

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию **Криволуцкого 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 «космической погоды и её влияния на среду обитания человека» была сформулирована уже в начале эры космических исследований, как только стало очевидным, что любые проявления солнечной активности оказывают критическое воздействие не только на магнитное поле Земли, но и на все процессы, происходящие в атмосфере Земли, от её приземных слоёв до ионосферы. Актуальность этой проблемы ещё более возросла в последние годы в связи с «глобальным потеплением» и ожесточёнными спорами о роли человеческой деятельности в этом потеплении. Солнечные протонные события (СПС), под которыми подразумевают эпизодические вторжения в атмосферу Земли потоков высокоэнергичных (от 1 до сотен МэВ) протонов солнечного происхождения, являются одним из наиболее эффективных агентов солнечного влияния на атмосферные процессы. В основе этого влияния лежит **физический** механизм ионизации нейтральных компонент атмосферы, интенсификация ионно-нейтральных **химических** взаимодействий и образование молекул и радикалов, разрушающих озоновую оболочку Земли, соответствующие изменения в интенсивности потоков солнечной УФ радиации, поступающей на земную поверхность и, как следствие, изменения теплового и ветрового режима на всех уровнях атмосферы. Таким образом, проблема воздействия солнечных протонных вспышек на среднюю атмосферу Земли распадается на целый комплекс физико-химических проблем, при решении которых необходимо ещё учитывать и разную временную шкалу скорости различных химических взаимодействий. Именно эта актуальная задача была поставлена и успешно разрешена в диссертации А.А.Криволуцкого.

Диссертация состоит из четырёх глав, введения и заключения. Во **введении** сформулированы цели работы и её актуальность. Кратко формулируются положения, выносимые на защиту, и содержание диссертации. Каждая глава содержит разделы, где формулируется проблема, дается обзор литературы, и суммируются результаты исследований. В **заключении** приводятся основные результаты исследований и положения, выносимые на защиту.

Глава 1 посвящена истории и современному состоянию вопроса. Рассматриваются экспериментальные и расчётные данные о воздействии солнечных корпускулярных потоков на состояние и химический состав верхней атмосферы. Делается вывод, что данные большого массива спутниковых измерений убедительно свидетельствуют о влиянии солнечных корпускулярных потоков на озон и малые газовые составляющие. В основе этого влияния лежат процессы воздействия корпускулярных потоков на фотохимическую систему и термодинамический режим атмосферы, и поэтому численное моделирование этих процессов является оптимальным методом исследования и решения проблемы воздействия солнечных протонных вспышек на среднюю атмосферу Земли.

Глава 2 содержит результаты общего анализа солнечных протонных событий в 23 цикле солнечной активности. По данным измерений интенсивности солнечных протонов на спутниках GOES за 1994-2005 гг. были рассчитаны временные ряды средней энергии солнечных протонов в диапазоне от 1 до 100 МэВ и плотности потока энергии в этом диапазоне. Показано, что 43 СПС из 117 (37%) содержали протоны с энергиями $E_p > 100$ МэВ, при этом величина потока энергии в диапазоне 1-9 МэВ оставалась примерно такой же, как и в диапазоне 10-100 МэВ. Длительность протонных событий обычно превышала 100 часов. Сопоставление СПС данных за 20, 21, 22 и 23 циклы солнечной активности показало, что поток солнечных протонов (I) и поток энергии протонов (W) в 23 цикле был примерно в 5 раз ниже, чем в 22 цикле, но превышал соответствующие показатели 21 цикла.

Для дальнейшего анализа были выбраны 7 протонных событий 23 цикла SA с максимальными среднесуточными значениями плотности потока энергии солнечных протонов $E_p = 1-100$ МэВ. Был изучен вклад протонов различных энергетических диапазонов в ионизацию атмосферы. Ионизирующее воздействие протонов на стратосферу и мезосферу имеет импульсный характер (2-3 суток), однако последствия воздействия могут длиться значительно дольше (более 15 суток) благодаря большому времени жизни некоторых химических компонент. Показано, что ионизация наиболее глубоких слоёв атмосферы осуществляется протонами с энергией $E_p > 95.5$ МэВ. С использованием одномерной фотохимической модели был проанализирован отклик на СПС в высокоширотной озоносфере ($\Phi = 70^\circ$). Результаты модельных расчётов показали, что убыль озона в мезосфере ($h = 40-60$ км) может достигать 90%. Реакция озона на СПС существенно зависит от сезона: летом уровень содержания озона быстро восстанавливается, при этом чётко прослеживается суточная вариация, в зимний период (полярная ночь) озон не восстанавливается, по крайней мере в течение 10 суток, и

суточная вариация отсутствует. Восстановление озона начинается в верхнем, наиболее освещённом слое атмосферы ($h > 60$ км).

Во второй главе представлены также результаты модельных расчётов (при использовании фотохимической модели ЦАО) влияния СПС на электронную концентрацию нижней ионосфере ($h = 50-95$ км) в высокоширотной области ($\Phi = 70^\circ$). Показано, что электронная концентрация в D слое ионосферы возрастает более, чем на порядок величины, в первые сутки после СПС.

Следует отметить неточности, встречающиеся в Главе 2: (1) на Рис 2.1 в диссертации и, соответственно, на Рис. 1 в автореферате, дана неверная маркировка протонных событий, отобранных для дальнейшего анализа; (2) подпись к Рис 2.9 гласит, что показаны «изменения концентрации $O(^3P)$ » (??); (3) ссылка на Рис. 2.13 (а-ж) на стр.76 диссертации на самом деле означает ссылку на Рис. 2.12 (а-ж); (4) в Табл. 2.3 приведены, без каких-либо пояснений в тексте, средние величины параметра солнечной активности R_z (??).

Глава 3, основная в диссертации, включает описание 3-х мерной численной фотохимической нестационарной модели CHARM (Chemical Atmospheric Research Model), разработанной в лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО под руководством диссертанта, результаты расчёта глобальных сценариев воздействия СПС на химический состав средней атмосферы, полученных с использованием этой модели, и анализ этих результатов. Модель, представляющая собой численное решение системы уравнений неразрывности для химически активной примеси с учётом адвективного переноса, описывает взаимодействие между 41 химическими составляющими, участвующими в 127 фотохимических реакциях. Для всех сезонов года были рассчитаны «модельные» скорости фотодиссоциации молекулярного кислорода и скорости фотодиссоциации озона. Сопоставление выборочных, рассчитанных по модели CHARM, высотных профилей концентрации озона с экспериментально полученными на различных широтах профилями, показало их хорошее соответствие, так же как и сравнение такой полученной из модели компоненты, как «отношение смеси семейства нечётного озона», с данным наблюдений на спутнике UARS.

Моделирование вызываемых протонными событиями изменений в озоносфере было проведено для наиболее сильных в 23 цикле СПС, отобранных по результатам одномерного моделирования в Главе 2: 14 июля 2000г., 4 ноября 2001г., 28 октября 2003г. Результаты модельных расчётов были сопоставлены с соответствующими данными спутниковых измерений: модельные изменения содержания озона в период СПС 14 июля 2000г. сопоставлялись с данными измерений содержания озона на спутнике

UARS/HALOE, модельные скорости ионизации сопоставлялись с данными измерений потоков заряженных частиц на спутниках КОРОНАС-Ф и GOES, модельные расчёты структуры отклика озона и NO_y на СПС 28 октября 2003г. – с соответствующими измерениями на борту спутника ENVISAT (в рамках международного проекта NEPPA). Сопоставление показало общее согласие модельных и экспериментальных результатов, что свидетельствует как о пригодности модели CHARM для решения поставленных задач, так и о корректности выполненных с её помощью расчётов глобальной пространственно-временной структуры изменений озона и других химических составляющих под воздействием СПС. На этом основании в Главе 3 делаются следующие важные физические выводы: солнечные протонные события вызывают в стратосфере и мезосфере полярных широт сильное разрушение озона (до 80%) и увеличение окислов азота (до 1000%); имеет место чёткая сезонная асимметрия в отклике химического состава на воздействие СПС (при отсутствии солнечной радиации в период полярной ночи озон не восстанавливается); имеет место горизонтальный перенос, обуславливающий отклик на СПС в мезосфере на более низких широтах (до широты ~ 50°); в полярных областях выявлены незональные структуры поля скоростей ионизации в содержании озона и NO_y.

В главе 4 рассматриваются результаты трёхмерного моделирования отклика на СПС температуры и ветра в полярной атмосфере, полученные с помощью модели общей циркуляции ARM (разработанной в ЦАО под руководством диссертанта). Модель ARM (Atmospheric Research Model) является усовершенствованной модификацией модели общей циркуляции атмосферы, в которую в качестве входных параметров вводятся глобальные поля озона, окиси азота и малых газовых составляющих, рассчитанные предварительно в рамках фотохимической модели (см. Глава 3). Результаты численного моделирования показывают, что отрицательные изменения температуры и возмущения в циркуляции, вызванные СПС разрушением озона, распространяются к низким широтам и сохраняются в стратосфере и мезосфере в течение долгого времени после СПС. Даже в нижней термосфере обнаруживаются изменения температуры и ветра, обусловленные нарушением условий распространения ВГВ из тропосферы из-за изменений структуры зонального ветра под действием СПС.

Диссертация суммирует результаты исследований, выполненных автором за более чем 20-летний (судя по публикациям) период работы. Основными из них являются следующие:

1. Разработана одномерная фотохимическая численная модель средней атмосферы, учитывающая диффузионное распространение химически активной примеси по вертикали

и возможность учёта дополнительных химических источников, обусловленных солнечными космическими лучами;

2. Разработана трёхмерная глобальная нестационарная численная модель (CHARM) с химическим блоком, позволяющим учесть дополнительное образование окислов азота и водорода в периоды солнечных протонных событий;

3. Создана новая версия модели общей циркуляции тропосферы, средней атмосферы и нижней атмосферы, позволяющая исследовать термодинамические последствия разрушения озона в периоды СПС.

4. С помощью указанных моделей проведен расчёт эффектов воздействия высокоэнергичных солнечных протонов на химический состав и структуру озоносферы, на термический режим и циркуляцию в средней атмосфере. Сопоставление результатов модельных расчётов для наиболее мощных протонных событий 23-го цикла солнечной активности сопоставлены с данными соответствующих измерений на спутниках показало их хорошее соответствие, что свидетельствует о корректности разработанных численных моделей. Таким образом, создана технология диагностирования изменений в средней атмосфере, обусловленных воздействием высокоэнергичных солнечных протонов.

5. Использование этой технологии позволило получить новые сведения о воздействии СПС на состояние средней атмосферы, таких как сезонные различия эффектов СПС, распространение эффектов на более низкие широты (незатронутые вторжением протонов), долговременные последствия воздействия СПС, отклик на СПС в D слое ионосферы.

К работе могут быть сделаны следующие замечания:

- Наряду с высокоэнергичными протонами Солнце излучает также интенсивные потоки высокоэнергичных (релятивистских) электронов. Совокупность высокоэнергичных протонов и электронов, излучаемых солнечными вспышками, обычно обозначается термином «Солнечные космические лучи», который широко используется в первой, обзорной главе диссертации. Однако в дальнейшем диссертант рассматривает, без каких-либо оговорок либо пояснений, только высокоэнергичные солнечные протоны, хотя упоминания о солнечных электронах продолжают встречаться в тексте диссертации (см. например, Рис. 3.29 и 3.30). В итоге роль релятивистских электронов остаётся совершенно неосвещённой; неясно, оказывают ли электроны какое-либо специфическое воздействие на атмосферу Земли и, если оказывают, то каков их вклад в сравнении с солнечными протонами.
- Для расчёта эффектов воздействия высокоэнергичных солнечных протонов на среднюю атмосферу используются 3 модели, из которых одна – одномерная, а две другие –

трёхмерные. Остаётся неясным, какие ограничения на результаты расчётов накладывает использование одномерной фотохимической модели.

Отмеченные недостатки не умаляют достоинств диссертации, основные результаты которой опубликованы в 30 научных статьях и докладывались на многих международных и всероссийских конференциях. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Работа А.А. Криволуцкого является серьёзным, экспериментально и теоретически обоснованным исследованием, в котором решена одна из проблем влияния космической погоды на процессы в земной атмосфере, что имеет несомненное практическое значение для разработки методов мониторинга состояния атмосферы. Таким образом, работа А.А.Криволуцкого полностью соответствует критериям, предъявляемым к докторским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент:

руководитель научного направления «Космическая погода и её воздействие на среду обитания человека» Федерального государственного бюджетного учреждения «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт» (сокращенное название ФГБУ «АНИИ»), доктор физ.-мат. наук, профессор



О.А.Трошичев

22.06.2017 г.

Адрес: 199397, Санкт_Петербург, ул. Беринга 38,
Телефон, e-mail: +7(812)337-31-34, olegtro@aari.ru

Подпись О.А. Трошичева заверяю.

Директор ФГБУ «АНИИ»,
доктор геогр. наук, чл.-корр. РАН



И.Е.Фролов