

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию

Криволицкого Алексея Александровича

«ВОЗДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК НА СРЕДНЮЮ АТМОСФЕРУ ЗЕМЛИ»

**представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы**

Проблема влияния солнечной активности на атмосферу Земли входит в число актуальных проблем физики атмосферы и солнечно-земной физики. Несмотря на длительный период исследований, в данном направлении пока получено мало надежных результатов, и каждый новый результат имеет большое значение. В рассматриваемой работе проведен комплексный анализ процессов взаимодействия потоков энергичных солнечных заряженных частиц на среднюю атмосферу в периоды солнечных протонных событий (СПС). Доказывается, что основные механизмы влияния энергичных частиц на атмосферу связаны с разрушением атмосферного озона. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и двух приложений.

Во введении рассмотрены актуальность и новизна проблемы, описаны цели и задачи исследования, основных методов решения поставленных задач. Большое внимание уделено практической ценности работы, достоверности и обоснованности проведенных исследований. Приводится краткое описание содержания работы и научные положения, выносимые на защиту. Отмечено, что в настоящее время широким фронтом ведутся работы в рамках SCOSTEP (Scientific Commission on Solar Terrestrial Physics), международных программ CAWSES (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), направленные на выяснение эффективности механизмов внешних воздействий на атмосферу Земли, включая погоду и климат. Автор выделяет проект HEPPA (High Energetic Particle Precipitation in the Atmosphere), направленный на исследование воздействия энергичных частиц на атмосферу и сравнению результатов моделирования с данными спутниковых наблюдений, и рассматривает ряд других международных и отечественных проектов.

Первая глава является обзорной. В ней рассмотрены результаты исследований воздействия солнечных космических лучей на атмосферу Земли. Описаны основные структуры в средней атмосфере и нижней ионосфере. Рассматриваются физические

механизмы образования озonoактивных окислов водорода и азота под действием частиц СПС. Подчеркнуто, что ионизация атмосферы частицами высоких энергий приводит к дополнительному образованию азотных и водородных окислов, существенно влияющих на ход химических реакций в средней атмосфере. Отмечено, что к настоящему моменту накоплено много спутниковых данных, говорящих о зависимости содержания озона и других малых газовых составляющих от величины потоков в СПС. Подчеркнуто, что описание динамики озона требует тщательного анализа проходящих химических процессов и гидродинамического переноса как по вертикали, так и по горизонтали. Зафиксированное уменьшение содержания озона может превышать 70% в мезосфере и верхней стратосфере. Однако, несмотря на сравнительно большой ожидаемый эффект, изучение данных процессов находится на начальной стадии своего развития. Особый интерес представляет анализ выхолаживания и нагрева на разных высотах, широтах и долготах после СПС при разном уровне солнечной освещенности. Развивающиеся процессы могут приводить к изменениям скоростей зональных ветров после СПС. В настоящее время данный эффект статистически мало изучен, так как увеличение ионизации нижней и средней атмосферы солнечными энергичными частицами маскируется в результате одновременного Форбуш-понижения потоков галактических космических лучей.

Сложность развивающихся химических процессов и одновременный перенос крайне затрудняют изучение влияния энергичных частиц на атмосферные процессы. Практически единственным способом анализа в отсутствие одновременных данных многоточечных наблюдений является создание численных моделей, адекватно описывающих происходящие процессы, и их сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Результаты проведенного моделирования составили содержание защищаемой работы.

В Главе 2 рассмотрены особенности протонной активности Солнца во время 23 цикла солнечной активности и приведены результаты одномерного фотохимического моделирования воздействия на атмосферу ряда солнечных протонных событий. Автор сравнивает характеристики активности Солнца в 23 цикле и трех предыдущих циклах солнечной активности. Отобраны для анализа наиболее мощные протонные события. Описана методика расчета скорости ионизации атмосферы на разных высотах во время СПС и одномерная фотохимическая модель. Выполнен расчет ионизации для отобранных событий с использованием данных наблюдений на геостационарном спутнике GOES. Приведены основные радиационные характеристики для каждого отобранного события. Отмечено, что длительность большинства отобранных СПС превышала 100 часов. Получены зависимости от высоты отклика малых газовых составляющих атмосферы во

время СПС. Представлены результаты одномерного фотохимического моделирования и приведено сравнение результатов моделирования с данными наблюдений. Учитывались сезонные и суточные изменения зенитного угла Солнца для данной широты и его зависимость от высоты над поверхностью Земли. Для события 10-18 июля 2000 г. проведены расчеты и сравнение с измерениями на спутнике UARS (Upper Atmosphere Research Satellite). Продемонстрировано сравнительно хорошее совпадение результатов расчетов с данными измерений. Рассмотрены процессы в области D ионосферы, где имеет место сравнительно сложный состав ионизированной компоненты, включающий положительные и отрицательные ионы и идут сложные ионообменные реакции.

В третьей главе приведены результаты трехмерного моделирования изменений в полярной озоносфере, вызванных протонными вспышками на Солнце. Глава содержит описание модифицированной версии модели CHARM (CHemical Atmospheric Research Model), разработанной в Лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета. В процессе модификации модели был расширен список описываемых химических реакций, добавлен блок, позволяющий учесть эффекты, связанные с высыпавшимися потоками энергичных частиц, в схеме переноса использованы глобальные поля компонент ветра и температуры, рассчитанные с помощью модели общей циркуляции ARM (Atmospheric Research Model). Моделировались изменения 41-й химической составляющей, участвующей в 127-ми фотохимических реакциях. В расчетах были зафиксированы вертикальный профиль молекулярного кислорода и глобальное распределение водяного пара, основанное на наблюдениях со спутника UARS. Не учитывался вклад аэрозольных составляющих. Нижняя граница модели была выбрана на уровне земли, верхняя – на высоте 88 км с шагом по высоте 2 км, по широте – 5°, по долготе – 10°. Используются глобальные поля компонент ветра и температуры осредненные за сутки для всех дней года, полученные по модели общей циркуляции. На верхней границе концентрации долгоживущих компонент на первом шаге задавались в соответствии с расчетами по одномерной модели. Проведена верификация модели и трехмерное моделирование для событий СПС 14 июля 2000 г., 4 ноября 2001 г., 28 октября 2003 г. Результаты моделирования продемонстрировали образование OH и NO в условиях полярной ночи только благодаря процессам, инициированным солнечными космическими лучами в период СПС. Показано, что результаты моделирования воспроизводят различный характер отклика озона в северной и южной полярных областях. Обнаружено увеличение озона в мезосфере после его резкого уменьшения в период усиления ионизации.

Предсказания модели проверялись в рамках международного проекта NEPPA (High Energetic Particle Precipitation in the Atmosphere). Было проведено сравнение данных о составе в период возмущений, полученных с помощью прибора MIPAS (Mikhelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding) с результатами фотохимического моделирования, выполненного на базе 10 моделей, разработанных в 8 странах, среди которых была модель CHARM. Отличительной особенностью проведенной работы являлось использование скоростей ионизации, рассчитанных по единой методике для всех моделей. Одновременная работа ряда спутников в период октября-ноября 2003 г., включая российский проект CORONAS-F, обеспечила подробную информацию по СПС. Измерения и соответствующие расчеты скоростей ионизации включали солнечные протоны и электроны, высыпающиеся электроны и альфа-частицы. Сравнение предсказаний моделей показало, что почти все модели дают близкие результаты.

В ходе моделирования рассматривался случай долговременного воздействия энергичных частиц на полярную озоносферу в условиях мешающего горизонтальному перемешиванию устойчивого полярного вихря. Автору удалось описать эффект опускания области разрушения озона до более низких высот в результате возникновения нисходящих движений. Показано, что после быстрого разрушения озона под воздействием СПС происходит увеличение его содержания. Промоделировано увеличение содержания озона ниже области его разрушения.

Четвертая глава посвящена анализу воздействия СПС на температурный режим и циркуляцию. Описана модель общей циркуляции ARM (Atmospheric Research Model), разработанная в Лаборатории химии и динамики атмосферы. Решалась полная система уравнений гидротермодинамики, что позволяло определять глобальные поля ветра и температуры на каждом шаге интегрирования. Задавались глобальные поля окиси азота, углекислого газа и водяного пара. Поле озона и других малых составляющих определялось в результате предварительного расчета по фотохимической модели. Модель была разработана в ходе усовершенствования модели COMMA (Cologne Middle Atmosphere Model), разработанной в Институте метеорологии Университета, г. Кельн, Германия. Отмечено, что модель ARM имеет лучшее по сравнению с COMMA пространственное разрешение. В ней учтено наличие облачности и аэрозолей. Рассчитывался нагрев в результате поглощения солнечной УФ радиации озоном и молекулярным кислородом, связанное с воздействием СПС. Расчет вклада СПС рассчитывался с помощью трехмерной фотохимической модели. Модель ARM воспроизводит приливы в средней атмосфере и учитывает стационарные и бегущими планетарные волны.

В ходе анализа было показано, что наиболее сильный эффект продолжительностью порядка 10 суток, СПС вызывает летом, когда радиационные эффекты, связанные с изменениями в поле озона велики. Прослежено влияние внутренних гравитационных волн на возмущения ветра и температуры в нижней полярной термосфере. Выявлены долговременные последствия воздействия частиц на полярную озоносферу.

Диссертация А.А. Криволицкого является первым серьезным шагом в определении влияния мощных солнечных протонных событий на атмосферную динамику. В работе затронут широкий спектр вопросов физики и химии средней атмосферы, солнечно-земных связей. Основное внимание уделяется механизмам и последствиям для средней атмосферы воздействия потоков корпускулярной радиации в периоды солнечных протонных событий. В ней проанализировано поведение атмосферного озона, который оказывает существенное воздействие на структуру и режим циркуляции средней атмосферы. Не вызывают сомнений актуальность и новизна полученных результатов. Хорошее соответствие результатов численного моделирования химии средней атмосферы и ее гидротермодинамики данным спутниковых наблюдений свидетельствует об обоснованности и достоверности результатов.

Однако, работа не лишена некоторых недостатков. Излишне краткое описание рассмотренных солнечных протонных событий затрудняет возможность анализа каждого конкретного случая. К сожалению, автор не уделил должного внимания анализу возможных перспектив использования созданного комплекса численных моделей в программах «космической погоды». На стр. 10 не дается расшифровки аббревиатур ВГВ и СКЛ, впервые встречающихся в тексте. В тексте много опечаток.

Отмеченные недостатки не снижают общей высокой оценки работы. Алексей Александрович Криволицкий является специалистом, хорошо известным у нас в стране и за рубежом. Вклад А.А. Криволицкого в реализацию ряда международных проектов позволил существенно продвинуться в понимании влияния солнечных протонных событий в разрушении атмосферного озона и роли солнечно-земных связей в динамике средней атмосферы. Результаты работы 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». Автореферат соответствует содержанию диссертации. Результаты диссертации могут быть использованы в исследованиях в области солнечно-земной физики и физики атмосфера в таких институтах, как СИБИЗМИР, НИИЯФ МГУ, ИКИ РАН, ААНИИ, ИЗМИРАН, ПГИ, ИСЗФ, ИПГ Роскомгидромета и других заинтересованных организациях.

В соответствии с вышеизложенным, диссертация Алексея Александровича Криволицкого удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук (пункты 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней») по специальности 25.00.29 – «физика атмосферы и гидросферы», а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения искомой степени.

Официальный оппонент:

главный научный сотрудник Отдела космических наук Научно-исследовательский института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», доктор физ.-мат. наук, профессор  Е.Е. Антонова

20.06.2017 г.

Адрес: 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2

Телефон, e-mail, рабочий телефон: +7(495)939-18-18, info@sinp.msu.ru, +7(495)939-28-10

Подпись Е.Е. Антоновой заверяю.

Директор НИИЯФ МГУ,
доктор физ.-мат. наук, профессор



М.И. Панасюк