

«УТВЕРЖДАЮ»



Зеленый П.М.

20\_\_ г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации о научно-практической ценности диссертации  
А.А. Криволуцкого  
(Ф.И.О. соискателя)

на тему: **Воздействие солнечных протонных вспышек на среднюю атмосферу Земли**, представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности: **25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы**

Работа посвящена фундаментальным вопросам взаимодействия космической плазмы, включая потоки быстрых частиц, с веществом атмосферы Земли.

**Актуальность проблемы.** Проблема эффективности механизмов внешних воздействий на атмосферу Земли (в том числе на погоду и климат), поставленная более 100 лет назад (см. обзор [Gray, et al., 2010]), остается актуальной и сегодня. Благодаря огромному массиву информации, накопленной к настоящему времени по наблюдениям со спутников о солнечной радиации, параметрах атмосферы (ее химическом составе, температурном режиме и циркуляции), а также прогрессу в развитии численных моделей и вычислительных средств, создан современный мировой уровень науки, позволяющий решать новый класс задач, в том числе, в области солнечно-земной физики. Данные о потоках солнечной радиации (электромагнитной и корпускулярной), накопленные за период более 3-х циклов активности Солнца, позволяют перейти к количественной форме результатов при использовании моделей в дополнении к статистическим исследованиям.

Отражением актуальности данного направления исследований является организация, под эгидой Международного Комитета по Солнечно-земной Физике (SCOSTEP-Scientific Commission on Solar Terrestrial Physics), международных программ CAUSES (Climate and Weather of the Sun-Earth System) и VarSITI (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact), включающей проект ROSMIC (Role Of the Middle Atmosphere/Lower Thermosphere in Climate). В рамках международного проекта SPARC (Stratospheric Processes and Their Role in Climate) организован под-проект SOLARIS, целью которого является изучение воздействия солнечной активности на нижнюю атмосферу через связь стратосфера-тропосфера. Следует выделить также проект HEPPA (High Energetic Particle Precipitation in the Atmosphere), посвященный исследованию воздействия энергичных частиц на

атмосферу и детальному сравнению результатов моделирования с данными спутниковых наблюдений состава в полярных областях в период протонной активности Солнца

В работе А.А. Криволуцкого впервые применен комплексный подход к изучению одного из наиболее сложных явлений – последствий воздействия высокоэнергичных частиц (протонов), попадающих в полярные области атмосферы Земли в периоды протонных вспышек на Солнце. Для реализации исследования под руководством автора были созданы глобальные численные модели, описывающие динамику фотохимических и термодинамических параметров средней атмосферы и нижней термосферы.

Диссертационная работа автора состоит из Введения, четырех Глав, Заключения, двух Приложений и списка литературы. Общий объем работы – 260 стр., включая 9 таблиц, 105 иллюстраций. Список цитируемой литературы содержит 105 наименований.

Во Введении, в разделе Актуальность, приводится информация по международным проектам, посвященным солнечно-атмосферным взаимодействиям.

Первая глава является обзорной. В ней говорится о том, что впервые разрушение озона в высоких широтах, вызванное солнечными энергичными протонами, было зафиксировано по измерениям со спутника Nimbus-4 [Heath et al., 1977] после вспышки на Солнце 4 августа 1972. Теоретические исследования, проведенные после обнаружения этого эффекта [Porter et al., 1976; Hearn, 1978; Тальрозе и др., 1978; Solomon and Crutzen, 1981], показали, что ионизация атмосферы, вызванная торможением энергичных частиц, приводит в итоге к дополнительному образованию молекул окиси азота и радикала OH, которые далее интенсифицируют разрушение озона в каталитических химических циклах.

Во второй главе исследованы характеристики протонной активности Солнца, выделены наиболее интенсивные протонные события 23-го цикла его активности, проведены расчеты ионизации полярной атмосферы, вызванные протонными вспышками в этом цикле. На основе полученных результатов выстроена иерархия вспышек этого цикла по количеству образованных ими в столбе полярной атмосферы пар ионов и соответствующему воздействию на озон (расчеты по фотохимической модели). Для расчетов были использованы спутниковые измерения потоков протонов (GOES) в различных каналах энергий. Показано, что максимум протонной активности Солнца приходится на (2000 – 2001) годы. Энергетически наиболее мощным событием была вспышка 14 июля 2000 г. СПС 4 ноября 2001 года, которая выделяется жестким энергетическим спектром протонов при меньшей, чем 14.07.2000, интенсивности потоков.

В этой главе выделяется также событие октября-ноября 2003 года, сопровождавшееся сильными геомагнитными возмущениями. Этот период важен, поскольку он был обеспечен не только регистрацией частиц высоких энергий со

спутников GOES и CORONAS-F (российская солнечная обсерватория), но и измерениями химического состава в полярных широтах, что позволило впервые провести детальное сравнение наблюдаемых изменений в полярной озоносфере с результатами трехмерного моделирования. Следует отметить важный результат, представленный в работе в этой главе, посвященный проведенному сравнению расчетов скорости ионизации в период СПС 28 октября 2003 года по данным измерений потоков солнечных протонов со спутника серии GOES (измерения велись на геостационарной орбите на высоте приблизительно 40 тыс. км) и российской солнечной обсерватории CORONAS-F. Полярной атмосферы (полярная орбита, высота которой около 400 км). Показано, что соответствующие скорости ионизации близки т.е. при расчетах скоростей ионизации можно использовать данные высокоорбитальных спутников.

Представлены результаты расчетов количества пар ионов, образовавшихся в толще полярной атмосферы, в период наиболее сильных СПС 23-го цикла активности Солнца. Показано, что существует определенная иерархия СПС в этом цикле активности. При этом наибольшее количество ионных пар было образовано СПС 14.07.00, 04.11.01 и 28.10.03. Результаты очень наглядны. Перечисленные СПС в дальнейшем были выбраны для реализации численных сценариев с помощью трехмерных моделей.

К сожалению, эти очень интересные результаты не подкреплены наблюдениями состояния нижней ионосферы в периоды рассмотренных автором СПС. В то же время приводятся результаты ракетного корабельного эксперимента 1989 года в высоких широтах южного полушария, в котором были измерены сильные изменения в содержании положительных ионов в нижней ионосфере, сопровождавшееся увеличением содержания окиси азота и уменьшением озона. Концентрация электронов в ракетных пусках, к сожалению, не измерялась.

В третьей главе представлены результаты реализации численных сценариев воздействия СПС на химический состав средней атмосферы, полученные с помощью 3-мерной численной фотохимической глобальной нестационарной модели CHARM (CHemical Atmospheric Research Model), созданной в лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО под руководством автора. Следует отметить, что это первая (и пока единственная) трехмерная глобальная модель, описывающая фотохимические процессы до высоты 90 км. Дается описание модели и ключевых алгоритмов. Модель представляет собой численное решение системы уравнений непрерывности для химически активной примеси, с учетом адвективного переноса, использован метод «химических семейств», позволяющий увеличить шаг интегрирования по времени частично сняв «жесткость» системы уравнений химической кинетики.

Приведены примеры глобальных изменений озона и некоторых других малых газовых составляющих после СПС 14 июля 2000 года. Эта вспышка интересна тем, что ее воздействие реализовалось в условиях полярного дня над северной полярной областью, и полярной ночи над южной полярной областью, что очевидно должно было привести к различному фотохимическому отклику (при практически одинаковых потоках солнечных протонов, попадающих в разные полярные области). Очень интересны результаты, относящиеся к СПС периода октября-ноября 2003 г., который также характеризовался мощными потоками частиц, зарегистрированных приборами на нескольких спутниках (включая российский аппарат CORONAS-F). В это же время проводились измерения озона и других малых газовых составляющих с борта европейского спутника ENVISAT. Таким образом, исследователям была предоставлена уникальная возможность сравнить результаты наблюдений с результатами моделирования. Позже автором был реализован численный сценарий долговременного воздействия энергичных частиц на полярную озоносферу.

В четвертой главе приведены результаты, полученные с помощью модели общей циркуляции ЦАО ARM (Atmospheric Research Model), которые демонстрируют эффекты воздействия СПС на температурный режим и циркуляцию. Модель основана на численном интегрировании полной системы уравнений гидротермодинамики и позволяет вычислять глобальные поля ветра и температуры на каждом шаге интегрирования. В качестве входных параметров в данной версии модели заложены глобальные поля озона, углекислого газа, водяного пара, окиси азота, необходимые для расчета источников нагрева и охлаждения. Поле озона и других малых газовых составляющих интерактивно вводится в модель на основе предварительного расчета по фотохимической модели.

Сценарии воздействия, реализованные с помощью модели ARM, были основаны на введении в радиационный блок пространственно-временных возмущений озона, вызванных воздействием частиц и рассчитанных с помощью модели CHARM. Разрушение озона, инициированное частицами в полярных областях, должно после окончания полярной ночи, очевидно, приводить к охлаждению атмосферы и изменению температурных градиентов, определяющих структуру поля ветра. Показано, что понижение температуры, вызванное долговременным разрушением озона составляет несколько градусов и максимально в середине лета (максимум солнечной радиации). Обнаружен эффект в нижней атмосфере (слабый рост температуры). Последнее связано с разрушением озона в стратосфере.

Диссертация А.А. Криволицкого является первым комплексным детальным исследованием воздействия протонных событий на химический состав (включая заряженные компоненты), температурный и циркуляционный режим земной атмосферы. В работе рассматриваются в количественной форме вопросы механизмов воздействия, которые долгое время не были достаточно проработаны.

#### **Связь с планами соответствующих областей науки и народного хозяйства**

Работа выполнена в рамках планов НИР Росгидромета и тематически соответствует разделу гелиогеофизических исследований.

#### **Новизна исследования**

Впервые с помощью численного фотохимического моделирования получена трехмерная пространственно-временная структура отклика химического состава озоносферы на воздействие наиболее мощных протонных вспышек 23-го цикла активности Солнца.

Впервые с помощью численного фотохимического моделирования исследована структура отклика озоносферы на воздействие СПС для условий полярной ночи.

Впервые с помощью численного моделирования исследована реакция термического режима и циркуляции средней атмосферы на воздействие СПС.

По уровню ионизации полярной атмосферы, рассчитанной по данным о потоках СКЛ в периоды СПС, установлена иерархия геоэффективности солнечных протонных событий для этого цикла.

Обнаружена возможность долговременных последствий воздействия СПС 28.10.2003 г. на озон и температуру в стратосфере и тропосфере.

Впервые с помощью фотохимического моделирования рассчитан отклик области D ионосферы.

На основе анализа данных спутниковых измерений изучена структура изменений в период СПС компонент химического состава и температуры средней атмосферы в полярных широтах северного полушария и установлено их соответствие с результатами численного моделирования.

На основе совокупности модельных расчетов и результатов анализа спутниковых наблюдений, представленных в работе, следует сделать заключение о том, что разработанная в 70-х годах прошлого столетия теоретическая концепция о возможности генерации дополнительных атомов азота и окислов водорода солнечными космическими лучами, нашла количественное подтверждение.

#### **Значимость исследования для науки и производства**

Практическая значимость работы заключается в создании технологии, основанной на использовании глобальных численных моделей химического состава и динамики средней атмосферы, а также на усвоении спутниковой информации о солнечных корпускулярных потоках, которая является основой для мониторинга и прогноза изменений в озоносфере и нижней ионосфере Земли, вызванных Солнечной активностью. Результаты использовались при выполнении плановых НИР целевой научно-технической программы (ЦНТП) Росгидромета и, проектов РФФИ, а также в рамках участия в международных проектах NEPPA, SolarMIP, ROSMIC.

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

Глобальные численные модели и полученные автором результаты могут быть использованы как для прикладных исследований при организации системы мониторинга состояния озоносферы и нижней ионосферы в системе Росгидромета (ЦАО, ИПГ, ААНИИ, Гидрометцентр), так и при фундаментальных исследованиях в системе РАН (ИФА, ИКИ, ИКИР, ИГКЭ и др.).

#### **Достоверность и обоснованность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждена международным сравнением результатов моделирования в рамках проекта NEPPA, сравнением результатов моделирования с данными спутниковых наблюдений и ракетных экспериментов, а также экспертизой результатов в процессе публикаций в отечественных и зарубежных реферируемых журналах.

#### **Оценка завершенности диссертации**

Диссертация представляет собой важный шаг в области солнечно-земной физики и физики атмосферы, является новым законченным исследованием, показывающим в количественной форме (с применением численных моделей и анализа спутниковой информации) последствия воздействия частиц высоких энергий космического происхождения на химический состав и термодинамический режим атмосферы Земли. Технические погрешности в тексте (опечатки и др.) не снижают высокого научного уровня работы.

#### **Соответствие автореферата основным положениям диссертации**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

#### **Подтверждение основных опубликованных результатов в научной печати**

Все представленные в диссертации результаты опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых изданиях (включая монографию) и сопровождаются соответствующими ссылками. Можно высказать некоторые замечания, касающиеся, например, результатов воздействия СПС на нижнюю ионосферу.

Результаты воздействия СПС для одной широты ( $70^0$  с.ш.). Было бы интересно исследовать и широтную структуру эффекта. Затем в четвертой главе показано, что воздействие СПС может привести к температурным изменениям на высотах верхней части области D. Возникает вопрос о возможном влиянии этих изменений на электронную концентрацию. В тексте есть опечатки.

Высказанные замечания не меняют высокой оценки работы. Алексей Александрович Кривошук является известным специалистом, как в России так и за рубежом. Он активно участвует в выполнении отечественных и зарубежных проектов в области солнечно-земной физики, в первую очередь воздействия солнечных протонных событий на озоносферу Земли. Результаты работы неоднократно докладывались на ряде семинаров и конференциях у нас в стране и за рубежом. Основные результаты работы опубликованы в журналах из перечня ВАК и монографии «Воздействие космических факторов на озоносферу Земли».

Таким образом, диссертация А.А. Кривошук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. В ней решена научная проблема, имеющая важные научное и практическое значения. Изложены научно обоснованные решения, внедрение которых внесет значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п.7 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 30.01.2002 г. № 74 (с изменениями, внесенными Постановлением Правительства РФ от 20.06.2011 г. № 475), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 25.00.29 – «физика атмосферы и гидросферы»..

Результаты диссертации могут быть использованы для исследований в области солнечно-земной физики и физики атмосфера в институтах ИСЗФ СО РАН, ИКИ РАН, НИИЯФ МГУ, ААНИИ и ИПГ Росгидромета, ИЗМИРАН, ПГИ и др. организациях.

Отзыв подготовил: главный научный сотрудник ИКИ РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

С.А. Пулинец

«28» июня 2017 г.

Адрес : 117997 Москва, ул.Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН

Телефон 8-963-760-67-98, e-mail pulse1549@mail.ru, рабочий телефон: 8-495-333-41-00

Подпись С.А.Пулинца заверяю, ученый секретарь ИКИ РАН А.В. Захаров

«28» июня 2017 г.

