ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА СОСТОЯНИЕ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ И ПОГОДУ

М. И. ПУДОВКИН

Санкт-Петербургский государственный университет

1. ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемом обзоре обсуждается одна из самых актуальных и в то же время вызывающая самые ожесточенные споры проблема современной геофизики – воздействие солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду.

Вопрос о реальности и физическом механизме солнечно-земных связей имеет достаточно длительную историю. Так, еще в конце прошлого века Г. Вильд [1] исследовал связь между солнечной активностью и температурой воздуха в России. Позднее В. Робертс [2] показал существование 22-летней повторяемости засух в западных областях США; Шуурманс и Оорт [3] обнаружили регулярные изменения высоты уровней постоянного давления в тропосфере, связанные с интенсивными солнечными вспышками; Б. Тинслей и др. [4] выявили отчетливые вариации высотного профиля температуры в тропосфере во время понижений интенсивности потока галактических космических лучей.

Список экспериментальных данных, свидетельствующих о наличии статистически достоверных связей между различными погодными явлениями и солнечной (и магнитной) активностью можно было бы увеличить в десятки или даже сотни раз. И тем не менее сама идея о влиянии солнечной активности на состояние нижней атмосферы многими геофизиками решительно отвергается как совершенно неприемлемая [5]. И прежде всего дело в том, что мощность атмосферных процессов на несколько порядков превышает поток энергии, вносимой в околоземное космическое пространство (магнитосферу Земли) солнечным ветром; в связи с этим представляется крайне маловероятным, чтобы солнечная активность могла существенно воздействовать на состояние нижней атмосферы.

Однако исследования, выполненные за последние годы, позволили найти ключ к преодолению этого противоречия и тем самым к решению проблемы солнечно-земных связей.

EFFECT OF SOLAR ACTIVITY ON THE LOWER ATMOSPHERE AND WEATHER

M. I. PUDOVKIN

Recent studies have shown that solar flares and magnetic fields released by the Solar wind from the Sun active regions modulate cosmic ray fluxes of Solar and Galactic origin. In turn, these fluxes determine the ionization rate of molecules in stratosphere and troposphere and thus the state of cloudness and atmospheric transparency. Experimental data and theoretical results are discussed.

Солнечные вспышки и магнитные поля, выносимые солнечным ветром из активных образований на Солнце, модулируют потоки космических лучей солнечного и галактического происхождения, которые, в свою очередь, определяют скорость ионизации молекул воздуха в стратосфере и тропосфере и тем самым состояние облачности и прозрачность атмосферы. Обсуждаются экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов.

© Пудовкин М.И., 1996

2. ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНОЙ И МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В ВАРИАЦИЯХ СКОРОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ

На рис. 1 по данным Главной геофизической обсерватории представлены вариации среднегодовых температур воздуха в Петербурге за период с 1775 по 1982 год. Обращают на себя внимание следующие характерные особенности в ходе температур за указанный период.

1. Общее постепенное увеличение среднегодовой температуры за рассматриваемые двести лет от 3°С в 1775 – 1815 годах до 4,5°С в настоящее время, объясняемое, скорее всего, парниковым эффектом (см. раздел 4 этого обзора).

2. Интенсивные (с амплитудой 1 – 2°С) "высокочастотные" колебания с периодом 2 – 3 года. Эти колебания имеют, скорее всего, внутриатмосферные причины, и мы их рассматривать не будем.

3. Относительно длиннопериодные колебания с периодом до нескольких десятков лет.

Характерный период этих колебаний близок к периоду вариаций солнечной активности. И в самом деле, в частотных спектрах вариаций как солнечной активности, так и температуры воздуха наблюдаются пики на периодах 11 – 13, 21 – 23, 35 – 43, 52 – 57 и 100 лет. Коэффициент корреляции между ними равен 0,45 и является статистически достоверным [6], что свидетельствует о реальности связи между вариациями температуры и солнечной активности.

Чрезвычайная изменчивость погоды в Петербурге обусловлена, как известно, прохождением атлантических циклонов, траектории которых, в свою очередь, определяются топографией изобарических поверхностей и, следовательно, характером общей циркуляции атмосферы. Учитывая это обстоятельство, рассмотрим, как влияют на циркуляцию нижней атмосферы вариации солнечной и магнитной активности.

На рис. 2 показана полученная осреднением данных нескольких возмущений вариация индекса Блиновой, характеризующего интенсивность зональной циркуляции атмосферы, на различных

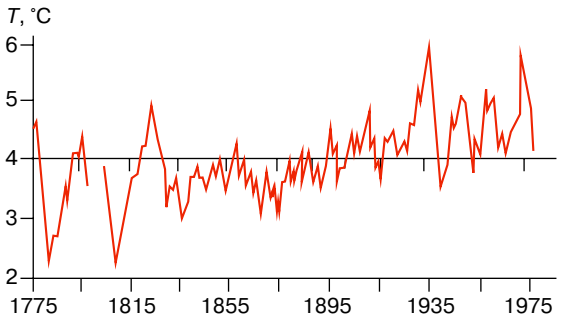


Рис. 1. Вариации среднегодовой температуры в Петербурге.

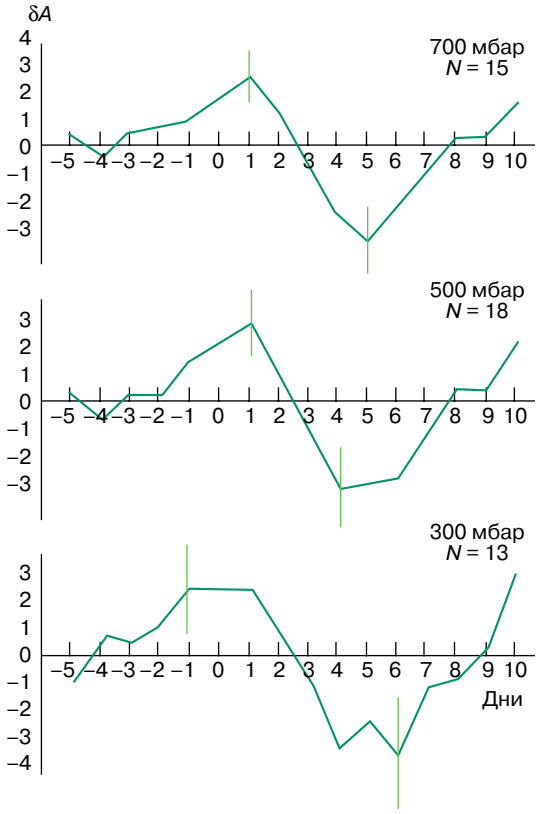


Рис. 2. Вариации индекса Блиновой δ*A* на различных изобарических уровнях. *N* – количество рассмотренных событий. Вертикальными отрезками показана величина стандартного отклонения.

изобарических уровнях в ходе магнитосферного возмущения [7]; за нулевой день ($t = 0$) принят день начала интенсивного геомагнитного возмущения. Индекс Блиновой определяется как $A = 10^3\alpha/\Omega$, где α – средняя (в поясе широт $\varphi = 45° - 65°$) угловая скорость зонального движения атмосферы относительно поверхности Земли и $\Omega = 2\pi/86400$ – угловая скорость вращения Земли; на широте Петербурга ($\varphi = 60°$) величина $A = 1$ соответствует линейной скорости ветра $\upsilon = 23$ см/с. Как видно из приведенных на рисунке графиков, развитие геомагнитного возмущения сопровождается отчетливой вариацией скорости циркуляции атмосферы: в интервале от минус первого до плюс второго дня индекс Блиновой оказывается на одну-две единицы повышенным, а в интервале от третьего до седьмого дня – на одну – три единицы пониженным.

Таким образом, скорость атмосферной циркуляции оказывается на 20 – 40 см/с выше нормы на начальной фазе и на 20 – 60 см/с пониженной на поздней фазе возмущения.

Напомним, что под действием сил инерции Кориолиса скорость ветра направлена перпендику-

лярно градиенту давления, то есть вдоль изобар. Соответственно азимутальная (то есть направленная вдоль географической параллели на восток) компонента скорости ветра равна

$$V_\lambda = -\frac{1}{2\rho\Omega\sin\varphi}\nabla_\varphi p, \qquad (1)$$

где $\nabla_\varphi p$ – меридиональная составляющая градиента давления.

Таким образом, индекс Блиновой для пояса широт (φ_1, φ_2) на некоторой высоте h_i связан с разностью давления на границах пояса на этой же высоте соотношением

$$\Delta p(h_i) \equiv p_1(h) - p_2(h) =$$

$$= \frac{\langle A_i \rangle}{10^3}\rho R_E^2\Omega^2(\cos^2\varphi_1 - \cos^2\varphi_2). \qquad (2)$$

Выражению (2) можно придать несколько иную форму. Действительно, разлагая p в ряд по степеням Δh и полагая, что давление изменяется с высотой по барометрическому закону

$$p = p_0 e^{-\mu g h/kT},$$

где μ – средний молекулярный вес воздуха, получаем

$$\Delta p(h_i) \approx \frac{\mu g_0}{kT} p_i \Delta h, \qquad (3)$$

$$h_i(\varphi_1) - h_i(\varphi_2) \equiv \Delta h_i \equiv \frac{\langle A_i \rangle R_E^2\Omega^2}{10^3 g_0}(\cos^2\varphi_1 - \cos^2\varphi_2), \quad (4)$$

здесь h_i – высота уровня постоянного давления p_i. Следовательно, возмущение, представленное на рис. 2, обусловлено уменьшением высот изобарических поверхностей на высокоширотной границе пояса Блиновой во время первой фазы и их увеличением во время второй фазы. Величина этих возмущений, рассчитанная на основе экспериментальных данных (рис. 3) и выражения (4), представлена в табл. 1. Приведенные в таблице данные показывают, что величина $\delta\Phi$ составляет в среднем около 17 м

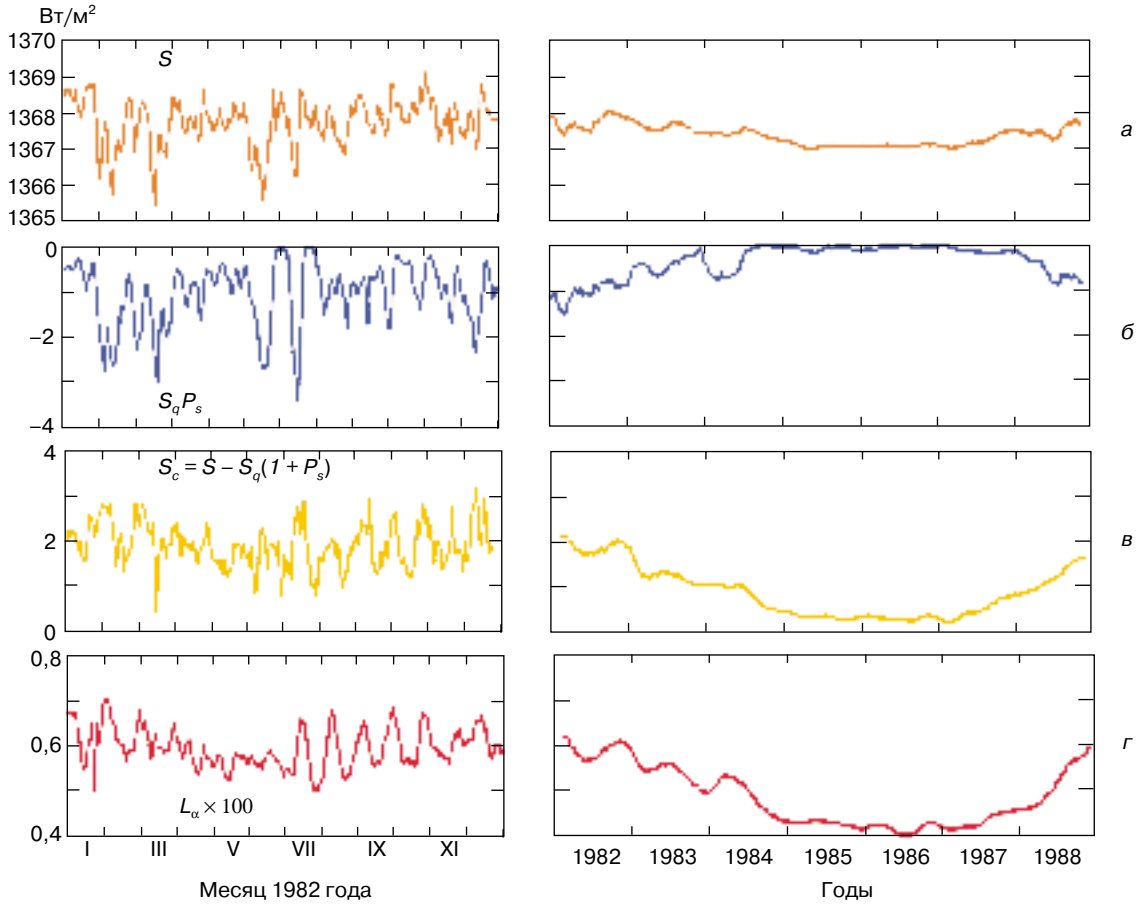


Рис. 3. Вариации среднесуточных (слева) и осредненных по 81-дневным интервалам (справа) величин: *а* – полная солнечная радиация S; *б* – блокировка солнечной радиации пятнами S_qP_s; *в* – остаточная солнечная радиация $S_c = S - S_q(1 + P_s)$; *г* – интенсивность солнечной радиации в L_α-свете.

Таблица 1. Вариации индекса Блиновой δA и высоты различных изобарических уровней в ходе атмосферного возмущения $\delta\Phi$

Первая фаза			Вторая фаза	
Давление, мбар	δA	$\delta\Phi$	δA	$\delta\Phi$
700	2,4	17,0	−3,3	−23,3
500	2,7	19,1	−2,9	−20,5
300	2,4	17,0	−3,4	−24,0

в первый день возмущения и около –23 м на четвертый-пятый день. При этом совершается работа порядка $\pm(5-7)\cdot 10^{26}$ эрг [7]. В то же время из солнечного ветра в магнитосферу Земли поступает энергия $\approx 10^{23}$ эрг/сутки, что на 3 – 4 порядка меньше энергии рассматриваемого атмосферного возмущения. Таким образом, непосредственно солнечный ветер не может быть энергетическим источником атмосферных возмущений, что и является одним из основных доводов против возможности воздействия солнечной активности на погодные явления. Рассмотрим возможные источники искомой энергии.

3. ВАРИАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Как известно, спектр излучения Солнца близок к спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры 5770 К при существенном дефиците излучаемой энергии в диапазоне близкого ультрафиолета (УФ). В то же время интенсивность солнечной радиации в далеком УФ и рентгеновском диапазоне на несколько порядков больше соответствующего излучения абсолютно черного тела. Такое различие в спектрах Солнца и абсолютно черного тела объясняется тем, что коротковолновое излучение в различных диапазонах длин волн генерируется в различных областях атмосферы Солнца.

В частности, излучение с длиной волны $\lambda < 1500$ Å генерируется в хромосфере и короне Солнца, то есть в областях, температура которых много выше температуры фотосферы. В то же время известно, что параметры хромосферы и короны весьма изменчивы и существенно зависят от уровня солнечной активности, так что неудивительно, что интенсивность коротковолнового излучения Солнца также существенно изменяется изо дня в день и с уровнем солнечной активности. Относительная величина циклической вариации интенсивности солнечного излучения достигает фактора 10 при $\lambda = 300 - 500$ Å и резко уменьшается при $\lambda > 2000$ Å. В результате интегральная интенсивность солнечного волнового излучения (так называемая солнечная постоянная, равная $K = 1{,}37\cdot 10^6$ эрг/(см$^2\cdot$ с) на орбите Земли) не испытывает вариаций более 0,1%.

В последнее время появилось много публикаций, свидетельствующих о том, что интенсивность солнечной радиации отчетливо зависит от распределения на поверхности Солнца активных образований, таких, как солнечные пятна, факелы и флоккулы.

Как было показано Р. Вильсоном [8] и Х. Хадсоном и др. [9], появление на диске Солнца относительно темных пятен может вызвать ослабление интенсивности солнечного излучения на несколько десятых долей процента. К тому же факелы вызывают увеличение солнечной радиации. И хотя увеличение яркости Солнца в области факелов составляет лишь несколько процентов, область, занятая ими, обычно на порядок больше суммарной площади пятен, так что обусловленные этими образованиями вариации интенсивности солнечной радиации оказываются одного порядка.

На рис. 3*а* (слева) по данным [10] представлены вариации общей интенсивности свечения Солнца в течение 1982 года; на рис. 3*б* – величина ослабления этого свечения, обусловленного прохождением по диску Солнца пятен: $\delta S = S_q P_s$, где S_q – интенсивность свечения "спокойного" Солнца и P_s – "функция блокировки" этого свечения пятнами. Видно, что некоторые из минимумов излучения (например, имевшие место в феврале, марте, июне и июле) действительно обусловлены эффектом солнечных пятен. В то же время остаточная солнечная радиация (то есть величина, равная $S_c = S - S_q(1 + P_s)$), характеризующая избыточную радиацию и представленная на рис. 3*в*, отчетливо коррелирует с интенсивностью эмиссии L_α (кривая 3*г*), генерируемой в области ярких магнитных образований вне активной области.

Таким образом, прохождение активных образований по диску Солнца действительно отчетливо модулирует суммарную интенсивность солнечного излучения. Вместе с тем амплитуда этих вариаций, как видно из рис. 2*а*, не превышает 0,25%.

В правой части рис. 3 представлены сглаженные по 81-дневным интервалам вариации тех же величин: S, $S_q P_s$, S_c и L_α – в ходе одиннадцатилетнего солнечного цикла. Из рисунка видно, что интенсивность солнечного излучения испытывает также и отчетливую циклическую вариацию: величина S максимальна в 1981 – 1982 и 1989 годах, то есть в эпоху максимума солнечной активности, и минимальна в 1985 – 1987 годах, то есть в эпоху минимума солнечной активности. Однако амплитуда циклической вариации интенсивности солнечного излучения оказывается даже меньше амплитуды кратковременных вариаций и составляет около 0,1%.

Таким образом, вариации солнечной радиации не являются энергетическим источником рассматриваемых атмосферных возмущений. В связи с этим чрезвычайно интересными представляются полученные К.Я. Кондратьевым и Г.А. Никольским

[11] результаты, свидетельствующие о заметном (до 6%) изменении в ходе одиннадцатилетнего солнечного цикла прозрачности атмосферы. Рассмотрим это подробнее.

4. ВАРИАЦИИ ПРОЗРАЧНОСТИ АТМОСФЕРЫ

Относительно плотная атмосфера надежно защищает земную поверхность от смертоносной коротковолновой радиации с $\lambda < 3000$ Å. Длинноволновая радиация с $\lambda > 10^4$ Å также эффективно поглощается атмосферой. Вместе с тем достаточно широкое окно в атмосферном экране наблюдается на длинах волн $\lambda = 3000 - 10000$ Å, то есть в области максимума интенсивности в спектре солнечного излучения, что обеспечивает проникновение большей части солнечной энергии в нижнюю атмосферу и к поверхности Земли.

Не менее важно существование и второго окна на длинах волн порядка $\lambda = (0{,}7 - 1{,}5) \cdot 10^5$ Å. Эта длина волны соответствует максимуму излучения абсолютно черного тела, нагретого до температуры $T \approx 300$ K, что близко к средней температуре поверхности Земли. Таким образом, инфракрасное окно играет существенную роль в регулировании температуры воздуха в нижней атмосфере.

Итак, параметры входного и выходного окон в атмосферном экране таковы, что обеспечивают на поверхности Земли и в нижней атмосфере именно ту температуру, которая необходима для существования органической жизни. Заметим, что такое сочетание условий является, по крайней мере для планет Солнечной системы, уникальным, что делает Землю единственным в своем роде космическим объектом.

Однако оптические характеристики атмосферы не являются раз и навсегда заданными величинами. Дело в том, что поглощение солнечного излучения в атмосфере зависит от содержания в ней озона, водяных паров, окиси углерода и других "малых составляющих", концентрация которых может существенно меняться. В результате этого термодинамическое равновесие в атмосфере является весьма хрупким и легко может быть нарушено. В частности, всевозрастающий приток в атмосферу углекислого газа, образующегося в результате технической деятельности человека, уже в настоящее время приводит к уменьшению скорости вывода тепла из атмосферы (так называемый парниковый эффект) и соответственно к повышению температуры Земли (см. раздел 2 и рис. 1).

Заметное изменение химического состава и содержания малых составляющих, а также прозрачности атмосферы вызывается, в частности, вариациями потока ионизирующего излучения в атмосфере, наблюдаемыми во время магнитосферных возмущений.

Основными типами таких вариаций являются: 1) кратковременные понижения интенсивности галактических космических лучей (ГКЛ), наблюдаемые во время геомагнитных возмущений (так называемые форбуш-понижения), обусловленные рассеянием энергичных заряженных частиц магнитными полями, выносимыми из атмосферы Солнца высокоскоростными потоками солнечного ветра, и 2) всплески потоков солнечных космических лучей (СКЛ), обусловленные солнечными вспышками.

На рис. 4*а* по данным субавроральной обсерватории Оленек [12] представлены вариации относительной интенсивности S солнечной радиации на поверхности Земли в ходе геомагнитного возмущения и связанного с ним форбуш-понижения интенсивности потока галактических космических лучей; нулевой день $t = 0$ соответствует началу форбуш-понижения (за единицу принята средняя величина S в минус второй-третий дни. Как видно из рисунка, через день после начала возмущения величина δS в авроральной зоне достигает максимума около 8% от нормального значения S в рассматриваемом широтном поясе. Поскольку вне атмосферы вариации интенсивности солнечной радиации, как мы видели, не превышают 0,25%, ее изменения, наблюдаемые на поверхности Земли, могут быть обусловлены изменениями прозрачности атмосферы.

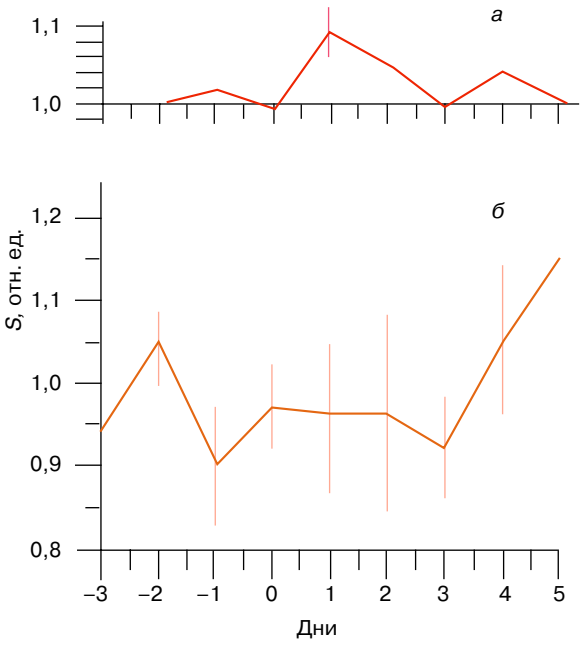


Рис. 4. Полученные методом наложенных эпох вариации прямой солнечной радиации, измеренной в полуденные часы на обсерватории Оленек в ходе форбуш-понижений интенсивности ГКЛ (*а*) и в ходе всплесков СКЛ (*б*). Нулевой день ($t = 0$) соответствует началу форбуш-понижения для кривой (*а*) и началу всплеска СКЛ для кривой (*б*). Вертикальными отрезками показана величина стандартного отклонения.

Но если уменьшение потока энергичных космических частиц вызывает увеличение прозрачности атмосферы, то увеличение потока таких частиц должно вызвать уменьшение прозрачности атмосферы. В связи с этим на рис. 4*б* представлены вариации относительной интенсивности S прямой солнечной радиации на той же обсерватории Оленек во время интенсивных вспышек солнечных космических лучей (СКЛ); нулевой день $t = 0$ соответствует началу всплеска СКЛ. Легко видеть, что в период от минус первого до плюс третьего дня интенсивность солнечного излучения действительно оказывается на 5 – 10% меньше спокойного уровня. Элементарные расчеты показывают, что суммарный поток солнечной энергии в поясе широт 55° – 80° увеличивается или уменьшается при этом на $\sim 3 \cdot 10^{26}$ эрг/сутки, что вполне соизмеримо с мощностью рассматриваемых атмосферных процессов (см. раздел 2).

Изменение потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу, нарушает в ней термодинамический баланс и приводит к изменению высотного распределения температуры. Рассмотрим эти изменения.

5. ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТНОГО ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВАРИАЦИЯМИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКА КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Детальное исследование возможных изменений химического состава атмосферы, ее оптических характеристик и высотного профиля температуры воздуха в нижней атмосфере выполнено в работе [13].

Согласно обсуждаемой в этой работе модели, вторжение энергичных частиц в атмосферу вызывает ионизацию и диссоциацию молекул N_2 и O_2. Образующиеся при это ионы N_2^+, O_2^+, N^+, O^+ и другие участвуют затем в целом комплексе фотохимических реакций, одним из продуктов которого является окись азота NO. Последняя активно взаимодействует с молекулами озона:

$$NO + O_3 \longrightarrow NO_2 + O_2$$

Озон разрушается также при взаимодействии с атомарным кислородом:

$$O_3 + O \longrightarrow 2O_2$$

Таким образом, вторжение энергичных частиц в атмосферу вызывает разрушение озона O_3 и образование двуокиси азота NO_2. Это, в свою очередь, вызывает существенные изменения в радиационном балансе в атмосфере. В частности, в нижней атмосфере и на поверхности Земли возрастает поток солнечного ультрафиолетового излучения с $\lambda < 3250$ Å в результате уменьшения его поглощения озоном. В то же время поток радиации в сине-зеленой области уменьшается вследствие увеличившегося поглощения последней двуокисью азота, сечение поглощения которой достигает максимума $\sigma = 6 \cdot 10^{-19}$ см^2 на длине волны около 4000 Å [13].

Выполненные авторами работы [13] расчеты показывают, что вторжение протонов с энергетическим спектром, соответствующим спектру, наблюдавшемуся во время протонного события 4 августа 1972 года, вызывает более чем десятикратное уменьшение концентрации озона и увеличение концентрации NO_2 почти на два порядка на высоте 30 – 35 км. При этом в результате повышенного поглощения солнечной радиации двуокисью азота температура воздуха в стратосфере увеличивается, достигая в максимуме на высоте 30 км величины 300 K, что на 80 K выше нормы. В тропосфере, наоборот, дефицит солнечной радиации вызывает остывание воздуха на 10 K.

Таким образом, согласно модели [13], интенсивные потоки космических лучей могут вызвать заметное похолодание на поверхности Земли, подобное (хотя и в значительно меньшей степени) явлению “ядерной зимы”. Рассмотрим, в какой степени эта модель согласуется с экспериментом.

На рис. 5 (кривая *1*) по данным [14] представлен осредненный вертикальный профиль отклонений температуры от спокойного уровня на обсерватории Соданкюля ($\varphi = 67°$) во время интенсивных протонных событий. Наблюдаемые изменения температуры в целом согласуются с предсказаниями модели: температура воздуха в стратосфере в ходе

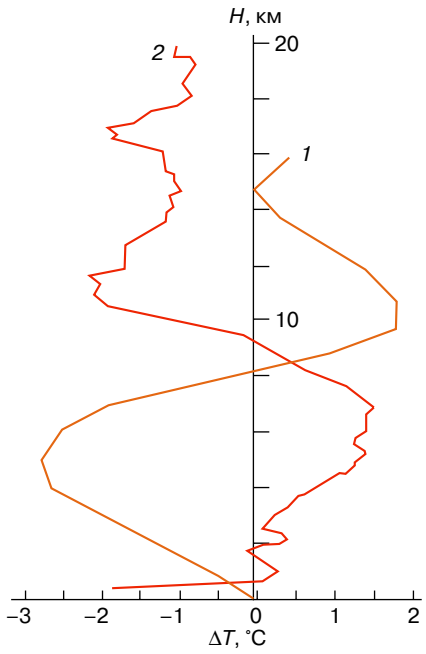


Рис. 5. Высотный профиль отклонений температуры воздуха ΔT от “спокойного” уровня во время всплесков СКЛ (кривая *1*) и форбуш-понижений (кривая *2*).

возмущения увеличивается, в то время как в тропосфере уменьшается. Однако область повышенной температуры в стратосфере оказывается значительно менее протяженной, чем в модели, и величина δT составляет всего лишь 2°С вместо 80°С.

Таким образом, количество поглощенной в стратосфере солнечной энергии оказывается существенно меньше, чем предполагается моделью, и вряд ли может объяснить наблюдаемое на поверхности Земли ослабление солнечной радиации. Это обстоятельство позволяет предположить, что ослабление солнечной радиации в атмосфере объясняется не столько ее поглощением, сколько рассеянием и отражением. При этом отражающий слой должен располагаться приблизительно на тех высотах, где $\delta T \approx 0$, то есть около 8 км. На том же рисунке кривая *2* показывает высотное распределение δT, наблюдаемое во время форбуш-понижений галактических космических лучей. График $\delta T(h)$ в этом случае близок к зеркальному отображению кривой в случае солнечных космических лучей и соответствует исчезновению отражающего слоя примерно на тех же высотах ($h = 9$ км). Полученный результат представляется несколько неожиданным, поскольку протоны с типичной для СКЛ энергией 100 – 300 МэВ проникают в атмосферу Земли до высот 25 – 30 км. Для проникновения на высоту 10 км протоны должны обладать энергией порядка 10^3 МэВ. Конечно, частицы таких энергий имеются в "хвосте" энергетического спектра солнечных протонов, однако поток их мал. Тем не менее предположение об относительно малой высоте отражающего слоя подтверждается результатами работы [15], в которой показано, что вариации интенсивности потока космических лучей сопровождаются изменениями частоты появления перистых облаков ($h = 7 - 10$ км).

Физический механизм, определяющий воздействие потоков энергичных частиц на состояние облачности в верхней тропосфере, пока неясен. В связи с этим значительный интерес представляет модель, предложенная Б. Тинслеем и Р. Хилисом [16]. Эта модель основана на наблюдениях, согласно которым скорость собирания частиц аэрозолей заряженными капельками воды оказывается на один-два порядка выше, чем незаряженными. В свою очередь, скорость, с которой заряжаются капельки воды, зависит от плотности вертикальных электрических токов в атмосфере и, следовательно, от плотности потока ионизирующего излучения и интенсивности электрического поля в атмосфере.

Какова относительная роль механизмов, предложенных в работах [13] и [16], неизвестно, и выяснение этого вопроса потребует дополнительных исследований.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы постарались проследить основные физические процессы, определяющие воздействие солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду. Эти процессы таковы.

1. В результате активных процессов на Солнце в области интенсивных вспышек генерируются потоки энергичных ($\varepsilon = 100 - 300$ МэВ) протонов, через несколько часов достигающие орбиты Земли. В то же время относительно интенсивные магнитные поля, выносимые из активных областей на Солнце связанными со вспышками потоками, экранируют магнитосферу Земли от попадания в нее потоков галактических космических лучей. В результате наложения этих двух процессов солнечные вспышки вызывают довольно сложную и неоднозначную вариацию интенсивности потоков энергичных частиц, вторгающихся в атмосферу Земли. И только разделив (путем отбора соответствующих событий) названные явления, удается обнаружить и достоверным образом описать их атмосферные эффекты.

2. Усиление (ослабление) потока вторгающихся частиц в результате еще не вполне выясненных физико-химических процессов вызывает уменьшение (или увеличение) прозрачности атмосферы и тем самым модулирует поступление солнечной энергии в нижнюю атмосферу.

3. Изменение потока поступающей солнечной энергии вызывает изменение температуры воздуха и высоты изобарических поверхностей в тропосфере, обусловливая тем самым заметные изменения скорости крупномасштабной циркуляции атмосферы.

Таким образом, основное возражение против возможности эффективного воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоду, основанное на недостаточной мощности солнечного ветра, оказывается вполне преодолимым. В самом деле, как показывают, например, расчеты [13], энергия, необходимая для создания атмосферного оптического экрана, на несколько порядков меньше амплитуды вызываемых этим экраном вариаций потока солнечной энергии, поступающей в нижнюю атмосферу.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вильд Г.* О температуре воздуха в Российской империи. СПб., 1882. Ч. 2.

2. *Робертс В.О.* В кн.: Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Нормана, Т. Селиги. М.: Мир, 1982. С. 44.

3. *Schuurmans C.J.E.*, *Oort A.H.* // Pure and Appl. Geophys. 1969. V. 75. P. 233.

4. *Tinsley B.A.*, *Brown G.M.*, *Scherrer P.H.* // J. Geophys. Res. 1989. V. 94. № D12. P. 14783.

5. *Монин А.С.* Прогноз погоды как задача физики. М.: Наука, 1969.

6. *Пудовкин М.И.*, *Любчич А.А.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 29. № 3. С. 359.

7. *Пудовкин М.И.*, *Бабушкина С.В.* // Там же. 1991. Т. 31. № 3. С. 493.

8. *Willson R.C.* // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. P. 4319.

9. *Hudson H.S.*, *Silva S.*, *Woodbard M.*, *Willson R.C.* // Solar Phys. 1982. V. 76. P. 211.

10. *Lean J.* // Rev. Geophys. 1991. V. 29. № 4. P. 505.

11. *Кондратьев К.Я.*, *Никольский Г.А.* В кн.: Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. Мак-Нормана, Т. Селиги. М.: Мир, 1982. С. 354.

12. *Pudovkin M.I.*, *Babushkina S.V.* // J. Atmos. and Terr. Phys. 1992. V. 54. № 9. P. 1135.

13. *Hauglustaine D.*, *Gerard J.*-C. // Ann. Geophys. 1990. V. 8. № 2. P. 87.

14. *Pudovkin M.I.*, *Veretenenko S.V.*, *Pellinen R.*, *Kyro E.* // Adv. Space Res. 1995. V. 17. № 11. P. (11)165.

15. *Веретененко С.В.*, *Пудовкин М.И.* // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 6. С. 35.

16. *Tinsley B.A.*, *Heelis R.A.* // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. № D6. P. 10375.

* * *

Михаил Иванович Пудовкин, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Санкт-Петербургского государственного университета. Область научных интересов: полярные сияния, электромагнитное поле Земли, влияние солнечной активности на изменение климата Земли. Автор более 300 научных статей и семи монографий.