ГП НСМОС "Выполнение мероприятий (заданий) государственной программы развития системы мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь на 2006 – 2010 годы (п. 35, 38, 44)", 2006-2010 г., № г.р. 20066818;

**3.** ГЦП, задание 1.2 "Доработать и изготовить измеритель общего содержания озона ПИОН и усовершенствовать спектрорадиометр ПИОН-УФ с целью организации мониторинга озонового слоя в полярных районах Земли", 2008-2010 г., № г.р. 20081972;

**4.** НИОК(Т)Р "Организовать и провести комплексные исследования состояния озоносферы и ультрафиолетовой радиации в Антарктике, осуществить гидрометеорологическое обеспечение деятельности Белорусской Антарктической экспедиции и провести климатические исследования", 2012-2015 г., № г.р. 20115680;

**5.** БРФФИ "Пространственное распределение, временная изменчивость, эмиссии и стоки двуокиси азота в атмосфере над территорией Союзного государства России и Беларуси", 2012 г., Ф10Р-214, № г.р. 20102961;

**6.** НИОК(Т)Р "Разработка программно-методических средств восстановления общего содержания озона по спектральному распределению освещенности земной поверхности при больших зенитных углах Солнца с учетом привлечения априорной информации об общем содержании двуокиси азота в атмосфере", 2012 г., № г.р. 20121191;

**7.** РФФИ "Влияние антропогенных и естественных эмиссий парниковых и загрязняющих примесей на климатические и экосистемные изменения в Евразии", 2014, № г.р. 144700049;

**8.** РФФИ "Развитие методов и аппаратного комплекса для наблюдения глиоксаля как продукта окисления летучих органических соединений в атмосфере", 2016, № г.р. 163550100;

**9.** НИОК(Т)Р "Разработать научно-учебный программный комплекс для анализа состояния атмосферы по данным орбитальных наблюдений и

моделирования процессов переноса излучения в атмосфере", 2017-2019, № г.р. 20171513.

**10.** ГПНИ "Экспериментальные и модельные исследования влияния малых газовых составляющих атмосферы на сезонные вариации УФ облученности в приземном слое и водных экосистемах в районе базирования Белорусской Антарктической экспедиции", 2016-2020 г., № г.р. 20163748.

### **Цель и задачи исследования**

**Цель работы** заключалась в создании методик измерений параметров МГС в атмосфере и разработке аппаратно-программного комплекса (АПК) для определения вертикального распределения  $\text{NO}_2$  и других МГС в воздухе антропогенных и чистых зон оптическим дистанционным методом.

В диссертации поставлены следующие **задачи**:

- 1) разработать и создать АПК всепогодного исполнения, способный регистрировать и сохранять спектры яркости небесной сферы под различными углами возвышения в автоматическом режиме;
- 2) разработать программы управления АПК и методики обработки спектральных данных нулевого и первого уровня;
- 3) проверить корректность восстанавливаемых наклонных толщ МГС; проверить корректность решения обратной задачи;
- 4) установить закономерности параметров профилей  $\text{NO}_2$  над крупными городами и в экологически чистых районах.

**Объектом исследования** служили МГС.

**Предметом исследования** являются ряды восстановленных при помощи АПК профилей МГС в воздухе антропогенных и чистых зон.

### **Научная новизна**

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Создан АПК, отличающийся от мировых аналогов эффективностью своей оптической схемы, при помощи которого получены оригинальные ряды экспериментальных данных из различных точек земного шара: Беларусь (г. Минск, р-н оз. Нарочь), Германия (г. Майнц), Нидерланды (г. Кабау), Восточная Антарктика (ст. "Прогресс").

2. Разработан метод коррекции результатов измерений наклонных толщ МГС по результатам измерений эталонного прибора. В ходе применения предложенного метода, в остаточных спектрах независимым способом была обнаружена температурная зависимость вращательного рамановского рассеяния.

3. Обнаружена корреляция профилей концентрации  $O_3$  и  $NO_2$ , а также начало фотохимического распада  $NO_2$  по окончании полярного дня в стратосфере Антарктики.

4. Экспериментально получены, проанализированы и классифицированы вертикальные профили  $NO_2$  над г. Минск, исходные данные для которых регистрировались в течение одного года.

### **Положения выносимые на защиту**

1. Разработанный аппаратно-программный комплекс с многоосевой геометрией наблюдений, в котором входная щель спектрографа выполняет функцию диафрагмы угла зрения, позволяет регистрировать спектры яркости небесной сферы в автоматическом режиме и обеспечивает восстановление профилей малых газовых составляющих, при температурах от  $-30$  до  $+40$  °С, позволяет определять параметры стратосферных профилей  $NO_2$  и  $O_3$  в сумерки, тропосферные профили аэрозольного поглощения и концентрации  $NO_2$  в течение светового дня с временным разрешением 1,5 мин. в диапазоне 320-390 нм или 0,5 мин. в диапазоне 411-490 нм.

2. Методика математической коррекции результатов измерений дифференциальных наклонных толщ при сопоставлении с эталонными данными, отличающаяся тем, что подавление высокочастотного шума в спектрах первого уровня приводит к уменьшению ошибки при решении прямой задачи.

3. Алгоритм работы аппаратно-программного комплекса, обеспечивающий расширение возможности регистрации спектров при зенитных углах солнца до  $97^\circ$  с более высокой в 3-14 раз скоростью регистрации по сравнению с аналогами.

4. Методики и результаты анализа временных рядов параметров аэрозоля по методу MAX-DOAS в восточной Антарктиде; параметров  $NO_2$  и  $O_3$  в восточной Антарктиде и р-не оз. Нарочь в сумерки, параметров стратосферных профилей  $NO_2$  и  $O_3$ , тропосферных профилей  $NO_2$  над г. Минск за 2017 год.

### **Личный вклад соискателя**

Результаты диссертационной работы, сформулированные в защищаемых положениях и выводах, получены автором самостоятельно. Научный руководитель А.Н. Красовский участвовал в выборе темы, постановке задач и обсуждении полученных результатов.

В.С. Демин и А.Н. Боровский оказали помощь на начальных этапах создания АПК. Т. Wagner оказывал соискателю поддержку в участии в

международных кампаниях сравнений. А.Г. Светашев, Л.Н. Турышев и С.К. Бородко участвовали в обсуждении результатов. А.А. Гайдашов оказывал логистическую и организационную поддержку в ходе 6-й Белорусской Антарктической экспедиции (БАЭ). Y. Wang предоставил алгоритм PriAM для восстановления тропосферных профилей оптической толщи аэрозоля и двуокиси азота. А.С. Елохов и О.В. Постыляков участвовали в обсуждении аспектов организации наблюдений МГС в Минске и на ЗНС.

Работы, выполненные соискателем совместно с большими коллективами зарубежных соавторов, отражают вклад разработанного АПК в международные сравнения на одном уровне с мировыми аналогами.

### **Апробация диссертации и информация об использовании её результатов**

Изложенные в диссертационной работе результаты докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

"Международный симпозиум атмосферная радиация и динамика" (г. Санкт-Петербург, Россия, 2011); международной конференции "Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды" (к.п. Нарочь, Беларусь, 2011); международной конференции "European Geosciences Union 2012" (г. Вена, Австрия, 2012); международной школы-конференции "Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические эффекты" (г. Звенигород, Россия, 2012); международной конференции "Quadrennial Ozone Symposium 2012" (г. Торонто, Канада, 2012); международной конференции "European Geosciences Union 2013" (г. Вена, Австрия, 2013); международной конференции "American Geophysical Union" (г. Сан-Франциско, США, 2013); международной конференции "35-th Canadian Symposium of Remote Sensing" (г. Квебек, Канада, 2014); международной научно-практической конференции "Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечение деятельности национальных экспедиций" (к.п. Нарочь, Беларусь, 2014); международной конференции "European Geosciences Union 2015" (г. Вена, Австрия, 2015); международной конференции "7-th International DOAS Workshop" (г. Брюссель, Бельгия, 2015); международной конференции "Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата" (г. Минск, Беларусь, 2015); международной конференции "European Geosciences Union 2016" (г. Вена, Австрия, 2016); международной конференции "Challenges for Climate Science - Synergies between SPARC and the WCRP Grand Challenges" (г. Берлин, Германия, 2016); международной конференции "European Geosciences Union 2017" (г. Вена, Австрия, 2017); международной конференции "European Geosciences Union 2018" (г. Вена, Австрия, 2018);

международной конференции "3-rd CINDI-2 Workshop" (г. Фраскати, Италия, 2019); V Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (г. Минск, Беларусь, 2019).

Созданный прибор принимал участие в международной кампании сравнений Multi Axis Doas - Comparison campaign for Aerosols and Trace gases (MAD-CAT, г. Майнц, Германия, 2013) и в международной кампании сравнений Cabauw Intercomparison of Nitrogen Dioxide measuring Instruments 2 (CINDI-2, г. Кабау, Нидерланды, 2016).

Результаты диссертационного исследования внедрены в технологический процесс методик измерения и регистрации спектров яркости небесной сферы в ИФА им. А.М. Обухова РАН (1 акт), в технологический процесс проведения экспериментов для ГУ РЦПИ НАН РБ (1 акт), в практику мониторинга параметров атмосферы в НИИЦ МО БГУ (1 акт).

### **Опубликованность результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 51 научной работе, из которых: 11 статей в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 5 авторских листов), 2 статьи в других научных изданиях, 7 статей в сборниках материалов научных конференций, 31 тезисы в сборниках материалов научных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и пяти приложений. Полный объем диссертации составляет 144 страницы, в том числе 54 рисунка занимают 28 страниц, 5 таблиц на 2 страницах, 2 приложения на 8 страницах. Библиографический список содержит 161 наименование, включая собственные публикации соискателя ученой степени (занимает 18 страниц).

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**В главе 1** представлен обзор основных методов измерений МГС в атмосфере. В разделе **1.1** перечислены преимущества и недостатки оптических методов дистанционного зондирования атмосферы. Отмечено, что для задач мониторинга, применение пассивных оптических методов является более

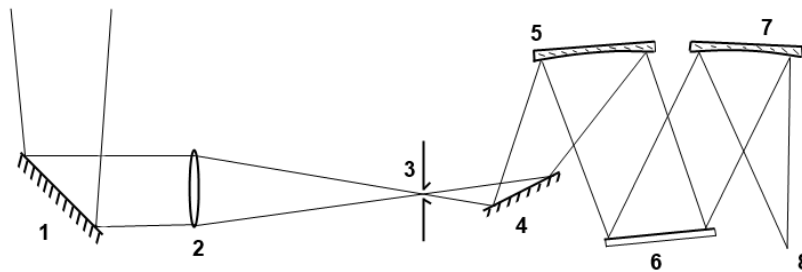


актуальным в сравнении с активными. В разделе **1.2** описан один из наиболее перспективных среди пассивных дистанционных методов – метод дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (DOAS).

В разделе **1.3** описан метод MAX-DOAS как модификация метода DOAS для измерения вертикальных распределений малых газовых составляющих в тропосфере. Основными преимуществами метода MAX-DOAS являются: бесконтактность, большой диапазон детектируемых МГС, простота реализации продолжительных измерений в реальном времени. Отмечается также, что исследование распределений МГС в стратосфере наземным пассивным методом возможно только при зенитной геометрии наблюдений, в сумерки. В разделе **1.4** анализируются варианты создания приборов для задач дистанционного зондирования, имеющих оптоволоконный ввод излучения, в рамках совместных проектов с ИФА РАН им. А.М. Обухова (г. Москва). Представлены основные этапы создания, настройки и особенности этих приборов с оптической точки зрения [4, 6].

Обзор литературы показал необходимость создания оптического прибора для дистанционного зондирования в Беларуси, измерения которого могут быть обработаны как зенитным методом, так и методом MAX-DOAS, с целью использования преимуществ обоих методов. Определяются задачи диссертационного исследования, а также предмет и объект исследования.

**Глава 2** посвящена практическим аспектам создания АПК с многоосевой геометрией наблюдений для мониторинга МГС. В разделе **2.1** описан оптический расчет телескопа, методика определения области линейности детектора, методика оценки воздействия температурных деформаций на оптические характеристики спектрографа, оптическая схема которого представлена на рисунке 1. В разделе **2.2** представлена структурная схема АПК.



- 1 – поворотное зеркало; 2 – линза; 3 – входная щель спектрографа;  
4 – плоское зеркало; 5 – входной объектив; 6 – дифракционная решетка;  
7 – камерный объектив; 8 – спектральное изображение**

**Рисунок 1. – Оптическая схема спектрографа АПК MARS-B**

В разделе **2.3** приводятся характеристики созданного АПК в сравнении с мировыми аналогами, которые определялись в ходе международной кампании сравнений приборов подобного типа MAD-CAT, 2013.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики приборов-участников за один день измерений кампании MAD-CAT [51], откуда следует, что АПК MARS-B способен проводить измерения при большем диапазоне зенитных углов солнца, а также превосходит представленные аналоги по количеству измерений.

Таблица 1. – Количественные параметры данных приборов за 08.07.2013

|                                    | <i>2D DOAS<br/>Boulder, CO<br/>USA</i> | <i>4-azimuth<br/>MPIC Mainz,<br/>Germany</i> | <i>EUSAAR,<br/>Heidelberg,<br/>Germany</i> | <i>MARS-B,<br/>Minsk,<br/>Belarus</i> |
|------------------------------------|--|--|--|---------------------------------------|
| <i>Измерений за световой день</i>  | 1474                                   | 1774   | 383  | 5554                                  |
| <i>Азимутальных направлений</i>    | 15                                     | 1  | 9  | 1                                     |
| <i>Измерений в одном напр.</i>     | 60                                     | 162  | 38   | 463                                   |
| <i>Продолж. измерений, ч.</i>      | 14,14                                  | 14,47  | 14,67                                      | 16,90                                 |
| <i>Диап. зенитных углов солнца</i> | 72,51° - 91,76°                        | 88,21° - 79,68°                              | 84,85° – 84,98°                            | 100° – 85,3°                          |

Таким образом, продолжительность измерений в области 411-490 нм для средних широт за световой день при помощи MARS-B оказалась примерно на 2 часа больше в сравнении с аналогами, а качество получаемых данных (разброс и среднее значение) соответствует статистическим параметрам аналогичных приборов [3, 7].

В разделе **2.4** приводятся характеристики созданного АПК относительно мировых аналогов, которые определялись в ходе международной кампании сравнений CINDI-2. В ней приняли участие 26 научных групп из разных институтов мира, всего 36 приборов были установлены на измерительной площадке в г. Кабау [52].

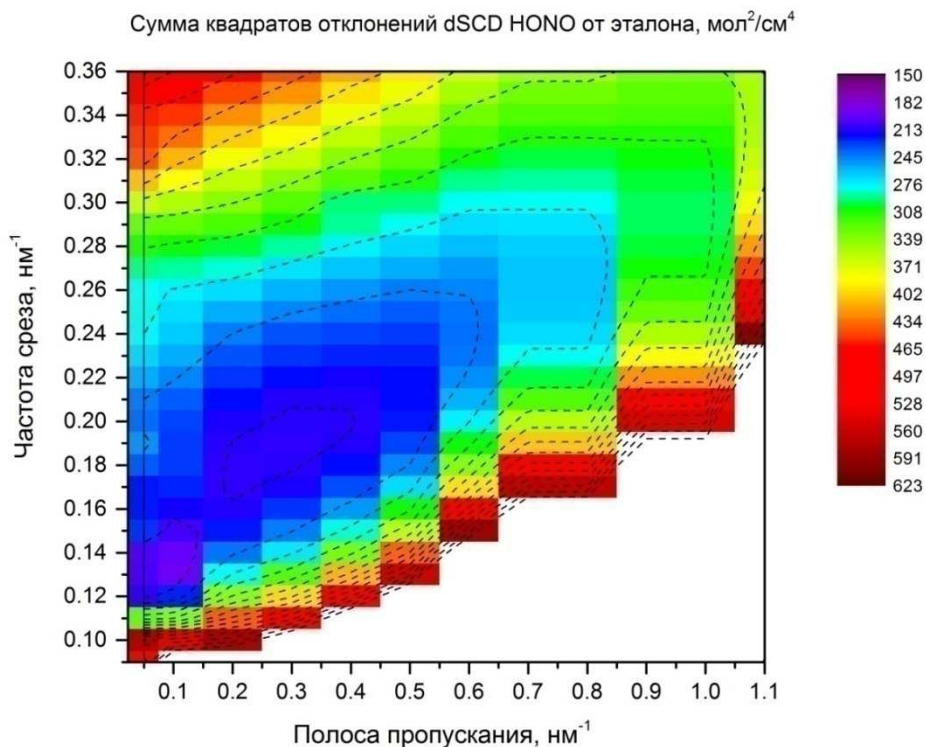
В ходе кампании CINDI-2, АПК MARS-B работал в диапазоне длин волн 320-390 нм. Большой набор полученных данных позволил более точно оценить статистические параметры измеряемых наклонных толщ МГС.

Кроме скорости регистрации спектров, в данных прибора MARS-B выявилось наличие систематической ошибки, вследствие чего происходило недооценивание измеряемых величин наклонных толщ МГС от 10 до 20 %. Также была определена точность позиционирования телескопа АПК по углу возвышения: в пределах 0,1° [11].

**Глава 3** посвящена определению природы систематической ошибки в измерениях MARS-B при работе в УФ-диапазоне и способу ее устранения.

В разделе 3.1 приводится описание процесса обработки спектров яркости методом DOAS с практической точки зрения. В разделе 3.2 рассматривается проблема сравнения данных двух приборов, работающих по методу DOAS. В разделе 3.3 предлагается методика математической коррекции спектрального шума путем применения цифрового фильтра низких частот к регистрируемым спектрам. В разделе 3.4 представлены результаты практической реализации методики математической коррекции для наклонных толщ HONO, зарегистрированным в ходе кампании CINDI-2. Вводится понятие эталонного прибора, в качестве критерия удовлетворительного подбора параметров фильтра предлагается использовать сумму квадратов отклонений СКО значений наклонных толщ HONO от соответствующих средних значений – эталонного прибора. В данном случае СКО выступает в качестве целевой функции, которая минимизируется путем подбора параметров фильтра.

На рисунке 2 представлен вид целевой функции на примере HONO для одного дня измерений. HONO была выбрана в качестве примера по той причине, что она находилась на пределе обнаружения методом DOAS в исследуемых условиях наблюдений.



**СКО dSCD HONO от эталонного измерения за день измерений**

**Рисунок 2. – Сумма квадратов отклонений от эталона**

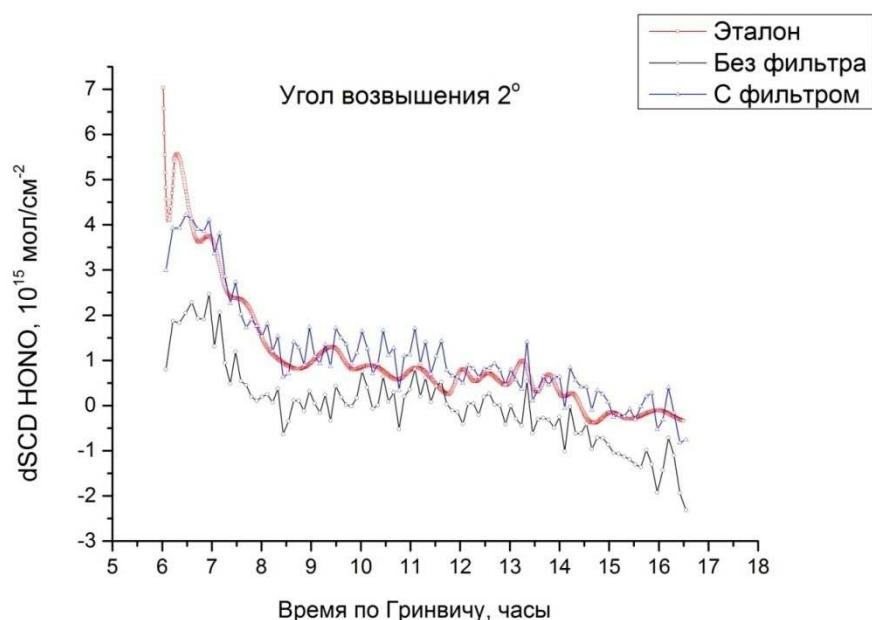
В разделе 3.5 для определения природы спектрального шума представлены результаты эксперимента, в ходе которого варьировались параметры работы детектора спектрографа, а именно: скорость считывания и

температура детектора. После проведения DOAS-анализа при помощи Фурье-преобразования исследовался остаточный спектр, на основании чего делается вывод о наличии высокочастотной шумовой компоненты в спектрах нулевого уровня.

При подборе параметров фильтра, в остаточном спектре было обнаружено присутствие повторяющейся структуры, особенности которой не зависели от места проведения измерений (измерения проводились в Нидерландах, Германии и в Беларуси в разное время) а ее амплитуда менялась в течение дня. Обнаруженная структура по своему спектру очень похожа на структуру, независимо полученную [Lampel J., 2013], методом анализа главных компонент, и описанную как температурный эффект вращательного рамановского рассеяния.

На примере наклонных толщ HONO, показана возможность корректировки получаемых наклонных толщ путем подбора оптимальных параметров фильтра низких частот для предварительной обработки экспериментальных спектров.

Результат выполнения процедуры такой корректировки представлен на рисунке 3. В рассмотренном случае с HONO, в диапазоне длин волн 335-373 нм, были определены оптимальные параметры фильтра Кайзера, при фиксированной крутизне ослабления в 70 dB: частота среза  $0,13 \text{ нм}^{-1}$  и полоса пропускания  $0,1 \text{ нм}^{-1}$ .



**Рисунок 3. – Сравнение значений наклонных толщ HONO, полученных с использованием фильтра и без использования фильтра с интерполированными эталонными значениями**

При использовании вышеназванных параметров фильтра, среднее значение квадрата амплитуды остаточного спектра после проведения процедуры DOAS анализа уменьшилось с  $1,67 \cdot 10^{-3}$  до  $6,94 \cdot 10^{-4}$  O.D. (почти в 2,4 раза). Кроме того, анализировалось поведение целевой функции для  $O_4$  и  $NO_2$ , для чего проводились исследования по описанной выше методике, но с небольшой разницей: вместо 336 вариантов обработки для однодневного ряда данных, применялось 8800 вариантов обработки для каждого из шести дней измерений – с целью проведения более полного исследования.

Полученные выводы для  $O_4$  и  $NO_2$  не противоречат исследованию работы алгоритма на примере HONO. При этом показано, что для определения оптимальных параметров фильтра желательно выбирать ряд наблюдений с плавными временными изменениями. Такой выбор позволяет уменьшать влияние ошибок интерполирования данных, полученных приборами различного временного разрешения, для создания эталонного измерения. Блок-схема алгоритма представлена в разделе **3.6**.

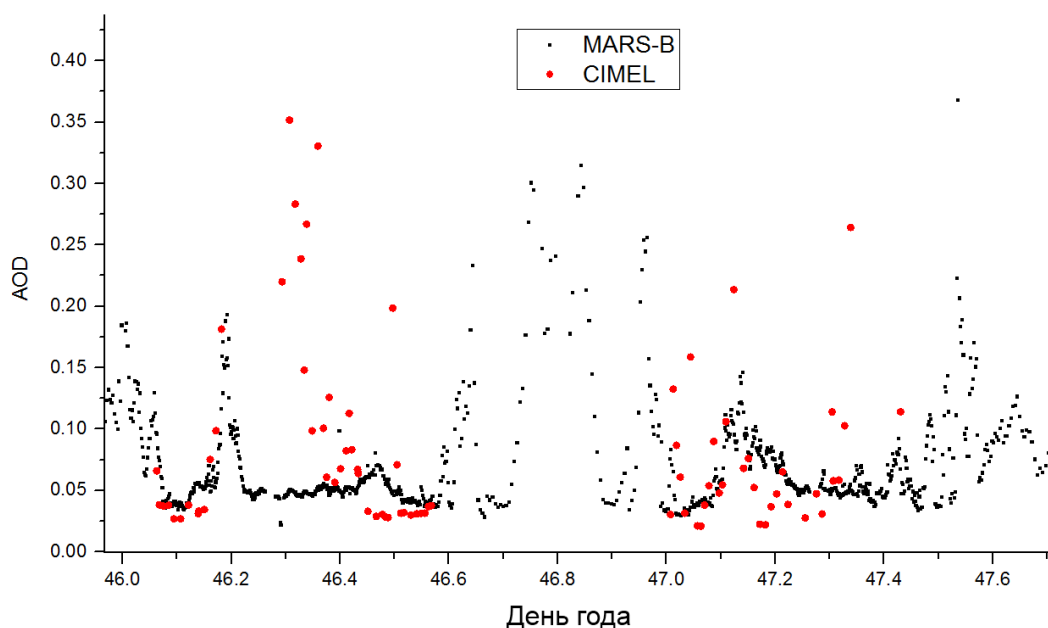
Таким образом, на примере HONO показана возможность калибровки получаемых в результате DOAS-анализа значений наклонных толщ МГС, позволяющая проводить коррекцию результатов измерений с учетом индивидуальных особенностей прибора, с использованием предварительной математической обработки спектров при помощи фильтра низких частот.

**Глава 4** посвящена анализу рядов экспериментальных данных дневных и сумеречных измерений, зарегистрированных АПК MARS-B.

В разделе **4.1** представлены результаты измерений аэрозольной оптической толщи в ходе 6-й Белорусской антарктической экспедиции в сравнении с данными солнечного фотометра CIMEL CE318 №399 для длины волны 340 нм. Отмечается, что в силу особенностей распространения излучения в атмосфере, одновременное измерение аэрозольного поглощения по прямому и рассеянному солнечному излучению различными методами может дать информацию о наличии/отсутствии высотного аэрозольного поглощения, что имеет большое значение для исследований антарктических озоновых аномалий. В тех случаях, когда результаты, полученные обоими методами совпадают, можно говорить об отсутствии аэрозольного поглощения на высотах более 4 км (рисунок 4).

В разделе **4.2** представлены результаты измерений стратосферного  $O_3$  и  $NO_2$  в ходе 6-й Белорусской антарктической экспедиции. Анализ рядов данных показал, что в некоторый период времени дневной ход наклонных толщ (DSCD)  $O_3$  меняет свою форму, она становится ближе к квадратной (т. е. DSCD начинает более резко увеличиваться с увеличением зенитного угла солнца), что

означает изменение высоты слоя  $O_3$  (т.е. подъем слоя  $O_3$  примерно до высоты слоя  $NO_2$ ).



**Рисунок 4. – Дневной ход AOD методом MAX-DOAS и по прямому солнцу для длин волн 416-500 нм, станция "Прогресс", Восточная Антарктида, 2014 год**

Наряду с изменением формы дневного хода DSCD, из данных рисунка 5 можно также заметить изменение максимальных значений DSCD: у  $O_3$  они увеличились, в то время как максимальные значения DSCD  $NO_2$  уменьшились, что может указывать на взаимодействие между  $O_3$  и  $NO_2$  непосредственно, либо при участии промежуточного агента.

Одно из возможных объяснений совокупности поведения формы дневного хода и изменения максимальных значений DSCD, которые наблюдаются при обработке данных натурального эксперимента, может состоять в следующем: наличие высотного слоя  $NO_2$  в верхней стратосфере сдерживает генерацию стратосферного  $O_3$ , а после того, как содержание  $NO_2$  в слое уменьшается, максимум концентрации  $O_3$  поднимается выше и общее содержание  $O_3$  в слое увеличивается.

Для обоснования данного утверждения, проводилось моделирование переноса излучения в атмосфере при помощи модели переноса излучения *libRadtran* с различными параметрами профилей  $NO_2$ , в ходе которого выдвинутую гипотезу опровергнуть не удалось. Отмечается также, что данные наблюдений согласуются с данными реанализа (рисунок 5, в).

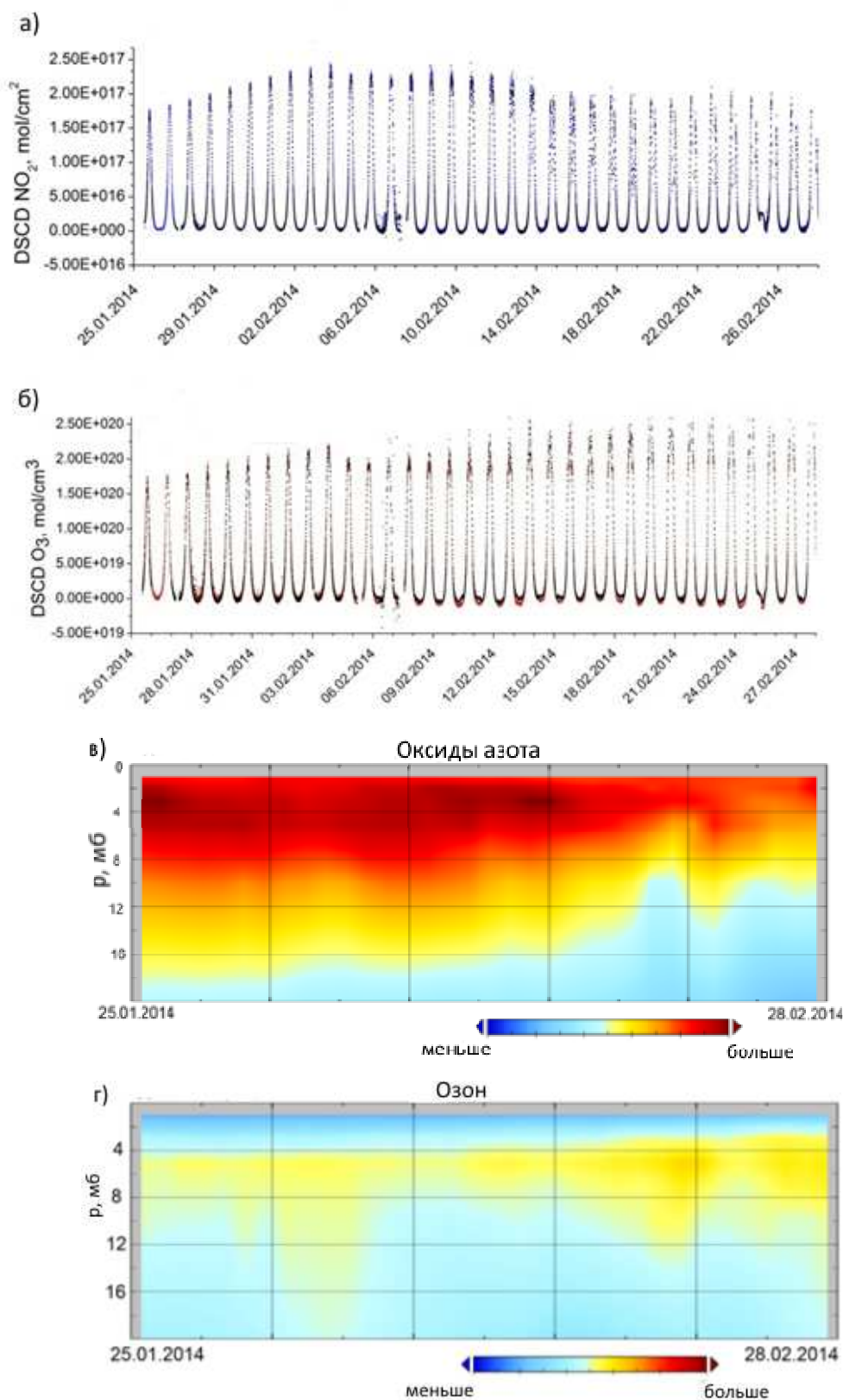


Рисунок 5. – Сопоставление рядов измеренных наклонных толщ  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  (станция "Прогресс", Восточная Антарктида) и данных реанализа: а) наклонные толщ двуокиси азота; б) наклонные толщ озона; в) данные реанализа для оксидов азота; г) данные реанализа для озона

Представлены результаты измерений  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  в сумерки, в сравнении с данными спутников GOME и OMI, а также в сравнении с данными штатного прибора ННИЦ МО БГУ (PION-UV). Анализ ряда данных показал следующее:

- стратосферное содержание МГС пропорционально соответствующей наклонной толще для зенитной геометрии наблюдений при зенитном угле солнца  $91^\circ$ , – это подтверждается сравнением с данными спутников GOME и OMI за период наблюдений;

- в полярный день утренние и вечерние содержания стратосферной  $\text{NO}_2$  одинаковы, тогда как с увеличением продолжительности ночи разница между утренними и вечерними значениями возрастает. Это происходит до некоторого момента, после чего состояние стабилизируется, и различие между утренними и вечерними значениями остается на одном уровне и составляет примерно 40 %, т. е. зарегистрирован факт фотохимического распада  $\text{NO}_2$  в течение ночи.

Раздел 4.3 посвящен исследованию изменчивости временных рядов вертикальных профилей  $\text{NO}_2$  в тропосфере над Минском. На основании результатов анализа возможных сценариев поведения вертикального распределения  $\text{NO}_2$  в течение дня, предложена классификация восстановленных профилей концентрации  $\text{NO}_2$  за исследуемый период наблюдений по пяти группам: чистые дни (17,4 %), автотранспортные загрязнения (19,2 %), конвективный подъем (7,8 %), всплески (9,3 %) и случаи комбинированного загрязнения (15,5 %). Остальные 30,8 % случаев классификации не поддаются по причине наличия плотной облачности в период наблюдений. Представлен ряд наблюдений общего содержания  $\text{NO}_2$  в Минске за 2017 год.

Представлен среднегодовой дневной ход общего содержания  $\text{NO}_2$  над Минском, откуда можно заметить наличие суточной компоненты в виде фоновой подставки, то есть плавная часть дневного хода  $\text{NO}_2$  частично определяется выбросами автотранспорта. При этом в течение года можно заметить около 20 резких кратковременных выбросов (продолжительность выброса не превышает 30 минут), в ходе которых общее содержание  $\text{NO}_2$  увеличивается в 1,5-6 раз по сравнению с фоновым средне-годовым значением  $1 \cdot 10^{16}$  молекул/см<sup>2</sup>.

Отмечается, что за весь период наблюдений в Минске получено более 3 млн. дневных спектров, которые были обработаны методом MAX-DOAS. Проведено сравнение данных прибора MAX-DOAS и ближайшей стационарной точки мониторинга №11 по данным Белгидрометцентра, полученных методом отбора проб на масштабе времени один месяц.

В разделе 4.4 представлены результаты измерений  $\text{NO}_2$  в р-не оз. Нарочь, которые показали полное отсутствие тропосферной  $\text{NO}_2$  за период измерений (аналогичная картина наклонных толщ впоследствии наблюдалась в воздухе



Восточной Антарктики). Из анализа проведенных результатов измерений следует, что "чистые дни" в различных районах могут иметь принципиальное отличие, которое состоит в наличии приземной компоненты  $\text{NO}_2$ , имеющей локальные источники. Представлено сравнение дневного хода наклонных толщ  $\text{NO}_2$  для чистых дней из различных регионов.

Приблизительная сравнительная оценка "чистого дня" в Минске и чистого дня в р-не оз. Нарочь (сравнимого по чистоте с воздухом Антарктики в терминах  $\text{NO}_2$ ) говорит о том, что в Минске концентрации  $\text{NO}_2$  могут отличаться в 4-5 раз в большую сторону. При сравнении с загрязненными событиями концентрации могут отличаться в 20-100 раз.

В ходе совместных работ с ИФА им. Обухова РАН по результатам наблюдений получены первые оценки изменчивости МГС в зоне влияния Московской агломерации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

1. Создан АПК MARS-B с многоосевой геометрией наблюдений, позволяющий регистрировать спектры участков небесной сферы в УФ и видимом диапазонах в автоматическом режиме, что дает возможность восстанавливать профили вертикального распределения МГС, отличающийся от зарубежных аналогов способом ввода излучения в спектрограф [1, 2, 8, 21-24, 26, 28, 29, 36, 42].

2. Предложен и опробован метод корректировки результатов измерений дифференциальных наклонных толщ по результатам измерений эталонного прибора. В ходе анализа результатов практического применения предлагаемого метода, в остаточных спектрах была обнаружена спектральная структура температурной зависимости ринг-эффекта. [7, 16, 20, 42, 48, 51]

3. Установлены характеристики АПК MARS-B, определенные в ходе двух международных кампаний сравнений, показана возможность регистрировать качественные спектры в УФ (315-399 нм) и видимом диапазонах (409 - 493 нм) при зенитных углах солнца до  $97^\circ$ - $100^\circ$ , установлена скорость регистрации спектров в сравнении с аналогами: от 3 до 14 раз быстрее. Опробован алгоритм восстановления (PriAM) вертикального распределения тропосферной  $\text{NO}_2$ , полученные результаты проверялась в ходе совместных работ. [3, 5, 6, 11, 29, 32, 40-46]

4. Проведены измерения параметров аэрозоля и параметров  $\text{NO}_2$  и  $\text{O}_3$  в восточной Антарктиде а также в р-не оз. Нарочь, параметров формальдегида на Звенигородской научной станции. Экспериментально зафиксировано начало

фотохимического распада  $\text{NO}_2$  в стратосфере Антарктики по окончании полярного дня в ночные периоды: при увеличении продолжительности ночи увеличивается разница между утренними и вечерними значениями стратосферной  $\text{NO}_2$ , однако начиная с определенного момента, эта разница становится практически неизменной. Экспериментально зафиксировано взаимодействие  $\text{O}_3$  и  $\text{NO}_2$  в стратосфере: при уменьшении количества стратосферной  $\text{NO}_2$ , общее содержание  $\text{O}_3$  возрастает и слой  $\text{O}_3$  поднимается выше, при этом слой  $\text{NO}_2$  в период наблюдений располагается выше слоя  $\text{O}_3$ .

Проведены измерения  $\text{NO}_2$  над г. Минск, в результате анализа полученного ряда данных классифицировано и выделено пять типичных дневных ходов вертикальных профилей концентрации тропосферной  $\text{NO}_2$  для г. Минска за 2017 год. [4, 8, 9, 10, 12, 14, 15, 17, 18, 28, 36, 39, 41, 50]

### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

АПК MARS-B использовался в ходе двух международных кампаний сравнений с целью верификации получаемых данных путем статистического сравнения с данными аналогичных приборов.

Методы, использованные при построении АПК MARS-B и регистрации спектров яркости, внедрены в процесс регулярных измерений МГС на Звенигородской научной станции (1 акт о практическом применении в ИФА им. А.М. Обухова РАН) [33, 35, 37, 38].

АПК MARS-B используется [10, 13, 25, 27, 30, 34, 49] в качестве средства мониторинга состояния воздуха, для восстановления вертикального распределения МГС, а также вертикальных профилей аэрозольного поглощения (2 акта о практическом применении в ГУ РЦПИ НАН РБ и ННИЦ МО БГУ). Модернизация системы ввода излучения прибора MARS-B до уровня солнечного трекера позволит проводить измерения по прямому солнцу, используя лунный и звездный свет. Используя зенитный сумеречный метод АПК MARS-B можно использовать для изучения стратосферных процессов над Республикой Беларусь.

Для задач дистанционного зондирования интерес представляет аэрозольное состояние атмосферы на момент проведения измерений. Малогабаритный спектрометр наземного базирования по схеме MARS-B теоретически может предоставить такую информацию [19, 20, 31, 47, 50].

АПК MARS-B можно применять для контроля городских источников эмиссий двуокиси азота, а также для оценки мощности выбросов [48]. Данные АПК MARS-B можно использовать в качестве граничных условий для гидродинамической модели переноса воздушных масс с целью определения коридоров проветривания для города Минска.

С помощью разработанного метода математической коррекции возможно проведение сравнений с последующей калибровкой других приборов с многоосевой геометрией наблюдений при компарировании с аппаратно-программным комплексом MARS-B.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Прибор для дистанционной регистрации двуокиси азота в атмосфере / И.И. Бручковский, А.Н. Боровский, В.С. Демин, А.Н. Красовский // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2013. – № 1. – С. 41– 45.

2. Bruchkouski, I. Seasonal variability of the atmospheric trace constituents in Antarctica / I. Bruchkouski, V. Dziomin, A. Krasouski // Proceedings of IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. – Québec, 2014. – P. 4098 – 4100.

3. Бручковский, И.И. Зеркально-линзовый прибор MAX-DOAS: результаты международных сравнений MAD-CAT 2013 / И.И. Бручковский, А.Н. Красовский, В.С. Демин // Вестн. БГУ. Сер. 1. – 2015. – № 3. – С. 44 – 49.

4. A layout of two-port DOAS system for investigation of atmospheric trace gases based on laboratory spectrograph / I. Bruchkouski, A. Borovski, A. Elokhov, O. Postilyakov // Proceedings of SPIE. – 2016. – Vol. 10035. – P. 100353C-1 – 100353C-9.

5. Investigating differences in DOAS retrieval codes using MAD-CAT campaign data / E. Peters, G. Pinardi, A. Seyler, A. Richter, F. Wittrock, T. Bösch, J.P. Burrows, M. Van Roozendaal, F. Hendrick, T. Drosoglou, A.F. Bais, Y. Kanaya, X. Zhao, K. Strong, J. Lampel, R. Volkamer, T. Koenig, I. Ortega, A. Piter, O. Puentedura, M. Navarro, L. Gómez, M. Yela González, J. Remmers, Y. Wang, T. Wagner, S. Wang, A. Saiz-Lopez, D. García-Nieto, C. A. Cuevas, N. Benavent, R. Querel, P. Johnston, O. Postilyakov, A. Borovski, A. Elokhov, **I. Bruchkouski**, C. Liu, Q. Hong, H. Liu, C. Rivera, M. Grutter, W. Stremme, M. F. Khokhar, J. Khayyam // Atmospheric Measurement Techniques. – 2017. – № 10. – P. 955 – 978.

6. Study of different operational modes of the IAP 2-port-DOAS instrument for investigation of atmospheric trace gases during CINDI-2 campaign / A. Borovski, A. Elokhov, O. Postilyakov, **I. Bruchkouski** // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10424. – P. 104662Z-1 – 104662Z-7.

7. Предварительная обработка спектров для анализа по методу дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии / И.И. Бручковский, А. Г. Светашев, В. С. Демин, С. К. Бородко, П. П. Аникин, А. Н. Красовский // Журнал БГУ. Физика. – 2018. – № 2. – С. 86 – 96.

8. Aerosol profile measurements in the coastal zone of Antarctica: instrumentation and preliminary results / I. Bruchkouski, A. Krasouski, L. Turishev, S. Umreika, A. Elokhov, O. Postylyakov, Y. Wang // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10786. – P. 107860M-1 – 107860M-9.

9. Наблюдения интегрального содержания формальдегида в нижней тропосфере в городских агломерациях Москвы и Томска методом дифференциальной спектроскопии / И.И. Бручковский, А.Н. Боровский, А.В. Джола, Н.Ф. Еланский, О.В. Постыляков, О.Е. Баженов, О.А. Романовский, С.А. Садовников // Оптика атмосферы и океана. – 2019. – Т. 32, №1. – С. 11 – 18.

10. Бручковский, И.И. Восстановление вертикального профиля концентрации тропосферной двуокиси азота по результатам измерений в Минске / И.И. Бручковский // Журнал БГУ. Физика. – 2020. – №1. – С. 95 – 104.

11. Evaluating different methods for elevation calibration of MAX-DOAS (Multi AXis Differential Optical Absorption Spectroscopy) instruments during the CINDI-2 campaign / S. Donner, J. Kuhn, M. van Roosendael, A. Bais, S. Berlie, T. Bösh, K. Bognar, **I. Bruchkouski**, K. Chan, S. Dörner, T. Drosgolou, C. Fayt, U. Frieß, F. Hendrick, C. Hermans, J. Junli, A. Li, J. Ma, E. Peters, G. Pinardi, A. Richter, S. Schreier, A. Seyler, K. Strong, J.-L. Tirpitz, Y. Wang, P. Xie, J. Xu, X. Zhao, T. Wagner // Atmospheric Measurement Techniques. – 2020. – № 13. – P. 685 – 712.

### Статьи в других научных изданиях

12. Оптические исследования атмосферы и подстилающей поверхности в Антарктике. Глава 2 / А.П. Чайковский, Э.П. Зега, И.Л. Кацев, М.М. Король, А.П. Иванов, С.В. Денисов, В.П. Дик, А.В. Малинка, Ф.П. Осипенко, А.С. Прихач, А.С. Слесарь, Л.И. Чайковская, В.П. Кабашников, Н.С. Метельская, Я.А. Король, Л.А. Бондарчик, В.А. Свидинский, А.Н. Красовский, Л.Н. Турышев, А.Г. Светашев, В.С. Демин, В.Я. Венчиков, В.Н. Венчиков, В.В. Жучкевич, В.Л. Тавгин, С.К. Бородко, **И.И. Бручковский**, Я.М. Мицкевич, P. Golou, T. Podvin, L. Blarell, A. Laryonok, В.Ф. Радионов, А.А. Гайдашов, В.Ф. Логинов, А.К. Карабанов // Беларусь в Антарктике = Belarus in Antarctic: к 10-летию начала регулярных научных и экспедиционных исследований / под ред. акад. В. Ф. Логинова. – Мн.: Беларуская Навука, 2016. – С. 50 – 99.

13. Мониторинг озонового слоя / А.Н. Красовский, Л.Н. Турышев, А.Г. Светашев, А.М. Людчик, В.И. Покаташкин, В.В. Жучкевич, В.Я. Венчиков, В.Н. Денисенко, В.Л. Тавгин, С.К. Бородко, **И.И. Бручковский**, В.С. Демин, С.И. Бручковская, М.Х. Климов, В.В. Юркевич, Б.Б. Козерук, Е.А. Мельник // Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь: результаты наблюдений, 2017 год / под общ. ред.: Е.П. Богодяж. – Мн., 2018. – С. 224 – 229.

### Статьи в сборниках материалов научных конференций

14. Бручковский, И.И. Особенности распределения NO<sub>2</sub> в атмосфере / И.И. Бручковский, А.Н. Красовский, В.С. Демин // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы междунар. научн. конф., Минск, 5 – 8 мая 2015 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: П.С. Лопух (отв. ред.) [и др.]. – Мн., 2015. – С. 265 – 267.

15. Бручковский, И.И. Специфика проведения стратосферных измерений в Антарктиде / И.И. Бручковский, А.Н. Красовский, В.С. Демин // Природная среда Антарктики: современное состояние изученности : матер. II междунар. научн.-практ. конф., пос. Нарочь, 18–21 мая 2016 г. / ред. совет: В.Е. Мямин [и др.]. – Мн. : Конфидо, 2016. – С. 61 – 66.

16. Бручковский, И.И. Исследование остаточного спектрального шума в процедуре анализа по методу дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии / И.И. Бручковский, В.С. Демин, А.Н. Красовский // Приборостроение – 2017 : 10-я междунар. научн.-техн. конф., Минск, 01 – 03 нояб. 2017 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Мн., 2017. – С. 348 – 350.

17. Результаты измерений тропосферного аэрозоля методом MAX-DOAS в прибрежной зоне Антарктики (Восточная Антарктида) / И.И. Бручковский, А.Н. Красовский, Л.Н. Турышев, А.Г. Светашев, В.В. Станчик // Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана : матер. III Междунар. научн.-практ. конф., учебный центр «Форум», Минский р-н, 17–19 сент. 2018 г. / ред. совет. : Д.А. Лукашанец [и др.]. – Мн. : ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам», 2018. – С. 92 – 95.

18. Исследования спектрального альbedo подстилающей поверхности в местах базирования Белорусской Антарктической экспедиции / М.М. Король, **И.И. Бручковский**, А.П. Чайковский, В.П. Дик // Природная среда Антарктики: экологические проблемы и охрана : матер. III Междунар. научн.-практ. конф., учебный центр «Форум», Минский р-н, 17–19 сент. 2018 г. / ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» ; ред. совет. : Д.А. Лукашанец [и др.]. – Мн., 2018. – С. 345 – 348.

19. Метод измерения альbedo подстилающей поверхности и профиля поглощения аэрозоля / И.И. Бручковский, Г.С. Литвинович, С.И. Бручковская, Ю.В. Беляев // Приборостроение – 2018 : 11-я междунар. научн.-техн. конф., Минск, 14-16 нояб. 2018 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Мн., 2018. – С. 113 – 115.

20. Бручковский, И.И. Применение малогабаритного спектрометра ССП-600Н для дистанционного зондирования атмосферы и его интеркалибровка / И.И. Бручковский, А.Г. Светашев, Г.С. Литвинович // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : V междунар. научн.-практ. конф., Минск, 16 – 17 мая 2019 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Мн., 2019. – С. 11 – 12.

### **Тезисы докладов конференций**

21. Бручковский, И.И. Автоматизированная установка для измерения малых составляющих атмосферы / И.И. Бручковский, В.С. Демин // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тез. докл. XV Всероссийская школа-конф. молодых ученых, Борок, 30 мая – 3 июня 2011 г. / Ин-т. физ. Земли им. О. Ю. Шмидта. – Борок, 2011. – С. 29.

22. Бручковский, И.И. Автоматизированная установка для измерения двуокиси азота в атмосфере / И.И. Бручковский, В.С. Демин // Атмосферная радиация и динамика : тез. докл. междунар. симп., СПб гос. ун-т., 21–24 июня 2011. – СПб, 2011. – С. 162 – 163.

23. Бручковский, И.И. Автоматизированная установка для измерения общего содержания двуокиси азота в столбе атмосферы / И.И. Бручковский, В.С. Демин, А.Г. Светашев // Озерные экосистемы: биологические процессы, антропогенная трансформация, качество воды : тез. докл. IV междунар. научн. конф., к.п. Нарочь, 12-17 сент. 2011 г. / Белорус. гос. ун-т. ; ред.: Т.М. Михеева. – Мн., 2011. – С. 160.

24. The characteristic properties of DOAS technique for retrieval of trace gases / I. Bruchkouski, V. Demin, A. Svetashev, A. Krasouski // European Geosciences Union General Assembly 2012: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 22–27 Apr. 2012 / European Geosciences Union. – Vienna, 2012. – Vol. 14. – P. 12437.

25. Bruchkouski, I. Employing the MAX-DOAS geometry in the process of retrieving a vertical profile of nitrogen dioxide concentration / I. Bruchkouski, A. Krasouski // European Geosciences Union General Assembly 2013: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 7–12 Apr. 2013. / European Geosciences Union. – Vienna, 2013. – Vol. 15. – P. 660.

26. Бручковский, И.И. Оценка влияния аппаратных и методических факторов на точность определения содержания двуокиси азота в столбе

атмосферы / И.И. Бручковский, В.С. Демин, А.Н. Боровский // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тез. докл. XVI междунар. конф. молодых ученых, Звенигород, 28 мая – 1 июня 2012 г. / Ин-т физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН; ред.: А.В. Чернокульский. – Звенигород, 2012. – С. 41.

27. Analysis of Nitrogen Dioxide and Ozone Concentrations under Combined Processing of Spectra by Instruments with Different Aperture [Electronic resource] / I. Bruchkouski, A. Borovski, A. Krasouski, L. Turishev, A. Svetashev // Quadrennial Ozone Symposium 2012: Toronto, Canada, 26 Aug. - 1 Sept.: Abs. – Toronto, 2012. – P. 55 – 56. – Mode of access: [https://www.researchgate.net/publication/336676891\\_Analysis\\_of\\_Nitrogen\\_Dioxide\\_and\\_Ozone\\_Concentrations\\_under\\_Combined\\_Processing\\_of\\_Spectra\\_by\\_Instruments\\_with\\_Different\\_Aperture](https://www.researchgate.net/publication/336676891_Analysis_of_Nitrogen_Dioxide_and_Ozone_Concentrations_under_Combined_Processing_of_Spectra_by_Instruments_with_Different_Aperture). – Date of access: 20.10.2019.

28. Бручковский, И.И. Мониторинг озона и двуокиси азота на станции "Прогресс", Восточная Антарктида / И.И. Бручковский, А.Н. Красовский, В.С. Демин // Мониторинг состояния природной среды Антарктики и обеспечения деятельности национальных экспедиций : тез. докл. I междунар. научн.-практ. конф., к.п. Нарочь, 26 – 29 мая 2014 г. / ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам» . – Мн., 2014. – С. 24.

29. Inter-comparison of nitrogen dioxide column densities retrieved by ground-based MAX-DOAS under different instrumental conditions over Mainz [Electronic resource] / I. Bruchkouski, V. Dziomin, I. Ortega, R. Volkamer, A. Krasouski // American Geophysical Union, Fall Meeting 2013: Abs., San Francisco, USA, 9-13 Dec. 2013 / AGU ed.: E. Rozell, T. Narock. – San Francisco, 2013. – Mode of access: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013AGUFM.A31C0100B>. – Date of access: 20.10.2019.

30. Bruchkouski, I. Application of the angular position of the visible horizon for atmospheric trace gases retrieval by MAX-DOAS method / I. Bruchkouski, A. Krasouski, V. Demin // European Geosciences Union General Assembly 2015: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 12–17 Apr. 2015 / European Geosciences Union. – Vienna, 2015. – Vol. 17. – P. 1066.

31. Измерение характеристик атмосферных аэрозолей методами СПЭО и DOAS спектроскопии / Г.И. Чакур, **И.И. Бручковский**, А.Н. Красовский, А.Г. Светашев, Л.Н. Турышев // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тез. докл. 19-й междунар. школы-конф. молодых ученых, Туапсе, 25–29 мая 2015 / Ин-т физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. – Москва-Туапсе, 2015. – С. 54.

32. Разработка метода измерения вертикальных профилей концентрации малых газовых составляющих атмосферы по данным наземных наблюдений в спектральном диапазоне 290 – 450 нм / В.В. Божкова, **И.И. Бручковский**, В.С. Дёмин, А.Г. Светашев, Л.Н. Турышев // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тез. докл. 19-й междунар. школы-конф. молодых ученых, Туапсе, 25–29 мая 2015 / Ин-т физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. – Москва-Туапсе, 2015. – С. 33.

33. Предварительные результаты исследования пространственно-временного распределения содержания NO<sub>2</sub> и НСНО в тропосфере методом дифференциальной спектроскопии на Звенигородской научной станции / А.Н. Боровский, О.В. Постыляков, В.А. Иванов, Y. Kanaya, А.Н. Красовский, **И.И. Бручковский**, А.С. Елохов // Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы : тез. докл. 19-й междунар. школа-конф. молодых ученых, Туапсе, 25–29 мая 2015 / Ин-т физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. – Москва-Туапсе, 2015. – С. 34.

34. Bruchkouski, I. Catadioptric MAX-DOAS instrument – first observations results / I. Bruchkouski, A. Krasouski // Abs. 7-th International DOAS Workshop, Brussels, 6-8 July 2015 / Royal Belgian Institute of Natural Sciences. – Brussels, 2015. – P. 82.

35. Investigation of atmospheric composition using ground-based methods in cloudy conditions at Russian-Belorussian DOAS Network / O.V. Postylyakov, M.S. Andreev, A.S. Elokhov, A.P. Medvedev, A.I. Chulichkov, S.K. Borodko, A.N. Borovski, **I.I. Bruchkouski**, V.A. Ivanov, A.N. Krasouski, A.G. Svetashev // Geography, Culture and Society for our future Earth : Internat. Geographical Union Regional Conference, Moscow, 17-21 Aug. 2015 / Lomonosov Moscow St. Univ. – Moscow, 2015. – P. 1475.

36. The interaction of ozone and nitrogen dioxide in the stratosphere of East Antarctica / I. Bruchkouski, A. Krasouski, V. Demin, A. Svetashev // European Geosciences Union General Assembly 2016: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 17–22 Apr. 2016 : Abs. / European Geosciences Union. – Vienna, 2016. – Vol. 18. – P. 715.

37. Особенности модернизации монохроматора МДР-2 для мониторинга двуокси азота методом дифференциальной спектроскопии / И.И. Бручковский, А.Н. Боровский, А.С. Елохов, О.В. Постыляков // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: тез. докл. XXII междунар. симп., Томск, 30 июня - 3 июля 2016 г. / Ин-т оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. – Томск, 2016. – С. 112.

38. Исследование содержания формальдегида в атмосфере методом дифференциальной спектроскопии / А.Н. Боровский, **И.И. Бручковский**,



В.А. Иванов, О.В. Постыляков // Климат и эколого-географические проблемы российской Арктики : тез. докл. междунар. школа-конф. молодых ученых, Апатиты, 4 – 10 сент. 2016 г. / Ин-т физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. – М., 2016. – С. 51.

39. Employing DOAS procedure for the study of stratospheric ozone and nitrogen dioxide in Antarctica / I. Bruchkouski, A. Krasouski, V. Dziomin, A. Svetashev, S. Barodka, L. Turishev // Quadrennial Ozone Symposium 2016, Edinburgh, 4–9 Sept. 2016 / ИОС. – Edinburgh, 2016. – P. 347.

40. О первых результатах международной кампании сравнения приборов для измерения состава атмосферы методом дифференциальной спектроскопии в Кабау, Нидерланды (CINDI-2) / А.Н. Боровский, О.В. Постыляков, А.С. Елохов, **И.И. Бручковский** // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса : тез. докл. XIV Всероссийской открытой конф., Москва, 14-18 нояб. 2016 г. / ИКИ РАН; ред.: Н.П. Лаверов [и др.]. – М., 2016. – С. 146.

41. Stratospheric nitrogen dioxide: some peculiarities of its retrieval procedures and its possible effects on the total ozone column / I. Bruchkouski, A. Krasouski, V. Dziomin, S. Barodka, L. Turishev, A. Svetashev // Challenges for Climate Science - Synergies between SPARC and the WCRP Grand Challenges : Abs. WCRP/SPARC workshop, Berlin, 31 Oct. – 01 Nov., 2016 / German Aerospace Center. – Berlin, 2016. – P. 10.

42. Preliminary results of the CINDI-2 campaign for MARS-B instrument and its implementation for MAX-DOAS measurements over Minsk / I. Bruchkouski, Y. Wang, A. Krasouski, V. Dziomin, L. Turishev, A. Svetashev S. Barodka // European Geosciences Union General Assembly 2017: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 23–28 Apr. 2017 / European Geosciences Union. – Vienna, 2017. – Vol. 19. – P. 1065.

43. Intercomparison of HONO profiles derived from MAX-DOAS observations during the CINDI-2 campaign [Electronic resource] / Y. Wang, S. Donner, T. Wagner, F. Hendrick, M. Van Roozendaal, J. L. Tirpitz, U. Frieß, J. Lampel, S. Schmitt, A. S. López, N. Benavent, D. Garcia, J. Jin, J. Z. Ma, A. Piters, A. Apituley, B. Henzing, A. Bais, T. Drosoglou, Z. R. Wang, O. Postylyakov, A. Borovski, R. Querel, L. Gómez, **I. Bruchkouski**, C. Liu, H. R. Liu, C. Z. Xing, C. X. Zhang, K. Kreher, R. M. Volkamer, H. Finkenzeller, T. Koenig, P. H. Xie, J. Xu, X. Tian, O. L. Polyansky, L. Lodi, A. Hilboll, K. L. Chan // 8-th International DOAS Workshop, Yokohama, 4 – 6 Sept. 2017. – P. 41. – Mode of access: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/doasws2017/program.html>. – Date of access: 20.10.2019.

44. Central reprocessing of CINDI-2 MAX-DOAS NO<sub>2</sub>, O<sub>4</sub>, HCHO and O<sub>3</sub> slant column data [Electronic resource] / M. Van Roozendaal, C. Fayt, F. Hendrick, G. Pinardi, T. Drosoglou, A. Bais, F. Wu, A. Li, P. Xie, U. Frieß, A. Richter,

T. Boesch, S. Schreier, J. Jin, H. Irie, N. Benavent, D. García-Nieto, A. Saiz-López, T. Koenig, H. Finkenzeller, R. Volkamer, N. Hao, V. Kumar, C. Prados, O. Puentedura, A. Pipers, A. Cede, M. Tiefengrabe, T. Wagner, S. Donner, E. Spinei, P. Johnston, R. Querel, F. Khokhar, J. Khayam, M. Wenig, Ka Lok Chan, K. Bognar, K. Strong, A. Borovski, O. Postilyakov, A. Pazmino, M. Pinaranda, **I. Bruchkouski**, K. Kreher // 8-th International DOAS Workshop, Yokohama, 4 – 6 Sept. 2017. – P. 44. – Mode of access: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/doasws2017/program.html>. – Date of access: 20.10.2019.

45. Comparison of MAX-DOAS and ancillary profiling results during CINDI-2 [Electronic resource] / Jan-Lukas Tirpitz, U. Frieß, F. Hendrick, M. Allaart, A. Apituley, N. Benavent, S. Berkhout, T. Boesch, K. Bognar, **I. Bruchkouski**, K. L. Chan, M. den Hoed, S. Donner, T. Drosoglou, A. Frumau, L. Gast, L. Gomez, C. Gielen, N. Hao, A. Hensen, B. Henzing, S. Hoque, H. Irie, J. Jin, T. Koenig, K. Kreher, J. Lampel, A. Li, J. Ma, A. Merlaud, D. Nieto, E. Peters, G. Pinardi, A. Pipers, D. Pöhler, O. Postilyakov, A. Richter, S. Schmitt, E. Spinei, D. Stein, D. Swart, F. Tack, T. Vlemmix, R. van der Hoff, M. Van Roozendael, J. Vonk, T. Wagner, S. Wang, Y. Wang, Z. Wang, M. Wenig, M. Wiegner, F. Wittrock, P. Xie, X. Zhao, Jin Xu Comparison of MAX-DOAS and ancillary profiling results during CINDI-2 // 8-th International DOAS Workshop, Yokohama, 4 – 6 Sept. 2017. – P. 12. – Mode of access: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/doasws2017/program.html>. – Date of access: 20.10.2019.

46. Different ways of elevation calibration of MAX-DOAS instruments during the CINDI-2 campaign [Electronic resource] / S. Donner, J. Kuhn, A. Bais, K. Bognar, **I. Bruchkouski**, K. L. Chan, T. Drosoglou, C. Fayt, U. Frieß, F. Hendrick, C. Hermans, J. Jin, J. Ma, E. Peters, G. Pinardi, O. Puentedura, A. Richter, S. Schreier, A. Seyler, K. Strong, L. Tirpitz, M. Van Roozendael, Y. Wang, T. Wagner // 8-th International DOAS Workshop, Yokohama, 4 – 6 Sept. 2017. – P. 13. – Mode of access: <https://ebcrpa.jamstec.go.jp/doasws2017/program.html>. – Date of access: 20.10.2019.

47. Бручковский, И.И. Первые измерения параметров атмосферы по методу DOAS малогабаритным спектрометром низкого разрешения / И.И. Бручковский, Г.С. Литвинович, С.И. Бручковская // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса : тез. докл. XV Всероссийской откр. конф., Москва, 13–17 нояб. 2017 г. / ИКИ РАН; ред.: Л.М. Зеленый [и др.]. – М., 2017. – С. 150.

48. First NO<sub>2</sub> measurements by car-DOAS instrument in Minsk / H. Litvinovich, B. Beliaev, V. Stanchyk, **I. Bruchkouski**, S. Bruchkouskaya // European Geosciences Union General Assembly 2018: Geophysical Research

Abstracts, Vienna, 4–13 Apr. 2018 / European Geosciences Union. – Vienna, 2018. – Vol. 20. – P. 9690.

49. MAX-DOAS aerosol and NO<sub>2</sub> profile retrieval analysis data over Minsk / I. Bruchkouski, V. Demin, A. Svetashev, A. Krasouski, L. Turishev, Y. Wang, S. Barodka // European Geosciences Union General Assembly 2018: Geophysical Research Abstracts, Vienna, 4–13 Apr. 2018 / European Geosciences Union. – Vienna, 2018. – Vol. 20. – P. 9285.

50. Применение малогабаритного спектрометра для измерения профиля аэрозольного ослабления / И.И. Бручковский, Г.С. Литвинович, С.И. Бручковская, В.В. Станчик, А.П. Попков // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса : тез. докл. XV Всероссийской открытой конф., Москва, 12–16 нояб. 2018 г. / ИКИ РАН; ред.: Л.М. Зеленый [и др.]. – М., 2018. – С. 157.

51. Bruchkouski, I. Spectra calibration method for inter-comparison of MAX-DOAS instruments [Electronic resource] / I. Bruchkouski // 3rd CINDI-2 Workshop, Frascati, 26–27 Feb. 2019. – Mode of access: <http://frm4doas.aeronomie.be/index.php/documents/3rd-cindi-2-workshop>. – Date of access: 20.10.2019.

**РЕЗЮМЕ****Бручковский Илья Игоревич****Методы обработки спектральных данных аппаратно-программного комплекса с многоосевой геометрией для регистрации малых газовых составляющих атмосферы**

**Ключевые слова:** многоосевая дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия, дистанционное зондирование, малые газовые составляющие, двуокись азота, озон, наклонные толщи.

**Цель работы:** создание прибора и получение долговременных наблюдений за вертикальным распределением двуокиси азота и других малых газовых составляющих над Минском методом много-осевой дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** методы теории переноса излучения в атмосфере, молекулярная спектроскопия, численное моделирование, спектрограф изображения Oriel MS257.

**Полученные результаты и их новизна:** при помощи созданного соискателем прибора, который отличается от мировых аналогов эффективностью своей оптической схемы, получены уникальные ряды экспериментальных данных из различных точек земного шара. Эти данные представляют собой спектральные измерения, проведенные в Беларуси (г. Минск, к.п. Нарочь), Германии (г. Майнц), Нидерландах (г. Кабау) и в восточной Антарктике (ст. "Прогресс"). Впервые экспериментально получены и проанализированы вертикальные профили двуокиси азота над Минском, исходные данные для получения которых регистрировались в течение двух лет. Впервые в мире предложен и применен метод корректировки результатов измерений дифференциальных наклонных толщ малых газовых составляющих по результатам измерений эталонного прибора. В ходе применения предложенного метода, в остаточных спектрах независимым способом была обнаружена температурная зависимость вращательного рамановского рассеяния. Комбинация эффективной оптической схемы прибора и нового подхода к анализу дневного хода наклонных толщ, позволили экспериментально показать взаимодействие озона и двуокиси азота в стратосфере Антарктики.

**Рекомендации по использованию:** в качестве средства мониторинга состояния воздуха, для восстановления вертикального распределения таких малых газовых составляющих как: двуокись азота, формальдегид, глиоксал, азотистая кислота, а также вертикальных профилей аэрозольного поглощения.

**Область применения:** пассивное дистанционное зондирование атмосферы методом много-осевой дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии.

**Бручкоўскі Ілья Ігаравіч****Метады апрацоўкі спектральных дадзеных апаратна-праграмнага комплексу з шмат-восевай геаметрыяй для рэгістрацыі малых газавых кампанентаў атмасферы**

**Ключавыя словы:** шматвосевая дыферэнцыяльная аптычная абсарбцыйная спектраскапія, дыстанцыйнае зандзіраванне, малыя газавыя кампаненты, двухвокіс азоту, озон, нахільныя тоўшчы.

**Мэта даследавання:** стварэнне прыбора і атрыманне доўгачасовых назіранняў за вертыкальным размеркаваннем двухвокісу азоту і іншых малых газавых кампанентаў над Мінскам метадам шматвосевай дыферэнцыяльнай аптычнай абсарбцыйнай спектраскапіі.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады тэорыі пераносу выпраменьвання ў атмасферы, малекулярная спектраскапія, лічбавае мадэляванне, спектрограф вобразавы Oriel MS257.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна:** пры дапамозе створанага суіскальнікам прыбора, які адрозніваецца ад сусветных аналагаў эфектыўнасцю сваёй аптычнай схемы, атрымана ўнікальная эксперыментальная інфармацыя з розных частак зямнога шара. Гэтыя дадзеныя ўяўляюць сабой спектральныя вымярэнні, праведзеныя ў Беларусі (г. Мінск, к.п. Нарач), Германіі (г. Майнц), Нідэрландах (г. Кабау) і ва ўсходняй Антарктыцы (ст. "Прагрэс"). Упершыню эксперыментальна атрыманы і прааналізаваны вертыкальныя профілі двухвокісу азоту над Мінскам, зыходныя дадзеныя для атрымання якіх рэгістраваліся на працягу двух гадоў. Упершыню ў свеце прапанаваны і ўжыты метады карэкціроўкі вынікаў вымярэнняў дыферэнцыяльных нахільных тоўшчаў малых газавых кампанентаў па выніках вымярэнняў эталоннага прыбора. У ходзе ўжывання прапанаванага метаду ў астаткавых спектрах незалежным спосабам была выяўленая тэмпературная залежнасць вярчальнага раманаўскага рассеявання. Камбінацыя эфектыўнай аптычнай схемы прыбора і новага падыходу да аналізу дзённага ходу нахільных тоўшчаў, дазволілі эксперыментальна паказаць ўзаемадзеянне азону і двухвокісу азоту ў стратасферы Антарктыкі.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** у якасці сродку маніторынгу стану паветра, для разліку размеркавання такіх малых газавых кампанентаў як: двухвокіс азоту, фармальдэгід, гліаксал, азоцістая кіслата, а таксама вертыкальных профіляў аэразольнага паглынання.

**Галіна карыстання:** пасіўнае дыстанцыйнае зандзіраванне атмасферы метадам шматвосевай дыферэнцыяльнай аптычнай абсарбцыйнай спектраскапіі.

## SUMMARY

**Bruchkouski Ilya**

### **Methods for processing spectral data of instrument with multi-axis geometry for trace gases retrieval in the atmosphere**

**Keywords:** Multi-axis Differential Optical Absorption Spectroscopy, remote sensing, trace gases, nitrogen dioxide, ozone, slant column density.

**Goal of the research:** instrument development and obtaining long-term observations of the nitrogen dioxide vertical distribution and other trace gases over Minsk by Multi-axis Differential Optical Absorption Spectroscopy method.

**Research methods and instruments used:** methods of the radiative transfer modelling in the atmosphere, molecular spectroscopy, numerical simulation, imaging spectrograph Oriel MS257.

**Results and their novelty:** by the new MAX-DOAS instrument MARS-B has been built by the applicant and differs from the world analogues by the efficiency of its optical scheme, unique series of experimental data from different points of the globe has been obtained. These data are spectral measurements performed in Belarus (Minsk, the Naroch lake), Germany (Mainz), Netherlands (Cabauw) and Eastern Antarctic ("Progress" station). For the first time, vertical profiles of NO<sub>2</sub> over Minsk were experimentally obtained and analyzed, based on original data has been registered for two years. The new method for the trace gases DSCDs correction has been proposed and applied aiming to minimize differences in comparison with reference instrument. During the application of the suggested method, the temperature dependence of the rotational Raman scattering has been found in the residual spectra in an independent way. The combination of the effective optical design of the MARS-B instrument and the original approach to the analysis of the NO<sub>2</sub> DSCDs showed experimentally the interaction of ozone and NO<sub>2</sub> in the Antarctic stratosphere.

**Recommendations for use:** air quality monitoring, for the vertical distribution retrieval of trace gases: nitrogen dioxide, formaldehyde, glyoxal, nitrous acid, as well as vertical profiles of aerosol optical extinction.

**Application area:** passive remote sensing of the atmosphere by the method of Multi-axis Differential Optical Absorption Spectroscopy.