

**Отзыв  
официального оппонента  
Захарова Виктора Ивановича  
на диссертационную работу Боровского Александра Николаевича  
«СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ  
ДИОКСИДА АЗОТА И ФОРМАЛЬДЕГИДА В АТМОСФЕРЕ И  
ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ»,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.**

Рост хозяйственной активности человека приводит ко все более увеличивающемуся антропогенному воздействию на окружающую среду. Причем в настоящее время динамика антропогенного воздействия по некоторым показателям сравнима с естественными процессами в атмосфере. Более того, исследования последнего времени показывают, что летучие органические соединения, активно создаваемые в нижней атмосфере как биотическими циклами, так и человеком, изменяют химический состав и окислительные свойства нижней атмосферы. Например, окислы азота могут оказывать значительное экологическое воздействие на окружающую среду в виде выпадающих кислотных дождей. В то же время, высокая концентрация оксида азота может приводить к хроническим заболеваниям дыхательных путей человека. Время жизни окислов азота составляет в разных условиях от нескольких часов до нескольких дней, что позволяет судить о возможных изменениях химического состава атмосферы, радиационного баланса, а также изменениях атмосферной циркуляции. Особое внимание к динамике содержания окислов азота связано с тем обстоятельством, что они являются ключевыми элементами азотного цикла, который играет главную роль в образовании озона в тропосфере и разрушении его в стрatosфере.

В этой связи исследование механизмов изменения состава атмосферы и определение причин такого изменения хотя бы для некоторых основных химических соединений в атмосфере Земли крайне важно. Именно таким исследованиям и **посвящена рассматриваемая работа Боровского А.Н.**

В рассмотренной постановке тема **представленной диссертации** А.Н. Боровского **является актуальной и важной** как для теоретических аспектов физики атмосферы и динамики примесей в ней, так и для решения ряда прикладных задач, в том числе, для развития методики исследований атмосферы.

**Диссертационная работа** объемом 127 страниц состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы. Список цитируемой литературы содержит 109 наименований, работа включает 28 рисунков и 15 таблиц. Основные

результаты по теме диссертации изложены в 56 печатных изданиях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 46 — в тезисах докладов.

Во **введении** автором обоснована актуальность исследований, обозначены цели работы и сформулированы задачи, решение которых целесообразно. Рассмотрены основные методы исследований и перечислены основные научные результаты и положения, выносимые на защиту, их новизна, значимость и апробация. Указывается личный вклад автора.

В **первой главе** приведен обзор литературы, посвященной изучению фотохимических процессов в атмосфере и механизмов влияния двуокиси азота и формальдегида в атмосфере на содержание озона в стрatosфере и тропосфере. Рассмотрены основные фотохимические реакции, протекающие с участием указанных примесей и основные проблемы, связанные с использованием дистанционных методов измерения содержания  $\text{NO}_x$  и формальдегида в атмосфере. На основе проведенного анализа автор конкретизирует задачи данных исследований..

**Вторая глава** посвящена описанию общего подхода к измерениям содержания примесей спектрометрическими пассивными методами дистанционного зондирования и их усовершенствованию для определения содержания двуокиси азота по спектрам ослабления прямого солнечного излучения. Подробно описано развитие автором алгоритмов для определения общего содержания оксида азота в атмосфере из измерений спектров ослабления прямого солнечного излучения на Кисловодской высокогорной научной станции и интегрального содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы из измерений спектров ослабления рассеянного в зените солнечного излучения в безоблачных условиях на Звенигородской научной станции. Оценены источники ошибок и их величины для проводимых измерений. Приведены собственные уникальные результаты сопоставления созданных автором или при его участии методов исследований с данными, полученных разными научными группами в рамках представительных международных кампаний (более 10 групп-участников!) сравнений измерительных инструментов и методов обработки. В конце главы содержатся основные выводы, касающиеся полученных автором результатов.

В **третьей главе** проведен анализ временной изменчивости содержания двуокиси азота. Автором использовался уникальный по продолжительности 30-летний банк данных о спектральном составе прямого солнечного излучения, наблюдения которого проводились на Кисловодской высокогорной научной станции с 1979 по 2008 гг. Период наблюдений занял практически 3 полных 11-летних цикла солнечной активности, наблюдения проводились по сходным методикам, что позволило на практически однородных статистических данных определить линейный тренд изменчивости концентрации оксида азота, оценить влияние на общее содержание  $\text{NO}_2$  солнечной активности и вулканических

извержений, оценить связь изменчивости общего содержания  $\text{NO}_x$  с крупномасштабной атмосферной циркуляцией (квазидвухлетней цикличностью и явлением Эль-Ниньо). В конце главы содержатся основные выводы, касающиеся полученных автором результатов.

**Четвертая глава** посвящена анализу изменчивости интегрального содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы в безоблачных условиях, вызываемой изменениями температуры воздуха, а также влиянием Московского мегаполиса на состав региональной атмосферы.

Автор, используя созданную и описанную ранее методику раздела 2.3, определил интегральное содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы и измерил спектры поглощения рассеянного солнечного излучения на Звенигородской научной станции в период декабрь 2009 - март 2016г. В этой главе приведен анализ полученного ряда на наличие связи интегрального содержания формальдегида с температурой воздуха. Также автор анализирует влияние Москвы как мегаполиса на состав региональной атмосферы с использованием интегрального содержания формальдегида как индикатора этого влияния. В конце главы содержатся основные выводы, касающиеся полученных автором результатов.

**В заключении** сформулированы наиболее значимые результаты и выводы, полученные в работе.

**Диссертационная работа представляет собой** в целом завершенное научное исследование. Работа четко структурирована, хорошо написана, содержит актуальную библиографию по рассмотренным проблемам. Краткие результаты по главам позволяют однозначно оценить собственный вклад автора. Для получения представленных экспериментальных данных использовалась современная аппаратура и апробированные методы измерений, результаты измерений сравнивались с данными других научных групп и приборов. Объем и качество представленных научных материалов достаточен для обоснования сформулированных выше выводов, а интерпретация полученных результатов в целом достоверна и не противоречит известным физическим теориям и результатам других авторов.

**К научной новизне** работы можно отнести **следующие основные результаты**:

1. Обработан и проанализирован уникальный 30 летний однородный ряд данных измерений общего содержания  $\text{NO}_2$ , полученный по наблюдениям спектрального состава прямого солнечного излучения на Кисловодской высокогорной научной станции с 1979 по 2008 гг.

2. Усовершенствован метод восстановления содержания примеси в атмосфере из спектров поглощения солнечной ультрафиолетовой радиации в безоблачных условиях. Показана важность детектирования безоблачных условий для корректного применения усовершенствованного метода и разработан метод отбора данных, полученных в безоблачных условиях.

3. Показано наличие статистически значимых связей общего содержания  $\text{NO}_2$  с 11-летним циклом солнечной активности и квазидвухлетней цикличностью атмосферной циркуляции.

4. Выявлен систематический статистически значимый отрицательный линейный тренд общего содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере над Северным Кавказом. На уникальном событии - извержении вулкана Пинатубо – показано длительное (порядка 4 лет) влияние этого события на общее содержание  $\text{NO}_2$  в атмосфере.

5. Впервые в России получены данные об интегральном содержании формальдегида в пограничном слое атмосферы по измерениям спектрального состава рассеянной солнечной радиации на Звенигородской научной станции с 2009 по 2016 гг. Подтвержден рост содержания формальдегида при увеличении температуры. Получено количественное свидетельство влияния Московского мегаполиса на содержание формальдегида в районе Звенигорода.

6. Подготовлен современный измерительный комплекс, который может использоваться для измерения общего содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере и интегрального содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы. Измерительный комплекс успешно прошел сертификационные испытания в представительной международной кампании сравнений приборов для измерений содержания двуокиси азота и формальдегида.

Разные аспекты работы докладывались на многочисленных конференциях и широко опубликованы. Автором по теме диссертации опубликовано 56 печатных изданиях, 10 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 46 — в тезисах докладов. Автор не только предложил усовершенствование методики определения изучаемых в работе параметров, но и сам участвовал в проведении экспериментов, создании и тестировании современного измерительного комплекса, который может использоваться для измерения общего содержания  $\text{NO}_2$  в атмосфере и интегрального содержания формальдегида в пограничном слое атмосферы.

Вместе с тем, к рассмотренной диссертационной работе можно высказать **ряд критических замечаний**.

1. При анализе данных интегрального содержания формальдегида автор использует результаты теории переноса излучения в атмосфере. В связи с локализацией указанной примеси на сравнительно небольших высотах, важным

фактором при интерпретации результатов представляется не только вклад облачности в процесс измерений, учитываемый автором, но и подстилающей поверхности. Квазиравномерное распределение формальдегида в погранслое атмосферы также является значительным допущением, влияющим на интерпретацию получаемых автором результатов.

2. В качестве параметра в методике определения временных вариаций общего содержания  $\text{NO}_2$  в регрессионной модели отклика автор использует индекс F10.7, т.е. данные о радиоизлучении Солнца на длине волны 10.7 см (стр. 82). В то же время собственно измерения УФ радиации не имеют особых сложностей и представляются более «правильными» по частотному диапазону для целей настоящей работы .

3. Анализ изменчивости содержания  $\text{NO}_2$  после вулканических извержений требует весьма длительных и однородных временных рядов наблюдений, причем процесс релаксации не должен сопровождаться дополнительным воздействием в виде других извержений. Поэтому приводимые автором оценки указанного влияния, строго говоря, носят качественный характер. Методически хотелось бы, чтобы этот уникальный результат был бы подтвержден другими событиями, обработанными по использованной методике.

4. Из результатов диссертации можно сделать вывод о том, что метод определения формальдегида применим в случаях облачности, однако этот важнейший вопрос не нашел отражения в работе! Собственно читателю предлагаются результаты анализа данных, полученные только в безоблачных условиях, что значительно сужает возможности изучения механизмов изменчивости содержания формальдегида.

5. Вызывает ряд вопросов применимость линейной аппроксимации для описания различных процессов, рассматриваемых в работе, например, влияния Москвы на интегральное содержание формальдегида на Звенигородской НС

6. В работе присутствуют опечатки и описки, некоторые «жаргонизмы», что особенно жаль ввиду очень хорошего в целом качества текста. Например, на рис. 3.1 (стр. 84 диссертации) автор предлагает читателям найти стрелки разных размеров, которые там отсутствуют (во всяком случае, рецензент этот ребус не решил), равно как и на аналогичном рис. 4 автореферата (стр. 16). В работе отсутствует также список сокращений, которых довольно много в тексте.

Тем не менее, **ценность работы можно оценить как очень высокую**, а ряд высказанных замечаний теоретико-методического характера можно считать предметом дальнейших исследований, что еще раз доказывает актуальность избранной автором темы.

Перечисленные замечания и недостатки в **целом не снижают общий высокий уровень** диссертации. Основные выводы и положения, выносимые на защиту, содержательны и обоснованы. Достоверность и новизна научных результатов подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах, обсуждениями на конференциях и семинарах, а также удовлетворительным согласием с результатами масштабного сравнения с другими авторами и научными группами. Содержание диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

**Материалы диссертации могут быть полезны** широкому кругу специалистов, занимающихся научно-исследовательской работой в области физики и оптики атмосферы. Результаты могут быть использованы в ряде научных учреждений, в частности, в ИФА РАН, ИОА СО РАН, НПО Тайфун, МГУ, МосЭкоМониторинг и других учреждениях РФ, коллективы которых занимаются исследованием пространственно-временной изменчивости малых газовых составляющих атмосферы, моделированием атмосферных процессов.

Оценивая работу А.Н. Боровского, можно утверждать, что **диссертация представляет собой законченное научное исследование и по объему результатов, достоверности, научной и практической значимости выводов удовлетворяет требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям**, а ее автор, А.Н. Боровский, безусловно заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы.

Официальный оппонент –  
к. ф.-м. н., доцент кафедры физики атмосферы  
Физического факультета МГУ  
им. М.В. Ломоносова  
e-mail : [zvi\\_555@list.ru](mailto:zvi_555@list.ru) или [zakharov.vi@physics.msu.ru](mailto:zakharov.vi@physics.msu.ru)

В.И. Захаров

Декан Физического факультета МГУ  
им. М.В. Ломоносова, профессор

Н.Н. Сысоев

