

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

**Беликовича Михаила Витальевича**

«Развитие радиофизических методов анализа данных дистанционного зондирования для исследования и прогноза атмосферных явлений»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – Радиофизика

Диссертационная работа Беликовича Михаила Витальевича посвящена анализу удаленного зондирования физических характеристик и химического состава различных слоев атмосферы. Наземное и спутниковое удаленное зондирование атмосферы является единственным способом получения глобальной картины структуры атмосферы в ее различных слоях. Это особенно относится к мезосфере и нижней термосфере (МНТ), где прямые контактные измерения оказываются наиболее трудными и дорогостоящими.

В то же время, дистанционное зондирование, осуществляемое прежде всего в виде спектроскопии собственного, рассеянного или поглощенного излучения в полосах различных атмосферных газов (ультрафиолетовый, оптический, инфракрасный и микроволновой диапазоны), не восстанавливает всех характеристик требуемой области атмосферы, ограничиваясь лишь газами, полосы которых попадает в рабочий диапазон прибора. Для восстановления остальных характеристик, не измеряемых в ходе эксперимента или измеряемых с недостаточной точностью, строятся методы их получения, исходя из имеющихся данных по другим характеристикам. Для этого создаются физические и физико-химические модели различных слоев атмосферы. В основу этих моделей закладываются определенные предположения, степень достоверности которых не всегда хорошо обоснована. Основной целью диссертационной работы Беликовича М.В. является проверка, дополнение и развитие этих моделей, актуальность такой работы не вызывает никаких сомнений.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложений. Первая глава диссертации связана с обработкой данных наземного дистанционного зондирования тропосферы. Данная задача имеет очень большое прикладное значение, так как является основой прогнозирования погоды и неблагоприятных погодных явлений, в частности, гроз. Для анализа развития грозовых явлений необходимы малые шаги в пространстве и времени,

что не реализуется в большинстве современных моделей. В ходе работы было показано, что ряд моделей распространения микроволнового излучения, используемых при анализе радиометрических измерений, характеризуются спектроскопической ошибкой, которая может существенно влиять на результаты. Наилучшим образом работает модель ECS, которая, однако, требует значительного вычислительного ресурса. Еще одним результатом главы является вывод о лучшей прогностической эффективности микроволновых измерений по сравнению с радиозондовыми.

Вторая глава диссертации посвящена вопросу равновесных моделей в МНТ (в частности, модель равновесия ночного озона). Эти модели используются при анализе спутниковых данных для восстановления концентраций малых газовых примесей, которые напрямую в ходе спутникового эксперимента не измеряются. Для проверки применимости подобных моделей для различных высот в МНТ используется известная химико-транспортная модель, разработанная в Институте атмосферной физики в г. Кьюлунгсборн, Германия, а также модели общей динамики атмосферы. Показано, что равновесное состояние ночного озона, определяемое простым соотношением с учетом всего двух химических реакций (один исток и один сток озона) с хорошей точностью достигается в МНТ выше определенного уровня. Высота этого уровня коррелирует с высотой максимума концентрации возбужденного гидроксила  $\text{OH}^*$  и составляет примерно 85 км. Ниже равновесие не достигается, и концентрация озона может быть на десятки процентов как выше, так и ниже равновесного значения.

Основная существующая проблема равновесной модели дневного озона, в частности, в спутниковых данных TIMED/SABER, состоит в пренебрежении его реакции с атомарным водородом (в модели ночного озона эта реакция учитывается). Расчеты, сделанные в диссертации, показывают, что подобное допущение может приводить к существенным изменениям концентрации озона, особенно в низких широтах в зимний период. Как следствие, возникают погрешности при определении содержания других составляющих: O, H, OH,  $\text{HO}_2$ . Делается важный вывод о применимости моделей равновесия соединений нечетного водорода и кислорода, но при условии учета всех необходимых реакций.

Третья глава диссертации связана со статистической оценкой качества спутниковых измерений OH,  $\text{HO}_2$  и  $\text{O}_3$ , имеющих своим результатом некоторую вероятную область в трехмерном пространстве, координатами в котором являются концентрации данных компонент. Эта область может быть сужена, если наложить дополнительное требование,

связанное с равновесием данных компонент, определяемым темпом взаимных химических реакций. В этом случае область возможных значений из трехмерной переходит в двумерную, но при этом ее вид может меняться в зависимости от способа наложения ограничения (парадокс Бореля – Колмогорова). В диссертации предлагается методика предельного перехода от трехмерной к двумерной фигуре вероятности («одеяло»), которая, как показывается, характеризуется наименьшими систематическими ошибками. Показано, что величины концентрации  $\text{NO}_2$ , полученные данным способом, существенно отличаются от «стандартных» методов, используемых в анализе спутниковых данных (на примере MLS/Aura), что указывает на необходимость корректировки «стандартных» подходов.

Все результаты, полученные в диссертации, являются новыми. Их актуальность и важность для дальнейших исследований в области физики атмосферы бесспорны. Хочется особо отметить их важность для изучения верхней мезосферы, самой холодной области атмосферы и всей Земли и одновременно демонстрирующей наибольшие отклонения от равновесной картины. Основные выводы диссертации четко обоснованы и понятны. Достоверность научных результатов, полученных в диссертации, не вызывает сомнений.

Научные результаты, приведенные в диссертации, опубликованы в 11 работах в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК. Вклад автора в этих работах является либо определяющим, либо равным вкладу соавторов. Диссертация представляется законченным научным трудом, имеющим большую научную ценность. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В качестве незначительных недостатков работы можно отметить некоторое количество грамматических ошибок и пропуски слов. Отдельные, иногда достаточно сложные для понимания промежуточные выводы автор формулирует в текстовом виде, хотя их можно было бы оформить математически или в виде рисунка. Часто ссылка на рисунок отстоит от самого рисунка в диссертации на несколько страниц, хотя, с учетом большого количества численных результатов и объема выкладок, это может быть неизбежным.

Указанные недостатки ни в коей степени не умаляют общей высокой оценки качества диссертации. Считаю, что диссертационная работа Беликовича Михаила Витальевича «Развитие радиофизических методов анализа данных дистанционного зондирования для исследования и прогноза атмосферных явлений» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК, утвержденных постановлением



Приложение. Список научных работ оппонента за последние 5 лет:

1. Угольников О.С., Маслов И.А., 2018. Исследования фонового стратосферного аэрозоля с помощью многоцветных широкоугольных измерений фона сумеречного неба. Космические исследования 56, 2, 97-104. DOI: 10.7868/S0023420618020012.
2. Ugolnikov, O.S., Maslov, I.A., 2018. Stratospheric aerosol particle size distribution based on multi-color polarization measurements of the twilight sky. Journal of Aerosol Science, 117, 139-148. DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.01.002.
3. Ugolnikov, O.S., Maslov, I.A., 2019. Optical depth and altitude profiles of stratospheric aerosol based on multi-year polarization measurements of the twilight sky. Journal of Aerosol Science, 127, 93-101 (WS, Scopus, РИНЦ, JCR Impact factor 2.042, Q1). DOI: 10.1016/j.jaerosci.2018.10.006.
4. Ugolnikov, O.S., Maslov, I.A., 2019. Polarization analysis and probable origin of bright noctilucent clouds with large particles in June 2018. Planetary and Space Science 179, 104713. DOI: 10.1016/j.pss.2019.104713.
5. Угольников О.С., Маслов И.А., 2021. Измерения высоты и размера частиц пост-вулканического аэрозоля на основе поляриметрии сумеречного неба. Космические исследования 59, 2, 111-117. DOI: 10.31857/S0023420621020096.
6. Ugolnikov O.S., Kozelov B.V., Pilgaev S.V., Roldugin A.V., 2021. Retrieval of particle size distribution of polar stratospheric clouds based on wide-angle color and polarization analysis. Planetary and Space Science 200, 105213. DOI: 10.1016/j.pss.2021.105213.