

# Воздействие солнечного корпускулярного излучения на атмосферу Земли: современное состояние проблемы

© Л. В. Райченко, 2010

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 8 февраля 2010 г.

Представлено членом редколлегии В. Н. Шуманом

Наведено огляд деяких результатів, які підтверджують гіпотезу, що сонячні космічні промені (СКП), імовірно, відіграють значну роль в іонізації середньої та нижньої атмосфери і можуть слугувати фізичним посередником у сонячно-земних кліматичних співвідношеннях. Простежено ланцюжки взаємопов'язаних процесів у навколоземному просторі у контексті системної парадигми тектоносфера — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, збуджених СКП і сонячним вітром. Указано можливі тригерні механізми передавання сонячної енергії у навколоземний простір. Розглянуто можливість збагачення СКП ядрами важких елементів.

Review of results has been given, which approve the hypothesis that solar cosmic rays (SCR) apparently play an important role in ionization of middle and lower atmosphere and may serve as a physical intermediary in solar-terrestrial climatic interrelations. Chains of interconnected processes in circumterrestrial space have been traced in the context of a system paradigm tectonosphere — atmosphere — ionosphere — magnetosphere, excited by SCR and solar wind. Possible trigger mechanisms of solar energy transfer to circumterrestrial space have been indicated. Possibility of enrichment of SCR by nuclei of heavy elements has been considered.

**Введение.** До недавнего времени исследования солнечно-земных связей сводились, в основном, к поискам статистически значимых корреляций между некоторыми солнечными и атмосферными параметрами и на этом пути тормозились несколькими принципиальными трудностями (см. обзор: [Авдюшин, Данилов, 2000, и ссылки в ней]).

1. В качестве солнечных параметров при поисках корреляций использовалось число Вольфа  $W$ , различные показатели волнового излучения Солнца (например, индекс  $F(10,7)$ ) и солнечная постоянная  $S$ , характеризующая общий поток солнечной волновой энергии. Между тем вариация  $S$  в цикле солнечной активности составляет  $\sim 0,1\%$ .

2. Энергия, приходящаяся на корпускулярную часть солнечного излучения, которая меняется достаточно сильно, также мала ( $\sim 10^3$  МВт) по сравнению, например, с энергией циклона и, казалось, не может вызывать глобальных изменений климата.

3. Считалось, что корпускулярная часть солнечного излучения не доходит до Земли и поглощается выше стратосферы — в мезосфере и нижней термосфере.

4. Отсутствовали какие-либо очевидные тригерные механизмы для передачи воздействия солнечного излучения в нижние слои атмосферы.

Однако уже наблюдения на спутнике "Нimbus" показали, что солнечная постоянная  $S$  позволяет отслеживать вариации  $W$ , но с меньшей амплитудой. Реконструкция прошлых циклов солнечной активности и изучение длинных рядов данных с помощью компьютерных методик открыли новые возможности в изучении солнечно-земных связей. Установлено, что в предшествующих циклах вариации  $S$  были больше и составили не  $2 \text{ Вт/м}^2$  (как вблизи минимума в 1984 г.), а возможно,  $10 \text{ Вт/м}^2$  в период Маундеровского минимума. Солнечная постоянная была восстановлена с 1610 г. до настоящего времени, и получена хорошая кор-

реляция изменения  $S$  и приповерхностных температурных отклонений (см., например: [Lean et al., 1995]).

В качестве солнечного радиационного форсажа в модельных расчетах использовались различные оценки солнечной активности, и был обнаружен четкий отклик атмосферных циркуляций на незначительное ее изменение (см., например: [Webber et al., 2004; Bauer et al., 2003]). Таким образом, на больших временных интервалах ( $> 100$  лет) отмечается связь земных климатических параметров с циклами солнечной активности; сравнительно малое изменение солнечного радиационного форсажа приводит к значительным изменениям атмосферных параметров.

Существенным прорывом в этих исследованиях оказались работы группы К. Labitzke [Labitzke, Van Loon, 2000], которые показали, что атмосферный отклик на изменение солнечных параметров становится хорошо выраженным, если рассматривать отдельно годы различных фаз квазидвухлетних вариаций, отражающих тонкую структуру солнечного цикла. В результате такого подхода были обнаружены значимые корреляции стратосферных давлений и температур с числом солнечных пятен  $W$  и индексом  $F(10,7)$ , даже на сравнительно коротких временных интервалах ( $\sim 100$  лет). В свою очередь, была прослежена хорошо выраженная корреляция между вариациями стратосферных параметров и температурами различных слоев термосферы.

Спутниковые наблюдения (см., например: [Frohlich, Lin, 2004]) обеспечили точные измерения солнечного радиационного выхода, его изменчивости и поглощения атмосферой. Общее солнечное излучение (TSI) и среднее падающее солнечное излучение ( $\sim 1/4$  TSI) оценены, соответственно, как 1366 и 341 Вт/м<sup>2</sup>. Амплитуда 11-летнего цикла в этих параметрах составляет порядка 0,1% (соответственно, 0,3 и 1,3 Вт/м<sup>2</sup>), а амплитуда вариаций, связанных с 27-суточным периодом Солнца, — примерно 0,2%. Более длинные периоды считались пренебрежимо малыми ( $\sim 0,1$  Вт/м<sup>2</sup>), однако в работе [Skafetta, Wilson, 2008] показано, что эта величина на порядок больше, и составляет  $\sim 1$  Вт/м<sup>2</sup>. В публикации [Lindzen, Choi, 2009] обоснована переоценка относительных вкладов в глобальные температуры концентрации CO<sub>2</sub> и солнечного радиационного форсажа: по мнению авторов, первый должен быть уменьшен на фактор, равный  $\sim 6$ , а второй увеличен на фактор, равный  $\sim 10$ .

Более того, вариации в солнечной светимости зависят от длины волны. В то время как в видимом спектральном интервале солнечная светимость достигает максимальных значений в  $10^3$  МВт/(м<sup>2</sup> · нм<sup>-1</sup>), а в УФ-интервале, который сильно поглощается нижней атмосферой и наиболее влияет на космическую погоду (см., например: [Chanin, 2006]), только  $10^{-2}$  МВт/(м<sup>2</sup> · нм<sup>-1</sup>), т. е. на 5 порядков ниже, чем в спектральном интервале, ее изменение в солнечном цикле достигает 100% (на 3 порядка выше, чем в видимом интервале).

Таким образом, в настоящее время появилось все больше доказательств, что прежние модельные расчеты не включали значительной части солнечного воздействия на температуру не только в нижней, но и в верхней атмосфере [Scafetta, West, 2007; Tinsley et al., 2007; De Jager, 2008]. De Jager, Usoskin (2006) использовали различные наборы глобальных/хемисферных температурных реконструкций за последние 400 лет и пришли к выводу, что на тропосферные температуры влияет, в основном, поток УФ-излучения. Обзорное исследование роли рентгеновского и УФ потоков в пространственной погоде приведено в [Lilensten et al., 2008].

Проблема состоит в том, что большинство моделей не позволяет корректно объяснить, каким образом вариации коротковолнового солнечного излучения могут оказывать заметное воздействие в направлении к поверхности Земли (в действительности во многих моделях использованы не сами значения потоков, а их грубый заменитель — мощность солнечного излучения, эмитируемая на радиоволне 10,7 см ( $F_{10,7}$ )). Более того, в моделях не могут быть учтены взаимодействия атмосферных слоев ниже 20 км. В этом аспекте, по-видимому, весьма перспективны модели, в которых учитывается ионизация слоя  $E$  за счет этого излучения, в результате которой развивается атмосферное динамо.

С.В. Авакян (2008) обзорно исследовал микроволновое излучение ионосферы, обеспечивающее передачу энергии солнечного рентгеновского излучения и потоков заряженных частиц от вспышек в тропосферу. Предлагаемая модель включает также потоки энергичных электронов, высыпаящихся из радиационных поясов во время геомагнитных возмущений.

В связи с необходимостью отыскания механизма передачи солнечной энергии в тропосферу С.В. Авакян (2008) в качестве реше-

ния проблемы предлагает ввести “трехступенчатый триггер”.

1. Преобразование в ионосфере потоков коротковолнового солнечного излучения и высыпавшихся корпускул из радиационных поясов в поток микроволн, проникающих в тропосферу до земной поверхности. На этой стадии возникает прямая информационная связь между верхней атмосферой и тропосферой.

2. Указанное излучение играет роль регулирующего фактора в скоростях образования и разрушения водных кластерных ионов на высотах действия конденсационного механизма, а также инициирует генерацию облачных и аэрозольных слоев в стратосфере и нижней атмосфере. В этом процессе может участвовать и резонансное поглощение, поскольку эмиссионное микроволновое излучение молекул ионосферного азота и кислорода на ридберговских переходах поглощается в нижней атмосфере также ридберговски-возбужденными молекулами азота и кислорода, образующими окружающий газ в столкновительно-диссоциативной рекомбинации кластерных ионов из паров воды и молекул  $\text{CO}_2$ .

3. Далее следует очевидная роль образованных облаков и аэрозольных слоев в погодно-климатических явлениях — поглощение и отражение ими определенной части (примерно 6 %) лучистой энергии Солнца и теплового потока подстилающей поверхности.

В работе [Авакян, 2008] практически нет энергетических оценок, но нам представляется, что предлагаемый механизм, хотя и должен учитываться при моделировании климатических процессов, не может быть единственным в сложной системе откликов климата на ионизирующие солнечное излучение.

Тот факт, что сравнительно небольшой солнечный радиационный форсаж вызывает значительные изменения не только в верхних, но и в нижних слоях земной атмосферы, заставляет снова вернуться к поискам триггерных механизмов передачи воздействия солнечного волнового и корпускулярного излучения в нижние слои атмосферы.

В этом аспекте принципиально новые возможности открывает концепция глобального атмосферного тока, обзорно рассмотренная в работе [Markson, 1978] (рис. 1). Исследование изменения солнечной активности (индекса вихреобразования (*vorticity*)) на фиксированной площади показало [Roberts, Olsen, 1973], что обусловленный формированием перистых облаков нагрев нижней атмосферы нельзя объяс-

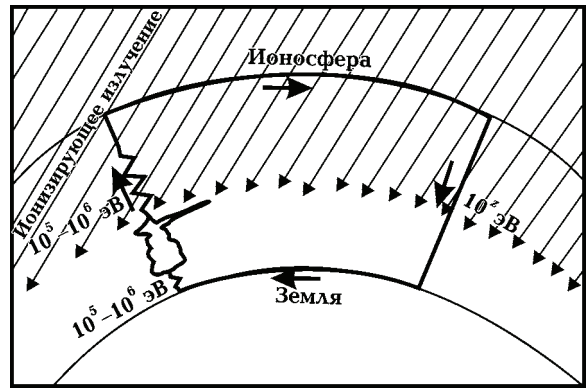


Рис. 1. Схематическое изображение атмосферного электрического тока [Markson, 1978].

нить быстрым (в течение 1 сут) откликом этого индекса на 94 большие солнечные вспышки в зимние периоды 1955—1969 гг. Поэтому были обсуждены возможности атмосферного электричества. Авторы пришли к выводу, что электрический механизм, включающий изменение ионосферного потенциала под воздействием ионизирующего излучения, быстро меняет интенсивность атмосферного электрического поля Земли через 1 сут после солнечных вспышек.

Действительно, атмосферный электрический ток обходит создаваемые механизмом волнового нагрева трудности как в отношении энергетических оценок (не требует дополнительной тепловой солнечной энергии, а лишь открывает возможность высвобождения и перераспределения большой энергии, уже запасенной в тропосфере), так и в аспекте соединения верхних и нижних атмосферных областей: он воздействует на все электрическое поле от стратосферы до поверхности Земли (примерно до высот  $\sim 15$  км). Этот ток генерирует пространственные заряды, которые могут влиять на микрофизические взаимодействия между каплями и ледоформирующими конденсативными ядрами и, таким образом, — на облачное покрытие и климат.

Ясно, что концепция глобального атмосферного электрического тока вызывает необходимость системного подхода к исследованию вариаций параметров внеатмосферного происхождения в различных слоях земной атмосферы.

А. Ф. Черногор (2003) предложил новую системную парадигму применительно к объекту тектоносфера — атмосфера — ионосфера — магнитосфера (ТАИМ). Эта парадигма пред-

полагает объект ТАИМ открытой сверху и снизу динамической нелинейной системой, подвергающейся воздействию различных высокоэнергетических потоков, которые вызывают сложный комплекс процессов во всех ее подсистемах и изменения в характере их взаимодействия.

В работе [Lockwood, 2003] приведено описание проекта "Климат и погода системы Солнце — Земля", одна из тем которого посвящена исследованию связи между солнечной активностью (индексом *SSC*, который, как и индекс *aa*, оценивает энергию поступающих в атмосферу заряженных частиц) и глобальными вариациями приземной температуры с 1868 г. Показано, что для временных масштабов более 60 лет 70 % долгопериодных изменений в приземной температуре может быть отнесено к изменениям индекса *SSC* и 30 % — к вариациям потоков солнечного излучения.

Таким образом, доказан факт солнечного воздействия на погоду и климат Земли, но поистине революционным в поисках солнечно-земных погодных корреляций можно считать цикл исследований, недавно проведенных Le Mouel et al. [2009а, б] и Courtillot et al. [2009]. В этих работах вместо традиционных глобальных температурных трендов были использованы статистические характеристики длинных серий данных 153 станций Европы и Северной Америки за период свыше 200 лет: суточные отклонения температур; среднеквадратичные межгодовые температурные возмущения; "времена жизни" этих вариаций (соответствующие средней продолжительности температурных возмущений). Было замечено, что многодекадные тренды этих кривых заметно коррелируют между собой и совпадают с трендами для таких заместителей солнечных индексов, как числа Вольфа *W* или геомагнитная интенсивность на соответствующих станциях. Для улучшения корреляции авторы расщепили длинные серии данных в соответствии с уровнем солнечной активности, учитывая сезонные и региональные вариации, и показали, что солнечный признак уверенно фиксируется в изменениях этих параметров на разных временных шкалах (рис.2). В течение XX в. квадратичные температурные возмущения изменялись на фактор, достигающий значения 1,5.

Ясно, что солнечный радиационный форсаж — мировое явление, но в силу своей сложности атмосферная климатическая система не может откликнуться на него всегда и везде оди-

наково. Поэтому учет региональных и сезонных вариаций оказался очень плодотворным в поисках соответствующих корреляций.

Исследования показали, что эволюция температурных возмущений остается связанной с солнечной активностью вплоть до настоящего времени, вопреки многочисленным работам, посвященным 15-летнему (с 1985 г.) тренду потепления глобальных температур, так называемому глобальному потеплению, которое приписывалось парниковому эффекту и, по видимому, является артефактом.

С нашей точки зрения, очень важен также вывод Le Mouel et al. (2009а) и Courtillot et al. (2009) о сходстве температурных и солнечных кривых на 100- и 10-летней шкалах. Он позволяет надеяться, что обсуждаемые ниже вопросы генерации солнечных космических лучей (СКЛ) и связанных с ними изменений в атмосферной климатической системе будут также полезны для длинномасштабного моделирования.

Далее рассмотрим сравнительное воздействие на околоземное пространство различных потоков корпускулярного излучения, галактических и солнечных космических лучей, а также солнечного ветра (СВ) и попытаемся проследить, как оно проявляется в высокой, средней и нижней земной атмосфере.

Еще раз подчеркнем, что целью статьи не является подробное реферирование всех относящихся к рассматриваемой проблеме работ последних лет. Упомянуты лишь те работы, которые подтверждают наше предположение, что именно СКЛ могут оказаться агентом, обуславливающим солнечный признак, блестяще обнаруженный в работах [Le Mouel et al., 2009а, б]. Широтные вариации, сезонный ход и региональный характер этого признака вполне согласуются с характером вариаций и анизотропией СКЛ, учитываемой с помощью асимптотических конусов приема [Dorman, 2000].

При этом можно предположить, что СКЛ генерируются практически во всех солнечных вспышках, которые, как показано ниже (разд. 1.2), имеют циклический характер, так что ионизация верхних слоев земной атмосферы может производиться СКЛ не спорадически, а постоянно на 10-летних временных шкалах.

Нижних слоев атмосферы достигают лишь высокоэнергетические (порядка 1 ГэВ) СКЛ, которые генерируются не только в больших вспышках на Солнце, но, вероятно, и в малых,



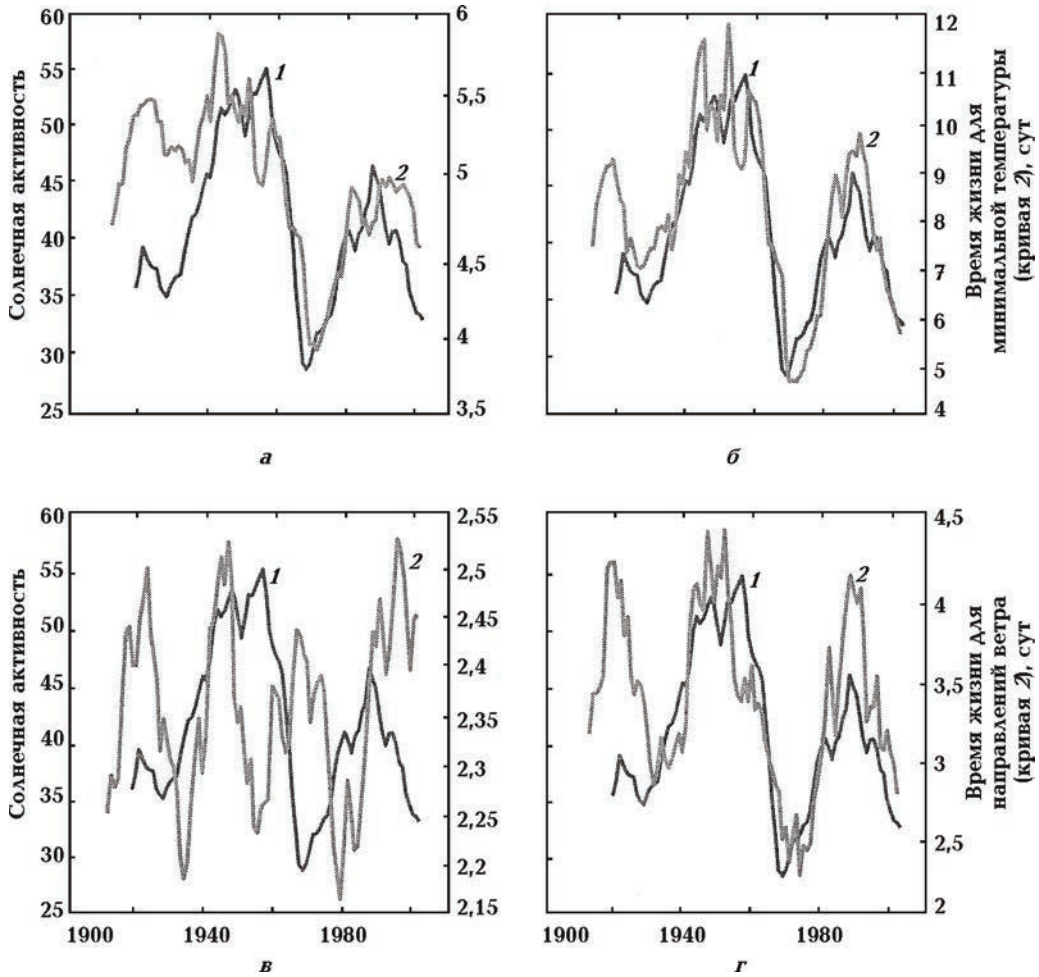


Рис. 2. Доказательство сильного солнечного признака в метеорологических возмущениях (температурных и скорости ветра) в Норвегии. Времена жизни (1) минимальных температур (а, б) и направлений скорости ветров (в, г) вычислены для всего года (а, в) и зимнего сезона (б, г) и сравнены с заместителем солнечной активности (2), в качестве которого использована средне-квадратичная суточная вариация геомагнитной z-компоненты на обсерватории Eskdalimuir.

соединенных с корональными выбросами массы на Солнце (СМЕs), где СКЛ могут формироваться на фронтах ударных волн.

## 1. Корпускулярные потоки в системе ТАИМ

**1.1. Галактические космические лучи (ГКЛ): воздействие в минимумах солнечной активности.** Как известно, потоки ГКЛ генерируются в межзвездном пространстве и на своем продвижении к Земле моделируются как солнечным, так и магнитосферным магнитным полем (так называемая эффективная жесткость обрезания). Вблизи Земли поток ГКЛ практически однороден. Попадая в атмосферу Земли, высокоэнергетические ГКЛ

образуют ядерно-электромагнитные каскады, включающие в себя электроны, нуклоны и мезоны, а также  $\gamma$ -излучение и рентгеновское излучение, и ионизуют атмосферу до высот  $\sim 3\text{--}4$  км. В силу этого ГКЛ могут быть посредниками в соотношении солнечная активность — климат. Как показано ниже, потоки ГКЛ очень малы, и взаимодействие с возмущенными полями СВ (Форбуш-спады космических лучей (КЛ)) приводит к их выметанию из межпланетного пространства. Поэтому воздействие ГКЛ на климат Земли, по-видимому, особенно эффективно в периоды минимумов солнечной активности.

Воздействие ГКЛ на атмосферные процессы подробно изучено в работах [Стожков, 2002; Ермаков, 2000; Jermakov, Stozhkov, 2003] — ис-

следованы вызываемые ГКЛ ионизационные процессы в атмосфере, показана их роль в формировании облачности, грозового электричества и глобального атмосферного тока на высоте ~ 60 км. Yu. I. Stozhkov (2002) получил линейные соотношения для ионного баланса и зависимость коэффициента диффузии частиц от напряженности межпланетного магнитного поля (ММП), которые, в принципе, могут учитываться для любых потоков заряженных частиц (см. таблицу).

В. И. Ермаков и Ю. И. Стожков (2000) исследовали глобальный физический механизм солнечно-земной погодной связи, в который в качестве связующего звена включена глобальная электрическая цепь, а ключевую роль играют грозовые облака. После возмущений на Солнце повышается электропроводность нижней ионосферы Земли, уменьшается сопротивление глобальной электрической цепи (см. выше) и увеличивается грозовая активность. Увеличение энергии в глобальном масштабе может достигать  $10^{18}$ — $10^{20}$  Дж, чего достаточно для изменения циркуляции в нижней атмосфере.

Возможные воздействия ГКЛ на формирование облачности в земной атмосфере обзорно рассмотрены в работе [Usoskin, Kovaltsov, 2008]. Показано, что даже небольшое изменение состава облачного покрова, при прочих равных факторах, может сильно влиять на количество поглощенной и отраженной солнечной радиации. Поскольку поток ГКЛ, очевидно, моделируется солнечной активностью, то этот механизм играет важную роль при моделировании солнечно-земных связей. Широко дискутируется возможность постоянной и высокозначимой корреляции между низкооблачным покровом и ГКЛ, обнаруженной Voiculescu et al. (2006) для некоторых географических областей и согласующейся с модельными

расчетами Kazil et al. (2006). Предложены два механизма, с помощью которых земная атмосфера откликается на солнечное воздействие. В одном из них каскадные процессы в атмосфере, обусловленные прохождением ГКЛ (а также СКЛ — прим. автора), вызывают ионизацию, которая воздействует на образование ядер облачной конденсации в присутствии аэрозолей. Другой механизм предполагает, что на облачное формирование воздействует атмосферный электрический ток, при этом КЛ влияют на электропроводимость атмосферы.

На основе моделирования химического состава нижней атмосферы в лабораторных условиях показано [Svensmark, 2007; 2009], что ударные волны, связанные с СМЕs и вызывающие Форбуш-понижения КЛ, обуславливают уменьшение жидководного содержания низких облаков так, что в океанской атмосфере водное содержание уменьшается на 7%. Заметим, что с СМЕs уверенно связываются также генерация СКЛ и их ускорение на фронте ударной волны.

Поэтому представляется спорным утверждение Ю. М. Стожкова (2000) о том, что ГКЛ — единственные источники ионизации в нижней атмосфере на высотах ~ 30 км. Потоки ГКЛ на 8 порядков меньше, чем потоки от солнечных вспышек: энергетический поток солнечных частиц составляет:  $F_{СКЛ} = 1,36 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>, в то время как соответствующий поток ГКЛ равен:  $F_{ГКЛ} \sim 10^{-5}$  Вт/м<sup>2</sup>. В действительности это различие еще больше, так как здесь не учтены СКЛ, поступающие в магнитосферу от СВ, ускоренные ударными волнами (см. разд. 2). Согласно анализу многолетних данных об изменениях электрического поля в атмосфере на высоте ~ 3 км, характеризующих грозовую активность в глобальном масштабе [Jeramkov, Stozhkov, 2003], максимальная грозовая

**Скорость ионной продукции в атмосфере Земли для различных источников ионизации, усредненная за 1 год**

Источник	Скорость, пк
Природная радиоактивность, $h < 3$ км	$< 10^{24}$
ГКЛ (в атмосфере)	$\sim 10^{27} - 10^{28}$
СКЛ и осаднение (полярные широты, спорадически)	$\sim 10^{26} - 10^{27}$
УФ- и X-лучи солнечного излучения (верхняя атмосфера, $h > 50$ км)	$\sim 10^{28}$
Освещенность (области с грозовой активностью $> 10$ км)	$\sim 10^{27} - 10^{28}$

активность на Земле образуется через 2 сут после прохождения активной области через солнечный центральный меридиан. Эта область влияет на грозовые процессы посредством исходящего из нее высокоскоростного СВ (который, как показано ниже, является также ловушкой для ускоренных во вспышках СКЛ). Широко известны также наземные эффекты солнечных вспышек.

Однако Svensmark (2000) установил, что в течение последнего цикла облачность меняется согласованно по фазе с изменением потоков ГКЛ, а Fanggun (2002), исследуя роль вариаций КЛ в образовании тропосферных аэрозолей и формировании облачности, показал, что этих вариаций вполне достаточно для появления заметных вариаций в образовании аэрозолей. По-видимому, данный вопрос нуждается в дальнейшем исследовании в рамках теории ядерно-каскадных процессов для заряженных частиц в широком диапазоне энергий.

Такая возможность появилась после серии мощных солнечных вспышек в октябре — ноябре 2003 г. (см. разд. 1. 2), показавших, что и ГКЛ, и СКЛ обладают достаточно широкими спектрами энергий для ионизации верхних и нижних слоев атмосферы. В связи с этим возникла необходимость в точных количественных оценках инициированной космическими лучами ионизации (CRII), а также ее пространственно-временных вариаций и зависимости от солнечной и магнитной активности.

G. Vazilevskaia (2008) обсудила нуклонно-электромагнитные каскады в нижней атмосфере, приводящие к ионизации, диссоциации и возбуждению атмосферных молекул [Dorman, 2000], и показала, что основные ионизационные потери происходят на высоте ниже ~ 30 км.

Появились численные модели для определения CRII в полном интервале физических параметров, основанные на применении метода Монте-Карло. В кратком обзоре [Usoskin et al., 2009] подробно описаны три такие модели: Софийская [Velinov, Mateew, 2007], Бернская [Desorgen et al., 2005] и Оулу [Usoskin, Kovaltsov, 2006].

В этих моделях ионизация CRII представлена в виде

$$Q(h, \varphi, P_c) = \sum_{T_{c, I}}^{\infty} \int J_i(T, \varphi) Y_i(h, T) dt, \quad (1)$$

где суммирование проводится по различным

ядрам  $i$  первичных КЛ (протонов,  $\alpha$ -частиц, более тяжелых ядер);  $Y_i(h, T)$  — функция ионизации (число пар ионов, произведенных одной частицей  $i$ -го вида с кинетической энергией  $T$  на высоте  $h$  в атмосфере, которая вычисляется с помощью метода Монте-Карло);  $J_i(T, \varphi)$  — дифференциальный энергетический спектр  $i$ -х ядер. Интегрирование проводится выше  $T_{c, I}$  — кинетической энергии частиц, соответствующей геомагнитному обрезаю на широте  $\varphi$ .

Скорости ионизации, вычисленные с помощью этих моделей (а также моделей [Schroter et al., 2006]), совпадают между собой и согласуются с немногочисленными экспериментальными измерениями. Понятно, что представление (1) можно использовать для вычислений потоков заряженных частиц как галактического, так и солнечного происхождения.

Вычисление ионизации CRII для верхней атмосферы (ионосферы и стратосферы) упрощается, так как здесь практически не возникают ядерно-каскадные процессы (так как плотность слоев на высоте  $h = 50$  км менее  $1 \text{ г/см}^3$ , т. е. намного меньше ядерного свободного пробега частиц). Более того, для  $h > 50$  км можно пренебречь изменением энергии заряженных частиц, и это приводит к сравнительно простым аналитическим решениям [Velinov, Mateew, 2007]. Данная модель была применена для вычисления атмосферных электрических проводимостей в средней атмосфере, и оказалось, что в событиях солнечных энергетических протонов (SEPs) проводимость на высотах 30—80 км увеличивается на 2 порядка по сравнению с фоном ГКЛ. Эти результаты также служат сильным аргументом в пользу того (см. выше), что ГКЛ — не единственный источник ионизации в нижней атмосфере.

**1. 2. СКЛ в системе ТАИМ.** СКЛ играют самостоятельную роль в возбуждении системы ТАИМ. Они генерируются в больших и малых вспышках на Солнце, а также, возможно, и в субвспышках. Попадая в атмосферу Земли, СКЛ образуют вторичные потоки протонов и нейтронов, которые регистрируются нейтронными мониторами (NM) и могут быть пересчитаны к первичному потоку с помощью разработанного Л. И. Дорманом (Dorman, 2000) метода коэффициентов связи.

Состав СКЛ меняется для разных вспышек в зависимости от условий их ускорения

в источнике, но в основном они состоят из протонов, электронов и ядер более тяжелых элементов и, как раньше считалось, отражают состав солнечной хромосферы и короны. Так как  $V_\alpha = 1/2 V_p$ , то у Земли  $\alpha$ -частицы регистрируются позже, чем протоны, и зачастую СКЛ оказываются обогащенными протонами (так называемые солнечные протонные события SEPs). Спектр среднего потока электронов в солнечных вспышках можно определить по рентгеновскому излучению [Brown, 2003].

Об обогащенности СКЛ ядрами тяжелых элементов указано в работе [Cohen, 1999]. Исследовав по данным спутника ACE зарядовый состав высокоэнергетических солнечных частиц, автор обнаружил, что вспышка 06. 10. 1997 г. вызвала обогащение СВ тяжелыми элементами: Fe / O ~ 1;  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{54}\text{Fe}$  с  $E \sim 12\text{--}60$  МэВ/нуклон. Энергетические спектры ионов Fe солнечного и галактического происхождения сопоставлены в работе [Баранов и др., 2001]. Kocharov and Torsti (2002) проанализировали солнечные события с необычно высоким содержанием  $^3\text{He}$  с  $E > 50$  МэВ/нуклон и предложили модель повторного ускорения этих частиц ударными волнами, связанными с выбросами корональных масс (CMEs) после вспышки.

Данные об относительном обилии элементов с  $1 < Z < 82$ , зарегистрированных в SEPs на энергиях 2—10 МэВ/нуклон с помощью спутника WIND за 9 лет, обобщены в обзоре [Reames, Ng, 2004]. В выборке из 39 больших импульсных событий в 25 зарегистрированы измеряемые увеличения содержания элементов ( $50 < Z < 56$ )/O и ( $76 < Z < 82$ )/O относительно их коронарного содержания в диапазоне от ~ 100 до 10 000 раз. Как отмечают авторы, увеличение обилия тяжелых элементов в импульсных SEPs менее поразительно, чем их сильная корреляция с показателем спектра ионов Fe и с размером вспышки. Впервые сообщается, что наибольшее увеличение наблюдается во вспышках с крутыми спектрами ионов Fe и с наименьшей интенсивностью рентгеновского излучения.

Как известно, впервые аномально высокие потоки тяжелых ядер, сопровождавшие вспышки классов 2 и 1, были зарегистрированы на спутниках "Электрон-2" и "Электрон-4" [Райченко, 1982]. На рис. 3 показан случай кратковременного возрастания пото-

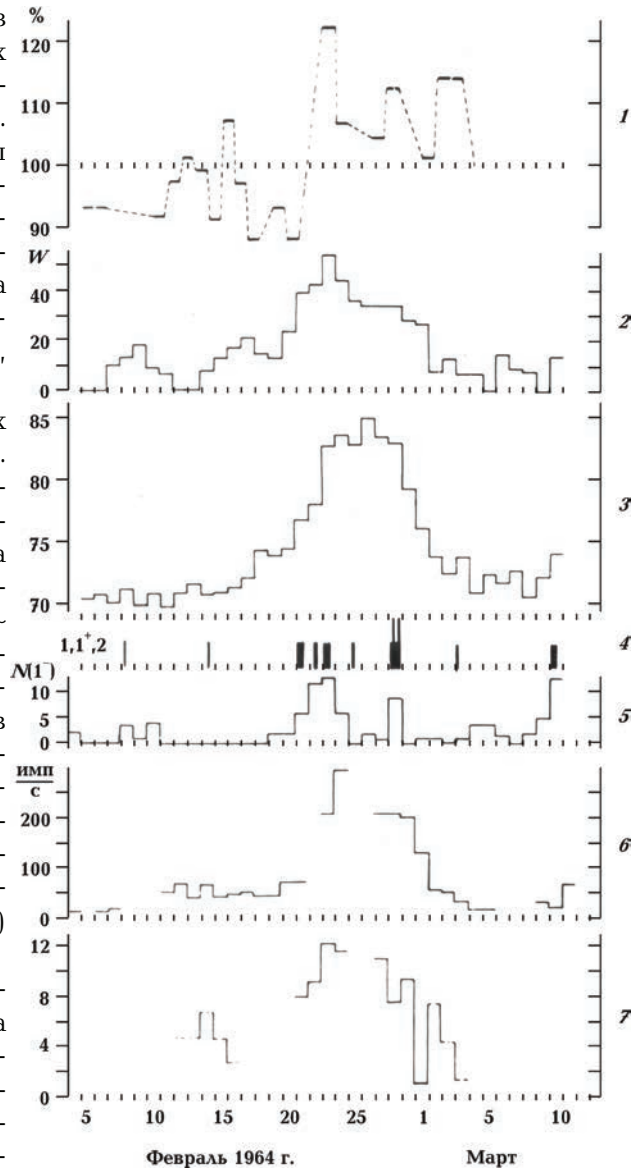


Рис. 3. Кратковременное возрастание потоков тяжелых ядер, зарегистрированное на спутнике "Электрон-2" (февраль 1964 г.): 1 — поток ядер с  $Z \geq 15$  (в % к среднему значению за февраль 1964 г.); 2 — число солнечных пятен W; 3 — поток излучения локальных радиоисточников на диске Солнца на волне 6,6 км, % к интегральному потоку; 4, 5 — хромосферные вспышки класса 1 и 2; 6 — рентгеновское излучение Солнца в участках спектра 0,1—1 нм (по данным счетчиков фотонов на спутнике "Электрон-2"); 7 — поток радиоизлучения Солнца на волне 10,7 см.

ка ядер с  $Z > 15$ , энергией  $> 1,5$  ГэВ/нуклон, спутник "Электрон-2".

Возможно, эти результаты подтверждают наличие на Солнце механизма преимущест-



венного ускорения тяжелых ядер на Солнце, подобный тому, который давно установлен для ГКЛ. Можно также предположить, что малые вспышки, связанные с этими увеличениями потоков тяжелых ядер, были соединены с CMEs.

Частота солнечных протонных событий обсуждалась в [Shea, Smart, 2001], исследована по наблюдениям в линии  $H_{\alpha}$  в течение 1955—1977 гг. [Temmer, Veronig, 2004]. Обнаружен 24-суточный период в появлении вспышек, который отмечается также для субвспышек и, по-видимому, связан с появлением нового магнитного потока.

Г. А. Базилевская и соавторы (2003) утверждают, что в результате анализа многолетних (1958—2001) наблюдений на баллонах заряженных частиц с  $E > 100$  МэВ получен самый длинный ряд солнечных протонных событий (100 протонных вспышек за ~ 40 лет наблюдений!). Между тем, Сут et al. (2000) зарегистрировали на спутнике LASCO / SOND 841 CMEs в течение 1996—1998 гг., а Woods et al. (2004) сообщили о регистрации 140 мощных вспышек только между 18.10 и 05.11.2003 г. Статистически исследованы 20 930 вспышек по данным спутника GOES в течение 22-го солнечного цикла [Yin Suingun, 2002]. Исследовав протонные события с энергиями ~ 10 МэВ в течение 1955—2003 гг., И. К. Переяслова и соавторы (2005) показали циклический их характер с 2- и 3-пиковой структурой в распределении числа событий в цикле.

Можно предполагать, что оценки Г. А. Базилевской и соавторов (2003) занижены, по меньшей мере, на порядок, если не учитывать возможности генерации СКЛ в субвспышках. Следует отметить, что позднее в работе [Базилевская и др., 2004] был использован более представительный ряд данных при исследовании связи между SEPs и рентгеновскими вспышками на Солнце. Представляют также большой интерес события релятивистских протонов от Солнца, когда они наблюдаются наземными приборами [Базилевская и др., 2008]. Эти события часто характеризуются быстрым нарастанием потоков релятивистских солнечных протонов (РСП) с энергией  $> 1000$  МэВ — иногда они приходят на Землю после взрывного энерговыделения на Солнце (CMEs), что, возможно, указывает на ускорение протонов не ударной волной, а непосредственно во вспышках. Такое заключение подтверждается отсутствием корреляции между вычисленными в этих работах интенсивностями первых релятивистских протонов и скоростями

CMEs за период нескольких больших ( $\geq 2$ ) вспышек в течение 1997—2006 гг.

Исследование наземных эффектов солнечных протонных событий с  $E > 100$  МэВ, зарегистрированных на спутнике GOES в 1989—1992 гг. [Струминский, 2003], показало, что энергетические всплещечные частицы диффузно распространяются в атмосфере в течение нескольких часов после вспышки.

Л. В. Егорова и соавторы [2003], изучавшие влияние вариаций СКЛ и ГКЛ на атмосферные параметры (давление и температуру) в Антарктике в течение 1987—1998 гг., утверждают, что Форбуш-понижения, сопровождаемые всплесками СКЛ, вызывают потепление атмосферы на 10 %, а сами всплески СКЛ за 2 сут влияют на увеличение давления на высоте ~ 10—15 км. Veretenenko et al. (2008) полагают, что солнечные протоны с  $E > 90$  МэВ, по-видимому, усиливают регенерацию (вторичное углубление) циклонов у юго-восточного побережья Гренландии при существенном изменении структуры тропосферного термобарического поля в субполярных и высоких широтах. Способность СКЛ влиять на мезосферные и околоповерхностные электрические поля (изменяя их на ~ 5 %) показана в работе [Farrell, Desh, 2002].

Исследовав методом дистанционного зондирования распространение радиоволн в тропосфере во время солнечных вспышек, А. А. Шапиро и Ю. В. Гончаренко (2003) установили связь всплещечных явлений с процессами в нижней атмосфере — во время вспышек в тропосфере возникает инверсионный слой, создающий аномалии в распространении радиоволн. Обнаруженный эффект авторы объяснили в рамках теории управляемого атмосферного фильтра, который меняет степень пропускания потоков солнечной волновой энергии под воздействием рентгеновского и УФ излучений.

Многочисленные эксперименты по вертикальному зондированию ионосферы (см., например: [Винницкий и др., 2001]) указывают, что в моменты вспышек класса  $\geq 2$ , сопровождающихся потоками рентгеновского излучения (~ (8—10)  $10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>), происходят внезапные ионосферные возмущения (полное исчезновение отраженных сигналов), которые обычно связываются с различием скоростей ионизации и рекомбинации ионов в  $D$ -области ионосферы.

В настоящее время установлено, что всплещечные СКЛ вызывают резкое уменьшение вертикального содержания озона в страто-

сфере и, таким образом, влияют на стратосферную циркуляцию. В этом отношении особенно показательна вспышка "День Бастилии" 14.07.2000 г., во время которой было зарегистрировано самое большое из известных, 70%-е уменьшение содержания озона [Jackman, 2001]. И. В. Кузнецов (2002) обнаружил 40%-е уменьшение содержания озона над Антарктидой во время сильной ионизации атмосферы под воздействием солнечных протонных вспышек в августе — ноябре 1989 г.

Как показано в статье [Veignon, 2005], понижение содержания озона в солнечных протонных событиях октября — ноября 2003 г. составило 20 % на высоте ~ 40 км и более 95 % на высоте ~ 78 км (как известно, в этих событиях протоны ускорялись до энергий более 1 ГэВ).

Таким образом, ионизация солнечными и галактическими космическими лучами может создавать источники и стоки озона и влиять на стратосферную циркуляцию [Кривоуцкий, 1999]. Согласно модельным исследованиям влияния структуры магнитного поля Земли (МПЗ) на состав атмосферы во время солнечных протонных событий [Sinhuber, Burrows, 2003], потери озона под воздействием солнечных протонных событий и авроральных высыпаний частиц значительно возрастают (на ~ 30 %). Результирующие потери аналогичны наблюдавшимся в Антарктической озоновой дыре 1990 г. Это приводит к увеличению поверхностного УФ-излучения и к изменению стратосферной температуры и циркуляции в течение нескольких месяцев после больших солнечных корпускулярных событий.

Следует отметить, что потоки СКЛ значительно возрастают во время пересечения Землей границ секторной структуры ММП. Ранее это отмечалось при исследовании наземного эффекта малых вспышек на Солнце [Райченко, 1982]. По данным Е. А. Сигаевой и соавторов (2006), пересечение Землей границы секторной структуры ММП сопровождается большими вариациями потоков тепловых нейтронов у Земли. Так, 20.01.2005 г. было зарегистрировано увеличение в десятки раз скоростей счета NM в Антарктике и в несколько раз — потоков тепловых нейтронов у Земли. По-видимому, пересечение границ секторной структуры ММП может быть одним из триггерных механизмов при исследовании солнечно-земных связей.

Установлено, что в геоэффективности солнечных вспышек важную роль играют СМЕs. Как показано в обзоре [Lambour et al., 2003],

почти все вспышки, связанные с СМЕs, сопровождаются наземными эффектами, глобальными возмущениями геомагнитного поля и связанными с ними ионосферными возмущениями. Особенно сильно это проявилось в уже упомянутой вспышке "День Бастилии" 14—16.07.2000 г.

Отождествление солнечных источников геомагнитных бурь в период 1988—1993 гг. проведено в статье [Pankaj et al., 2003]. Показано, что в этот период связка-вспышка СМЕs ответственна за геомагнитные бури с внезапным началом (SC). Zhang и соавторы (2003) установили связь с геомагнитными возмущениями всех выбросов (СМЕs), зарегистрированных на борту ИСЗ "Зонд" в 1996—2000 гг., отметив лишь, что СМЕs могут быть связаны со вспышками.

Кроме различий в методах регистрации (на борту ИСЗ "Зонд" регистрировались СМЕs типа гало), причина такого кажущегося расхождения может состоять в том, что, как показано ниже (см. разд. 2), за геомагнитные бури с внезапным началом скорее всего ответственны высокоскоростные потоки СВ, которые зачастую инжектируются той же активной областью, в которой находится вспышка.

Тем не менее существование солнечных источников геомагнитных бурь уже не вызывает сомнений. Геомагнитные возмущения тесно связаны с возмущениями ионосферы. В частности, геомагнитная буря 28.09.1998 г. сопровождалась резко выраженной бурей в слое F2: уменьшением электронной концентрации, подъемом высоты слоя, возрастанием температур заряженной и нейтральной компонент атмосферы, а также волновыми ионосферными возмущениями [Григоренко, 2003].

В свою очередь, А. В. Винницкий и соавторы (2001) обнаружили статистически значимую связь между уровнем геомагнитной активности и изменениями приземного давления, а также показали, что температура тропосферы согласуется с вариациями околоразнощной высоты F-области ионосферы.

Таким образом, можно проследить, как последовательно, по мере снижения высоты, возбуждаются все подсистемы ТАИМ: вспышка + СМЕs — геомагнитные возмущения — ионосферные возмущения — изменение температуры тропосферы — изменение приземного давления. Становится очевидной необходимость системного подхода к этим явлениям.

Изложенные выше далеко не полные результаты исследований свидетельствуют, что

вариации СКЛ влияют не только на верхнюю, но и на нижнюю атмосферу, и их следует рассматривать в качестве важного посредника при изучении солнечного воздействия на климат Земли.

## 2. Солнечный ветер у Земли как индикатор глобального воздействия на систему ТАИМ

Система ТАИМ получает внешнее энергетическое воздействие от Солнца как в виде волнового и корпускулярного излучения от Солнца, так и в виде магнитной и кинетической энергии СВ. Воздействие на атмосферную циркуляцию в первую очередь происходит через возмущенное состояние межпланетной среды и СВ у Земли. По-видимому, магнитосфера Земли является не только экраном для низкоэнергетических частиц, но и мощным триггерным усилителем ММП, поскольку, как показано ниже, при определенных условиях небольшие (порядка нескольких нанотесла) изменения магнитного поля СВ могут вызывать магнитные бури с интенсивностью в несколько сотен нанотесла и связанные с ними возмущения во всех подсистемах системы ТАИМ.

Не претендуя на полноту изложения проблемы, кратко рассмотрим некоторые результаты исследований, свидетельствующие об определяющей роли СВ в возбуждении системы ТАИМ.

**2.1. Процессы передачи энергии СВ в магнитосферу.** До недавнего времени считалось, что основными параметрами СВ, влияющими на состояние магнитосферы, являются ориентация ММП и скорость плазмы СВ. Однако исследования последних лет показывают, что плотность СВ также может быть важной в процессах передачи солнечной энергии в магнитосферу [Lopez, 2004]. Исследовав геоэффективность различных параметров СВ, М. Д. Сытинский и др. (2003) пришли к выводу, что наиболее эффективна концентрация заряженных частиц  $N_{\max}$ , а знак реакции атмосферы на приход возмущенного СВ зависит от полярности ММП. Одно из условий геоэффективности солнечных потоков — наличие составляющей  $B_z$  ММП  $< 0$ , что свидетельствует о роли МПЗ в этом взаимодействии. По данным [Сытинский и др., 2003], энергия возмущения атмосферы под влиянием высокоскоростных солнечных потоков соответствует энергии циклонов ( $\sim 10^{19}$  Дж) и

составляет  $\sim 12\%$  общей циркуляции атмосферы.

По оценкам [Feldstein, 2003], полная энергия, инжектируемая СВ в магнитосферу, составляет  $(1,85-3,2) \cdot 10^{17}$  Дж.

Количество энергии СВ, поступающей в околоземное пространство, по-видимому, определяется процессами пересоединения силовых линий на магнитопаузе — в зоне сопряжения СВ с наиболее удаленной частью магнитосферы. Радарные наблюдения показывают, что действующей моделью пересоединения является антипараллельное слияние силовых линий. По данным [Пономарев и др., 2001], при южном ММП ( $B_z < 0$ ) происходит прямой вход в магнитосферу заряженных частиц СВ.

По данным Е. С. Беленькой [2004], исследовавшей различные типы пересоединения ММП и МПЗ, все направления ММП (с равной нулю азимутальной компонентой) можно разделить на секторы: 1 — осуществляется двумерное пересоединение по типу Данжи; 2 — происходит трехмерное пересоединение в двух нейтральных точках внутри магнитосферы; 3 — реализуется трехмерное пересоединение в нейтральной точке вблизи северного каспа и двумерное — в токовом слое южной магнитопаузы; 4 — трехмерное пересоединение происходит вблизи южного каспа, двумерное — в токовом слое северной магнитопаузы.

Учет различных типов пересоединения может в значительной степени устранить существующие разногласия в оценках геоэффективности различных бурь.

Согласно оценке воздействия связанного с СВ электрического поля на тепловое состояние средней стратосферы ( $h = 20 \div 31$  км) [Макарова и др., 2004], электрическое поле может передавать энергию СВ вплоть до нижних слоев атмосферы: глобальная электрическая цепь включает генератор ЭДС на внешней границе магнитосферы, а также слой тяжелых ионов-связок в стратосфере, которые являются носителями тока. Количественная оценка нагрева током составляет  $1^\circ\text{C}/\text{сут}$  и более, что сравнимо с воздействием солнечного УФ-излучения и космических лучей, а также с нагревом от поступающей снизу радиации.

Исследование влияния вариаций СВ на атмосферные температуры в южных полярных районах по метеоро- и аэрологическим данным ст. "Восток" (Антарктида) [Troshichev et al., 2003] показало, что крайне резкие изменения

тропосферных температур в этом районе связаны с вариациями ММП; кроме того, обнаружена линейная связь вариаций СВ с почвенными температурами.

Stone, Feinberg [1999] предложили использовать в качестве нового индекса солнечной активности квазиинвариант СВ  $(B^2 / 8\pi) / \rho v^2$  ( $B$  — напряженность,  $\rho$  — плотность,  $v$  — объемная скорость СВ), указав, что эта величина лучше коррелирует с приземными температурами.

Наряду с макрохарактеристиками СВ в оценках его геоэффективности успешно используются спутниковые измерения его зарядового состава. В работах [Зайцев, 2002; Рязанцева и др., 2003] сообщается об изменениях в околоземном пространстве, которые вызываются резкими скачками концентраций ионов в СВ, зарегистрированными на спутниках "Interball", "Wind". При этом концентрации ионов в СВ однозначно и четко отображаются в конфигурации и динамике токовых систем, развивающихся на поверхности и внутри магнитосферы (DCP, DP, DR). Непосредственно под влиянием ионов СВ формируется система DCF.

Очевидно, что такие резкие скачки ионов в СВ могут служить одним из триггерных механизмов при исследовании солнечно-земных связей.

## 2. 2. Кольцевой ток, авроральные высыпания и динамика радиационных поясов.

Кольцевой ток — это критический элемент в понимании появления и развития возмущений погоды. Мерой энергетического содержания кольцевого тока, как известно, служит  $D_{st}$ -вариация, прямо связанная с воздействием высокоскоростных потоков СВ: при южном ММП ионы СВ непосредственно поступают в кольцевой ток [Kozuza, Liemohn, 2003].

Вместе с тем по непосредственным изменениям частиц кольцевого тока и наземным вариациям геомагнитных возмущений установлено [Turner, Baker, 2001], что ионы кольцевого тока составляют в среднем примерно половину изменений  $D_{st}$ , т. е. в  $D_{st}$  содержатся также индукционные эффекты, которые обусловлены серией процессов, связанных с вторжениями СВ (в частности, с токами в хвосте магнитосферы и с токами замыкания на магнитопаузе).

По данным модели образования кольцевого тока в зависимости от плотности СВ сделан вывод, что источник повышенной плотности энергии протонов кольцевого тока свя-

зан с контролируемым СВ, дрейфом протонов из плазменного слоя в крупномасштабном электрическом поле конвекции. В работе [Ebihara et al., 2004] показано, что кольцевой ток находится под влиянием не только ММП и СВ, но также солнечно-корпускулярного излучения и морфологических особенностей высыпаний авроральных электронов.

Подробный обзор противоречий при исследовании изменений  $D_{st}$  в ходе различных бурь сделан в работе [Maltsev, 2004]. Разделив значения  $D_{st}$  на быстро (за минуты) и медленно (за часы) меняющиеся части ( $D_{st} = DCF + D_{st}^k$ ), автор показал, что величина DCF прямо связана с динамическим давлением СВ:

$$DCF = a\sqrt{p_{CB}},$$

где  $a \approx 8nT/(P_a)^{1/2}$  для спокойных условий и в 2 раза превышает это значение для бурь с южным направлением ММП.

Уравнение для изменения  $D_{st}^k$  имеет вид

$$D_{st}^* = Q - D_{st}^* G/\tau,$$

где  $Q$  — функция связи с другими параметрами СВ;  $\tau$  — время релаксации.

По сути в этой работе сделана первая попытка теоретического обоснования функции  $Q$  для связи кольцевого тока с различными параметрами СВ в рамках теории хвостовых токов, токов замыкания на магнитопаузе и парциальных хвостовых токов.

Плазменный слой, который является источником частиц кольцевого тока, в зависимости от характера возбуждения солнечным ветром, может стать суперплотным, горячим и обогащенным ионами (см. обзор [Kozuza, Liemohn, 2003] и ссылки в нем). Возрастая в период бури, плотность энергии плазменного слоя модулирует относительные геоэффективности сравнимых интервалов  $B_z$  ММП даже внутри одной бури.

Мощность конвекции магнитосферы, возбуждаемой СВ, связана с движущимся электрическим полем  $E_y$  СВ.

Используя данные спутника "Polar" SAMMICE/MICS для протонов и ионов СВ в течение нескольких бурь 1996—1998 гг., Ganushkina et al. (2005) оценили численную плотность плазменного слоя и смоделировали движение частиц в различных интервалах энергий внутрь магнитосферы с помощью серии импульсов электрического поля, возбуждающих частицы плазменного слоя до высоких (> 80 кэВ) энергий и переносящих их на закрытые дрейфовые оболочки. Интенсивность



кольцевого тока во время умеренных и сильных бурь равна соответственно  $3 \cdot 10^6$  и  $1 \times 10^5$  А, тогда как интенсивность хвостового тока на  $6-8 R_E$  составляет  $(1-2) \cdot 10^5$  А.

Huttunen, Koskinen (2004) сделана попытка оценить роль различных структур СВ (магнитных облаков и областей послеударных токов) в возбуждении интенсивных бурь и высокоширотной активности. Показано, что области обрезания и послеударных токов вызывают увеличение Кр-индексов, а магнитные облака — рост вариаций  $D_{st}$ . Это свидетельствует, что система ТАИМ по-разному откликается на различные условия в СВ, по-видимому, в зависимости от различных типов пересоединения в хвосте магнитосферы. Так, области обрезания и послеударных токов, как правило, возбуждают бури, но бывают случаи, когда они сопровождаются долго продолжающейся высокоширотной активностью без одновременного увеличения вариаций  $D_{st}$ .

Сталкиваясь с магнитосферой, высокоскоростные потоки СВ вызывают интенсивные высыпания заряженных частиц (магнитосферных электронов и протонов) в областях аврорального овала и каспа. Широта экваториально направленной кромки аврорального овала, по-видимому, тесно связана с  $D_{st}$ -вариацией и снижается в течение бури по направлению к экватору.

Планетарное распределение авроральных высыпаний и их связь с областями авроральных свечений исследованы В. А. Старковым и соавторами (2003) по данным спутников DMSF и P7; показано, что площадь полярной шапки линейно увеличивается по мере уменьшения  $D_{st}$ . Область каспа, куда прямо поступают частицы с  $E \sim 200$  эВ из плазменного слоя, также расширяется при южном направлении  $B_z$  ММП и снижается от  $\lambda \sim 87^\circ$  до  $\lambda \sim 60^\circ$  и ниже.

Изучение спектрального распределения авроральной эмиссии при взаимодействии СМЕs с магнитосферой в январе 1997 г. [Sivjee, 1999] показало высыпание электронов со средней энергией  $\sim 500$  эВ. В работе [Millan, 2003] исследовано рентгеновское излучение от высыпаний релятивистских электронов над Антарктидой и определено, что скорость потока электронов с  $E \geq 0,5$  МэВ составляет  $\sim 360$  см<sup>2</sup>/с и соответствует  $\sim 5 \cdot 10^{25}$  таких электронов, выпавших за 8 сут на  $L = 3,8 \div 6,7$ . В качестве

механизма высыпания предложено рассеивание электромагнитными ионными циклотронными волнами.

С воздействием СВ связано также изменение положений внешнего и внутреннего радиационных поясов Земли [Onsager, Rostoker, 2002]. В работе [Maltsev, 2004] дана оценка снижению электронно-поточкового радиационного пояса с  $L \sim 5$  до  $L_{\max} \sim 2$  по эмпирической формуле  $L_{\max} = 12,9 / (D_{st})^{1/9}$ . Обзор моделирования радиационных поясов в рамках эффектов космической погоды сделан в работе [Neundorfer et al., 2002].

Моделирование изменения поведения низкоширотной верхней атмосферы под воздействием авроральных высыпаний во время магнитных бурь [Fuller-Rowler et al., 2002] показало, что в этих условиях нагрев термосферы в высоких широтах вызывает ветровые волны, направленные к экватору, а реакцию низкоширотной атмосферы определяют меридиональные волны, и, таким образом, меняется глобальная циркуляция. Влияние высыпаний заряженных частиц на химический состав средней и нижней атмосферы модельно исследовалось также в ранее цитированной работе [Sinhuber, Burgows, 2003].

В результате исследований глобального ионосферного эффекта одновременного появления солнечного протонного события и интенсивного высыпания релятивистских электронов в мае 1992 г., по данным риометров и фазовых низкочастотных измерений на разных широтах [Shirochkov, Makarova, 2004], установлено, что область полярной шапки свободна от высыпаний релятивистских электронов.

Очевидно, что вследствие изменения проводимости ионосферы авроральными высыпаниями релятивистских и тепловых магнитосферных электронов последние могут служить в качестве триггера при исследовании солнечно-земных погодных связей.

**2. 3. Магнитосферно-ионосферные возмущения и Форбуш-понижения космических лучей.** Обзор результатов исследований показывает, что СВ вызывает глобальный геомагнитный и авроральный отклик всех подсистем системы ТАИМ: его воздействие проявляется в почти одновременном развитии магнитосферно-ионосферных возмущений (как правило, при смене полярности ММП), Форбуш-понижений КЛ и следующих за этим от-

кликов средней и нижней атмосферы. Приближение к Земле высокоскоростного СВ обычно сопровождается (в интервале 2—10 мин) ударной волной, ответственной за геомагнитные бури с внезапным началом (*SC*) и Форбуш-понижения КЛ. Амплитуда этой волны согласуется с динамическим давлением СВ (см., например: [Takenachi, Russel, 2002]).

Исследуя Форбуш-понижения КЛ во время сильных геомагнитных бурь (более 1400 событий), А. В. Белов и соавторы (2001) получили линейное соотношение между амплитудой Форбуш-понижения КЛ и индексом *Kp* геомагнитной активности.

"Мгновенный" отклик ионосферы на геомагнитные бури с внезапными началами продемонстрировал А. В. Косоголов (2001) с помощью развитого им метода глобального обнаружения ионосферных возмущений, что подтверждено в работе [Григоренко, 2003].

Характеристики магнитосферно-ионосферных возмущений в периоды роста динамического давления СВ исследовали А. В. Моисеев, Юмото (2003). В работе [Shang Sheping, 2003] описана морфология глобальных магнитосферно-ионосферных возмущений. При изучении  $f_0 F_2$  и  $h_m F_2$  во время различных геомагнитных бурь установлено следующее: 1) бури с задержанной главной фазой (*S(C)* и *S(E)*, по классификации данных авторов), вызывают сначала кратковременное положительное, а затем длительное отрицательное возмущение  $f_0 F_2$ ; 2) бури с незадержанной главной фазой (*S(A)*, *S(B)*, *S(D)*) характеризуются отсутствием положительного возмущения  $f_0 F_2$ , имеется только длительное отрицательное возмущение. При этом интенсивность геомагнитной бури прямо связана с амплитудой отрицательного ионосферного возмущения.

В течение мощных солнечных событий в октябре и ноябре 2003 г. многие авторы (см., например: [Cander, Michajlovich, 2005]) сообщили о появлении сильных отрицательных ионосферных возмущений над высокими средними широтами и положительных — над низкими. Это приводит к мысли о сильных горизонтальных и вертикальных перераспределениях ионосферной плазмы во время геомагнитных бурь, появление которых обсуждено в статье [Jakowski et al., 2005].

СВ + ударная волна — кольцевой ток — магнитосферно-ионосферное возмущение — атмосферная циркуляция — Фарбуш-понижения КЛ — авроральные высыпания.

Исследование глобального ионосферного отклика на событие 10.11.2003 г. [Manucci, Tsurutani, 2005] показало, что в событии 29—30.10.2003 г. полное содержание электронов на дневной стороне в течение 2—5 ч увеличилось на ~40 и 250 %, а на высотах выше орбиты спутника CHAMP (~400 км) — на 900 %.

В. Д. Косоуров (2003) предложил использовать минимальную частоту отражений в слое  $F_2$  в качестве еще одной климатической характеристики.

В обзоре Kaziemirovsky (2003) утверждается, что "ионосферная погода" (появление спорадического слоя *E*, *F*-рассеяние,  $f_0 F_2$ , изменение *N(h)*-профилей и полного содержания электронов) должна предсказываться как часть космической погоды, в рамках изменения солнечной активности.

Важным аспектом "космической погоды" является отклик нейтральной термосферы на геомагнитные бури [Wiens et al., 2002]: с помощью интерферометра WINDI на борту спутника UARS обнаружено, что в геомагнитоактивные дни 1993 г. (*Kp* = 7) термосфера нагревалась на 100 °С, шкала высот увеличивалась на 5 км, излучение в зеленой линии возросло на 70 %.

В результате исследования связи между  $f_0 F_2$  и уровнем *h*(100) в стратосфере [Ванина, Данилов, 2003] установлено, что между этими параметрами существует сильная положительная (отрицательная) корреляция в ночное (дневное) время.

Как упоминалось выше, А. В. Винницким и соавторами (2001) выявлена взаимосвязь параметров геомагнитного поля, ионосферы и нижней атмосферы. Обнаружено, что температуры тропосферы и нижней стратосферы хорошо согласуются с вариациями околоразностной высоты *F*-области ионосферы, установлена также значимая статистическая связь между изменениями приземного давления и уровнем геомагнитной активности, знак которой меняется в зависимости от времени года.

Таким образом, аналогичная приведенной в разд. 2.2 цепочка взаимосвязанных явлений в системе ТАИМ, обусловленных ее возбуждением с помощью СВ, будет иметь следующий вид:

**Выводы.** Рассмотрено сравнительное воздействие различных корпускулярных потоков (СКЛ, ГКЛ и СВ) на состояние околоземной среды (системы ТАИМ: тектоносферы, атмосферы, ионосферы, магнитосферы). Показано, что ГКЛ, по-видимому, ответственны за формирование облачности в периоды минимумов солнечной активности; СКЛ наряду с ГКЛ участвуют в ионизации средней и нижней атмосферы и играют самостоятельную роль в формировании климатических процессов; СВ является определяющим в возбуждении системы ТАИМ, формировании кольцевого тока, магнитосферно-ионосферных возмущений и Форбуш-понижений КЛ. Существует возможность преимущественного ускорения тяжелых ядер на Солнце. Подтверждение этой гипотезы может привести к фундаментальным выводам о происхождении ядра и термоядерных процессов на Солнце. Значительным фактором ионизации атмосферы и связанной с

ней атмосферной циркуляции являются полярные высыпания и высыпания из радиационных поясов. Предложены триггерные механизмы, вызывающие значительный отклик земной атмосферы на относительно небольшие корпускулярные воздействия: а) хромосферные вспышки, соединенные с CMEs, генерирующие СКЛ и сопровождающиеся наземными эффектами; б) ядерно-каскадные процессы в атмосфере под воздействием высокоэнергетических потоков заряженных частиц; в) повороты ММП к северу или к югу (секторные границы СВ); г) скачки ионов в СВ; д) полярные высыпания из радиационных поясов.

Дальнейшие системные исследования в этих направлениях могут существенно улучшить солнечно-земные климатические корреляции и пролить свет на то, каким образом солнечное корпускулярное излучение воздействует на погоду и климат Земли.

### Список литературы

- Авакян С. В. Физика солнечно-земных связей: некоторые результаты, проблемы и новые подходы // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — **48**, № 4. — С. 435—442.
- Авдюшин С. И., Данилов А. Д. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему // Геомагнетизм и аэрономия. — 2000. — **40**, № 5. — С. 3—15.
- Базилевская Г. А., Крайнев М. Б., Махмутов В. С., Свиржевская А. К., Свиржевский И. С., Стожков Ю. И., Вашенюк Э. В. Солнечные протонные события с 1958 по 2001 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 4. — С. 442—452.
- Базилевская Г. А., Махмутов В. С., Свиржевская А. К., Свиржевский Н. М. Динамика потоков заряженных частиц в тропосфере Земли после 1990 г. // Изв. РАН. Сер. физ. — 2009. — **73**, № 3. — С. 405—307.
- Базилевская Г. А., Свиржевская А. К., Сладкова А. И. Связь между солнечными протонными событиями и рентгеновскими всплесками разных баллов на Солнце // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 4. — С. 442—448.
- Баранов Д. Т., Гагарин Ю. Ф., Дергачев В. А. Энергетические спектры ядер железа малых энергий галактического и солнечного происхождения // Изв. РАН. Сер. физ. — 2001. — **65**, № 3. — С. 327—334.
- Беленькая Е. С. Структура магнитосферного магнитного поля при различных направлениях магнитного поля солнечного ветра // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 3. — С. 421—418.
- Белов А. В., Ерошенко Е. И., Мавромичишвили Е., Янке В. Г. Протонное событие 23 февраля 1956 г. по данным нейтронных мониторов // Изв. РАН. Сер. физ. — 2005. — **69**, № 6. — С. 804—807.
- Белов А. В., Ерошенко Е. И., Оленева В. А., Струминский А. Б., Янке В. Г. Чем обусловлены и с чем связаны Форбуш-эффекты? // Изв. РАН. Сер. физ. — 2001. — **65**, № 3. — С. 290—297.
- Богданов М. Б., Федоренко А. В. Влияние космических лучей на приземное атмосферное давление // Геомагнетизм и аэрономия. — 2004. — **44**, № 1. — С. 13—16.
- Ванина Л. Б., Данилов Н. Д. Взаимосвязь между  $f_0F_2$  и  $h(100)$  стратосферы // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 660—668.
- Винницкий А. В., Казанцева В. В. Взаимосвязь изменений параметров нижней атмосферы, ха-

- рактистик ионосферы и геомагнитного поля на Северо-Востоке России // Оптика атмосферы и океана. — 2001. — **14**, № 10. — С. 970—973.
- Григоренко Е.И. О связи геомагнитных и ионосферных возмущений // Успехи соврем. радиоэлектроники. — 2003. — № 9. — С. 57—94.
- Егорова Л.В., Вовк В.Я., Москвин И.В. Эффекты космических лучей и динамического давления солнечного ветра в вариациях атмосферных характеристик в районе Южного полюса // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 4. — С. 473—481.
- Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Роль грозových облаков в механизме связи погоды с солнечной активностью // Геомагнетизм и аэрономия. — 2000. — **40**, № 1. — С. 129—132.
- Ермаков В.И., Стожков Ю.И. Влияние активных областей Солнца на глобальную грозovou активность и погоду на Земле // Кратк. сообщ. по физике ФИАН. — 2003. — № 3. — С. 9—25.
- Зайцев А.Н., Далин П.А., Застенкер Г.Н. Резкие вариации потоков ионов солнечного ветра и аритмические изменения условий в околоземном пространстве // Геомагнетизм и аэрономия. — 2002. — **42**, № 6. — С. 752—754.
- Кокоуров В. Д. Минимальная частота отражений как одна из климатических характеристик верхней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 2. — С. 274—276.
- Косоголов А. В. "Мгновенный" отклик ионосферы на магнитные бури с внезапным началом // Материалы совещ., г. Иркутск, 25—29.01.2001. — Иркутск, 2001.
- Кривоуцкий А.А., Куминов А.А., Репнев А.И. Влияние космических лучей на озоносферу Земли // Геомагнетизм и аэрономия. — 1999. — **39**, № 3. — С. 3—15.
- Кузнецов И.В. Вариации вертикального содержания озона над Антарктидой во время солнечных протонных событий в августе — ноябре 1989 г. // Геомагнетизм и аэрономия. — 2002. — **42**, № 5. — С. 661—669.
- Макарова Л. И., Широчков В. А., Нагурный А. Г., Шмутц В., Розанов Е. В. Оценка воздействия электрического тока, связанного с энергией солнечного ветра, на тепловое состояние средней стратосферы на  $h = 20—30$  км // Докл. РАН. — 2004. — **394**, № 3. — С. 402—406.
- Моисеев А. В., Юмото К. Роль динамического давления солнечного ветра в характеристиках магнитосферно-ионосферных возмущений // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 620—634.
- Переяслова И.К., Назарова М.Н., Петренко И.Е. Характеристики протонной активности Солнца в 19—23 солнечных циклах // Геомагнетизм и аэрономия. — 2005. — **45**, № 3. — С. 329—335.
- Пономарев Е.А., Урбанович В.Д., Немцова Э.И. К вопросу о передаче энергии из солнечного ветра в магнитосферу // Исследования по геомагнетизму и аэрономии и физике Солнца. — 2001. — № 112. — С. 66—77.
- Райченко Л. В. О влиянии секторной структуры ММП на распространение частиц, ускоренных в малых вспышках на Солнце // Методика интерпретации и результаты исследований аномальных геофизических полей. — Киев: Наук. думка, 1982. — С. 127.
- Райченко Л.В. Окончательный отчет по теме «Вариации космического излучения. Раздел 2: "Вариации солнечных космических лучей"». — Киев: Ин-т геофизики АН УССР, 1970. — С. 1—184.
- Рязанцева М.О., Далин П.А., Застенкер Г.Н. Скачки ионов в солнечном ветре // Косм. исследования. — 2003. — **41**, № 4. — С. 405—416.
- Сигаева Е.А., Володичев Н.Н. Проявления событий на Солнце и в межпланетном пространстве: потоки тепловых нейтронов вблизи земной коры // Тез. 6-й Укр. конф. по косм. исследованиям, г. Евпатория, 3—4 ноября 2006. — Евпатория, 2006. — С. 32—33.
- Струминский А.В. Свидетельство длительного существования солнечных протонов с энергией  $> 100$  МэВ в корональных структурах // Астрофиз. журн. — 2003. — **80**, № 1. — С. 992—1000.
- Струминский А.В., Зимовец И.В. Длительное нетепловое излучение солнечных вспышек и эффект Нойперта // Письма в Астрофиз. журн. — 2008. — **34**, № 10. — С. 777—787.
- Сытинский М.Д., Боков В.Н., Обарин Д.А. Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 1. — С. 136—142.



- Тимофеев В. Е., Григорьев В. Г., Морозова Е. И., Скрыбин Н. Г., Обарин Д. А. Воздействие космических лучей на скрытую энергию атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 683—687.
- Филиппов А. Х., Тимофеев В. Е. Вспышки с энергиями частиц  $E > 1$  ГэВ в октябре — ноябре 2003 г. // Вестн. Якут. ун-та. — 2005. — **2**, № 1. — С. 107—110.
- Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера как открытая нелинейная система // Тр. 5-й Рос. конф. по атм. электр. г. Владимир, 21—26 сент. 2003 г. — Владимир, 2003. — С. 23—36.
- Шапиро А. А., Гончаренко Ю. В. Распространение радиоволн в тропосфере во время солнечных вспышек // Геомагнетизм и аэрономия. — 2003. — **43**, № 5. — С. 669—672.
- Bazilevskaya G. A. Observations of variability in cosmic rays // Space Sci. Rev. — 2000. — **94**. — P. 25—38.
- Brown J. C., Emslil A. G., Kontar E. P. The determination and use of mean electron flux spectrum in solar flares // Astrophys. J. — 2003. — **595**, № 2. — P. 115—117.
- Cander L. R., Michajlovich S. J. Ionospheric spacial and temporal variation during 29—31 October 2003 storm // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2005. — **67**, № 12. — P. 1118—1128.
- Chanin M. L. Signature of 11-years cycle in the upper atmosphere // Space Sci. Rev. — 2006. — **125**. — P. 261—272.
- Cohen C. M. Change composition of highenergetic solar particles // Geophys. Res. Lett. — 1999. — **26**, № 2. — P. 149—153.
- Cohen C. M., Stone E. C. Heavy ion abundances and spectra from large solar proton events X—XI. 2003 // J. Geophys. Res. A. — 2005. — **110**, № 9. — P. A09S16/1—A09S16/15.
- Courtillot V., Le Mouel J.-L., Blanter E., Shirman M. Evolution of seasonal temperature disturbances, and solar forcing in the US North Pasific // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2009. — doi:10.011/j. jastr.
- Cyr O. C. St., Howard R. A., Sheeley J. N. R., Plunkett S. P., Michels D. J., Paswaters S. E., Koonen M. J., Sinnott G. M., Thompson B. J., Gurnan J. B., Schwenn R., Webb D. F., Hildner E., Lamy P. L. Properties of coronal mass ejections: SOHO Lasco observations from January 1996 to June 1998 // J. Geophys. Res. — 2000. — **105**, № A8. — P. 18169—18185.
- De Jager C., Usoskin I. On possible drivers of Sun-induced changes // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2006. — **68**. — P. 2053—2060.
- Dorman L. I. Cosmic ray survey in Antarctica, an coupling functions for neutron component near solar minimum 1996—1997 // J. Geophys. Res. A. — 2000. — **105**, № 9. — P. 2147—2156.
- Ebihara M. C., Fok R. A., Wolf T., Immel J., Moore T. E. Influence of ionospheric conductivity on the ring current // J. Geophys. Res. — 2004. — **109**, № 8. — P. A08205/1—A08205/14. — doi: 10.1029/2003JAD10351.
- Fanggun Ju. Altitude variations of cosmic rays induced production of aerosols: implications for global cloudness and climate // J. Geophys. Res. A. — 2002. — **107**, № A7. — P. SIA8/1—SIA8/10.
- Farrell W. M., Desh M. D. Solar proton events and fair weather electric field at ground // Geophys. Res. Lett. — 2002. — **29**, № 9. — P. 37/1—37/4.
- Feldsteinn Y. J. Energy of magnetosphere during magnetizing storms // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2003. — **65**, № 4. — P. 429—446.
- Fuller-Rowler T. J., Millward G. H., Richmond A. D., Codrescu M. V. Storm-time changes in the upper atmosphere at low latitudes // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2002. — **64**, № 12—14. — P. 1383—1391.
- Gang Li, Zank G. P., Rice W. K. M. Acceleration and transport of heavy ions at coronal mass ejection-driven shocks // J. Geophys. Res. A. — 2005. — **110**, № 6. — P. A06104/1—A06104/14.
- Harrison R. The global atmospheric electrical circuit and climate // Surv. Geophys. — 2004. — **25**, № 5-6. — P. 441—484.
- Heynderieck D. Modeling of radiative belt in cosmic weather context // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2002. — **64**, № 6. — P. 1687—1710.
- Ho G. G., Roelof E. C., Mason G. M. Upper limit on  $^3\text{He}$  fluence in solar energetic particle events // Astrophys. J. — 2005. — **621**, № 2. — P. 1441—1444.
- Huttunen K. E. J., Koskinen H. E. J. Importance of post-shock streams and sheath region as drivers of intense magnetospheric storms and high-latitude activity // Ann. Geophys. — 2004. — **22**. — P. 1729—1739.

- Jackman C.N., Mc Peters I., Labow G.J., Fleming E.L., Praderas C.J., Russell M.* Northern hemisphere atmospheric effects due to July 2000 solar proton event 14—16. 07. 2000 // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — **28**, № 15. — P. 2883—2887. — doi:10.1029/2001GL013221.
- Jakowski N., Wilken V., Schlueter S., Stankov S.M., Heisl S.* Ionospheric space weather effects, monitored by simultaneous ground and space based GNSS signals // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2005. — **67**, № 12. — P. 1074—1084.
- Jermakov V.I., Stozhkov J.I.* Cosmic ray fluxes in the atmospheric processes // *Proc. ISCS. Simpos. "Solar variability as input to the Earth Environment"*, Taetranska Lomnice, Slovakia, 23—28 June 2003 (ESA SP-535, Sept. 2003). — Taetranska Lomnice, 2003. — P. 281—295.
- Kazimirovsky E.* Influence on ionosphere from underlined processes // *Surv. Geophys.* — 2003. — **24**, № 2. — P. 139—184.
- Kocharov J., Torsti J.* He<sup>3</sup> anomalous fluxes in solar cosmic rays // *Astronom. J.* — 2002. — **586**, № 2. — P. 1430—1435.
- Kozyra J. U., Liemohn M. W.* Ring current energy input and decay // *Space Sci. Rev.* — 2003. — **109**. — P. 105—131.
- Labitzke K., Van Loon H.* 11-years cycle of activity and its influence on stratosphere // *Space Sci. Rev.* — 2000. — **94**, № 1—2. — P. 78—259.
- Lambour R.L., Coster A.J., Clouser R., Thornton L.E., Sharma J., Gott T.A.* Operational impacts of space weather // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — **30**, № 3. — P. 1—36. — doi:10.1029/2002GL015168.
- Le Mouel J.L., Blanter E., Shirman M., Courtillot V.* Evidence for solar forcing in variability of temperatures and pressures // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2009a. — **71**. — P. 1309—1321.
- Le Mouel J.L., Kossobokov V., Couztilot V.* A solar pattern in the longest temperature series from three Stations in Europe // *J. Jost. p.* — 2009b. — 10.009. — doi:10.1016.
- Lilensten J., Dudok de Witt T., Kretzsehmas M., Amblard P. O., Moussaoui S., Abautartham J., Auchere O.* Review on the solar spectral variability in the EUV for space weather purposes // *Ann. Geophys.* — 2008. — **26**. — P. 269—279.
- Lindzen R. S., Choi Y. S.* On the determination of climate feedbacks from ERBE data // *Geophys. Res. Lett.* — 2009. — **36**. — P. GL 039628. — doi:10.1029.
- Lockwood J.* International Solar Cycle studies [ISCS]: Symposium "Solar variability as an input to the Earth Environment", Taetranska Lomnice, 28 June 2003. — Taetranska Lomnice, 2003. — P. 317—321.
- Lohman G., Rimbu N., Dima M.* Climate signature of solar irradiance variations: analysis of long-term instrumental, historical and proxy data // *Jnt. J. Climatology.* — 2004. — **24**, № 8. — P. 1045—1056.
- Lopez R. E.* Solar wind density control of energy transfer to magnetosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 2004. — **31**, № 8. — P. L8804/1—L8804/5.
- Maltsev Y. P.* Points of controversy in magnetic storm studies // *Space Sci. Rev.* — 2004. — **110**, № 3—4. — P. 227—270.
- Manucci A. L., Tsurutani B. T.* Dayside global ionospheric response to the major interplanetary events of October 29—30. 2003 // *Geophys. Res. Lett.* — 2005. — **32**, № 12. — P. L12502/1—L12502/4.
- Markson R.* Solar modulation of atmospheric electrification and possible implications for the Sun — weather relationship // *Nature.* — 1978. — **273**. — P. 103—109.
- Millan P. U., Lin R. P., Smith D. M., Mc Carthy M. P.* Observations of relativistic electron precipitations during a rapid decrease of trapped electron flux // *Geophys. Res. Lett.* — 2007. — **34**. — P. L10101. — doi:10.1029/1200GGL028653.
- Olson R.H., Roberts W.O., Zerefors C.S.* Short term relationship between solar flares, geomagnetic storms and tropospheric vorticity patterns // *Nature.* — 1975. — **257**. — P. 113—121.
- Onsager T.G., Rostoker G.* Electron radiative belts precipitation // *Geophys. Res. Lett. A.* — 2002. — **107**. — P. 1—11.
- Osherovich V.A., Fainberg J., Stone R.G.* Solar wind quasi-invariant as a new index of solar activity // *Geophys. Res. Lett.* — 1999. — **26**, № 16. — P. 2557—2560. — doi:10.1029/1999 GL900583.
- Reames D. V., Ng C.K.* Heavy-element abundances in solar energetic particle events // *Astrophys. J.* — 2004. — **610**, № 1. — P. 510—522.
- Reid G. C.* Solar variability and Earth's climate: introduction and overview // *Space Sci. Rev.* — 2000. — **94**, № 1—8. — P. 1—11.

- Scafetta N., Wilson R.C.* ACRIM — gap, and TSI trend issuing a surface magnetic flux TSI proxy model // *Geophys. Res. Lett.* — 2008. — **36**. — L05701. — doi:10.1029GL036307.
- Scafetta N., West B.J.* Phenomological reconstructions of the Solar signature in the Northern Hemisphere surface temperature records since 1600 // *J. Geophys. Res.* — 2007. — **112**. — P. 24503.
- Schröter J. B., Heber F., Steinhilber P., Kallenrode M. B.* Energetic particles in the atmosphere: A Monte-Carlo simulation // *Adv. Space Res.* — 2006. — **87**. — P. 1597—1601. — doi:10.1016 / J. Asr. 2005.05.085.
- Sheping Sh.* Morphology of global ionospheric disturbance during geomagnetic storms // *J. Geophys.* — 2003. — **46**, № 1. — P. 11—17.
- Shea M.A., Smart D.P.* Solar proton and GLE events frequency: 1955—2000 // *Proc. 27<sup>th</sup> Int. Cosmic Ray Conf.* — Hamburg, 2001. — P. 3401—3404.
- Shirochkov A. V., Makarova L. N.* Ionespheric effect of the simultaneous occurrence of the solar proton event and relativistic electron precipitation as recorded by ground — based instrument at different latitudes // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2004. — **66**, № 12. — P. 1035—1045.
- Shrivastava Pankaj K., Singh G.N., Shrivastani D.* Short-term influence of coronal mass ejections on geomagnetic disturbances // *Indian. J. Radio Space Phys.* — 2003. — **32**, № 1. — P. 52—57.
- Sinhuber U., Burrows J.P.* Model investigations of Earth magnetic field influence on atmospheric composition during solar proton events // *Geophys. Res. Lett.* — 2003. — **30**, № 15. — P. 1—10.
- Stozhkov J. I.* The role of cosmic rays in the atmospheric processes // *J. Phys. G. Nucl. Part.* — 2002. — **28**. — P. 12—17.
- Svensmark H.* Cosmoclimatology: a new theory emerges // *Astronom. Geosc.* — 2007. — **48**. — P. 18—24.
- Svensmark H.* Cosmic rays and Earth's climate // *Space Sci. Rev.* — 2000. — **93**, № 1—2. — P. 175—185. — doi:10.1023/A:1026592411634.
- Takerachi T., Russel C. T.* Influence interplanetary shock wave orientation on geomagnetic storm with sudden onset // *J. Geophys. Res. A.* — 2002. — **107**, № 12. — P. 1—7.
- Temmer M., Veronig A., Rybak J., Braisa R., Hanslmeil A.* On the 24-day period, observed in solar flares occurrence // *Sol. Phys.* — 2004. — **221**, № 2. — P. 325—335. — doi:10.1023/B:SOLA.0000035044.49564.8.
- Tinsley B.A., Burns G.B., Zhou L.* The role of the global electric circuit in solar and internal forcing of clouds and climate // *Adv. Space Res.* — 2007. — **40**. — P. 1126—1139.
- Troshichev O.A., Egorova L. V., Vovk V.Ja.* Evidence for influence of solar wind variations on atmospheric temperatures in the southern polar regions // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2003. — **65**, № 8. — P. 947—956.
- Turner N.E., Baker D.N.* Energy content in the storm time ring current // *J. Geophys. Res.* — 2001. — **106**, № 9. — P. 149—156.
- Usoskin J. G., Desorgher L., Velinov P., Storini M., Fluckiger O., Butikofer R., Kovaltsov G.* Ionization of the Earth Atmosphere by Solar and Galactic Cosmic Rays // *Acta Geophysica.* — 2009. — **57**, № 1. — P. 88—101.
- Usoskin J. G., Kovaltsov G. A.* Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applicatios // *J. Geophys. Res.* — 2006. — **111**. — P. 21206.
- Usoskin J. G., Kovaltsov G.A.* Cosmic rays and climate of the Earth: Possible connection // *C. R. Geoscience.* — 2008. — **340**. — P. 441—450.
- Velinov P., Mateew L.* Improved cosmic ray ionization model for the system ionosphere — atmosphere. Calculation of electron production rate profiles // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2007. — doi:10.1016/j. jastp. — 2007.08.049.
- Veretenenko S., Theill P.* Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic // *J. Atmosph. Sol-Terr. Phys.* — 2004. — **66**. — P. 393—405.
- Verronen Pekka T.* Diurnal variation of ozone depletion during the Oct. — Nov. 2003 solar proton events // *J. Geophys. Res. A.* — 2005. — **110**, № 9. — P. A0932/1—A0952/12.
- Voiculescu M., Usoskin J. G., Mursula K.* Different response of clouds at the solar input // *Geophys. Res. Lett.* — 2006. — **93**. — P. L21802.
- Weber C.L., Growley T.J., Vonder G., Schrier V.A.* Solar irradiance forcing of centennial climate variability during Holocene // *Clim. Dyn.* — 2004. — **22**, № 5. — P. 539—553.

- Weber J. R. Generation of  $^{10}\text{Be}$  cosmogenic nucle-  
ars in Earth's atmosphere by cosmic rays: de-  
pendence from solar modulation // J. Geophys.  
Res. A. — 2003. — **108**, № 2. — P. 2—7.
- October 2003 solar storm period // Geophys. Res.  
Lett. — 2004. — **31**. — P. L02301. — doi:10.1029/  
2003GL0185841.
- Yin Suingun. Solar flare statistical study during  
22<sup>th</sup> solar cycle // Nanjig Univ. Nature. Sci. —  
2002. — **38**, № 4. — P. 457—461.
- Zhang J., Dere K.P. Geomagnetic disturbances so-  
lar sources in 1996—2000 yrs // Astronom. J. —  
2003. — **582**, № 1. — P. 520—533.
- Wiens R. H., Bhatnagar V. P., Thuillier G. Geomag-  
netic storm heating effects on low-latitude day-  
side thermosphere from WIND II observation at  
equinox // J. Atmosph. Sol-Terr. Phys. — 2002.  
— **64**, № 12. — P. 1393—1400.
- Zank G.P., Rice W.K., Wu C.C. Acceleration of so-  
lar particles by CMEs // J. Geophys. Res. A. —  
2000. — **105**, № 11. — P. 25079—25095.
- Woods T. N., Eparvier F. G., Fontenia J., Harder J.,  
Kopp G., Mc Clinton W.E., Rottman G., Smilley B.,  
Snow M. Solar irradiance variability during the