

Космические источники ионизации земной атмосферы (обзор)

© Л. В. Райченко, Г. В. Мельник, 2017

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 13 февраля 2017 г.

Характеристики верхней атмосферы Земли непрерывно изменяются под влиянием электромагнитного излучения Солнца, солнечного ветра, потоков галактических и солнечных космических лучей, а также осадков захваченных магнитосферных электронов. В зависимости от своих энергий, заряженные частицы и солнечная радиация проникают в разные атмосферные слои, ионизируя их и изменяя состав, динамические и температурные характеристики, что, в конечном итоге, вызывает значительные климатические вариации. До недавнего времени основным источником ионизации нижних слоев атмосферы считали частицы галактических космических лучей. Развитие измерительной аппаратуры и накопление данных рядов спутниковых и наземных наблюдений, а также одновременное совершенствование модельных расчетов дали возможность достичь значительного прогресса в исследовании целого ряда корпускулярных потоков, которые ионизируют земную атмосферу от поверхности до верхней атмосферы. Рассмотрены различные источники ионизации земной атмосферы. Показано, что существенная роль в ионизации атмосферы принадлежит частицам солнечного происхождения, концентрация которых в околоземном пространстве намного выше, чем считали раньше, а потоки их не только спорадические, а и непрерывные. Учет множественности солнечных источников ионизации может оказаться полезным при моделировании климатических вариаций на коротких и длинных временных масштабах.

Ключевые слова: галактические космические лучи, солнечные космические лучи, ионизация атмосферы.

Введение. На верхнюю атмосферу Земли (высоты 50—100 км) постоянно воздействуют электромагнитное излучение Солнца, солнечный ветер, потоки галактических (ГКЛ) и солнечных космических лучей (СКЛ). Только в постоянно обдуваемой Землю солнечным ветром в спокойные периоды наблюдается пять протонов, движущихся со скоростью ~ 500 км/с, во время солнечных возмущений — до 50—100 протонов (~ 1500 км/с).

В зависимости от своих энергий энергетические частицы и солнечная радиация проникают в атмосферу Земли на разные высоты: авроральные электроны воздействуют в основном на термосферу и верхнюю мезосферу, а их тормозное излучение проникает в верхнюю и среднюю стратосферу; релятивистские электроны, на которые воздействует магнитное поле Земли (МПЗ), ионизируют мезосферу и верхнюю стратосферу в авроральной области, а их тормозное излучение воздействует на среднюю и нижнюю стратосферу; СКЛ, энергии которых

находятся в очень широком диапазоне, в некоторых случаях, при $E \sim 100$ МэВ, проникают на высоты 30—20 км и ниже (так называемые GLE-события (Ground Level Enhancements)); высокоэнергетические ГКЛ теряют большую часть своей энергии на всех широтах в нижней стратосфере и в верхней тропосфере [Кривошук, Репнев, 2012].

Осаждающиеся в атмосферу заряженные частицы производят возбуждение, ионизацию, диссоциацию и диссоциативную ионизацию N_2 , O_2 и других атмосферных составляющих. Образовавшиеся при этом вторичные электроны с энергией 10—100 эВ участвуют в дальнейшей ионизации. В результате этих процессов в соответствующих атмосферных слоях прямо или через фотохимическую последовательность появляется большое количество короткоживущих (1—2 ч) HO_x (H, OH, HO_2) и долгоживущих (1—2 мес.) NO_y (NO , NO_2 , NO_3 , HNO_3 и др.) составляющих [Jackman et al., 2000, 2008, 2011; Кривошук, Репнев, 2012]. Короткоживущие се-

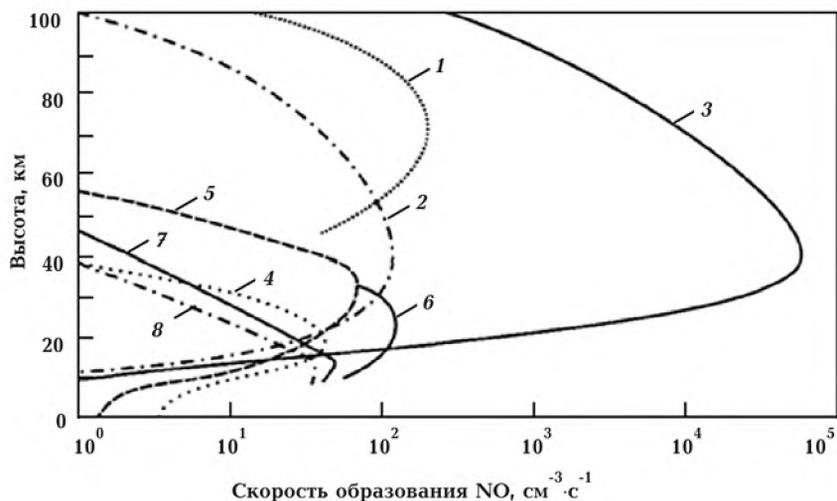


Рис. 1. Скорости образования окиси азота в протонных вспышках 12.07.1961 г. (1), 25.02.1969 г. (2), 04.08.1972 г. (3), при окислении N_2O на 60° с. ш. (4), на 80° с. ш. (5), на 60° с. ш. (6) летом; 7, 8 — под воздействием галактических космических лучей (7 — минимум, 8 — максимум солнечной активности) [Криволуцкий, Репнев, 2012 и ссылки там же].

мейства NO_x контролируют озон в верхней атмосфере и мезосфере ($P < 2$ гПа) через различные каталитические циклы. Долгоживущие NO_y способны опускаться в более низкие слои и здесь также участвовать в каталитических реакциях, приводящих к уменьшению озона (см., например [Ferguson, 1979]).

Можно сравнить скорости образования NO_y -составляющих атмосферы (рис. 1, кривые 3, 7): количество обусловленных СКЛ в полярной атмосфере в $4 \cdot 10^4$ раз превосходило то, которое было образовано под воздействием ГКЛ. По результатам многолетних наблюдений потоков солнечных протонов от больших вспышек СКЛ (платформ JMP с 1963 г. до настоящего времени, спутников GOES с 1975 г.), а также ракетных и спутниковых (SAGE) измерений NO_y -составляющих было оценено количество NO_y , обусловленных SPEs (Solar Proton Events) — около $(1-3) \cdot 10^{39}$ молекул/год (показано в гигамолях на рис. 2) [Jackman et al., 2008].

Эти оценки, значительные сами по себе, очевидно, могут возрасти при учете вклада в атмосферную ионизацию, например, от энергетичных солнечных электронов, которые, как принято считать, ускоряются во вспышках вместе с протонами в соотношении 5 : 1.

Это косвенно подтверждают полученные в конце прошлого века [Zeller et al., 1986] ультра-

высокоразрешенные записи нитратных осадков в антарктических и гренландских стратифицированных льдах, охватывающие последние несколько сотен лет. Большие (иногда до 400 %) нитратные пики на этих записях постулируются отражающими атмосферную ионизацию. Их связывают с образованием NO_y под воздействием SPEs [Shea et al., 1993]. Попытку проверить эту гипотезу сделали [Vitt, Jackman, 1996] и смоделировали некоторые пики после того, как учли вклады электронов от различных источников ионизации. Используя различные спутниковые данные за период с 01.01.1970 по 31.12.1994, они смогли разделить вклады в вариации нечетного азота NO_y над полярными (> 50 с. ш.) областями обоих полушарий. Были выделены вклады вариаций NO_y , образованных на высотах $h > 30$ км в стратосфере под воздействием ГКЛ и SPEs, образованных в нижней термосфере и верхней стратосфере потоками авроральных электронов, а также под воздействием ультрафиолетового и мягкого рентгеновского излучений. При этом оказалось, что вклады от солнечных источников атмосферной ионизации асимметричны относительно полушарий и более значимы над Южным, чем над Северным полюсом. Авторы объясняют это как сезонной зависимостью эффектов SPEs, так и тем, что над Южным полюсом термосферное влияние на

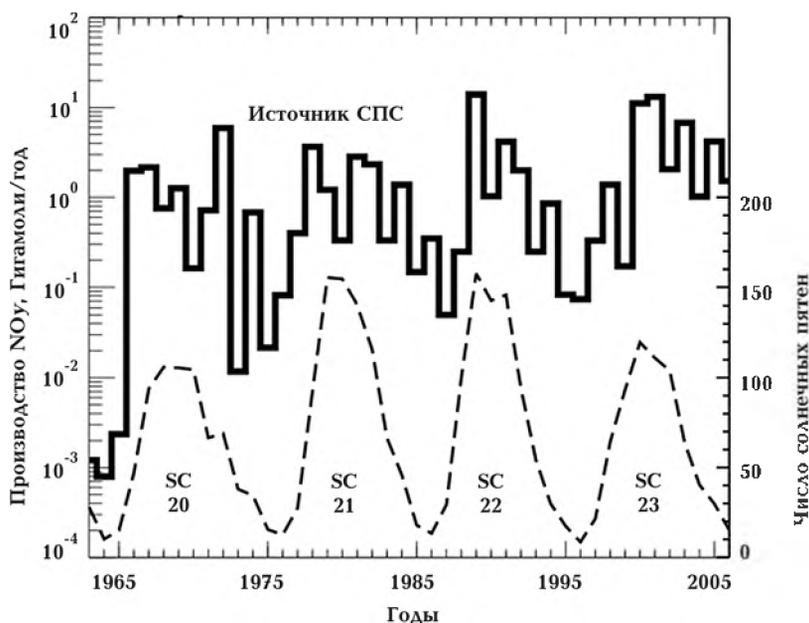


Рис. 2. Производство NO_v в средней атмосфере вследствие SPEs (гистограмма) и среднегодовые числа солнечных пятен (пунктир), SC — номер солнечного цикла [Jackman et al., 2008 и ссылки там же].

стратосферу больше, чем над северным. Действительно, [Haigh, Blackburn, 2006] пришли к выводу, что солнечный нагрев стратосферы может изменить тропосферную циркуляцию даже без учета каких-либо других факторов. Подобная асимметрия, касающаяся воздействия частиц ГКЛ и СКЛ на нижнестратосферный озон, была отмечена в работе [Кицифарска и др., 2016]. Авторы связывают ее с более слабым геомагнитным полем Южного полушария, позволяющим менее энергетичным солнечным частицам проникать здесь глубже в атмосферу.

Однако сам по себе ни один из вышеперечисленных источников ионизации не может адекватно объяснить высокоразрешенные пики нитратных ионов (NO_3^-). По нашему мнению, частичная неудача в моделировании этих пиков может быть связана как с неполным учетом всех действующих источников атмосферной ионизации (например, жесткого рентгена), так и тем обстоятельством, что вариации ГКЛ находятся в противофазе с солнечными вариациями и хоть не намного ($\sim 7\%$), но уменьшают пики нитратных ионов.

По-видимому, наметилась необходимость комплексного изучения различных источников и их относительных эффективностей в атмо-

сферной ионизации на разных высотах. Далее приведен обзор возможных источников атмосферной ионизации, поскольку все чаще она рассматривается как важный фактор влияния на прошлый и будущий климат Земли.

Галактические космические лучи. В течение многих лет ГКЛ считались (особенно климатологами) единственным источником атмосферной ионизации на низких и средних высотах. Однако даже сейчас, когда более понятны роль солнечных частиц в процессах атмосферной ионизации и “многокомпонентное” влияние на атмосферную ионизацию различных волновых и корпускулярных потоков, многие ученые считают ГКЛ основным фактором ионизации (см., например, [Bazilevskaya et al., 2010]). Потоки ГКЛ очень малы (почти на восемь порядков меньше, чем потоки СКЛ), а их энергии слишком велики для того, чтобы эффективно ионизировать земную атмосферу на всех интервалах высот и широт на столетних и более длинных шкалах. Почти изотропные возле Земли потоки ГКЛ модулируются солнечным ветром (амплитуда Форбуш-понижений достигает 7%), а их вариации имеют отрицательную корреляцию с солнечными характеристиками. Эффективность атмосферной ионизации ГКЛ находится на тре-

тем месте после видимого излучения Солнца и ультрафиолетового (УФ) излучения, составляя $\sim 0,1$ частиц в секунду в наиболее низкой части атмосферы, где ГКЛ образуют каскады [Gray et al., 2010]. Относительная скорость ионизации ГКЛ составляет $10^{-18} - 10^{-19} \text{ с}^{-1}$ [Артамонова, Веретененко, 2011].

Тем не менее потоки ГКЛ эффективны для реконструкции общего солнечного излучения (Total Solar Irradiance TSI) и прошлого климата Земли — они восстанавливаются по обнаруженным в ледовых кернах и осадочных толщах горных пород изотомам $^{10} \text{Be}$ и $^{14} \text{C}$, образованным в атмосфере Земли под воздействием ГКЛ.

Учитывая такую позицию большинства исследователей, понятно, что самые успешные попытки моделирования процессов атмосферной ионизации потоками заряженных частиц связаны именно с ГКЛ. В цикле работ [Usoskin et al., 2004, 2005; Usoskin, Kovaltsov, 2006] разработаны и применены для разных условий численные модели расчета инициированной космическими лучами ионизации (cosmic ray induced ionization CRII), которые в принципе могут быть применены для расчета эффектов заряженных частиц различного происхождения (СКЛ и ГКЛ).

Поскольку ГКЛ представляют собой потоки высокоэнергетичных частиц, состоящие в основном из протонов ($\sim 90\%$), α -частиц ($\sim 10\%$) и незначительного числа тяжелых ядер ($\sim 1\%$), энергия первичных ГКЛ находится в интервале от нескольких сотен МэВ до десятков ГэВ. Когда частицы с такими энергиями, постепенно снижаясь, входят в верхние разреженные слои атмосферы на средних и низких широтах, их траектории почти не искажаются. Этот процесс можно смоделировать с помощью простого аналитического приближения [Vitt, Jackman, 1996] или численных методов. Первичные частицы начинают сталкиваться с ядрами или молекулами окружающей атмосферы, в основном N_2 , O_2 , и образовывать каскады на высотах 15—26 км. В результате каскадного процесса производится большое количество вторичных частиц, которые подвергаются дальнейшим столкновениям [Velinov et al., 2013]. Можно выделить три основных составляющих, важных для дальнейшей ионизации атмосферы: мягкая или электромагнитная (электроны, позитроны и фотоны), жесткая или мюонная и адронная или

нуклонная (протоны, нейтроны и α -частицы). В модельных CR II расчетах учитываются все вторичные составляющие, но в разных интервалах энергий. Например, для ГКЛ с $E < 1$ ГэВ учитывается только нуклонная; для частичек со средними энергиями (~ 10 ГэВ) одинаково важны все три, но на разных высотах; в ионизации высокоэнергетичными частицами преобладают мюонная и электромагнитная составляющие, тогда как нуклонной можно пренебречь [Usoskin, Kovaltsov, 2006]. Примеры применения метода симуляции каскада с учетом энергии, отложенной вторичными частицами в каждом слое, приведены в работах [Usoskin et al., 2004; Desorgher et al., 2005].

Вклад в общую ионизацию от тяжелых ядер (количество которых исчезающе мало в ГКЛ, но, как будет показано ниже, становится достаточно большим в СКЛ, когда происходит преимущественное их ускорение в некоторых солнечных вспышках) оценивали [Mishev et al., 2011].

В соответствии с недавно появившимся поворотом ученых “лицом к Солнцу”, [Usoskin et al., 2011] модернизировали свою модель, включив в нее верхнюю атмосферу и потоки СКЛ. Результаты расчетов атмосферной ионизации с помощью этой новой модели показали, что каскадные процессы начинают происходить уже на высоте ~ 30 км, хотя в вышеуказанной работе этот порог образования каскадов был отнесен к $h \sim 15 \div 17$ км. Рассчитанные с учетом потоков СКЛ функции выхода на $h \sim 30 \div 35$ км хорошо согласуются с имеющимися наблюдениями. Однако представленные авторами модельные расчеты атмосферной ионизации на $h \sim 15 \div 17$ км, обусловленные потоками ГКЛ и спектрами СКЛ [Usoskin et al., 2011], вряд ли можно считать достоверными. Как известно, большинство потоков СКЛ (исключая события ground levels enhancement GLE) не доходят до таких высот и, следовательно, не могут создавать каскады. Их влияние распространяется только до $h \sim 30 \div 35$ км, и на этих высотах они эффективно влияют на стратосферу. Кроме этого, нельзя суммировать потоки, которые находятся в противофазе, эффекты СКЛ могут действительно компенсироваться Форбуш-понижениями ГКЛ за счет каскадов ГКЛ на этих высотах. Эти два вида корпускулярного излучения могут стать равнове-

ликими, хотя в первоначальном виде их потоки отличались на восемь порядков.

Чтобы объяснить ионно-индуцированное образование облачных ядер конденсации (cloud condensation nuclei CCN), недавно были проведены два лабораторных эксперимента: CLOUD в Церне [Duplissy et al., 2010] и SKY в Копенгагене [Enghoff et al., 2011]. В них имитирующая воздух искусственная смесь газов с контролируемыми физическими условиями и химическим составом подвергалась ионизирующему воздействию пучков заряженных частиц, или γ -излучения. До воздействия, в течение и после него измерялось количество образованных аэрозолей: 10-кратное увеличение ионизации приводит к 3-кратному увеличению концентраций мелких аэрозолей размерами в несколько нм. В таком случае, как отмечено в работе [Usoskin, Kovaltsov, 2006], CRП должно увеличиваться в нижней атмосфере на 10—25 %. В модельных расчетах каскадных процессов в нижней атмосфере учет продуктов этого не обеспечивает. Это затруднение, по-видимому, можно преодолеть, если учесть все ионизирующие процессы, включая также поверхностное излучение Земли. Отметим также, что [Mironova et al., 2008] показали, что в результате солнечного GLE-события 20.01.2005 увеличение плотности рассеянных аэрозолей наблюдалось в полярной атмосфере на высотах 1,5—2 км в течение нескольких дней после события.

Солнечные космические лучи и электромагнитное излучение Солнца. Солнечные вспышки происходят при неравновесных взаимодействиях магнитных полей и плазмы в хромосфере и солнечной короне, освобождая значительную часть ($\sim 10\%$) своей энергии в виде СКЛ — протонов, нейтронов, α -частиц, средних и тяжелых ядер и сопутствующего электромагнитного излучения (рентгеновского, γ и т. д.). Энергия корпускулярных потоков от Солнца находится в интервале от менее 1 МэВ до ~ 10 ГэВ. Протоны СКЛ наблюдаются вблизи земной орбиты с прошлого столетия (сначала на баллонах, а затем на спутниках) как солнечные протонные события SPE. С начала нынешнего тысячелетия стало широко известно [Reames, 2002], что СКЛ часто совпадают по времени с быстрыми выбросами корональной массы (coronal mass ejection CME), которые вызывают межпла-

нетные ударные волны. Все сомнения в эффективности атмосферной ионизации солнечным электромагнитным излучением, которые в течение многих лет из энергетических соображений выдвигались сторонниками “антисолнечного” воздействия на климат Земли, сразу же отпадают при изучении солнечных вспышек. Они выделяют энергию порядка 10^{24} — 10^{25} Дж в виде потоков корпускулярного и электромагнитного излучений. И здесь до настоящего времени сохранились сторонники “антисолнечной” позиции, утверждающие “спорадичность” солнечных вспышек и малую интенсивность потоков СКЛ [Bazilevskaya et al., 2008]. Существуют убедительные доказательства, что как сами вспышки (модель Сыроватского [Сыроватский, Сомов, 1982]), так и CMEs, обычно возникают в активных областях солнечного магнитного поля сложной конфигурации в процессе магнитного пересоединения его силовых линий [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008]. На Земле события CME (СКЛ) вызывают геомагнитные бури, наземные повышения атмосферной ионизации (CMEs) и поглощения в полярных шапках, часто обуславливают нарушения радиосвязи и эффективно влияют на климат Земли (см., например, [Prölss, 2004, Райченко, 2010, Килифарска и др., 2016]).

Солнечное электромагнитное излучение.

По мере накопления данных спутниковых наблюдений за общим излучением Солнца TSI на длинных временных шкалах был обнаружен климатический сигнал [Krivova et al., 2007]. Реконструкции значений TSI на столетних шкалах позволили оценить изменение радиационного влияния в интервале $0,16$ — $0,28$ Вт \cdot м $^{-2}$. На более длинных шкалах анализируются скорости отложения в полярных шапках космогенных изотопов ^{10}Be и ^{14}C .

Используя параметр климатической чувствительности λ , находящийся в пределах от $0,69$ до $0,97$ К \cdot (Вт \cdot м $^{-2}$) $^{-1}$ [Tung et al., 2008], можно оценить поверхностный температурный вклад 11-летней вариации TSI на границе атмосферы $\Delta T_s = \lambda \Delta F \sim 0,07$ К, где T_s — глобально усредненная приповерхностная температура, а ΔF — изменение радиационного влияния на границе атмосферы. Однако по меньшей мере региональные наблюдения указывают на более значительные солнечно-индуцированные климатические вариации, чем значения, полученные из

такого простого соотношения. Это наводит на мысль, что для объяснения солнечного радиационного воздействия на земной климат надо привлечь более сложные механизмы, чем простой нагрев.

Фундаментальный обзор таких механизмов и недавних результатов исследований солнечного излучения в различных спектральных интервалах представлен в работе [Gray et al., 2010]. Авторы указывают, что предложенные за последнее время механизмы для объяснения климатического отклика на очень малые вариации солнечного излучения могут быть сгруппированы в три категории. Первая включает в себя отклик на вариации солнечной светимости I , которая представляет мощность на единицу площади и на единицу длины волны и доходит до Земли (TSI является интегралом I по всем значимым длинам волн). Анализ спектра солнечной светимости, достигающей вершины земной атмосферы, показал, что она почти вся состоит из видимого и инфракрасного излучений, которые проникают к поверхности Земли и поглощаются ею. Поглощение TSI океанами обнаруживает большие вариации, учитывая их большую теплоемкость. Еще некоторая часть излучения поглощается в атмосфере, в основном тропосферным паром на различных интервалах длин волн и стратосферным озоном в УФ-области. Поглощаемое атмосферой УФ-излучение характеризуется относительно большими 11-летними вариациями — до 6 % на $\lambda = 200$ нм, когда возникает диссоциация кислорода и производство озона, и до 4 % на $\lambda = 240 \div 320$ нм, когда преобладает абсорбция атмосферным озоном. На очень коротких длинах волн (~ 100 нм) вариации I составляют около 100 % и вносят вклад в температуру верхней атмосферы. Вклад вариаций I в температуру экзосферы (как утверждают [Gray et al., 2010]) нам представляется сомнительным, поскольку на высотах 500—1000 км внешняя атмосфера практически прозрачна для всех видов солнечного излучения из-за ее большой разреженности. Здесь в 1 см^3 содержится меньше, чем 10^7 частиц, тогда как у Земли их в $3 \cdot 10^7$ раз больше.

Происхождение второго, нижнестратосферного, максимума и наблюдаемое проникновение сигнала глубоко в тропосферу на средних широтах, наверное, требует включения передаточ-

ных механизмов как внутри стратосферы, так и из стратосферы в тропосферу, подобно исследованным в работе [Авакян, 2008].

Большие (около 6 % за солнечный цикл) вариации поглощенного на стратосферных высотах УФ-излучения влияют на нижележащую тропосферу и тем самым на климат приземного слоя. Оцененные стратосферные температурные изменения обнаруживают сигнал ~ 2 К над экваториальной стратопаузой ($h \sim 50$ км) и вторичный максимум этого сигнала в нижней стратосфере на высоте около 20—25 км [Frame, Gray, 2010]. Прямой эффект светимости может усиливаться механизмом мощной обратной подпитки, включающим производство озона, которое является дополнительным источником нагрева [Gray et al., 2010]. Здесь также может оказаться эффективным механизм планетарно-волнового соединения тропосферы и стратосферы [Geller, Alpert, 1980].

Поскольку озон — основной газ, включенный в радиационный нагрев, то солнечно-индуцированные его вариации могут прямо влиять на радиационный баланс стратосферы и косвенно на стратосферную циркуляцию. Возникновение таких вариаций обусловлено: 1) изменениями солнечной светимости в УФ-диапазоне, которые модифицируют скорости производства озона с помощью фотолиза молекулярного кислорода в верхней и средней стратосфере, в основном на низких широтах; 2) изменениями в скорости осаждения заряженных частиц, которые косвенно влияют на концентрацию озона [Randel, Wu, 2007]. К тому же в результате циркуляции могут возникать вариации концентрации озона, связанные с его переносом [Stendel et al., 2006].

Потоки электронов в земной атмосфере. О регистрации потоков солнечных электронов в околоземном пространстве известно сравнительно мало. Однако модельные расчеты показали, что количество электронов с энергиями выше 20 кэВ, ускоренных при большой вспышке, должно составлять по крайней мере $2 \cdot 10^{35}$ электронов $\cdot \text{с}^{-1}$ для гибридной модели и до 10^{37} электронов $\cdot \text{с}^{-1}$ для нетепловой модели в течение 10—100 с [Miller et al., 1997]. В нетермальной интерпретации твердое рентгеновское излучение вспышек считается обусловленным потоками быстрых электронов с энергиями более чем 70 кэВ. Обнаружено [Kurt et al.,

1981], что как электромагнитные, так и электронные солнечные эмиссии могут быть описаны дифференциальными степенными функциями с наклоном $1,45 \pm 0,15$. Затем [Crosby et al., 1993] установил, что солнечные вспышки проявляют очень похожие распределения на различных длинах волн, таких как радио, мягкое и жесткое рентгеновское излучение и т. д. Наклон же функций распределения, в общем, зависит от параметров вспышки. Он составляет в среднем 1,7—1,9 для пиковых потоков, 1,4—1,6 для солнечных эмиссий и около 2,0 для продолжительности вспышек. Очевидно, электроны также непрерывно ускоряются в солнечных процессах, как и протоны, и могут эффективно ионизировать околоземную мезосферу и термосферу.

О роли низкоэнергетичных солнечных электронов в ионизации земной атмосферы ранее было известно мало. В цикле работ [Callis et al., 2001, 2002] оценено атмосферное влияние высыпаний магнитосферных энергетичных электронов (Energetic Electron Precipitations EEPs) с энергиями $4 \text{ кэВ} \leq E \leq 1 \text{ МэВ}$, обусловленных солнечным ветром. Авторы успешно доказали, что: 1) популяция магнитосферных энергетичных электронов действительно значительно модулируется электрическими полями высокоскоростных потоков солнечного ветра, которые интенсифицируются в максимумах солнечной активности; 2) эффекты EEPs приводят к интенсивной ионизации в верхней атмосфере и к увеличению (на порядок в течение дня) количества молекул NO_y в интервале высот от 70 до 120 км, 3) NO_y , сформированный за счет EEPs, действительно переносится вниз в стратосферу и значительно влияет на содержание озона в стратосфере снижая его, особенно в интервале от средних до высоких широт.

При изучении этой проблемы [Callis et al., 2001, 2002] включили в свои модельные расчеты планетарно-волновое соединение атмосферных слоев и другие механизмы пересоединения, подобные тем, которые были предложены в работе [Авакян, 2008], обуславливающие снижение в нижние слои атмосферы (до высот ~ 25 км) молекул NO_y , образованных за счет EEPs в нижней термосфере и верхней мезосфере. Важность этих работ состоит в том, что, в отличие от более ранних, где атмосферная ионизация моделировалась почти исключительно только в по-

лярных областях, в них оценены эффекты EEPs на всем интервале широт от -90° до $+90^\circ$. Это позволяет сделать вывод, что земная атмосфера может ионизироваться не только высокоэнергетичными, но и низкоэнергетичными корпускулярными потоками, а также более полно учитывать в моделировании атмосферных процессов весь спектр влияющих на них факторов. В частности, отсюда также следует, что потоки заряженных частиц от малых вспышек на Солнце имеют не меньшее (если не большее) влияние, чем потоки от крупных вспышек, происходящих сравнительно редко. Для потоков высокоэнергетичных частиц атмосфера часто оказывается почти прозрачной, за исключением самых низких ее слоев (0—15 км), где образуются каскады [Базилевская и др., 2009]. Это относится и к потокам ГКЛ, плотность которых на восемь порядков меньше, чем СКЛ. Вряд ли они могут эффективно ионизировать земную атмосферу на больших высотах.

Это подтверждается сравнением с данными 2D фотохимического моделирования содержания “малых” составляющих атмосферы в присутствии высыпания энергетичных электронов EEPs и при их отсутствии в трех полосах широт на высоте 25—40 км. Сравнение проинтегрированных по всему широтному интервалу (от -90° до $+90^\circ$) воздействий EEPs и УФ-излучений на колонку O_3 на двух высотных интервалах 0—50 км и 25—40 км показало, что на первом из них оба фактора влияния на колонку O_3 сравнимы и показывают уменьшение $\text{O}_3 \sim 1,5\%$, а на втором интервале эффект EEPs составляет $\sim 2,5\%$ по сравнению с $1,5\%$ для УФ-излучения [Callis et al., 2001].

Таким образом, магнитуды воздействия на озон, обусловленные EEPs, превышают магнитуды от УФ-излучения. Этот результат, хотя и с большими допущениями, является едва ли не первой численной оценкой, которая подтверждает на коротких временных шкалах влияние на климат Земли со стороны высыпающихся электронов и коротковолнового излучения Солнца. До этого считалось, что такое влияние (так называемый форсажный сигнал) обнаруживается только на длинных временных шкалах, поскольку на коротких шкалах он демпфируется медленным откликом океанов.

Как отмечено в работе [Callis et al., 2001],

широтные градиенты вариаций O_3 , обусловленные УФ-излучением, намного меньше, чем у тех, которые обусловлены EEPs (что связано с широтным эффектом электронов), а значит, влияние EEPs на атмосферную ионизацию в средних и высоких широтах возможно. Сравнительно небольшая амплитуда эффекта, наверное, связана с модельными ограничениями. Можно надеяться, что применение нового 3D моделирования на всем интервале высот до 120 км, а также более полный учет всех потоков осаждаемых в магнитосфере электронов позволят значительно улучшить эти результаты. Особая ценность изученных явлений EEPs заключается в том, что они подтверждают непрерывное, а не спорадическое, как это считалось до сих пор, солнечное воздействие на ионизацию атмосферы и климат Земли.

Вторым важным открытием, связанным с солнечными корпускулами, особенно электронами, стало обнаружение сильного разогрева (до 100°C), возможно обусловленного высокоскоростным солнечным ветром, во внешней сильно разреженной атмосфере Земли на высотах более 300 км [Шуйская и др., 1998]. Внешняя атмосфера Земли, простирающаяся до 300—1000 км над верхней атмосферой, сильно разрежена, в 1 см^3 содержится менее 10^7 частиц. Поскольку заряженные частицы внешней атмосферы мало соприкасаются друг с другом (только с атомами и ионами в низших атмосферных слоях), они могут сохранить свою энергию в течение длительного времени. Если они получают большую энергию, т. е. внешняя атмосфера разогреется сильнее, то этот разогрев тоже будет сохраняться длительное время из-за малого взаимодействия этой части атмосферы с плотными ее слоями. Таким образом, вокруг Земли создается своеобразная магнитная ловушка для заряженных низкоэнергетичных частиц, в которой они могут ускоряться до очень больших энергий. Частицы с максимальной амплитудой колебаний вокруг силовых линий магнитного поля Земли могут взаимодействовать с более плотными слоями верхней атмосферы и сбиваться со своих траекторий, оседая в эти слои и вызывая в них дополнительную ионизацию. Отдавая свою энергию окружающим атомам и молекулам, они создают дополнительный разогрев атмосферы на высотах 100—500 км. Когда таких оседающих частиц стано-

вится очень много, они могут вызвать хорошо известные полярные сияния, сопровождающиеся магнитными бурями. Частицы с меньшей амплитудой колебаний более долговечны.

Солнечные протонные события. Спутниковые наблюдения позволяют сейчас наблюдать солнечные протонные события (SPE) вблизи земной орбиты (на расстоянии 1 AU) на интервалах $E \geq 0,5$ МэВ/нуклон и ниже. Оказалось, что скорость появления SPE резко возрастает с уменьшением пороговой энергии их регистраций: если для $E > 433$ МэВ/нуклон (или магнитной жесткости $R \geq 1$ ГВ) частота появления SPEs составляет около 1,1 событий в год, то для частиц с $E \geq 100$ МэВ/нуклон — 2 события в год, а протоны с $E \leq 100$ МэВ/нуклон регистрируются с частотой более чем 250 событий в год. Другими словами, солнечные протонные события происходят почти каждый день (особенно, если включить в рассмотрение эффекты малых вспышек на Солнце), и потоки солнечных протонов почти так же непрерывно бомбардируют Землю, как потоки ГКЛ, отличаясь от последних меньшими энергиями и на восемь порядков большей плотностью [Miroshnichenko, Perez-Peraza, 2008 и ссылки в ней].

Таким образом, уменьшение пороговой энергии регистрации, увеличение чувствительности детекторов и продолжительности спутниковых измерений позволяют утверждать, что Солнце фактически является перманентным источником SPEs (в основном низкоэнергетичных с $E \geq 1$ МэВ/нуклон).

В связи с большим разнообразием регистрируемых вблизи земной орбиты характеристик параметров SPEs (элементный состав, энергетические спектры, интенсивности, зарядовые состояния, пространственные и временные изменения), наряду с различными каталогами SPEs, появились также различные классификационные системы SPEs, лучшей из которых, пожалуй, остается система [Smart, Shea, 1971]. В ней для каждого SPE указано отсутствие или наличие спутниковых наблюдений, значения PCA (Polar Cap Absorption) на интервале 4, 6, 15 дБ и процентное увеличение скоростей счета нейтронных мониторов на уровне моря. Для характеристики потоков SPE часто используется единица 1 proton flux unit (pfu) = 1 частица $\text{см}^{-2} \times \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1} = 104$ частицы $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{sr}^{-1}$. Не-

смотря на регулярные спутниковые наблюдения эмиссий рентгеновского излучения от вспышек, в последние десятилетия возникла новая классификация SPEs, основанная на продолжительности всплесков мягкого рентгеновского излучения [Reames, 2000]. По новым представлениям ускорения СКЛ происходят из разных источников на Солнце или вблизи него (импульсные или постепенные вспышки, межпланетные или коронарные ударные волны и т. д.). Термины “импульсные и постепенные” относятся именно к продолжительности в событии всплесков рентгеновского излучения (более или менее 1 ч соответственно). Однако между этими двумя группами SPEs есть и другие различия как в эмитированном, так и в корпускулярном излучении, в частности в составах эмитированных потоков. Расширенная классификационная система [Cliver, 1996] также включает в себя так называемые “гибридные” эффекты, т. е. вспышки, в которых импульсные и постепенные события затемняются: предполагается, что SPEs, связанные со вспышками с большой продолжительностью, имеют “ядро” ускоренных во вспышке частиц, которое окружает ориентированное во времени и в пространстве “гало” частиц, ускоренных в CMEs — возбужденных ударных волнах.

Протонные события могут быть классифицированы в терминах флюенсов — интегрированных по событию потоков в $1 \cdot \text{см}^{-2}$ или протон $\cdot \text{см}^{-2}$. Изучая зависимости скоростей появления солнечных событий выбросами корональной массы [Feunman et al., 1993], пришли к выводу, что это распределение описывается log-нормальной функцией.

Влияние потоков протонов от вспышек на среднюю и нижнюю полярную атмосферу (в частности, образование окиси азота NO, активного и нечетного водорода H и OH и их перенос в более низкие широты) активно изучается с помощью 2- и 3-мерного фотохимического моделирования [Криволицкий и др., 2008, Криволицкий, Репнев, 2012].

С 1942 по 2007 г. (конец 23 цикла солнечной активности) было зарегистрировано 70 солнечных высокоэнергетических событий, которые характеризовались различными наземными эффектами [Miroschnichenko, Perez-Peraza, 2008]. Заметим, что энергии протонов в этих случаях были как релятивистскими (жесткость более чем

1 ГВ), так и нерелятивистскими (менее чем 1 ГВ), а соответствующие вспышки — крупными, средними и малыми. Системное изучение 30 крупнейших событий позволило определить верхнюю границу ускоренных на Солнце частиц ULS (Upper Limit Spectrum) (рис. 3). Все точки ULS (затемненная линия 15) магнитуд расположены на порядок выше, чем все зарегистрированные или вычисленные интегральные потоки; в правом нижнем углу для сравнения показан пунктирной линией интегральный спектр ГКЛ с энергиями более 10^9 эВ.

Ускорение солнечных протонов до релятивистских энергий не обязательно связано с большими вспышками, но всегда обусловлено вторичным ускорением повышенных вспышкой корональных популяций межпланетными и корональными ударными волнами, возбужденными CMEs [Cliver, 2006].

Оригинальный и перспективный экспериментальный метод определения верхней границы общей энергии, индуцированной солнечными протонами, предложен в работе [Gladysheva et al., 1995]. Известно, что чем выше общая энергия СКЛ, тем меньше вероятность их наблюдения (см. выше). Итак, чтобы получить ULS СКЛ, необходимы наблюдения на длинной временной шкале. Информацию о событиях СКЛ можно восстановить по уже упоминавшимся нитратным отложениям в датированных антарктических и гренландских ледовых ядрах за последние 10 000 лет. Уже первые результаты обработки этих данных показали тесную корреляцию солнечных протонных событий с содержанием нитратов NO_3 , содержащихся в ядрах. Из анализа лунных образцов [Reedy, 1980] следует, что средний поток солнечных протонов с $E > 10$ МэВ составляет $100 \pm 25 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ за прошедшие 1 млн лет, что близко к средним значениям за несколько недавних циклов солнечной активности. Исходя из этого среднего значения, авторы оценили верхний предел энергии ускоренных во вспышках протонов в $\sim 10^7$ — 10^8 эВ. Расхождение с вышеприведенной оценкой ULS составляет четыре порядка и, вероятно, обусловлено тем, что не учтены ионизационные эффекты средних и тяжелых ядер СКЛ с большими энергиями [Gladysheva et al., 1995], так как многие из них были фактически обнаружены лишь в последние десятилетия. Но авторская методика, несомненно, открыва-

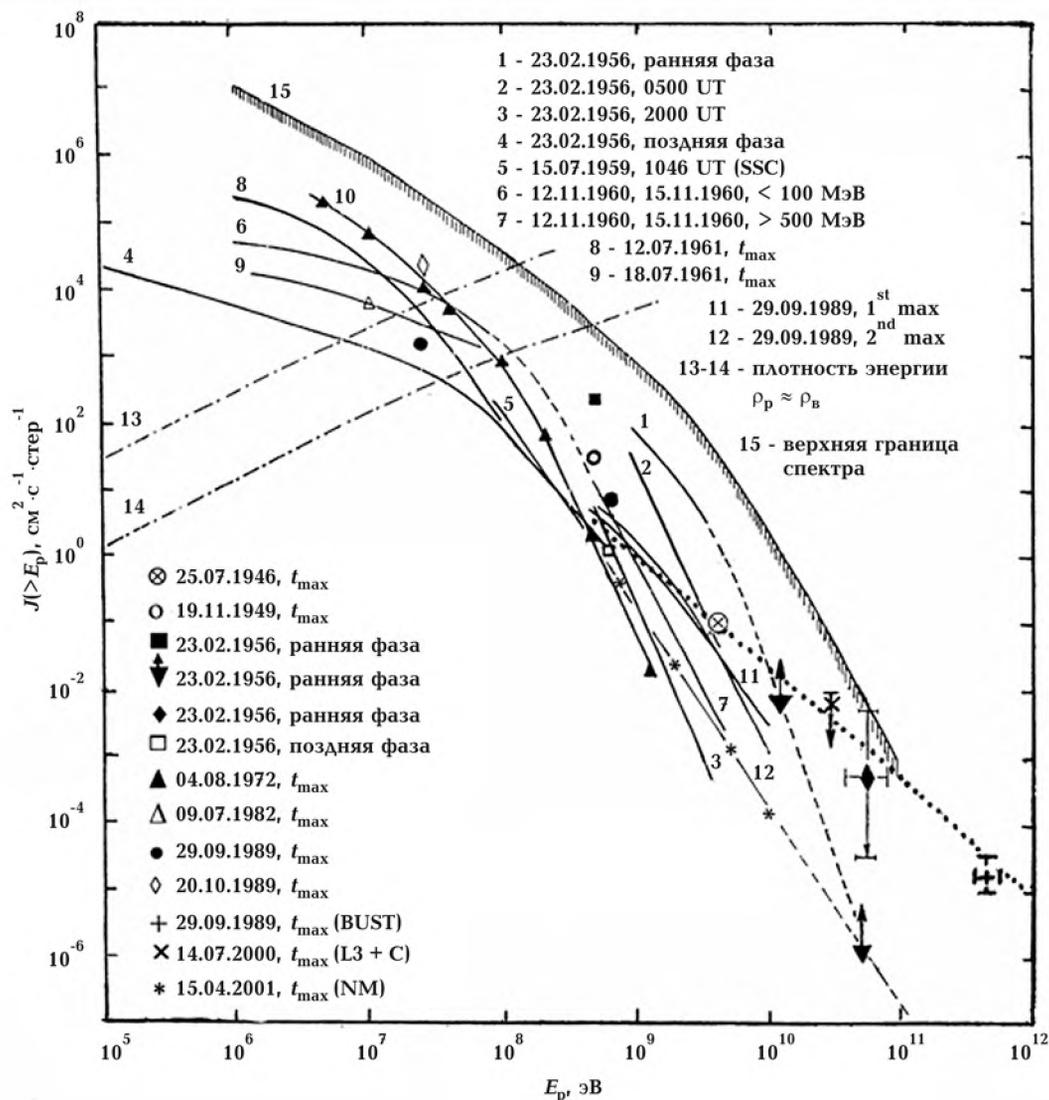


Рис. 3. Интегральный спектр энергии солнечных протонов в крупнейших SPEs, наблюдавшихся у Земли в 18—23 циклах солнечной активности. Кривая 15 соответствует верхней границе спектра. Интегральный спектр для галактических космических лучей выше 10^9 эВ показан пунктиром [Miroshnichenko, Perez-Pezaza, 2008 и ссылки там же].

ет большие перспективы в реконструировании климата прошлого Земли.

Потоки тяжелых ядер в событиях СКЛ.

Изучение элементного состава СКЛ, который часто изменяется от вспышки к вспышке, дает важные сведения об условиях ускорения СКЛ на Солнце и в межпланетном пространстве. Долгое время считалось, что в долговременных трендах эти различия стираются и в целом элементный состав СКЛ отражает состав солнечной короны. В постепенных вспышках отношение заряда к атомному номеру Q/A почти всегда постоянно. Однако спутниковые наблюдения во вре-

мя импульсных вспышек показали, что в регистрируемых потоках СКЛ обнаруживается тысячекратное увеличение He^3/He^4 , и такие же по величине возрастания потоков элементов с $z > 34$ (в основном железа), которые сопровождаются уменьшениями отношений Q/A в корональной плазме.

В работе [Tylka et al., 2005] детально описано современное состояние проблемы составов СКЛ и их зарядовых состояний в событиях SEPs (Solar Energetic Particle). Выше энергий в несколько десятков МэВ/нуклон большие постепенные SEPs-события также сильно изменяются по сво-

им спектральным характеристикам и элементному составу. Почти 1/3 SEPs, наблюдаемых в 23-м солнечном цикле на спутниках ACE и WIND, обнаруживают изменения с энергией отношений Fe/C, которое отражает спектральные различия этих элементов. Чтобы проиллюстрировать это различие, авторы сравнивают события SEP 21.04.2002 и 24.08.2002 (последнее относится к GLE-событиям). Ниже ~ 10 МэВ/нуклон отношение Fe/C в обоих событиях идентично, но начиная с ~ 60 МэВ/нуклон, Fe/C в GLE-событиях достигает величины, примерно в 7 раз превышающей ее значение в корональном составе. Оба эти события соответствуют CMEs, которые распространились к Земле за 51 и 58 часов со скоростью 2400 и 1900 км/с соответственно. Соответствующие этим событиям вспышки также были почти идентичны по размерам и расположению, так что различия в составах не могут, как обычно, объясняться различиями в скорости CMEs и разным расположением соответствующих вспышек.

В течение более чем 25 лет потоки тяжелых ядер от солнечных вспышек наблюдались на спутнике JMP-8 с помощью телескопа космических лучей [Dietrich, Lopate, 1999]. В очень многих SEPs наблюдались потоки солнечных ионов железа, превышающие фон от ГКЛ вплоть до энергий ~ 800 МэВ/нуклон. Эти наблюдения позволили сравнить потоки протонов с $E \sim 500$ МэВ в GLE 29.9.1989 с одновременными измерениями солнечных ионов железа с энергиями порядка 50—1000 МэВ/нуклон на спутнике JMP-8 [Tylka et al., 1999]: при очень высокой общей энергии спектры тяжелых ядер оказываются гораздо более жесткими, чем спектры протонов. Оценивая вклад солнечных тяжелых ядер в скорости счета нейтронных мониторов, авторы указывают, что при таком высоком отношении Fe/P тяжелые ядра могут вносить значительный ($\sim 20\%$) вклад в скорости счета, формируя каскады в самой нижней атмосфере. Становится также очевидным их участие в ионизации нижней атмосферы.

Из всего изложенного выше можно заключить, что выдвинутая много лет назад и незаслуженно забытая гипотеза о преимущественном ускорении тяжелых ядер в стохастических процессах на Солнце [Гинзбург, Гуревич, 1960], учитывая новые представления об ускорении солнечных частиц в петлях вспышечных магнитных полей или в ударных волнах от CMEs,

вновь становится актуальной. Уместно также заметить, что многие GLEs происходят во время нескольких происходящих в одной области малых вспышек (класса 1 в видимом диапазоне). Так, первая регистрация тяжелых ядер с энергиями порядка 600 МэВ/нуклон относится к измерениям на спутниках “Электрон-2.4” в минимуме солнечной активности 1964—1965 гг. Эти кратковременные и длительные возрастания потоков тяжелых ядер на каналах счета ядер с $Z \geq 15$ произошли после трех следующих друг за другом вспышек класса 1 и сопровождались большими наземными возрастаниями в скоростях счета нейтронных мониторов по данным мировой сети станций (NMDB, <http://www.nmdb.eu>).

γ -излучение солнечных вспышек. До появления солнечной γ -астрономии наблюдения в радио- и рентгеновских диапазонах обнаруживали только существование электронной компоненты в самой вспышечной области, хотя теоретические исследования изучали возможные ядерные реакции при взаимодействии ускоренных протонов и более тяжелых ядер во вспышках. Одним из важнейших проявлений таких реакций является нейтральная эмиссия (нейтроны и γ -излучение), обусловленная взаимодействием ускоренных ионов с окружающей солнечной атмосферой. Основными компонентами γ -лучевой эмиссии являются: а) тормозное излучение электронов, которое преобладает на интервалах фотонных энергий менее чем 1 МэВ и ~ 10 МэВ; б) нуклонная линия γ -излучения, эмиссия на интервале 1—10 МэВ и эмиссия пионного распада (более 50 МэВ). Эксперименты на спутниках SMM, GRANAT, INTERGAL и других позволили накопить множество данных о солнечных γ -лучах в самых разных энергетических интервалах, среди которых находятся эмиссия линий нейтронного захвата в 2,223 МэВ, тормозного излучения ядер на ~ 8 МэВ и регистрация (в течение 8 ч после импульсной фазы вспышки 11.01.1991 пионного γ -излучения с энергией более чем 1 ГэВ [Chupp, 1996]. С помощью γ -излучения в интервале 1—10 МэВ в некоторых импульсных SPEs было обнаружено 1000-кратное возрастание ^3He относительно его фотосферного содержания [Cliver et al., 1998]. Новейшие достижения солнечной γ -астрономии, некоторые ее важные геофизические приложения отмечены в работе [Murphy, Share, 2005].

Высокоэнергетичные солнечные нейтроны.

Первые солнечные нейтроны были зарегистрированы возле Земли на спутник eGRS/SMM 21.01.1980 г. Вслед за этим (в 1982 г.) была проведена одновременная регистрация нейтронных потоков от Солнца с помощью спутниковых и наземных детекторов (03.06.1982 г.). В течение 1980—2005 гг. на спутниках, наземных нейтронных мониторах и на некоторых высокогорных солнечных нейтронных телескопах наблюдалось 28 нейтронных событий. Всплеск высокоэнергетичных солнечных нейтронов 07.09.2005 сопровождался всплесками мягкого рентгеновского излучения и длинноволновым радиоизлучением II типа (по данным спутника GOES), а также всплесками жесткого рентгеновского излучения > 50 кэВ (по данным спутника GEOTATL). В это же время орбитальная лаборатория INTEGRAL детектировала γ -излучения в мегаэлектронвольтном диапазоне (см. обзор [Miroshnichenko, Perez-Pereza, 2008] и ссылки в нем). Модель импульсной нейтронной эмиссии в присутствии х-лучей и γ -излучений не объясняет адекватно длинный хвост детектируемых нейтронных сигналов. Пока также не понятно как взаимодействуют с атмосферой Земли потоки таких высокоэнергетичных нейтронов.

Корональные выбросы массы. На протяжении свыше трех десятилетий перед началом нового века корональные выбросы солнечного вещества или корональные эжекции массы (СМЕs) регистрировались в качестве спорадических явлений, детектируемых на многих длинах волн электромагнитного спектра рентгеновского, ультрафиолетового, микроволнового и радио-излучений. Усовершенствование техники межпланетных наблюдений на рубеже нового тысячелетия позволило получить статистические характеристики этих мощных солнечных воздействий на земную атмосферу. С помощью коронографа LASCO на борту спутника SOHO было обнаружено 841 СМЕs типа частичного (PH) и полного (FH) гало на орбите Земли только за период с января 1996 г. по июнь 1998 г. и изучены их статистические характеристики распределения по скоростям, угловым размерам и солнечным широтам [Cyr et al., 2000]. Авторы не смогли идентифицировать так называемые “быстрые эжекции”, а только СМЕs, видимые угловые размеры которых составляют $\sim 72^\circ$ на линии Солнце—

Земля, и гало-события, часто ответственные за появление геомагнитных бурь с $K_p \geq 6$. Пока не обнаружены также СМЕs, возникающие в верхней, а не в нижней короне. Почти все наблюдавшиеся СМЕs сопровождались всплесками радиоизлучения II типа. Вероятно, они возбуждают ударные корональные и межпланетные волны, дополнительно ускоряющие заряженные частицы.

Далеко не все СМЕs имеют одинаковые и постоянные скорости. Распределение их направленных к Земле скоростей асимметричное, так что при средней скорости в 400 км/с некоторые СМЕs достигают скорости ~ 100 км/с. В силу этого они могут опережать друг друга и взаимодействовать между собой. Эти взаимодействия, по-видимому, изменяют составы СМЕs и генерируют потоки ускоренных частиц, в основном электронов, протонов и, возможно, α -частиц [Burlaga et al., 2001]. Первый случай взаимодействия двух СМЕs наблюдался на длинных радиоволнах (21—280 м, 1—14 МГц) на борту спутника WIND 10.06.2000 г., когда более медленное СМЕ было поглощено более быстрым: соответствующие скорости составляли ~ 400 км/с и более 1000 км/с [Gopalswamy et al., 2001]. Взаимодействие сопровождалось интенсивными радиовсплесками II и III типа и отклонением траектории более медленного СМЕ. Авторы называют это явление СМЕ-каннибализмом. Такие воздействия могут иметь важные последствия для космической погоды, так как они, очевидно, изменяют составы обоих СМЕs и объясняют отсутствие эффектов некоторых зарегистрированных СМЕs на орбите Земли. Плотность медленного СМЕ авторы оценили, исходя из эмиссионных характеристик радиовозрастания, как $\sim 4 \cdot 10^4$ см $^{-3}$. Быстрые эжекции эпизодически наблюдались на протяжении всего XX ст. В разное время их называли плазменными или турбулентными облаками, магнитными языками и даже СМЕ-эжекциями. Только в начале 2000-х годов удалось установить их солнечные источники, измерить составы и другие плазменные характеристики, а также обосновать предположение о том, что по крайней мере некоторые из этих структур образуются при взаимодействии двух и более СМЕs.

По данным спутника ACE за период с февраля по ноябрь 1999 гг. были определены быст-

рые эжекции как транзитные, некоротирующие плазменные потоки, которые движутся с максимальной скоростью более 600 км/с, и регистрируются на орбите Земли в течение одного или нескольких дней. Идентифицировано два вида магнитобыстрых эжекций: магнитные облака, локальная магнитная структура которых сравнительно упорядочена, и комплексные эжекции с неупорядоченными магнитными полями [Burlaga et al., 2001]. Магнитные облака вызывают геомагнитные бури с $K_p > 6$ и имеют единственный источник на Солнце, тогда как почти все комплексные эжекции имеют несколько солнечных источников и, по-видимому, обусловлены взаимодействием двух или даже нескольких СМЭс. Такие магнитные структуры могут в течение нескольких дней влиять на ионизационные характеристики земной атмосферы.

При исследовании влияния взаимодействий СМЭс на интенсивность SPEs обнаружена прямая корреляция потоков рентгеновского излучения, связанного с этими взаимодействиями, со скоростями быстрых ($V > 800$ км/с) СМЭс [Gopalswamy et al., 2005]. Эта корреляция, возможно, указывает на то, что быстрые СМЭс дополнительно ускоряют вблизи Солнца не только протоны, но и более тяжелые ядра.

Обнаружение большой частоты появления направленных к Земле СМЭс имеет большое значение в связи с предположением об ускорении заряженных частиц не только во вспышке на Солнце, но и ударными волнами в межпланетном пространстве. Будучи источниками ударных волн, СМЭс, очевидно, должны влиять на энергетические и временные характеристики связанных с ними SPEs. Решающую роль СМЭ-возбужденных ударных корональных волн в динамике SPEs одними из первых теоретически обосновали [Kahler et al., 1987]. Затем были проанализированы случаи продолжительных возрастаний потоков солнечных релятивистских протонов с $E > 15$ МэВ, зарегистрированные на спутнике GOES между 1984 и 1989 г., и показано, что все 12 таких случаев, совпавшие по времени с наблюдениями коронографа на спутнике SMM, были связаны с появлениями СМЭс [Kahler, 1993]. Более того, было отмечено, что появление второго СМЭ из той же области вспышки увеличивает продолжительность таких SPEs-событий до 15—20 ч после начала возрастаний (рис. 4). Это явление

объясняется дополнительной эжекцией SPE-частиц, обусловленной вторым СМЭ.

Исследования зависимости интенсивности SPEs от скорости быстрых СМЭс подтвердили их корреляцию [Kahler, Vourlidas, 2005]. Также получено, что быстрые СМЭс дополнительно ускоряют SPEs вблизи от Солнца, что, по-видимому, не исключает возможности дополнительного ускорения, которое создается ударными волнами в межпланетном пространстве некоторых потоков более медленных СМЭс.

Заслуживает особого внимания тот факт, что в перечень надежно идентифицированных с солнечными источниками СМЭ-обусловленных возрастаний потоков релятивистских протонов включены события, связанные с тремя малыми вспышками класса 1 и даже с одной субвспышкой. По-видимому, СМЭс могут эффективно ускорять SPEs, генерированные не только в больших, но также в малых, суб- и рентгеновских вспышках на Солнце [Torsti et al., 1998]. В силу этого можно реально предположить, что случаи длительных возрастаний тяжелых ядер с энергиями более 600 МэВ/нуклон, зарегистрированные на спутниках “Электрон-2.4” в 1964—1965 гг., идентифицированные с тремя подряд вспышками класса 1, также были обусловлены воздействиями тогда еще нерегистрируемых СМЭс [Райченко, 1982].

Связанные с СМЭс еще более продолжительные, длившиеся в течение 3—4 сут 1000-кратные возрастания потоков релятивистских протонов с энергиями ~ 1 —50 МэВ на орбите Земли обнаружили [Torsti et al., 1998]. Они сообщили о регистрации четырех таких событий в течение января—мая 1997 г. с помощью прибора ERNE на борту спутника SOHO во время наблюдений LASCO-коронографа. Событие 07.04.1997 г. было связано со вспышкой мягкого рентгеновского излучения и малой оптической вспышкой. Оно сопровождалось радиовсплесками 2, 3 и 4 типов и было обусловлено СМЭ-выбросом в 14:27 UT 07.04.1997 г. Событие 12.05.1997 г. также ассоциировано со вспышкой мягкого рентгеновского излучения (C1, 3) и малой вспышкой класса 1N и сопровождалось радиовсплесками 3 и 4 типов: оно было обусловлено выбросом СМЭ в 07:35 UT 12.05.1997 г. Отчетливо обнаруживается на временных профилях интенсивности протонов повышение перед началами основных возрастаний, которые авторы связывают с пе-

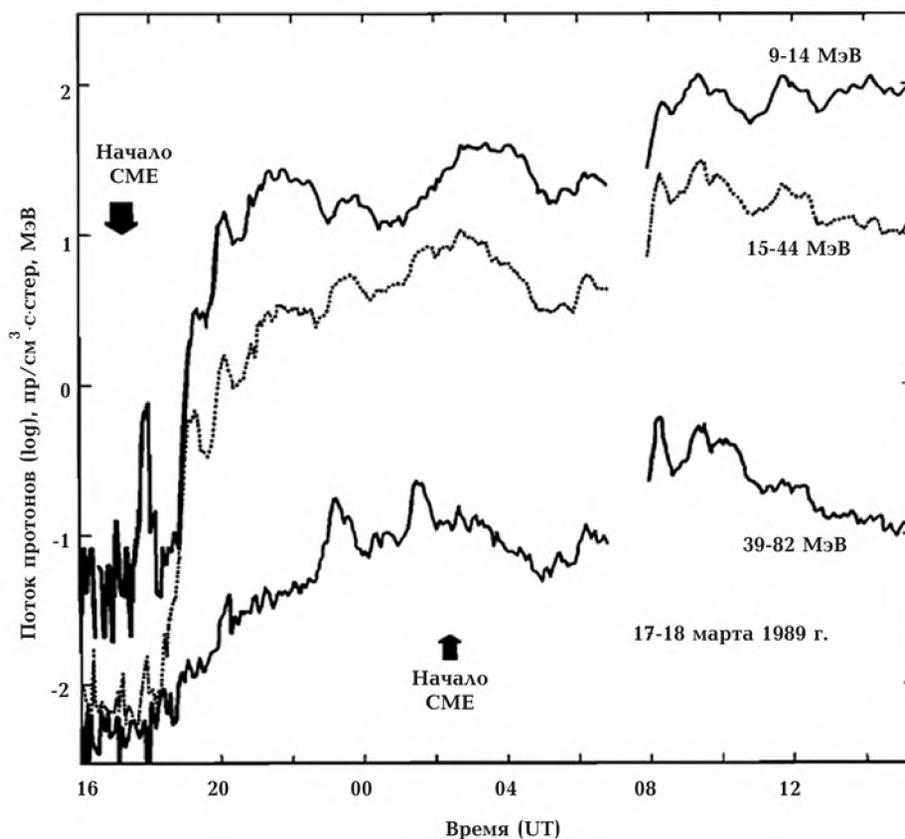


Рис. 4. Протонные потоки, наблюдавшиеся на спутнике GOES в трех интервалах энергии. Начало двух CMEs указано стрелками [Kahler, 1993].

ресоединением магнитных силовых линий на Солнце перед или во время выбросов CMEs после максимума рентгеновской вспышки. Эти результаты определенно указывают, что CMEs могут дополнительно ускорять солнечные частицы и значительно увеличивать продолжительность SPE-событий не только во время вспышек на Солнце, но и ударными волнами в межпланетном пространстве. В силу этого даже сравнительно маломощные солнечные вспышки могут оказаться эффективными источниками ионизации земной атмосферы.

Динамические характеристики CMEs, которые генерируют дополнительные потоки SPEs, изучались в работе [Kocharov et al., 2001]. Они выдвинули гипотезу о том, что эффективность таких CMEs зависит не только от их скорости, но также от характера их ускорения во время подъема в солнечной атмосфере, и протестировали эту гипотезу, используя набор полиномиальных подстановок в скорости CMEs, наблюдавшихся с помощью коронографа LASCO

[Cyr et al., 2000]. Авторы пришли к выводу, что эффективно ускоряют SPEs только те CMEs, которые были импульсно ускорены во время подъема в солнечной атмосфере и сопровождалась вспышками мягкого рентгеновского излучения и корональными ударными волнами.

Этому выводу частично противоречат результаты [Kahler, 1993]. Однако даже если так, то почти регулярное появление у Земли таких высокоскоростных магнитных структур как CME и быстрых эжекций неизбежно будет сопровождаться их взаимодействием с геомагнитным полем, проникновением заряженных частиц в верхние слои атмосферы и, в конечном итоге, изменением динамических ионизационных характеристик земной атмосферы. Таким образом, вопрос о воздействии CMEs на земную атмосферу приобретает чрезвычайно большое значение, хотя он пока еще очень мало изучен.

Классическим примером такого взаимодействия является случай солнечно-атмосферного соединения 12.05.1997 г., когда CME увели-

чило скорость солнечного ветра с 300 до 500 км/с, а его плотность — с ~ 15 до 50 частиц/см³ [Callis et al., 1998]. После этого аппаратура на спутниках SAMPEX и NOAA зарегистрировала 15.05.1997 г. 4—5-кратное возрастание потоков электронов с энергиями более 400 кэВ, которое продолжалось в течение 14 дней. Модельные расчеты для обоих полушарий обнаруживают связанное с этим событием 40—80 %-ное возрастание производства NO_x-составляющих, которое в Южном полушарии достигает высот ~ 25 км. Соответствующее этому понижение озона составляет ~ 20 % в средних широтах и на $\sim 20^\circ$ ю. ш. Вполне возможно, что подобным образом могут воздействовать на атмосферу Земли и все другие СМЕs, в частности те, которые не сопровождаются регистрацией потоков релятивистских протонов на орбите Земли [Kochanov et al., 2001].

Недавно [Антонов, Герасимов, 2011] обнаружили тропосферные эффекты некоторых СМЕs, связанных с оптическими и рентгеновскими вспышками в период 2001—2006 гг. по данным метеорологических станций, расположенных в интервале от $74,5^\circ$ до $57,75^\circ$ с. ш., с помощью метода наложения эпох, в котором за 0-дни принимались сутки, в течение которых СМЕs прибывали к Земле. Моменты таких прибытий СМЕs определялись по началам геомагнитных возмущений. Авторы показали, что под воздействием некоторых СМЕs на высотах более 10 км температура увеличивается почти на 10°C , а давление падает до ~ 13 гПа. Если так, то это свидетельствует о возможном понижении высот образования NO_x атмосферных составляющих до уровня средней атмосферы, которое обусловлено воздействием СМЕs.

Эти наблюдения позволяют вполне обоснованно предположить, что направленные к Земле СМЕs возмущают геомагнитное поле Земли и эффективно ионизируют атмосферу на всех высотах вплоть до уровня тропосферы, как это происходит во время наземных возрастаний СКЛ. Частые прибытия СМЕs к Земле, возможно, могут объяснить большую частоту нитратных максимумов в высокоразрешенных записях из полярных льдов обоих полушарий.

Таким образом, можно заключить, что помимо всего спектра составов и излучений во время больших солнечных вспышек источниками

ионизации могут служить также СМЕs, солнечный ветер, магнитосферные высыпания электронов под воздействием межпланетных ударных волн, малые и рентгеновские вспышки и еще многие другие процессы. Эффективность каждого из этих источников зависит от конкретных солнечных условий, но все вместе они создают в земной атмосфере непрерывный ионизационный “фон”, который может превышать ионизацию, обусловленную потоками ГКЛ.

Выводы. В связи с развитием и долговременным использованием измерительной аппаратуры на спутниках и одновременным усовершенствованием техники модельных вычислений, за последние десятилетия достигнут значительный прогресс в исследовании целого ряда корпускулярных потоков, ионизирующих земную атмосферу от поверхности до верхней атмосферы на высоте 100—500 км. Далее мы перечислим основные результаты, полученные за последние десятилетия при изучении этих явлений.

Спутниковые измерения показали эффективность больших вариаций потоков солнечного УФ-излучения в ионизации средней и нижней атмосферы и создании значимых вариаций озона на коротких временных шкалах. Разработаны современные модели вычисления ионизации, обусловленной корпускулярным излучением; получены некоторые новые доказательства изменения атмосферных параметров под воздействием ГКЛ за счет образования каскадов в периоды минимумов солнечной активности. Вероятно, в этих процессах участвуют также солнечное УФ-излучение и потоки тяжелых ядер от GLEs СКЛ. Наблюдения солнечных электронов позволяют предположить, что их поток к Земле и ионизация ими мезосферы и термосферы непрерывны. Такой же эффект создают высыпания низкоэнергетичных магнитосферных электронов под воздействием солнечного ветра. Попадая во внешнюю атмосферу Земли на высотах 100—500 км, горячие солнечные электроны многократно ускоряются здесь в сложных магнитных полях Земли, соединенных с магнитными полями солнечного ветра. Так образуется “ореол” вокруг Земли с температурами $\sim 1000^\circ$. Теряя свою энергию, эти частицы постепенно опускаются в верхнюю атмосферу, вызывая ее дополнительную ионизацию. Продукты ионизации могут снижаться в стратосферу и верхнюю тропосферу за счет меха-

низмов перемешивания слоев и вызывать здесь статистически значимые понижения озона.

Вероятность регистрации солнечных протонных событий SPEs увеличивается по мере уменьшений их мощности: так при $E \leq 10$ МэВ (для протонов) частота появления событий составляет более чем 250 событий в год. Фактически Солнце является перманентным источником появления SPEs и регистрации потоков низкоэнергетичных протонов на орбите Земли. Солнечные протоны одновременно являются самым мощным источником атмосферной ионизации [Кочаров, 1976]. Зарегистрированы наземные эффекты, связанные с малыми вспышками на Солнце. Появились основания для подтверждения выдвинутой много лет назад [Гинзбург, Гуревич, 1960] и незаслуженно забытой гипотезы о преимущественном ускорении тяжелых ядер в стохастических солнечных процессах. Обнаружены потоки высокоэнергетичных солнечных нейтронов. Изучается солнечное γ -излучение в широком интервале энергий от менее чем 1 МэВ до более чем 1 ГэВ, которое эффективно ионизирует атмосферу.

Одним из важнейших открытий в области солнечно-земных связей стало обнаружение большой частоты появления у Земли солнечных корональных выбросов массы (841 за 2,5 года) и изучение их характеристик. Оказалось, что быстрые ($V > 800$ км/с) CMEs с помощью ударных волн дополнительно ускоряют потоки SPEs вблизи областей их генерации на Солнце. Энергии протонов достигают ~ 50 МэВ, а продолжительности SPEs увеличиваются до нескольких часов и даже нескольких суток. Медленные ($V < 800$ км/с)

CMEs могут сливаться с солнечным ветром, значительно (с 300 до 500 км/с) увеличивая его скорость и в разы плотность протонов. В результате таких воздействий высоты атмосферной ионизации снижаются до тропосферных уровней в полярных областях и, возможно, в средних широтах. При этом некоторые CMEs могут дополнительно ускорять потоки SPEs ударными волнами в межпланетном пространстве, значительно (на сутки) увеличивая продолжительность этих событий. Это полностью меняет представление о том, что, кроме GLEs, СКЛ активизируют земную атмосферу только до высот ~ 35 км во время сравнительно редких больших солнечных вспышек. Напротив, под воздействием CMEs эффективными источниками атмосферной ионизации могут оказаться не только оптические, но и рентгеновские вспышки на орбите Земли. Часто появляются тысячекратные возрастания солнечных релятивистских протонов и высоты атмосферной ионизации могут снижаться до тропосферных уровней.

Поэтому можно заключить, что роль солнечных источников в ионизации атмосферы достаточно велика. Обнаруженные частые появления CMEs у Земли могут объяснить частоту нитратных максимумов на высоко разрешенных ледовых записях из обоих полушарий, а при изучении влияния атмосферной ионизации на прошлый и будущий климат Земли необходимо учитывать множественные ее источники: ГКЛ и СКЛ, осаждение релятивистских и солнечных электронов, авроральные процессы, солнечное коротковолновое излучение и т. д.

Список литературы

- Авакян С. В. Физика солнечно-земных связей: результаты, проблемы и новые подходы. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. Т. 48. № 4. С. 435—442.
- Антонов А. В., Герасимов Ю. М. Оценка влияния солнечных вспышек на тропосферу Земли. *Космічна наука і технологія*. 2011. Т. 17. № 1 С. 47—51.
- Артамонова И. В., Веретененко С. В. Влияние вариаций галактических космических лучей на динамические процессы в нижней атмосфере. *Вестник СПбГУ. Сер. 4*. 2011. Вып. 2. С. 15—23.
- Базилевская Г. А., Махмутов В. С., Свиржевская А. К., Свиржевский Н. М. Динамика потоков заряженных частиц в тропосфере Земли после 1990 г. *Известия РАН. Сер. физ.* 2009. Т. 73. № 3. С. 405—307.
- Гинзбург В. Л., Гуревич А. В. Нелинейные эффекты в плазме, находящейся в переменном электромагнитном поле. *Успехи физ. наук*. 1960. Т. 70. № 3. С. 393—428. doi: 10.3367/UFN.0070.196003a.0393.

- Килифарска Н. А., Бахмутов В. Г., Мельник Г. В. Связь изменений климата с геомагнитным полем. 3. Северное и Южное полушария. *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 52—71.
- Кочаров Г. Е. Ядерные реакции на Солнце. Москва: Знание, 1976. 64 с.
- Криволицкий А. А., Репнев А. И. Воздействие космических энергетичных частиц на атмосферу Земли (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия.* 2012. Т. 52. № 6. С. 723—754.
- Криволицкий А. А., Куминов А. А., Куколева А. А., Репнев А. И., Переяслова Р. К., Назарова М. Н. Протонная активность Солнца в 23-м цикле активности и изменения в озоносфере: численное моделирование и анализ данных наблюдений. *Геомагнетизм и аэрономия.* 2008. Т. 48. № 4. С. 450—464.
- Райченко Л. В. Воздействие солнечного корпускулярного излучения на атмосферу Земли: современное состояние проблемы. *Геофиз. журн.* 2010. Т. 32. № 5. С. 82—101.
- Райченко Л. В. О влиянии секторной структуры ММП на распространение частиц, ускоренных в малых вспышках на Солнце. В кн.: *Методика интерпретации и результаты исследований аномальных геофизических полей.* Киев: Наук. думка, 1982. 127 с.
- Сыроватский С. И., Сомов Б. В. Физика солнечных вспышек. Теория наблюдаемых проявлений вспышек. В сб.: *Вспышки на звездах (сверхновые, рентгеновские источники, Солнце).* Т. 21. Москва: Изд-во ВИНТИ АН СССР, 1982. С. 221—237.
- Шуйская Ф. К., Гальперин Ю. И., Ковражкин Р. А., Кузьмин А. К., Степанов В. А., Горн Л. С., Хазанов Б. И. Измерения энергетичных заряженных частиц на высоких широтах: эксперимент СКАЗ на спутнике “Интербол 2” (Авроральный зонд). *Космические исследования.* 1998. Т. 36. № 1. С. 86—97.
- Bazilevskaya G. A., Makhmutov V. S., Stozhkov Y. I., Svirzhetskaya A. K., Svirzhetsky N. S., 2010. Solar proton events recorded in the stratosphere during cosmic ray balloon observations in 1957—2008. *Adv. Space Res.* 45(5), 603—613. doi: 10.1016/j.asr.2009.11.009.
- Bazilevskaya G. A., Usoskin I. G., Flückiger E. O., Harrison R. G., Desorgher L., Butikofer R., Krainev M. B., Makhmutov V. S., Stozhkov Y. I., Svirzhetskaya A. K., Svirzhetsky N. S., Kovaltsov G. A., 2008. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. *Space Sci. Rev.* 137, 149—173. doi: 10.1007/s11214-008-9339-y.
- Burlaga L. F., Skoug R. M., Smith C. W., Webb D. F., Zurbuchen T. H., Reinard A., 2001. Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998—1999. *J. Geophys. Res.* 106(A10), 20957—20977. doi: 10.1029/2000JA000214.
- Callis L. B., Natarajan M., Evans D. S., Lambeth J. D., 1998. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 1. Effects of May 12, 1997 solar event on the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.* 103(D21), 28405—28419. doi: 10.1029/98JD02408.
- Callis L. B., Natarajan M., Lambeth J. D., 2001. Solar-atmospheric coupling by electrons (SOLACE) 3. Comparisons of simulations and observations 1979—1997 issues and implications. *J. Geophys. Res.* 106(D7), 7523—7539. doi: 10.1029/2000JD900615.
- Callis L. B., Natarajan M., Lambeth J. D., 2002. Observed and calculated mesospheric NO, 1992—1997. *Geophys. Res. Lett.* 29(2), 17-1—17-4. doi: 10.1029.2001GL013995.
- Chupp E. L., 1996. Evolution of our understanding of solar flare particle acceleration: (1942—1995). In: *High Energy Solar Physics.* AIP Publ. 374, 3—31.
- Cliver E., 1996. Solar flare gamma-ray emission and energetic particles in space. In: *High Energy Solar Physics.* AIP Publ. 374, 45—60.
- Cliver E. W., 2006. The Unusual Relativistic Solar Proton Events of 1979 August 21 and 1981 May 10. *Astrophys. J.* 639, 1206—1217. doi:10.1086.499765.
- Cliver E., Boriakoff V., Feynman J., 1998. Solar variability and climate change: geomagnetic aa index and global surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1035—1038. doi: 10.1029/98GL00499.
- Crosby N. B., Aschwanden M. J., Dennis B. R., 1993. Frequency distributions and correlations of solar X-ray flare parameters. *Solar Phys.* 143, 275—299. doi: 10.1007/BF00646488.
- Cyr O. C. St., Howard R. A., Sheeley Jr. N. R., Plunkett S. P., Michels D. J., Paswaters S. E., Koomen M. J., Simnett G. M., Thompson B. J., Gurman J. B., Schwenn R., Webb D. F., Hildner E., Lamy P. L., 2000. Properties of coronal mass ejections’ SOHO LASCO observations from January 1996 to June 1998. *J. Geophys. Res.* 105(A8), 18169—18185. doi: 10.1029/1999JA000381.
- Desorgher L., Flückiger E. O., Gurtner M., Moser M. R.,

- Bütikofer R., 2005. ATMOCOSMICS: a GEANT4 code for computing the interaction of cosmic rays with the Earth's atmosphere. *Int. J. Mod. Phys. A20*, 6802—6804. doi: 10.1142/S0217751X05030132.
- Dietrich W., Lopate C., 1999. Measurements of iron reach SEP events using the University of Chicago IMP8 instrument: *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, USA*. Vol. 6. P. 71—74.
- Duplissy J., Enghoff M. B., Aplin K. L., Arnold F., Aufmhoff H., Avngaard M., Baltensperger U., Bondo T., Bingham R., Carslaw K., Curtius J., David A., Fastrup B., Gagné S., Hahn F., Harrison R. G., Kellelt B., Kirkby J., Kulmala M., Laakso L., Laaksonen A., Lillestol E., Lockwood M., Mäkelä J., Makhmutov V., Marsh N. D., Nieminen T., Onnela A., Pedersen E., Pedersen J. O. P., Polny J., Reichl U., Seinfeld J. H., Sipilä M., Stozhkov Y., Stratmann F., Svensmark H., Svensmark J., Veenhof R., Verheggen B., Viisanen Y., Wagner P. E., Wehrle G., Weingartner E., Wex H., Wilhelmsson M., Winkler P. M., 2010. Results from the CERN pilot CLOUD experiment. *Atmos Chem. Phys.* 10(4), 1635—1647. doi: 10.5194/acp-10-1635-2010.
- Enghoff M. B., Pedersen J. O. P., Uggerhøj U. I., Paalung S. M., Svensmark H., 2011. Aerosol nucleation induced by a high energy particle beam. *Geophys. Res. Lett.* 38(9), L09805. doi: 10.1029/2011GL047036.
- Ferguson E. E., 1979. "Ion Chemistry of the Middle Atmosphere" in NASA CP 2090. National Aeronautics and Space Administration. P. 71—88.
- Feynman J., Spitale G., Wang J., Gabriel S., 1993. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991. *J. Geophys. Res.* 98, 13281. doi: 10.1029/92JA02670.
- Frame T. H. A., Gray L. J., 2010. The 11-year solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008. *J. Climate* 23, 2213—2222. doi: http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI13150.1.
- Geller M. A., Alpert J. C., 1980. Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible Sun-weather mechanism. *J. Atmos. Sci.* 37, 1197—1215. doi: http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<1197: PWCB TT>2.0.CO;2.
- Gladysheva O. G., Iwasaka Y., Kocharov G. E., Muraki Y., 1995. Unique possibility to obtain upper limit of total energy induced by solar flare protons: *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy*. Vol. 4, P. 1129—1131.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M. L., Howard R. A., Bougeret J.-L., 2001. Radio signatures of coronal mass ejection interaction: coronal mass ejection cannibalism? *Astrophys. J. Lett.* 548, L91—L94.
- Gopalswamy N., Hie H., Yashiro S., Usoskin I., 2005. Coronal mass ejections and ground level enhancements: *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf., Pune, India*. Vol. 1, P. 169—172.
- Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., van Geel B., White W., 2010. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.* 48, RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
- Haigh J. D., Blackburn M., 2006. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. *Space Sci. Rev.* 125, 331—344. doi: 10.1007/s11214-006-9067-0.
- Jackman C. H., Fleming E. L., Vitt F. M., 2000. Influence of extremely large solar proton events in changing stratosphere. *J. Geophys. Res.* 105(D9), 11659—11670. doi: 10.1029/2000JD900010.
- Jackman C. H., Marsh D. R., Vitt F. M., Roble R. G., Randall C. E., Bernath P. F., Funke B., Lypez-Puertas M., Versick S., Stiller G. P., Tylka A. J., Fleming E. L., 2011. Northern Hemisphere atmospheric influence of the solar proton events and ground level enhancement in January 2005. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 6153—6166. doi: 10.5194/acp-11-6153-2011.
- Jackman C. H., Marsh D. R., Vitt F. M., Garcia R. R., Fleming E. L., Labow G. J., Randall C. E., Lypez-Puertas M., von Clarmann T., Stiller G. P., 2008. Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 765—785. doi: 10.5194/acp-8-765-2008.
- Kahler S. W., 1993. Coronal mass ejections and long risetimes of solar energetic particle events. *J. Geophys. Res.* 98(A4), 5607—5615. doi: 10.1029/92JA02605.
- Kahler S. W., Cliver E. W., Cane H. V., McGuire R. E., Reames D. V., Sheeley Jr. N. R., Howard R. A., 1987. Solar energetic proton events and coronal mass ejections near solar minimum: *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.*, Vol. 3, 121 p.
- Kahler S. W., Vourlidas A., 2005. Fast coronal mass ejection environments and the production of solar energetic particle events. *J. Geophys. Res.* 110, A12S01. doi: 10.1029/2005JA011073.
- Kocharov L., Torsti J., Cyr O. C. St., Huhtanen T., 2001. A relation between dynamics of coronal mass

- ejections and production of solar energetic particles. *Astron. Astrophys.* 370, 1064—1070. doi: 10.1051/0004-6361:20010241.
- Krivova N. A., Balmaceda L., Solanki S. K., 2007. Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux. *Astron. Astrophys.* 467, 335—346. doi: 10.1051/0004-6361:20066725.
- Kurt V. G., Logachev Yu. I., Stolpovsky V. G., Dabog E. I., 1981. Energetic solar particle spectra according to Venera-11, 12 and Prognoz-5, 6 observations: *Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris, France*. Vol. 3, P. 69—72.
- Miller J. A., Cargill P. J., Emslie A. G., Holman G. D., Dennis B. R., La Rosa T. N., Winglee R. M., Benkaand S. G., Tsuneta S., 1997. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares. *J. Geophys. Res.* 102, 14631—14659. doi: 10.1029/97JA00976.
- Mironova I. A., Desorgher L., Usoskin I. G., Flückiger E. O., Bütikofer R., 2008. Variations of aerosol optical properties during the extreme solar event in January 2005. *Geophys. Res. Lett.* 35, L18610. doi: 10.1029.2008GL035120.
- Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J. A., 2008. Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays. *Int. J. Mod. Phys.* 23(1), 1—141. doi: 10.1142/S0217751X08037312.
- Mishev A. L., Velinov P. I. Y., Mateev L., Tassev Y., 2011. Ionization effect of solar protons in the Earth atmosphere — case study of the 20 January 2005 SEP event. *Adv. Space Res.* 48(7), 1232—1237. doi: 10.1016/j.asr.2011.06.004.
- Murphy R. J., Share G. H., 2005. What gamma-ray de excitation lines reveal about solar flares. *Adv. Space Res.* 35(10), 1825—1832. doi: 10.1016/j.asr.2005.03.004.
- Prölss G. W., 2004. *Physics of the Earth's Space Environment: an Introduction*. Berlin: Springer, 275 p. doi: 10.1007/978-3-642-97123-5.
- Randel W. J., Wu F., 2007. A stratospheric ozone profile dataset for 19792005: Variability, trends and comparisons with column ozone data. *J. Geophys. Res.* 112, D06313. doi: 10.1029.2006JD007339.
- Reames D. V., 2002. Magnetic topology of impulsive and gradual solar energetic particle events. *Astrophys. J.* 571, L63—L66. doi: 10.1086/341149.
- Reames D. V., 2000. Abundances of Trans-Iron Elements in Solar Energetic Particle Events. *Astrophys. J.* 540(2), L111—L114. doi:10.1086/312886.
- Reedy R. C., 1980. Lunar radionuclide records of average solar cosmic ray fluxes over the last ten million years: *Proc. Conf. Ancient Sun*. New York: Pergamon Press, P. 365—386.
- Shea M. A., Smart D. F., Dreschhoff G. A. M., Zeller E. J., 1993. The flux and fluence of major solar proton events and their record in Antarctic snow. *Reprint from 23rd International Cosmic Ray Conference*. Conference Papers, Vol. 3, P. 846—849.
- Smart D., Shea M., 1971. Solar proton event classification system. *Sol. Phys.* 16, 484—487. doi: 10.1007/bf00162491.
- Stendel M., Mogensen I. A., Christensen J. H., 2006. Influence of various forcings on global climate in historical times using a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Clim. Dyn.* 26, 1—15. doi:10.1007.s00382-005-0041-4.
- Torsti J., Anttila A., Kocharov L., Mäkelä P., Riihonen E., Sahla T., Teittinen M., Valtonen E., Laitinen T., Vainio R., 1998. Energetic (~ 1 to 50 MeV) proton associated with Earth-directed coronal mass ejections. *Geophys. Res. Lett.* 25(14), 2525—2528. doi: 10.1029/98GL50062.
- Tung K. K., Zhou J., Camp C. D., 2008. Constraining model transient climate response using independent observations of solar-cycle forcing and response. *Geophys. Res. Lett.* 35, L17707. doi: 10.1029/2008GL034240.
- Tylka A. J., Cohen C. M. S., Dietrich W. F., Lee M. A., MacLennan C. G., Mewaldt R. A., Ng C. K., Reames D. V., 2005. Shock Geometry, Seed Populations, and the Origin of Variable Elemental Composition at High Energies in Large Gradual Solar Particle Events. *Astrophys. J.* 625, 474—495. doi:10.1086/429384.
- Tylka A. J., Dietrich W. F., Lopate C., Reames D. V., 1999. High Energy Solar Fe Ions in the 29 September 1989 Ground Level Event: *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City*, 6, 6770.
- Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., 2006. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications. *J. Geophys. Res.* 111, D21206. doi:10.1029.2006JD007150.
- Usoskin I. G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G. A., Mursula K., 2005. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951—2004. *J. Geophys. Res.* 110, A12108. doi: 10.1029.2005JA011250.
- Usoskin I. G., Gladysheva O. G., Kovaltsov G. A., 2004. Cosmic ray — induced ionization in the

- atmosphere: spatial and temporal changes. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66, 1791—1796. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.037.
- Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., Mironova I. A., Tytka A. J., Dietrich W. F.*, 2011. Ionization effect of solar particle GLE events: Low and middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 11(is. 5), 1979—1988. <http://www.atmos-chem-phys.net/11/1979/2011/acp-11-1979-2011.html>.
- Velinov P. I. Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A., Tonev P.*, 2013. Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere. *J. Space Weather Space Clim.* 3, A14. doi: 10.1051/swsc/2013036.
- Vitt F., Jackman C.*, 1996. A comparison of sources of odd nitrogen production from 1974 through 1993 in the Earth's middle atmosphere as calculated using a two dimensional model. *J. Geophys. Res.* 101, 6729—6739. doi: 10.1029/95JD03386.
- Zeller E. J., Dreschho G. A. M., Laird C. M.*, 1986. Nitrate flux on the Ross Ice Shelf, Antarctica and its relation to solar cosmic rays. *Geophys. Res. Lett.* 13, 1264—1267. doi: 10.1029/GL013i012p01264.

Cosmic sources of the Earth's atmosphere ionization (review)

© *L. V. Raychenko, G. V. Melnik, 2017*

Characteristics of the Earth's upper atmosphere vary constantly under the action of electromagnetic emission of the sun, solar wind, streams of galactic and solar cosmic rays as well as of precipitation of captured magnetosphere electrons. Depending on their energies charged particles and solar radiation penetrate into different atmospheric layers ionizing them and changing their composition, dynamic and temperature characteristics that finally produce essential climatic variations. Up to recent period the particles of galactic cosmic rays were taken into consideration as the main source of ionization of the lower layers of the atmosphere. Development of the measuring equipment and accumulation of long series of satellite and terrestrial observations as well as simultaneous improvement of model calculations allowed attaining a considerable progress in the studies of the whole series of corpuscular streams ionizing the Earth's atmosphere from the surface to the upper atmosphere. Different sources ionizing the Earth's atmosphere have been considered in this review. It has been shown that considerable part in ionizing atmosphere belongs to the particles of solar origin with concentration in circumterrestrial space much higher than was considered before and their streams are not only sporadic but also continuous. Accounting of multiplicity of solar sources of ionization may turn out useful while modeling climatic variations in short and long temporal scales.

Key words: galactic cosmic rays, solar cosmic rays, ionization of atmosphere.

References

- Avakyan S. V.*, 2008. Physics of solar-terrestrial coupling: results, problems and new approaches. *Geomagnetism and Aeronomy* 48(4), 417—424 (in Russian). doi: 10.1134/S0016793208040014.
- Antonov A. V., Gerasimov Yu. M.*, 2011. Estimation of the influence of solar flares on the Earth's troposphere. *Kosmichna nauka i tekhnologiya* 17(1), 47—51 (in Russian).
- Artamonova I. V., Veretenenko S. V.*, 2011. Influence of variations of galactic cosmic rays on dynamic processes in the lower atmosphere. *Vestnik SPbGU. Ser. 4*(is. 2), 15—23 (in Russian).
- Bazilevskaya G. A., Makhmutov V. S., Svirzhevskaya A. K., Svirzhevskiy N. M.*, 2009. Dynamics of charged particle fluxes in Earth's troposphere since 1990. *Bull. of the Russian Academy of Sciences: Physics* 73(3), 387—389 (in Russian). doi: 10.3103/S1062873809030320.
- Ginzburg V. L., Gurevich A. V.*, 1960. Nonlinear phenomena in a plasma located in an alternating elect-

- geomagnetic field. *Sov. Phys. Usp.* 70(3), 175—194. (in Russian). doi: 10.1070/PU1960v003n02ABEH003267.
- Kilifarska N. A., Bakhmutov V. G., Melnik G. V., 2016. Relationship of climate changes with geomagnetic field. 3. Northern and Southern hemisphere. *Geofizicheskiy zhurnal* 38(3), 52—71 (in Russian).
- Kocharov G. E., 1976. Nuclear reactions to the Sun. Moscow: Znaniye, 64 p. (in Russian).
- Krivolutskiy A. A., Repnev A. I., 2012. Impact of space energetic particles on the Earth's atmosphere (a review). *Geomagnetism and Aeronomy* 52(6), 685—716 (in Russian). doi: 10.1134/S0016793212060060.
- Krivolutskiy A. A., Kuminov A. A., Kukoleva A. A., Repnev A. I., Pereyaslova R. K., Nazarova M. N., 2008. Solar proton activity during cycle 23 and changes in the ozonosphere: Numerical simulation and analysis of observational data. *Geomagnetism and Aeronomy* 48(4), 432—445 (in Russian). doi: 10.1134/S0016793208040038.
- Raychenko L. V., 2010. Influence of solar corpuscular radiation on the Earth's atmosphere: the current state of the problem. *Geofizicheskiy zhurnal* 32(5), 82—101 (in Russian).
- Raychenko L. V., 1982. On the effect of the MMF sector structure on the propagation of particles accelerated in small flares on the Sun. In: *Interpretation technique and results of studies of anomalous geophysical fields*. Kiev: Naukova Dumka, 127 p. (in Russian).
- Syrovatskiy S. I., Somov B. V., 1982. The physics of solar flares. The theory of observed manifestations of flares. In: *Flashes on stars (supernovas, X-ray sources, Sun)*. Vol. 21. Moscow: Academy of Sciences of the USSR, P. 221—237 (in Russian).
- Shuyskaya F. K., Galperin Yu. I., Kovrazhkin R. A., Kuzmin A. K., Stepanov V. A., Gorn L. S., Khazanov B. I., 1998. Measurements of energetic charged particles at high latitudes: experiment SCA3 on the satellite Interball2 (Auroral probe). *Kosmicheskiye issledovaniya* 36(1), 86—97 (in Russian).
- Bazilevskaya G. A., Makhmutov V. S., Stozhkov Y. I., Svirzhhevskaya A. K., Svirzhhevsky N. S., 2010. Solar proton events recorded in the stratosphere during cosmic ray balloon observations in 1957—2008. *Adv. Space Res.* 45(5), 603—613. doi: 10.1016/j.asr.2009.11.009.
- Bazilevskaya G. A., Usoskin I. G., Flückiger E. O., Harrison R. G., Desorgher L., Butikofer R., Kravnev M. B., Makhmutov V. S., Stozhkov Y. I., Svirzhhevskaya A. K., Svirzhhevsky N. S., Kovaltsov G. A., 2008. Cosmic ray induced ion production in the atmosphere. *Space Sci. Rev.* 137, 149—173. doi: 10.1007/s11214-008-9339-y.
- Burlaga L. F., Skoug R. M., Smith C. W., Webb D. F., Zurbuchen T. H., Reinard A., 2001. Fast ejecta during the ascending phase of solar cycle 23: ACE observations, 1998—1999. *J. Geophys. Res.* 106(A10), 20957—20977. doi: 10.1029/2000JA000214.
- Callis L. B., Natarajan M., Evans D. S., Lambeth J. D., 1998. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE): 1. Effects of May 12, 1997 solar event on the middle atmosphere. *J. Geophys. Res.* 103(D21), 28405—28419. doi: 10.1029/98JD02408.
- Callis L. B., Natarajan M., Lambeth J. D., 2001. Solar atmospheric coupling by electrons (SOLACE) 3. Comparisons of simulations and observations 1979—1997 issues and implications. *J. Geophys. Res.* 106(D7), 7523—7539. doi: 10.1029/2000JD900615.
- Callis L. B., Natarajan M., Lambeth J. D., 2002. Observed and calculated mesospheric NO, 1992—1997. *Geophys. Res. Lett.* 29(2), 17-1—17-4. doi: 10.1029.2001GL013995.
- Chupp E. L., 1996. Evolution of our understanding of solar flare particle acceleration: (1942—1995). In: *High Energy Solar Physics*. AIP Publ. 374, 3—31.
- Cliver E., 1996. Solar flare gamma-ray emission and energetic particles in space. In: *High Energy Solar Physics*. AIP Publ. 374, 45—60.
- Cliver E. W., 2006. The Unusual Relativistic Solar Proton Events of 1979 August 21 and 1981 May 10. *Astrophys. J.* 639, 1206—1217. doi: 10.1086.499765.
- Cliver E., Boriakoff V., Feynman J., 1998. Solar variability and climate change: geomagnetic aa index and global surface temperature. *Geophys. Res. Lett.* 25, 1035—1038. doi: 10.1029/98GL00499.
- Crosby N. B., Aschwanden M. J., Dennis B. R., 1993. Frequency distributions and correlations of solar X-ray flare parameters. *Solar Phys.* 143, 275—299. doi: 10.1007/BF00646488.
- Cyr O. C. St., Howard R. A., Sheeley Jr. N. R., Plunkett S. P., Michels D. J., Paswaters S. E., Koomen M. J., Simnett G. M., Thompson B. J., Gurman J. B., Schwenn R., Webb D. F., Hildner E., Lamy P. L., 2000. Properties of coronal mass ejections' SOHO LASCO observations from January 1996 to June

1998. *J. Geophys. Res.* 105(A8), 18169—18185. doi: 10.1029/1999JA000381.
- Desorgher L., Flückiger E. O., Gurtner M., Moser M. R., Büttikofer R., 2005. ATMOCOSMICS: a GEANT4 code for computing the interaction of cosmic rays with the Earth's atmosphere. *Int. J. Mod. Phys. A* 20, 6802—6804. doi: 10.1142/S0217751X05030132.
- Dietrich W., Lopate C., 1999. Measurements of iron reach SEP events using the University of Chicago IMP8 instrument: *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City, USA*. Vol. 6. P. 71—74.
- Duplissy J., Enghoff M. B., Aplin K. L., Arnold F., Aufmhoff H., Avngaard M., Baltensperger U., Bondo T., Bingham R., Carslaw K., Curtius J., David A., Fastrup B., Gagné S., Hahn F., Harrison R. G., Kelleli B., Kirkby J., Kulmala M., Laakso L., Laaksonen A., Lillestol E., Lockwood M., Mäkelä J., Makhmutov V., Marsh N. D., Nieminen T., Onnela A., Pedersen E., Pedersen J. O. P., Polny J., Reichl U., Seinfeld J. H., Sipilä M., Stozhkov Y., Stratmann F., Svensmark H., Svensmark J., Veenhof R., Verheggen B., Viisanen Y., Wagner P. E., Wehrle G., Weingartner E., Wex H., Wilhelmsson M., Winkler P. M., 2010. Results from the CERN pilot CLOUD experiment. *Atmos Chem. Phys.* 10(4), 1635—1647. doi: 10.5194/acp-10-1635-2010.
- Enghoff M. B., Pedersen J. O. P., Uggerhøj U. I., Pöhlert S. M., Svensmark H., 2011. Aerosol nucleation induced by a high energy particle beam. *Geophys. Res. Lett.* 38(9), L09805. doi: 10.1029/2011GL047036.
- Ferguson E. E., 1979. "Ion Chemistry of the Middle Atmosphere" in NASA CP 2090. National Aeronautics and Space Administration. P. 71—88.
- Feynman J., Spitale G., Wang J., Gabriel S., 1993. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991. *J. Geophys. Res.* 98, 13281. doi: 10.1029/92JA02670.
- Frame T. H. A., Gray L. J., 2010. The 11-year solar cycle in ERA-40 data: An update to 2008. *J. Climate* 23, 2213—2222. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI3150.1>.
- Geller M. A., Alpert J. C., 1980. Planetary wave coupling between the troposphere and the middle atmosphere as a possible Sun-weather mechanism. *J. Atmos. Sci.* 37, 1197—1215. doi: [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469\(1980\)037<1197:PWCBTT>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0469(1980)037<1197:PWCBTT>2.0.CO;2).
- Gladysheva O. G., Iwasaka Y., Kocharov G. E., Muraki Y., 1995. Unique possibility to obtain upper limit of total energy induced by solar flare protons: *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf., Rome, Italy*. Vol. 4, P. 1129—1131.
- Gopalswamy N., Yashiro S., Kaiser M. L., Howard R. A., Bougeret J.-L., 2001. Radio signatures of coronal mass ejection interaction: coronal mass ejection cannibalism? *Astrophys. J. Lett.* 548, L91—L94.
- Gopalswamy N., Hie H., Yashiro S., Usoskin I., 2005. Coronal mass ejections and ground level enhancements: *Proc. 29th Int. Cosmic Ray Conf., Pune, India*. Vol. 1, P. 169—172.
- Gray L. J., Beer J., Geller M., Haigh J. D., Lockwood M., Matthes K., Cubasch U., Fleitmann D., Harrison G., Hood L., Luterbacher J., Meehl G. A., Shindell D., van Geel B., White W., 2010. Solar influences on climate. *Rev. Geophys.* 48, RG4001. doi: 10.1029/2009RG000282.
- Haigh J. D., Blackburn M., 2006. Solar influences on dynamical coupling between the stratosphere and troposphere. *Space Sci. Rev.* 125, 331—344. doi: 10.1007/s11214-006-9067-0.
- Jackman C. H., Fleming E. L., Vitt F. M., 2000. Influence of extremely large solar proton events in changing stratosphere. *J. Geophys. Res.* 105(D9), 11659—11670. doi: 10.1029/2000JD900010.
- Jackman C. H., Marsh D. R., Vitt F. M., Roble R. G., Randall C. E., Bernath P. F., Funke B., Lyepez-Puertas M., Versick S., Stiller G. P., Tylka A. J., Fleming E. L., 2011. Northern Hemisphere atmospheric influence of the solar proton events and ground level enhancement in January 2005. *Atmos. Chem. Phys.* 11, 6153—6166. doi: 10.5194/acp-11-6153-2011.
- Jackman C. H., Marsh D. R., Vitt F. M., Garcia R. R., Fleming E. L., Labow G. J., Randall C. E., Lyepez-Puertas M., von Clarmann T., Stiller G. P., 2008. Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events. *Atmos. Chem. Phys.* 8, 765—785. doi: 10.5194/acp-8-765-2008.
- Kahler S. W., 1993. Coronal mass ejections and long risetimes of solar energetic particle events. *J. Geophys. Res.* 98(A4), 5607—5615. doi: 10.1029/92JA02605.
- Kahler S. W., Cliver E. W., Cane H. V., McGuire R. E., Reames D. V., Sheeley Jr. N. R., Howard R. A., 1987. Solar energetic proton events and coronal mass ejections near solar minimum: *Proc. 20th Int. Cosmic Ray Conf.*, Vol. 3, 121 p.
- Kahler S. W., Vourlidas A., 2005. Fast coronal mass ejection environments and the production of solar energetic particle events. *J. Geophys. Res.* 110, A12S01. doi: 10.1029/2005JA011073.
- Kocharov L., Torsti J., Cyr O. C. St., Huhtanen T.,

2001. A relation between dynamics of coronal mass ejections and production of solar energetic particles. *Astron. Astrophys.* 370, 1064—1070. doi: 10.1051/0004-6361:20010241.
- Krivova N. A., Balmaceda L., Solanki S. K., 2007. Reconstruction of solar total irradiance since 1700 from the surface magnetic flux. *Astron. Astrophys.* 467, 335—346. doi: 10.1051/0004-6361:20066725.
- Kurt V. G., Logachev Yu. I., Stolpovsky V. G., Dabog E. I., 1981. Energetic solar particle spectra according to Venera-11, 12 and Prognoz-5, 6 observations: *Proc. 17th Int. Cosmic Ray Conf., Paris, France*. Vol. 3, P. 69—72.
- Miller J. A., Cargill P. J., Emslie A. G., Holman G. D., Dennis B. R., La Rosa T. N., Winglee R. M., Benkaand S. G., Tsuneta S., 1997. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares. *J. Geophys. Res.* 102, 14631—14659. doi: 10.1029/97JA00976.
- Mironova I. A., Desorgher L., Usoskin I. G., Flückiger E. O., Büttikofer R., 2008. Variations of aerosol optical properties during the extreme solar event in January 2005. *Geophys. Res. Lett.* 35, L18610. doi: 10.1029.2008GL035120.
- Miroshnichenko L. I., Perez-Peraza J. A., 2008. Astrophysical aspects in the studies of solar cosmic rays. *Int. J. Mod. Phys.* 23(1), 1—141. doi: 10.1142/S0217751X08037312.
- Mishev A. L., Velinov P. I. Y., Mateev L., Tassev Y., 2011. Ionization effect of solar protons in the Earth atmosphere — case study of the 20 January 2005 SEP event. *Adv. Space Res.* 48(7), 1232—1237. doi: 10.1016/j.asr.2011.06.004.
- Murphy R. J., Share G. H., 2005. What gamma-ray de excitation lines reveal about solar flares. *Adv. Space Res.* 35(10), 1825—1832. doi: 10.1016/j.asr.2005.03.004.
- Prölss G. W., 2004. Physics of the Earth's Space Environment: an Introduction. Berlin: Springer, 275 p. doi: 10.1007/978-3-642-97123-5.
- Randel W. J., Wu F., 2007. A stratospheric ozone profile dataset for 1979-2005: Variability, trends and comparisons with column ozone data. *J. Geophys. Res.* 112, D06313. doi: 10.1029.2006JD007339.
- Reames D. V., 2002. Magnetic topology of impulsive and gradual solar energetic particle events. *Astrophys. J.* 571, L63—L66. doi: 10.1086/341149.
- Reames D. V., 2000. Abundances of Trans-Iron Elements in Solar Energetic Particle Events. *Astrophys. J.* 540(2), L111—L114. doi:10.1086/312886.
- Reedy R. C., 1980. Lunar radionuclide records of average solar cosmic ray fluxes over the last ten million years: *Proc. Conf. Ancient Sun*. New York: Pergamon Press, P. 365—386.
- Shea M. A., Smart D. F., Dreschhoff G. A. M., Zeller E. J., 1993. The flux and fluence of major solar proton events and their record in Antarctic snow. *Reprint from 23rd International Cosmic Ray Conference*. Conference Papers, Vol. 3, P. 846—849.
- Smart D., Shea M., 1971. Solar proton event classification system. *Sol. Phys.* 16, 484—487. doi: 10.1007/bf00162491.
- Stendel M., Mogensen I. A., Christensen J. H., 2006. Influence of various forcings on global climate in historical times using a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Clim. Dyn.* 26, 1—15. doi:10.1007.s00382-005-0041-4.
- Torsti J., Anttila A., Kocharov L., Mäkelä P., Riihonen E., Sahla T., Teittinen M., Valttonen E., Laitinen T., Vainio R., 1998. Energetic (~ 1 to 50 MeV) proton associated with Earth-directed coronal mass ejections. *Geophys. Res. Lett.* 25(14), 2525—2528. doi: 10.1029/98GL50062.
- Tung K. K., Zhou J., Camp C. D., 2008. Constraining model transient climate response using independent observations of solar-cycle forcing and response. *Geophys. Res. Lett.* 35, L17707. doi: 10.1029/2008GL034240.
- Tylka A. J., Cohen C. M. S., Dietrich W. F., Lee M. A., MacLennan C. G., Mewaldt R. A., Ng C. K., Reames D. V., 2005. Shock Geometry, Seed Populations, and the Origin of Variable Elemental Composition at High Energies in Large Gradual Solar Particle Events. *Astrophys. J.* 625, 474—495. doi:10.1086/429384.
- Tylka A. J., Dietrich W. F., Lopate C., Reames D. V., 1999. High Energy Solar Fe Ions in the 29 September 1989 Ground Level Event: *Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf., Salt Lake City*, 6, 6770.
- Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., 2006. Cosmic ray induced ionization in the atmosphere: Full modeling and practical applications. *J. Geophys. Res.* 111, D21206. doi:10.1029.2006JD007150.
- Usoskin I. G., Alanko-Huotari K., Kovaltsov G. A., Mursula K., 2005. Heliospheric modulation of cosmic rays: Monthly reconstruction for 1951—2004. *J. Geophys. Res.* 110, A12108. doi: 10.1029.2005JA011250.

- Usoskin I. G., Gladysheva O. G., Kovaltsov G. A., 2004. Cosmic ray — induced ionization in the atmosphere: spatial and temporal changes. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 66, 1791—1796. doi: 10.1016/j.jastp.2004.07.037.
- Usoskin I. G., Kovaltsov G. A., Mironova I. A., Tyllka A. J., Dietrich W. F., 2011. Ionization effect of solar particle GLE events: Low and middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 11 (is. 5), 1979—1988. <http://www.atmos-chem-phys.net/11/1979/2011/acp-11-1979-2011.html>.
- Velinov P. I. Y., Asenovski S., Kudela K., Lastovicka J., Mateev L., Mishev A., Tonev P., 2013. Impact of cosmic rays and solar energetic particles on the Earth's ionosphere and atmosphere. *J. Space Weather Space Clim.* 3, A14. doi: 10.1051/swsc/2013036.
- Vitt F., Jackman C., 1996. A comparison of sources of odd nitrogen production from 1974 through 1993 in the Earth's middle atmosphere as calculated using a two dimensional model. *J. Geophys. Res.* 101, 6729—6739. doi: 10.1029/95JD03386.
- Zeller E. J., Dreschho G. A. M., Laird C. M., 1986. Nitrate flux on the Ross Ice Shelf, Antarctica and its relation to solar cosmic rays. *Geophys. Res. Lett.* 13, 1264—1267. doi: 10.1029/GL013i012p01264.