

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию 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

Диссертация М.В. Беликовича посвящена решению трех различных задач физики атмосферы, относящихся к дистанционному зондированию двух атмосферных слоев: тропосферы и области МНТ (мезосфера и нижняя термосфера). Этими задачами являются: (1) краткосрочный прогноз грозовой активности по результатам мониторинга тропосферы наземными микроволновыми радиометрами; (2) определение границ применимости приближения фотохимического равновесия для ряда газовых компонент МНТ с помощью химико-транспортных моделей; (3) оценка качества результатов измерений состава МНТ на основе учета фотохимической и химической связи между определяемыми компонентами. Соответственно, каждая из задач рассмотрена в отдельной главе диссертации. В первой главе, наряду с задачей прогноза грозовой активности, исследуется точность нескольких моделей расчета атмосферного поглощения в микроволновом диапазоне. Вторая глава посвящена вопросам фотохимического равновесия атмосферных компонент в области МНТ, при этом рассматривается известный эксперимент по дистанционному зондированию средней и верхней атмосферы SABER/TIMED. В третьей главе, которая посвящена оценке качества спутникового зондирования МНТ на основе привлечения данных о химических связях между атмосферными составляющими, предложен способ, минимизирующий погрешности такой оценки. На мой взгляд, первая задача, рассмотренная в диссертации, никак не связана с двумя остальными. Вторую и третью задачи объединяет как общая пространственная область исследований, так и необходимость привлечения информации о фотохимических и химических процессах, в которые вовлечены газовые составляющие атмосферы. Поэтому ниже, говоря об актуальности проведенных исследований, а также о значимости и достоверности полученных результатов, я буду рассматривать так называемую «тропосферную» задачу отдельно от двух «мезосферных».

1. Актуальность темы диссертационного исследования.

История дистанционного зондирования тропосферы с помощью наземных микроволновых радиометров насчитывает уже много десятилетий. За это время были достигнуты значительные успехи как в области теории переноса радиотеплового излучения, так и в области измерительной практики. Прогресс в области технологий привел в настоящее время к коммерческому производству компактной, высокоточной наземной микроволновой аппаратуры для длительного непрерывного дистанционного зондирования атмосферы в полностью автоматическом режиме. Примером такой аппаратуры является радиометр RPG-NATPRO, который выступает в качестве основного инструмента исследований, описанных в первой главе диссертации. За рубежом созданы специализированные измерительные сети, например сеть MWRnet - An International Network of Ground-based Microwave Radiometers, в которой постоянно функционируют несколько наземных микроволновых радиометров. Создание новых сетей, включающих наземные микроволновые радиометры в сочетании с другими приборами (радары, лидары) и предназначенных для исследований пограничного слоя атмосферы является одной из главных целей выполняющегося в настоящее время европейского проекта PROBE (Profiling the atmospheric boundary layer at European scale). Несмотря на бурный прогресс в этом направлении, ряд вопросов все еще требуют уточнения. Среди этих проблем - точность расчета атмосферного поглощения в области полосы кислорода 50-60 ГГц и эффективность использования данных

наземного микроволнового зондирования в прогностических задачах. Таким образом, актуальность исследований первой главы диссертации не вызывает никаких сомнений.

Область МНТ (мезосфера и нижняя термосфера) является объектом изучения тоже достаточно давно. Тем не менее, как справедливо подчеркивается в диссертации, интерес к этим исследованиям в недавнее время резко возрос в связи с тем, что величина климатических изменений в этой области атмосферы существенно больше, чем у поверхности. Таким образом, раннее обнаружение трендов температуры и состава в области МНТ может служить индикатором будущих изменений в нижней атмосфере. Как следствие, возникает необходимость расширения списка восстанавливаемых параметров состояния МНТ и газовых компонент для зондирования. При этом решение проблемы повышения точности и улучшения контроля качества получаемых данных приобретает большое значение. Вторая и третья задачи, рассмотренные в диссертации, полностью соответствуют этим направлениям исследований, поэтому они, несомненно, также являются актуальными.

2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Степень обоснованности всех научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, можно считать высокой, поскольку все они получены на основе анализа экспериментальных данных и модельных расчетов.

3. Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации подтверждается целым рядом факторов. Во-первых, исследования опираются на экспериментальные данные, полученные современной высокоточной научной аппаратурой – это наземный микроволновый радиометр RPG-HATPRO, спутниковый ИК-радиометр SABER и спутниковый микроволновый радиометр MLS. Все эти приборы зарекомендовали себя как успешно функционирующие и поставляющие данные высокого качества. Во-вторых, большинство полученных в диссертации результатов основаны на учете подтвержденных физических, фотохимических и химических связей между газовыми компонентами атмосферы. В-третьих, диссертантом были проведены расчеты высотно-широтных глобальных распределений атмосферных параметров с помощью химико-транспортных моделей, адекватность и полнота которых подтверждены результатами многолетних независимых исследований.

Нет сомнений в том, что диссертационная работа содержит новые результаты. Несмотря на то что проблема точности расчета атмосферного поглощения в полосе кислорода 50-60 ГГц известна, оценки расхождений теории и эксперимента, полученные автором на большом и тщательно отобранном статистическом материале, являются новыми. Новым является и результат оценки качества сверхкраткосрочного прогноза грозы по данным пассивных микроволновых измерений. Исследования, касающиеся пространственных областей фотохимического и химического равновесия атмосферных компонент в области МНТ и проблемы учета этого равновесия в оценке качества спутниковой информации, являются в большой степени оригинальными и, соответственно, новыми.

4. Личный вклад соискателя в разработку научной проблемы, репрезентативность эмпирического материала.

Личный вклад соискателя в разработку научных проблем, которые рассмотрены в диссертации, подробно описан автором в соответствующем разделе на стр.16-17 диссертации. Для каждой из статей, которые были опубликованы по материалам, вошедшим в диссертацию, указан вклад соискателя по отношению к вкладу соавторов. Нет никаких

сомнений в том, что вклад соискателя является либо определяющим, либо весьма существенным.

К репрезентативности эмпирического материала в диссертации нет никаких замечаний. Более того, необходимо подчеркнуть, что одним из достоинств рассматриваемой работы является ее ориентированность на анализ результатов эксперимента.

5. Завершенность диссертации, правильность ее оформления, публикация основных результатов в печати.

Как было отмечено выше, диссертация представляет собой компиляцию исследований, посвященных решению трех задач, первая из которых не связана с двумя другими. Тем не менее, диссертация при чтении воспринимается как единое целое, поскольку все части объединены общими вопросами, которые касаются повышения точности данных дистанционного зондирования атмосферы и улучшения процедур контроля качества этих данных. Исследования, описанные в диссертации, без сомнения можно считать завершенными на определенном этапе, поскольку автору удалось сформулировать конкретные, полные и обоснованные выводы по каждой из рассмотренных задач.

Диссертация оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к научным работам, иллюстративный материал хорошо подобран, количество опечаток минимально. Все основные результаты опубликованы в рецензируемых журналах, в том числе высокорейтинговых международных (*Annales Geophysicae*, *Advances in Space Research*, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *Atmospheric Chemistry and Physics*, *Geophysical Research Letters*, *Remote Sensing*).

Автореферат диссертации достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации.

6. Замечания к диссертации.

Несмотря на очень хорошее впечатление о диссертации в целом, которое сложилось у меня после прочтения всей работы, хотелось бы высказать несколько критических замечаний. Начну с названия работы. На мой взгляд, оно является не очень удачным. Мне представляется, что «радиофизическим» может быть метод получения данных, но никак не метод анализа данных. Автор диссертации делает попытку объяснить название работы во Введении в конце страницы 7, где утверждает, что «радиофизический подход» основан «на теории распространения волн в неоднородных средах, алгоритмах решения некорректных обратных задач, байесовом подходе к оценке статистических гипотез, методах построения и анализа математических моделей нелинейно-динамических систем, адекватных исследуемой природной системе». Мне представляется данное объяснение несколько искусственным. В частности, какая может быть связь между радиофизическим подходом и построением химико-транспортных моделей атмосферы? (Полагаю, что автор имел в виду именно их, говоря о «математических моделях нелинейно-динамических систем».) По моему мнению, название работы вполне соответствовало бы ее содержанию, если бы в нем отсутствовало слово «радиофизических». Отмечу, что изменение названия, как мне представляется, никак не повлияло бы на степень соответствия работы заявленной специальности, по которой защищается соискатель.

В Главе 1, исследуя соответствие теоретических значений радиояркостной температуры экспериментальным, полученным в каналах радиометра НАТPRO, автор обнаружил, что «с уменьшением угла возвышения (увеличением зенитного угла) модели недооценивают значения яркостных температур в диапазоне 22–32 ГГц». В связи с этим возникает вопрос, на который нет ответа в тексте диссертации: оценивалась ли погрешность установки линии визирования прибора по углу возвышения при угловом сканировании?

По поводу оценок соответствия экспериментальных и расчетных значений радиоярких температур хочу отметить, что сам факт рассогласований в спектральной области 51-54 ГГц хорошо известен. Возникает вопрос: почему соискатель не исследовал зависимость расхождений от метеоусловий (сезонов)? Это косвенным образом помогло бы оценить и качество информации, получаемой из микроволновых измерений в различные сезоны.

Перейдем к рассмотрению задачи краткосрочного прогноза грозовой активности, решаемой в Главе 1. Автором диссертации получен важный результат, который заключается в том, что «для всех индексов вероятность детектирования грозы по микроволновым данным выше, чем по радиозондовым». (Имеются в виду прогностические индексы.) Важность этого результата обусловлена, среди прочего, и тем, что он является неожиданным. Прогностические индексы в общем случае представляют собой функционалы от профилей температуры и влажности. Хорошо известно, что самым существенным недостатком наземного микроволнового температурно-влажностного зондирования тропосферы является низкое вертикальное разрешение получаемых профилей, что обусловлено физикой переноса радиотеплового излучения. Многочисленные строгие оценки вертикального разрешения с использованием математического аппарата DOFS (degrees of freedom for signal) показывают, что число независимо определяемых элементов профиля температуры по микроволновым данным приборов типа NATPRO составляет 3-4, а элементов профиля влажности – 2. Это очень низкие характеристики по сравнению с вертикальным разрешением, которое обеспечивает радиозонд. Таким образом, не ясно, за счет каких физических причин вероятность детектирования грозы по микроволновым данным выше, чем по радиозондовым? Если я верно понял текст диссертации, то пороговые значения прогностических индексов подбирались отдельно для каждого из четырех наборов данных, по которым проводилось сравнение. Такой подход представляется не совсем корректным. Вопросов бы не возникало, если бы пороговые значения были бы получены независимо на отдельном так называемом «обучающем статистическом ансамбле». Вполне вероятно, что в этом случае преимущество микроволновых дистанционных измерений было бы совсем не очевидно.

В Главе 2, во Введении автор пишет о том, что «...привлечение моделей к обработке измеряемых данных может значительно (в разы) увеличивать информативность результатов экспериментальных кампаний по исследованию средней атмосферы». При этом автор не упоминает, что необходимым условием для этого является адекватность и полнота используемой модели.

На странице 74 автор диссертации приводит условия, когда пренебрежение реакцией $\text{H} + \text{O}_3 \rightarrow \text{OH} + \text{O}_2$ справедливо. В тексте диссертации не говорится, осуществлялся ли контроль случаев выполнения/невыполнения этих условий в модельных расчетах, результаты которых представлены в этом разделе диссертации.

Хочу отдельно остановиться на утверждении автора на странице 80 диссертации. Цитирую: «Таким образом, были получены два пространственно-временных ряда каждой характеристики в 2003-2015 гг: восстановленные с помощью очевидно некорректного подхода группы SABER [115] O' , H' , OH' , HO'_2 и CXH' и восстановленные правильным образом O , H , OH , HO_2 и CXH ». В данном случае мое замечание относится к сфере научной этики и научной стилистики и вызвано употреблением терминов «очевидно некорректный» и «правильный». Мне понятно желание соискателя найти научную истину, однако считаю, что в научных трудах следует избегать вышеупомянутых чересчур категоричных определений.

В главе 2 сопоставление высотно-широтных распределений параметров производится на основе относительных отклонений для каждой характеристики. Не подвергая сомнению данный подход, хочу, однако, отметить, что в общем случае рассмотрение одних только относительных отклонений бывает не достаточно для обоснования вывода о точности

используемых приближений. Бывают задачи, в которых существенны сами абсолютные величины, и если они малы, то для корректного решения таких задач погрешность даже в 100% может оказаться приемлемой.

Как мелкое замечание к Главе 2 отмечу неудачную фразу на стр. 89 «в результате аналитического анализа», а также кальку с английского «контурные карты» (стр. 64), использованную вместо «высотно-широтного распределения».

И наконец, одно замечание к последней третьей главе. Как следует из текста, в данной главе описано, как соискатель совершенствует (или корректирует) разработанный ранее метод статистической оценки качества данных измерений малых примесей мезосферы, основанный на учете фотохимической связи между компонентами. Если я правильно понял описание этого метода, данное в диссертации, суть метода сводится к попытке решить задачу учета дополнительных связей между параметрами атмосферы, восстановленными из спутниковых измерений. А основная проблема, из-за которой могут иметь место большие погрешности, возникает из-за нелинейности. Мое замечание заключается в том, что автор в своей диссертации никак не анализирует совершенствуемый им метод с точки зрения его эффективности по сравнению с другими методами и применимости в практических приложениях. Как мне представляется, существенным недостатком метода является то, что он позволяет получить оценку только усредненных по некоторому ансамблю характеристик. Возникает вопрос: в каких задачах нужна такая оценка? Помогает ли метод скорректировать спутниковые данные? На мой взгляд, обзор преимуществ и недостатков метода - это необходимый этап, который бы служил обоснованием большой работы, которую проделал соискатель, совершенствуя метод. Конечно, соискатель не претендует на защиту самого метода, в положениях, выносимых на защиту, отмечены большие погрешности метода и заявлено, что разработанный подход может их минимизировать. Поэтому существенно подчеркнуть, что мое замечание не относится непосредственно к подходу, который предложил соискатель для совершенствования метода. Мое замечание относится исключительно к отсутствию в диссертации критического взгляда на сам метод, который совершенствует соискатель. По сути, решается задача, принадлежащая к классу задач «Data fusion», когда, согласно определению, осуществляется процесс интеграции нескольких источников данных для получения более последовательной, точной и полезной информации, чем та, которую предоставляет какой-либо отдельный источник данных. Существует целый ряд способов такой интеграции. В частности, в работах Роджерса, цитируемого соискателем (ссылка 54), еще в прошлом веке предложен подход, в котором априорная информация в некорректных задачах рассматривается в виде виртуальных измерений. Этот подход позволяет, в принципе, учесть дополнительную информацию любого типа и избежать погрешностей, обусловленных нелинейностью, используя итерационный алгоритм.

Несмотря на приведенную выше критику, хочу подчеркнуть, что мои замечания носят частный характер и не снижают ценности исследований, выполненных соискателем. Работа выполнена на очень высоком современном научном уровне и содержит целый ряд интересных и полезных результатов. Относительно большое количество замечаний обусловлено сложностью решаемых задач и многообразием методов их решения. Диссертация производит очень хорошее впечатление и свидетельствует о высокой научной квалификации соискателя.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Учитывая все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что диссертационная работа М.В. Беликовича на соискание ученой степени кандидата наук является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение трех различных задач дистанционного зондирования тропосферы и области мезосферы/нижней термосферы

(МНТ), и которая, несомненно, имеет научную значимость для специальности 1.3.4 – радиофизика. Считаю, что диссертация работа «Развитие радиофизических методов анализа данных дистанционного зондирования для исследования и прогноза атмосферных явлений» полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013, ред. от 11.09.2021), предъявляемым к диссертационным работам на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, а ее автор М.В.Беликович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 – радиофизика.

Как официальный оппонент, выражаю свое согласие на обработку моих персональных данных, связанных с защитой диссертации Беликовича М.В.:

Фамилия, имя, отчество: Косцов Владимир Станиславович

Ученое звание: без ученого звания

Ученая степень: доктор физико-математических наук

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Организация: Санкт-Петербургский государственный университет

Должность: ведущий научный сотрудник

Почтовый адрес: 198504 С.Петербург-Петродворец, ул. Ульяновская 1, НИИ физики, кафедра физики атмосферы

Телефон: +7 (812) 4284347, +7 (921) 9798673

Адрес электронной почты: v.kostsov@spbu.ru

Список научных трудов за последние 5 лет (в обратном хронологическом порядке):

1. Ionov, D. V., Makarova, M. V., Hase, F., Foka, S. C., Kostsov, V. S., Alberti, C., Blumenstock, T., Warneke, T., and Virolainen, Y. A.: The CO₂ integral emission by the megacity of St Petersburg as quantified from ground-based FTIR measurements combined with dispersion modelling, *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 10939–10963, <https://doi.org/10.5194/acp-21-10939-2021>, 2021.
2. Makarova, M. V., Alberti, C., Ionov, D. V., Hase, F., Foka, S. C., Blumenstock, T., Warneke, T., Virolainen, Y. A., Kostsov, V. S., Frey, M., Poberovskii, A. V., Timofeyev, Y. M., Paramonova, N. N., Volkova, K. A., Zaitsev, N. A., Biryukov, E. Y., Osipov, S. I., Makarov, B. K., Polyakov, A. V., Ivakhov, V. M., Imhasin, H. Kh., and Mikhailov, E. F.: Emission Monitoring Mobile Experiment (EMME): an overview and first results of the St. Petersburg megacity campaign 2019, *Atmos. Meas. Tech.*, 14, 1047–1073, <https://doi.org/10.5194/amt-14-1047-2021>, 2021.
3. Kostsov, V. S., Ionov, D. V., and Kniffka, A.: Detection of the cloud liquid water path horizontal inhomogeneity in a coastline area by means of ground-based microwave observations: feasibility study, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 4565–4587, <https://doi.org/10.5194/amt-13-4565-2020>, 2020.
4. Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Применение регрессионного алгоритма к задаче исследования горизонтальной неоднородности водозапаса облаков по наземным микроволновым измерениям в режиме углового сканирования. // *Оптика атмосферы и океана*. 2020. Т. 33. № 08. С. 613-620. <https://doi.org/10.15372/AOO20200805>.
5. Chesnokova, T.Yu., M.V.Makarova, A.V.Chentsov, V.S.Kostsov, A.V.Poberovskii, V.I.Zakharov, N.V.Rokotyan: Estimation of the impact of differences in the CH₄ absorption line parameters on the accuracy of methane atmospheric total column retrievals from ground-based FTIR spectra, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, V.254, 1-8, <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2020.107187>, 2020.
6. Kostsov, V. S., Kniffka, A., Stengel, M., and Ionov, D. V.: Cross-comparison of cloud liquid water path derived from observations by two space-borne and one ground-based instrument in northern Europe, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5927–5946, <https://doi.org/10.5194/amt-12-5927-2019>, 2019.
7. Бирюков Е.Ю., Косцов В.С. Использование линейных регрессионных соотношений, полученных на основе модельных и экспериментальных данных, для определения водозапаса облаков из наземных микроволновых измерений. // *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32. № 05. С. 386–394. DOI: 10.15372/AOO20190508

8. Kostsov, V. S., Kniffka, A., and Ionov, D. V.: Cloud liquid water path in the sub-Arctic region of Europe as derived from ground-based and space-borne remote observations, Atmos. Meas. Tech., 11, 5439-5460, <https://doi.org/10.5194/amt-11-5439-2018>, 2018.
9. Kostsov, V.S., D.V. Ionov, E.Yu. Biryukov, and N.A. Zaitsev. Cross-validation of two liquid water path retrieval algorithms applied to ground-based microwave radiation measurements by the RPG-HATPRO instrument // International Journal of Remote Sensing. 2018. Vol. 39. No 5. P. 1321-1342. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1404163>
10. Virolainen, Y. A., Timofeyev, Y. M., Kostsov, V. S., Ionov, D. V., Kalinnikov, V. V., Makarova, M.V., Poberovsky, A. V., Zaitsev, N. A., Imhasin, H. H., Polyakov, A. V., Schneider, M., Hase, F., Barthlott, S., and Blumenstock, T.: Quality assessment of integrated water vapour measurements at the St. Petersburg site, Russia: FTIR vs. MW and GPS techniques, Atmos. Meas. Tech., 10, 4521-4536, <https://doi.org/10.5194/amt-10-4521-2017>, 2017.
11. Успенский А.Б., Крамчанинова Е.К., Косцов В.С., Успенский С.А., Черный И.В. Развитие системы внешней калибровки и валидации данных измерений микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 27–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-27-35
12. Ионов Д.В., Калинин В.В., Тимофеев Ю.М., Зайцев Н.А., Виролайн Я.А., Косцов В.С., Поберовский А.В. Сравнения радиофизических и оптического инфракрасного наземных методов измерений интегрального содержания водяного пара в атмосфере // Известия вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 4, С.336-345

(подпись)

/ Косцов В.С. /
(расшифровка подписи)

Дата: « 05 » сентября 20 22 г.



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>