

ОТЗЫВ

официального оппонента
Мирошниченко Леонтия Ивановича

на диссертацию

КРИВОЛУЦКОГО АЛЕКСЕЯ АЛЕКСАНДРОВИЧА

«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**

Влияние солнечной активности (СА) на состояние околоземной среды (в частности, на атмосферу Земли), на погоду и климат является одной из наиболее важных проблем в современной солнечно-земной физике (СЗФ). Актуальность такого исследования трудно переоценить. Вероятно, нет сегодня проблемы, которая бы столь непосредственно касалась судеб всего человечества в большей степени, чем, например, проблема глобального потепления. С другой стороны, механизмы указанного влияния, как и механизмы солнечно-земных связей (СЗС) в целом, до сих пор остаются неизвестными или плохо изученными.

Проблема эффективности механизмов внешних воздействий на атмосферу Земли (в том числе - на погоду и климат) была поставлена более 100 лет назад. С тех пор в понимании механизмов СЗС был достигнут значительный прогресс, но сама проблема остается актуальной и сегодня. К настоящему времени по наблюдениям с борта спутников накоплен огромный массив данных об электромагнитной и корпускулярной солнечной радиации, о параметрах атмосферы (ее химическом составе, температурном режиме и циркуляции). Кроме того, существенно улучшились численные модели и вычислительные средства в области СЗФ. Благодаря этому уже достигнут современный высокий уровень исследований, позволяющий решать новый класс задач, в том числе, при изучении гелио-метеорологических связей (ГМС). Данные о потоках электромагнитной и корпускулярной солнечной радиации, накопленные за период более трёх циклов активности Солнца, позволяют перейти к количественной форме результатов при использовании моделей в дополнение к статистическим исследованиям. Именно в таком ключе следует подходить к оценке диссертации А.А. Криволицкого. В этом случае особенно актуальным становится уточнение характеристик ГМС и, в особенности, основных механизмов этой связи.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав и Заключения, общий объем которых составляет 235 страниц, включая 8 таблиц, 105 иллюстраций и 2 Приложения. Список цитируемой литературы содержит 206 наименований.

В рецензируемой работе А.А. Криволицкого рассматриваются механизмы и последствия для атмосферы воздействия потоков корпускулярной радиации (солнечных космических лучей, СКЛ) после вспышек на Солнце, или, в более точной формулировке, в периоды солнечных протонных событий (СПС). При этом большое внимание уделяется атмосферному озону. Это обусловлено экологической важностью этой малой примеси, а также ее свойствами как радиационно-активного газа. Диссертация весьма содержательна и затрагивает довольно широкий круг проблем СЗФ, так что в кратком отзыве невозможно отразить все аспекты работы. Мы остановимся только на тех из них, которые имеют прямое отношение к проблемам гелио-атмосферных связей, где ключевую роль играют

СПС. При этом в каждой главе будут выделены наиболее существенные, по мнению оппонента, физические, экспериментальные или модельные результаты.

Первая глава является обзорной. Впервые разрушение озона в высоких широтах, вызванное энергичными солнечными протонами, было зафиксировано в измерениях с борта спутника Nimbus-4 [Heath et al., 1977] после солнечной вспышки 4 августа 1972 г. Теоретические исследования, проведенные после обнаружения этого эффекта [Porter et al., 1976; Hears, 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 интенсифицируют разрушение озона в известных каталитических химических циклах.

При этом каждая пара ионов, образующихся при торможении солнечных протонов в атмосфере, приводит к образованию 1.25 атомов азота и 2.0 молекул радикала OH. В этой связи следует отметить советские корабельные ракетные эксперименты, проведенные в период СПС октября 1989 г. [Zadorozhny et al., 1994]. Самым важным является тот факт, что изменения в атмосфере во время СПС были реально зарегистрированы. В дальнейшем различными группами был выполнен цикл работ по фотохимическому моделированию отклика озона на СПС различной мощности [Jackman et al., 2000; Krivolutsky et al., 2006]. Более детальный обзор работ и состояние вопроса можно найти в монографии [Кривоуцкий, Репнев, 2009]. Монография отражает важный этап в развитии СЗФ, связанный с новой информацией о химическом составе атмосферы, полученной со спутников. Именно эта информация позволила провести детальное сравнение наблюдений с модельными расчетами для периодов наиболее мощных СПС 23-го цикла SA.

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. На этой основе 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 [Кривоуцкий и др., 2008]. С использованием результатов измерений интенсивности солнечных протонов в интегральных каналах >1, >10, >100 МэВ на ИСЗ серии GOES (sec.noaa.gov) за период 1994-2005 гг. были рассчитаны временные ряды двух индексов: плотности потока энергии и средней энергии солнечных протонов в интервале 1-100 МэВ.

Согласно оценкам [Кривоуцкий и др., 2008], максимум протонной активности Солнца в 23-ем цикле приходится на 2000-2001 гг. Энергетически наиболее мощным событием была вспышка 14 июля 2000 г. Событие 4.11.2001 выделяется жестким энергетическим спектром протонов при меньшей, чем 14.07.2000, интенсивности потоков. Следует выделить также события за период октябрь-ноябрь 2003 г., которые сопровождалась также сильными геомагнитными возмущениями. Этот период важен, поскольку он был хорошо документирован по части наблюдений, а именно: обеспечен не только регистрацией частиц высоких энергий со спутников GOES и CORONAS-F (русская солнечная обсерватория [Панасюк и др., 2004]), но и измерениями химического состава в полярных широтах. Это последнее обстоятельство позволило впервые провести детальное сравнение наблюдаемых изменений в полярной озоносфере с результатами трехмерного моделирования [Funke et al., 2011].

Данное сравнение проводилось в рамках Международного проекта NEPPA, в основу которого были положены наблюдения химического состава атмосферы, проведенные с помощью прибора MIPAS, который был установлен на европейском спутнике ENVISAT. Более детально результаты сравнения воздействия СПС на полярную озоносферу в период октября-ноября 2003 года представлены в **третьей** главе.

Таким образом, наиболее сильными СПС 23-го цикла активности (по количеству образованных пар ионов) явились СПС: 14.07.2000, 04.11.2001 и 28.10.2003 гг. Для этих

СПС были реализованы численные сценарии, основанные на трехмерном моделировании. Во **второй** главе, по нашему мнению, наиболее интересными представляются модельные результаты отклика нижней полярной ионосферы (область D) на воздействие протонных вспышек. Такое впечатление подкрепляется практическим отсутствием наблюдений электронной концентрации в области D ионосферы в периоды рассмотренных СПС. Это, с одной стороны, затрудняет сопоставление с результатами моделирования, а с другой - придает последним ценность. В то же время ракетный корабельный эксперимент 1989 года зафиксировал 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 [Zadorozhny et al., 1994].

В **третьей** главе очень обстоятельно представлены результаты реализации численных сценариев воздействия СПС на химический состав средней атмосферы, полученные с помощью трёхмерной численной фотохимической глобальной нестационарной модели CHARM (Chemical Atmospheric Research Model). Модель была создана в лаборатории химии и динамики атмосферы Центральной Аэрологической Обсерватории (ЦАО) Росгидромета. Модель представляет собой численное решение системы уравнений неразрывности для химически активной примеси, с учетом адвективного переноса [Криволуцкий и др., 2012, 2015a].

Для описания пространственного переноса была реализована численная схема Пратера [Prather, 1986]. При интегрировании по времени кинетической части уравнения был использован метод "химических семейств", который ранее был реализован и в одномерной модели. Глобальные поля компонент ветра и температуры рассчитывались на каждый день года с помощью модели общей циркуляции ARM [Криволуцкий и др., 2015b]. Модель CHARM описывает взаимодействие между большим количеством химических составляющих (всего их 41), причём в целом они участвуют в 127-ми фотохимических реакциях.

Дополнительное образование окиси азота, вызванное ионизацией полярной атмосферы солнечными протонами после вспышек, должно приводить не только к разрушению озона в известном каталитическом цикле, но и трансформировать азотные составляющие. При этом следует ожидать различий в реакции химических составляющих в южной и северной полярной области как из-за некоторого различия в скоростях ионизации (вызванного различием в плотности воздуха), так и вследствие различий в освещенности (что приводит к различиям в скоростях фотодиссоциации). Время жизни химического семейства «нечетного азота» велико, поэтому изменения в содержании азотных окислов после вспышки могут иметь долговременные последствия. Именно такой результат и был получен в работе А.А. Криволуцкого.

В диссертации представлены модельные результаты, иллюстрирующие поведение содержания NO во времени на 75° северной и южной широты соответственно при воздействии СПС и в отсутствие СПС. Показано, что NO в области полярной ночи образуется практически только благодаря воздействию СПС, причём соответствующая концентрация сопоставима с дневными значениями. В работе также представлены результаты, которые показывают эволюцию содержания радикала OH во время СПС и в отсутствие СПС-возмущений в северной и южной полярных областях на высоких широтах. Показано, что OH, подобно NO, образуется в условиях полярной ночи только благодаря процессам, инициированным СКЛ.

Представленные в **третьей** главе результаты показывают, что СПС трансформирует практически всю фотохимическую систему полярной атмосферы Земли, а не только озон. В то же время озон является наиболее радиационно-активным газом: как известно, поглощение озоном ультрафиолетовой радиации Солнца практически полностью формирует термическую структуру и режим циркуляции средней атмосферы. Его изменения в пространстве и времени (в данном случае вызванные воздействием частиц

космического происхождения) должны вызвать также и термодинамические последствия в средней атмосфере. Наиболее важным результатом **третьей главы** представляется выделение ключевой роли озона в полярной атмосфере, куда как раз и приходит основная масса энергичных солнечных частиц в период СПС.

В **четвертой** главе приведены результаты, полученные с помощью модели общей циркуляции ARM (Atmospheric Research Model) и демонстрирующие эффекты воздействия СПС на температурный режим и циркуляцию [Krivolutsky et al., 2006; Кривоуцкий и др., 2012, 2015б]. 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 и 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. В модели учитываются возмущения, генерируемые тропосферными источниками (стационарными и бегущими волнами планетарными волнами). Для учета воздействия ВГВ на среднее движение в модели реализована параметризация, предложенная в работе [Lindzen, 1981]. Начальные поля ветра вводятся или на основе климатологических данных, или используются результаты предыдущих расчетов. В работе представлены расчеты глобальных полей температуры и зонального ветра для июля, полученные при интегрировании модели ARM. Сравнение модельных полей температуры и ветра с эмпирической климатологической моделью [CIRA'86] показало их хорошее соответствие. Следует отметить, что модель воспроизводит холодную летнюю полярную мезопаузу.

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 (рис.16). 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. Впервые такой сценарий удалось реализовать, рассматривая СПС 14 июля 2000 года [Krivolutsky et al., 2006]. В дальнейшем подобные сценарии были реализованы для других, наиболее сильных, СПС 23-го цикла активности Солнца [Кривоуцкий и др., 2010, 2012, 2015б]. Было показано, что наиболее сильный, но достаточно кратковременный эффект (продолжительностью ~10 суток) СПС вызывает летом, когда радиационные эффекты, связанные с изменениями в поле озона, велики. Изменения температуры при этом в зоне максимального разрушения озона составляют несколько градусов. Был обнаружен новый эффект – возмущения ветра и температуры в нижней полярной термосфере, который обусловлен изменениями в условиях распространения ВГВ из тропосферы вследствие уменьшения зонального ветра на более низких высотах. Было также показано, что модуль скорости зонального ветра везде уменьшается. Были найдены также изменения в глобальном распределении приливных гармоник зонального ветра [Krivolutsky et al., 2006].

На примере событий октября-ноября 2003 года с использованием модели общей циркуляции авторами [Кривоуцкий и др., 2012] были выявлены долговременные последствия воздействия частиц на полярную озоносферу. Воздействия обусловлены большим временем жизни «нечётного азота» NO_y в период полярной ночи и переносом азотных окислов на более низкие высоты, что приводит к дальнейшему разрушению озона и неожиданным эффектам в поле температуры в полярной области в летний период. В диссертации представлены результаты расчетов, иллюстрирующие этот эффект. Показано, что понижение температуры, вызванное долговременным разрушением озона, составляет несколько градусов и максимально в середине лета (максимум солнечной радиации). Виден также эффект в нижней атмосфере (слабый рост температуры). Последнее связано с

разрушением озона в стратосфере. Наиболее важным результатом **четвёртой** главы можно считать обнаружение своеобразного сезонного эффекта «зима-лето» в поведении озона, что свидетельствует о последствии мощных СПС на всю атмосферную фотохимию.

Данный эффект подтверждает важность учёта «фоновых (начальных) условий» при изучении СЗС. В свою очередь, это облегчает однозначную трактовку воздействия различных факторов СА на околоземное пространство и понимание его механизма(-ов).

Другим важным приложением обнаруженного эффекта последствия может быть анализ достоверности, происхождения и свойств «древних» экстремальных СПС типа события Кэррингтона (1859) по данным о содержании нитратов в полярных льдах (Гренландия и Антарктида).

Перейдём теперь к замеченным недостаткам диссертации. По существу работы у меня практически нет сколько-нибудь серьёзных замечаний. Основные замечания связаны с её оформлением и стилем изложения.

1. Работа хорошо иллюстрирована цветными рисунками. За редким исключением, они выполнены качественно, но их описание не всегда является адекватным. Например, на с.134 приведен рис.3.12 с оригинальными данными ИСЗ GOES-10 для события в июле 2000 г., а в подписи к нему почему-то указана ссылка на (Krivolutsky et al., 2005), что явно неправомерно.

2. Другое замечание касается списка литературы. Он достаточно хорошо отражает как состояние затрагиваемых проблем, так и вклад автора. Вызывает, однако, недоумение разнообразие использованных шрифтов по размерам и стилю: для русских ссылок использован один размер шрифта, а для английских – почему-то другой (меньшего размера), причём не только в списке ссылок, но и в самом тексте диссертации.

3. Следовало бы также больше цитировать и использовать последние публикации по СКЛ (СПС), например, Каталог СПС 23-го цикла солнечной активности, подготовленный российской Рабочей Группой «Каталог» и опубликованный недавно Геофизическим Центром РАН в виде электронной книги. Вероятно, отсутствием ссылки на этот Каталог можно объяснить утверждение автора о том (с.110), что «в период с 1997 до 2006 года было зарегистрировано 117 сильных СПС» с интенсивностью $\geq 1.0 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{sr}^{-1}$ в максимуме события для протонов с энергией $\geq 10 \text{ МэВ}$. Отсюда же следует и другой неверный вывод: «23-й цикл был менее активен» (с.111), чем 22-ой цикл. Всё это, как минимум, требует разъяснений.

4. Вызывает недоумение тот факт, что к работе отдельно прилагается полный список иллюстраций с подписями, хотя в тексте под всеми рисунками есть все необходимые подписи.

5. Местами автор использует устаревшую терминологию, например, «протонная вспышка» вместо СПС (глава 1), «корпускулярные потоки» вместо СКЛ (с.17), БэВ вместо ГэВ (с.84) и т.п. В работе можно заметить немало опечаток и других небрежностей стиля (например, с.84, 90, 91, 207 и другие).

6. Ещё одно замечание касается не всегда четких высказываний диссертанта по тому или иному поводу. Например, на с.219 написано: «Возможно, следует попытаться создать отдельную модель области D...». Довольно спекулятивной выглядит также следующая фраза (с.40): «Предполагается, что этот результат мог быть вызван различием во временном изменении спектра энергий протонов и в продолжительности этих СПС, однако это заключение требует специального исследования». Такие неуверенные высказывания, интересные предположения и некоторые недосказанности встречаются и в других местах (например, на страницах 31, 32, 36, 46, 219), причём в некоторых случаях для уверенности можно было бы просто добавить нужную ссылку, какую-то оценку и т.п.

7. Наконец, в Выводах следовало бы более чётко сформулировать вытекающие из диссертации новые задачи исследования (измерения, моделирование) и их возможные перспективы. Например, заслуживает внимания и более подробного изложения идея

(с.220) непрерывного мониторинга солнечного УФ-излучения и измерения потоков энергичных солнечных частиц на малых спутниках.

Диссертация А.А. Криволицкого подтверждает, что СКЛ – это не только активный агент солнечно-земных связей, но и один из путей (механизмов) влияния солнечной активности на земную атмосферу. Научные положения, выносимые А.А. Криволицким на защиту, основаны, прежде всего, на применении современных численных моделей, а также на обработке большого объема данных наблюдений с использованием архивов метеорологических и геофизических данных. Его результаты свидетельствуют о возросших возможностях численного моделирования как одного из мощных методов современной науки в целом. О достоверности и научной значимости результатов, представленных в диссертации, свидетельствуют публикации в рецензируемых российских и зарубежных журналах по солнечно-атмосферной тематике, доклады на крупных российских и международных конференциях, международный характер ряда результатов, полученных в тесном сотрудничестве со специалистами из других стран.

Результаты исследований по теме диссертации изложены в совместной монографии 2009 г.; они включены в несколько энциклопедических изданий по солнечно-земной физике, а также опубликованы в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах (всего 40 публикаций), в том числе 27 статей – в журналах, рекомендованных ВАК (14 – в российских и 13 – в зарубежных).

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Таким образом, в настоящей диссертации решена крупная научная проблема: путём численного фотохимического моделирования впервые получена пространственная и временная структура отклика химического состава полярной озоносферы на воздействие наиболее мощных СПС, показана возможность распространения эффекта воздействия на низкие широты и зависимость эффекта от сезона. Результаты диссертации, имеют важное научное и прикладное значение. Работа полностью соответствует всем требованиям ВАК, а ее автор, Криволицкий Алексей Александрович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Леонтий Иванович Мирошниченко

Главный научный сотрудник

Отдела Физики Солнца и солнечно-земных связей ИЗМИРАН,

доктор физико-математических наук по специальности: 01.03.03 – гелиофизика и физика

Солнечной системы

108840, Калужское шоссе, 4, Троицк, Москва, Россия.

Рабочий телефон: 0074958510282; факс: 0074958510124;

E-mail: leonty@izmiran.ru

20 июня 2017 г.

