

А. Л. Морозова, М. И. Пудовкин

ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ПРОЦЕССЫ И ПОГОДА

Большое количество работ было посвящено определению степени и характера изменения циркуляции атмосферы на протяжении нескольких веков и связи этих вариаций с уровнем солнечной активности. На основании своих исследований автор [1, 2] делает вывод о том, что в XX в. пути атлантических циклонов сдвинуты к северу (Скандинавия, Белое и Карское моря), а в XVIII–XIX вв. циклоны проходили южнее, через Центральную Европу и Балтику и Среднерусскую равнину. Аналогичный вывод делается и в [3] на основании анализа распределения полей давления в северо-восточной Атлантике. Исследования, проделанные авторами [4], свидетельствуют о том, что в XX в. усиление зональной (и, как следствие, ослабление меридиональной) циркуляции идет параллельно с ростом уровня солнечной активности как в вековом, так и в 11-летнем циклах.

Вариации циркуляции наблюдаются, как уже говорилось выше, и в ходе 11-летнего цикла солнечной активности. В частности, в [4] отмечается преобладание в годы солнечных максимумов зональных форм циркуляции, а в годы минимумов — меридиональных.

На более коротких временных интервалах наблюдается связь между геомагнитными возмущениями, всплесками солнечных космических лучей (СКЛ) и изменением типа и интенсивности циркуляции атмосферы. Как показали исследования [5], всплеск СКЛ приводит к усилению зональной циркуляции в умеренных широтах, а геомагнитные возмущения (форбуш — понижения интенсивности потока галактических космических лучей (ГКЛ)) — к ее подавлению или нарушению — полярные вторжения в Атлантический и Европейский сектора.

Изменение типа циркуляции, по-видимому, связано с перестройкой барического поля в высоких и средних широтах. Многие авторы отмечают изменение атмосферного давления у поверхности Земли и высоты геопотенциальных поверхностей после геомагнитных возмущений или солнечных вспышек, сопровождающихся всплесками СКЛ. В [6] отмечается чередование ячеек подъема и опускания уровня геопотенциальной поверхности 500 мбар после солнечных вспышек как по широте, так и по долготе. В частности, над Западной Европой (25° з. д.—20° в. д.) для широтной зоны 40°–70° с. ш. наблюдается подъем геопотенциальной поверхности. Автор [7] отмечает смещение путей атлантических циклонов, идущих к Европе, на юго-восток, а авторы [8] — падение приземного давления в широтной зоне $\phi = 50^\circ\text{--}75^\circ$ с. ш. примерно на 1 мбар после всплеска СКЛ. После геомагнитного возмущения давление в этом регионе возрастает примерно на 2 мбар.

В [9] делается вывод о том, что в эпохи повышенной солнечной активности давление в области затропического максимума повышается, а в высоких широтах падает, что приводит к смещению траекторий циклонов к полюсу. Кроме того, в периоды увеличения солнечной активности в теплые сезоны года над Атлантикой ось барической ложбины от Исландии к Евразии смещается на север, что может привести к проникновению на северо-запад Европы языка Азорского антициклона и установлению там теплой и сухой погоды [10].

Таким образом, представляется весьма интересным рассмотреть вариации климата в ходе циклов солнечной активности на протяжении почти трех веков в одном

из регионов Центральной Европы (Швейцария), а также попытаться построить модель воздействия изменения уровня солнечной активности на коротких временных интервалах (всплески СКЛ) на динамику тропосферы средних и высоких широт северного полушария.

1. Изменение увлажненности, температуры и приземного давления в Швейцарии в XVIII - XX вв.

Температура и количество осадков в Швейцарии представлены в виде градуированных индексов (Graduated Index, GI), изменяющихся в диапазоне $[-3, \dots, +3]$ как для температуры, так и для увлажненности с 1525 по 1989 г. GI получены из квазистационарных рядов данных, свидетельствующих об изменении климата (дневники наблюдений, архивы и пр.), и откалиброваны по данным для периода инструментальных наблюдений. Период калибровки — 1901–1960 гг. Значения индексов температуры и количества осадков определялись следующим образом [11, 12]:

± 3 — экстремально теплые (холодные) или дождливые/снежные (засушливые) периоды;

± 2 — теплые (холодные) или дождливые/снежные (засушливые) периоды;

± 1 — периоды, когда погода была чуть теплее (холоднее) или дождливее (засушливее), чем в среднем;

0 — среднее значение.

Для изучения вариаций приземного давления в Швейцарии использовались среднемесячные наблюдаемые данные станций в Базеле, Цюрихе и Женеве с 1755 по 1988 г. Данные по индексам осадков в Швейцарии получены через World Data Center A-Paleoclimatology, NGDC, NOAA, по давлению - через Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), а по вариациям чисел Вольфа и интенсивности космических лучей — через World Data Center A, NGDC, NOAA, Solar Database [13].

11-летний солнечный цикл в вариациях температуры, увлажненности и приземного давления в Швейцарии в XVIII–XX вв. Для того чтобы исключить вековые и короткопериодные (менее 5 лет) вариации метеопараметров, из исходных кривых вариаций индексов температуры и увлажненности был удален вековой тренд (скользящее среднее по 50 годам) и проведено скользящее осреднение по 5 годам. Кроме того, данные были нормированы таким образом, что в течение каждого солнечного цикла максимальное (минимальное) значение исследуемой величины было $+1$ (-1). Для того чтобы определить, имеется ли взаимосвязь между изменением температурного режима, увлажненности и приземного давления и солнечной активностью, воспользуемся методом наложенных эпох. В качестве реперных точек будем использовать годы максимумов и минимумов солнечной активности в 11-летнем цикле солнечных пятен. Сначала были проанализированы вариации индексов температуры, приземного давления и увлажненности для всего периода с 1700 по 1989 г. В качестве реперных точек взяты даты минимумов солнечной активности по числам Вольфа. Полученные результаты свидетельствуют о том, что вариации с периодом в 11 лет имеют место, хотя и выражены достаточно слабо. Затем был проведен анализ отдельно для XVIII–XIX вв. и XX в. (анализ, проведенный отдельно для XVIII и XIX вв., показывает, что вариации индексов метеопараметров в эти эпохи имеют сходный характер и их можно объединить в одну группу).

На рис. 1, 2 представлены кривые, полученные методом наложенных эпох для индекса увлажненности и приземного давления (среднее по трем станциям) для разных периодов. Для сравнения на этих же рисунках приведены соответствующие

вариации чисел Вольфа, характеризующие уровень пятнообразовательной деятельности Солнца в ходе 11-летнего солнечного цикла. По оси абсцисс отложены годы 11-летнего солнечного цикла, нулевое значение соответствует году минимума, по оси ординат отложены нормированные (см. ранее) вариации климатических индексов и чисел Вольфа. В то время как вид вариаций метеопараметров летом остается примерно постоянным на протяжении почти 300 лет, вариации температуры и увлажненности осенью, зимой и весной меняют свой характер [14].

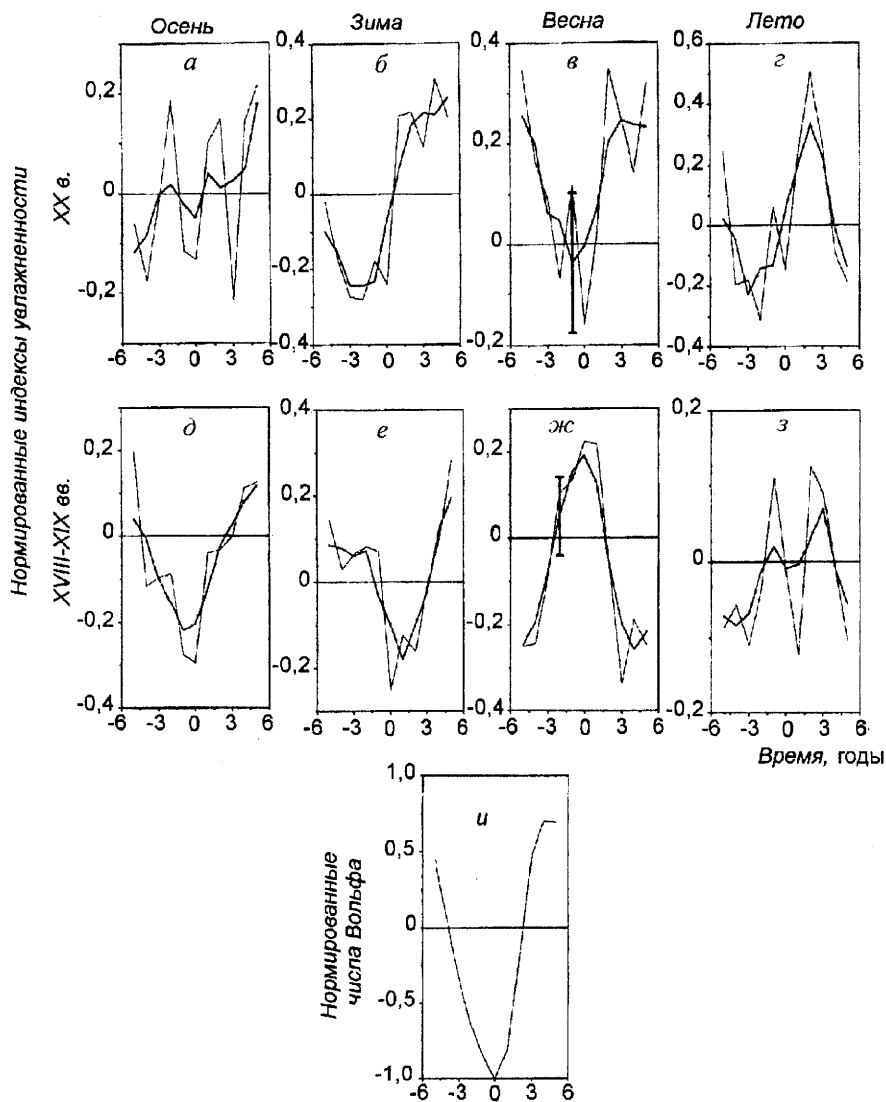


Рис. 1. Вариации индексов увлажненности в Швейцарии в ходе 11-летнего цикла солнечной активности для четырех сезонов в XX в. (а, б, в, з), в XVIII-XIX вв. (д, е, ж, з) и 11-летний цикл изменений чисел Вольфа (u).

Жирные линии — скользящее среднее по 3 точкам. Вертикальные линии — дисперсия.

22-летний цикл солнца в вариациях температуры и увлажненности в Швейцарии в XVIII–XX вв. Теперь в качестве реперных точек при анализе данных методом наложенных эпох будем использовать годы четных (по Цюрихской нумерации) минимумов солнечной активности. Для того чтобы подчеркнуть смену полярности пар пятен в смежных циклах — закон Хейла, в период нечетного (по Цюрихской нуме-

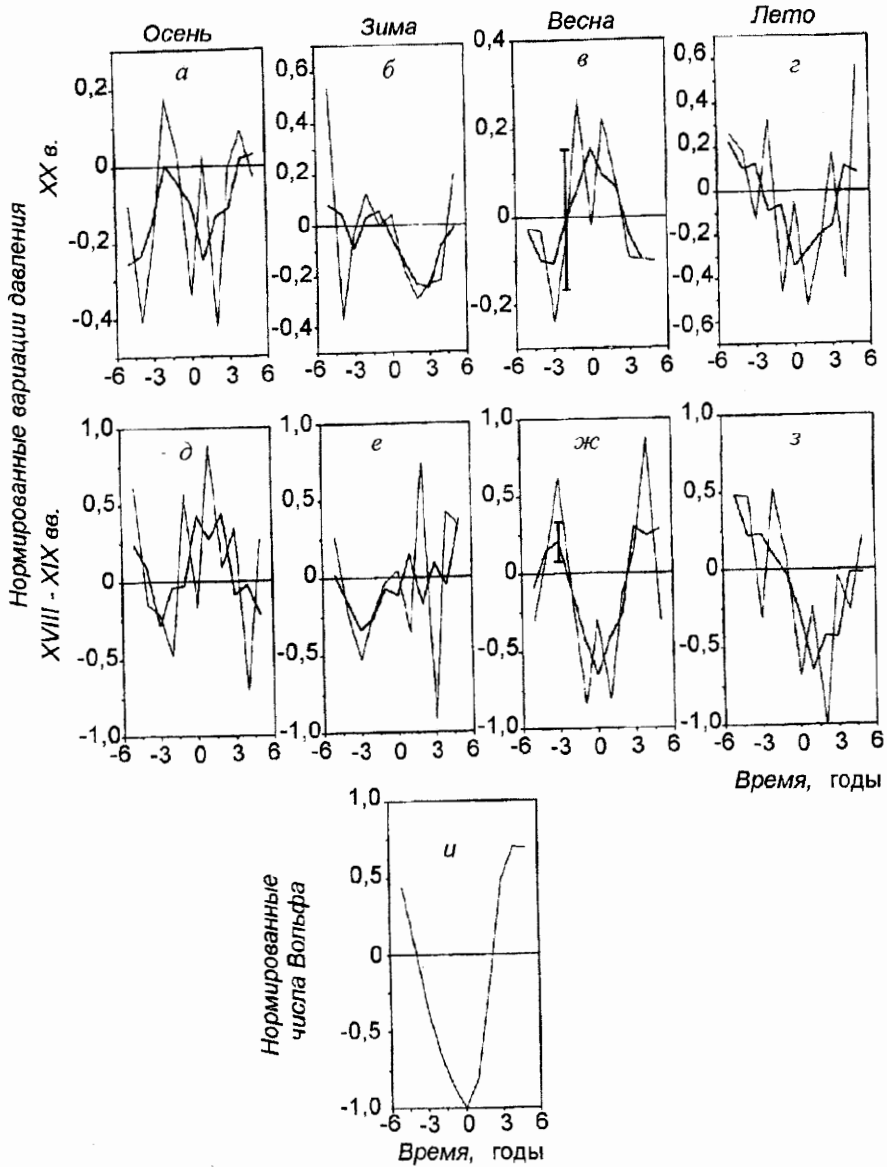


Рис. 2. Вариации приземного давления на трех станциях в Швейцарии (Базель, Женева, Цюрих) в ходе 11-летнего цикла солнечной активности для четырех сезонов в XX в. (а, б, в, г), в XIX в. (д, е, ж, з) и 11-летний цикл изменений чисел Вольфа (и).

Жирные линии — скользящее среднее по 3 точкам. Вертикальные линии — дисперсия.

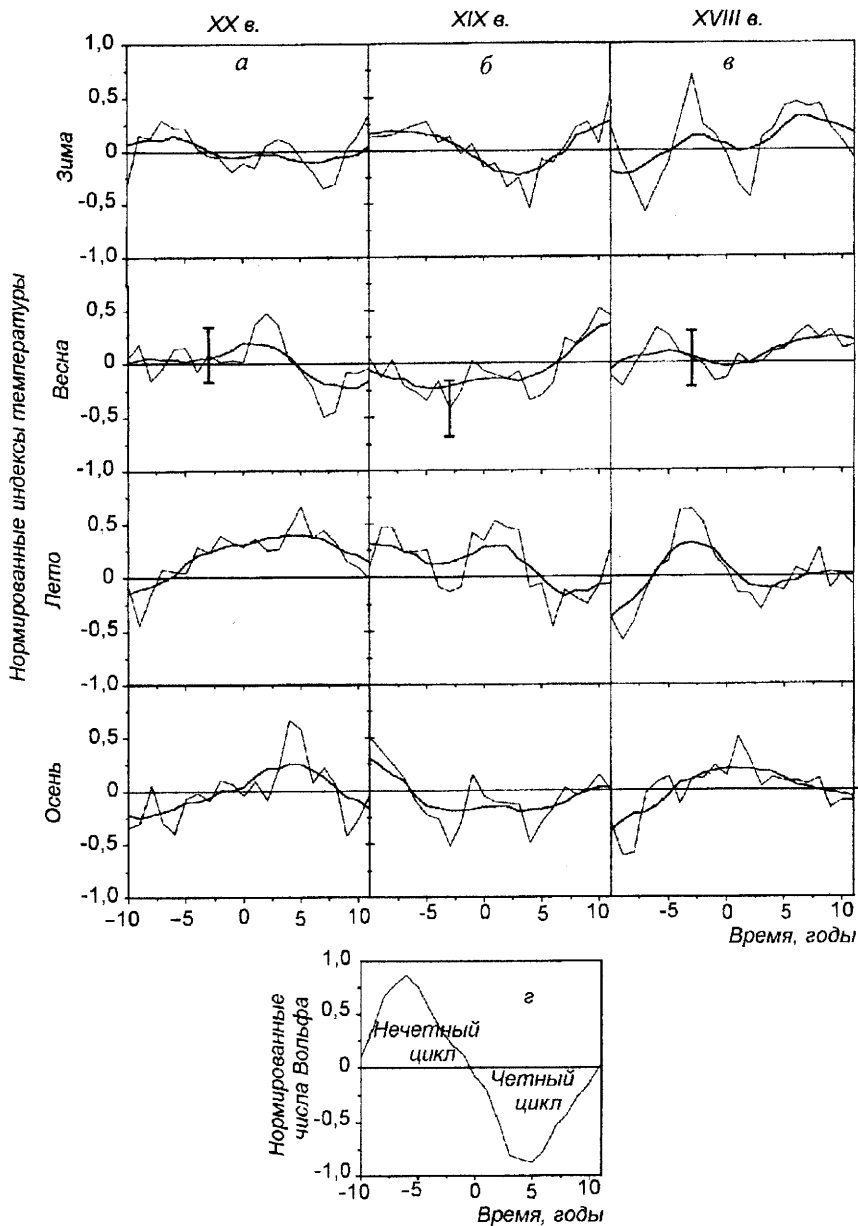


Рис. 3. Вариации индексов температуры в Швейцарии в ходе 22-летнего цикла солнечной активности для четырех сезонов в XX (а), XIX (б), XVIII вв. (в) и 22-летний знакопеременный цикл изменений чисел Вольфа (г).

Жирные линии — скользящее среднее по 3 точкам. Вертикальные линии — дисперсия.

рации) цикла солнечной активности числам Вольфа приписывался знак плюс, а в период четного цикла — знак минус.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что на фоне сильных 11-летних вариаций в рядах индексов температуры и количества осадков отчетливо виден 22-

летний цикл, особенно ярко проявляющийся в изменении индексов осенних температур и летних осадков. Затем были исследованы вариации температуры и увлажненности отдельно для XVIII, XIX и XX вв. Экспериментальные данные [15, 16] свидетельствуют о том, что время от времени закон Хейла — смена полярности пар пятен от одного 11-летнего цикла к другому — может нарушаться. В частности, по-видимому около 1700, 1800 и 1880 гг. такое нарушение имело место. Поэтому при анализе климатических индексов часть солнечных циклов, приуроченных к указанным датам, была выпущена. Полученные результаты (рис. 3) позволяют сделать следующие выводы: 22-летний цикл солнечной активности действительно проявляется в вариациях как индексов температуры, так и индексов увлажненности практически на протяжении трех веков, однако степень корреляции климатических индексов с вариациями чисел Вольфа, так же как и ее знак, может изменяться от эпохи к эпохе.

Общий характер вариаций индексов метеопараметров в Швейцарии с 1700 по 1989 г. При анализе вековых изменений индексов метеопараметров в Швейцарии с XVIII по XX в. достаточно отчетливо прослеживается “современное” потепление климата с середины XIX в., выражающееся в росте зимних, осенних и, может быть, весенних температур, тогда как температуры лета в последнее время оставались более или менее постоянными или даже уменьшались. В связи с этим фактом надо отметить, что в конце XIX в. начался новый “вековой” цикл, и общий уровень солнечной активности неуклонно возрастал до середины XX в. Более того, вариации температуры и увлажненности в течение почти пяти веков достаточно хорошо коррелируют (или антикоррелируют) с изменением уровня солнечной активности. Необходимо отметить, что в данном случае мы исключаем из рассмотрения 11- и 22-летние циклы. Если рассматривать коэффициенты корреляции между вариациями индексов температуры и увлажненности и числа солнечных пятен, то для всего периода с 1700 г. по настоящее время можно говорить о возможной корреляции между изменениями чисел Вольфа и индексов температуры для весны, лета и осени. Рассматривая отдельно XVIII–XIX вв. и XX в., можно заметить, что иногда слабая корреляция между полными рядами связана с изменением знака связи в отдельные периоды [14].

2. Вариации высотного профиля температуры в нижней атмосфере во время солнечных протонных событий

Одной из наиболее интересных задач в комплексе проблем солнечно-земных связей является определение степени воздействия солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погодо- и климатообразующие факторы. Были отмечены вариации давления, температуры и циркуляции воздуха в высоких и средних широтах после сильных всплесков интенсивности потоков СКЛ, геомагнитных возмущений и т. п. Ни один из предложенных ранее механизмов не способен в полной мере объяснить весь комплекс наблюдаемых явлений. Основная проблема — недостаток энергии. Для наблюдаемого изменения зональной циркуляции нижней атмосферы необходим дополнительный приток энергии, величина которого на несколько порядков превышает поток энергии частиц солнечного ветра, скрытую теплоту, которая может выделяться при конденсации (кристаллизации) воды в атмосфере и т. д. Поэтому представляется весьма перспективным механизм, связывающий изменение циркуляции воздуха с вариациями температуры, которые, в свою очередь, вызваны увеличением или уменьшением прозрачности нижней атмосферы для коротковолновой радиации. Подобное изменение оптических свойств атмосферы может быть

связано с вариациями под действием энергичных частиц космических лучей концентрации радиационно-активных малых газовых составляющих атмосферы или (что представляется в настоящее время более вероятным) изменением облачного покрова, в основном за счет облаков верхнего яруса.

Как показал анализ экспериментальных данных, после всплесков СКЛ прозрачность атмосферы для видимого излучения уменьшается примерно на 10–12 % на следующий день после вспышки. Эти вариации могут быть связаны с формированием под действием СКЛ облаков верхнего яруса. Со всплесками СКЛ связывают также и изменения температуры в высоких широтах ($\phi = 50 - 60^\circ$ с. ш.): в течение 3–4 дней после всплеска СКЛ наблюдается понижение температуры воздуха на высотах до 8–9 км и некоторое повышение в вышележащих слоях. Кроме того, при некоторых условиях имеет место “первичный” эффект: в первые сутки после увеличения потока СКЛ наблюдается некоторый нагрев нижних (до 8–9 км) слоев воздуха и остывание верхних [17]. Имея в своем распоряжении подобные экспериментальные данные, мы попытались промоделировать изменение состояния тропосферы при изменении прозрачности нижней стратосферы под действием части СКЛ.

Используя систему уравнений (1)–(7) переноса тепла в атмосфере за счет теплового и турбулентного переноса излучения (более подробно см. [18]), мы можем рассчитать как невозмущенный высотный профиль температуры, так и возникающий после всплесков СКЛ с учетом того, что эти события, как отмечалось выше, связаны с уменьшением потока прямой солнечной радиации в видимом диапазоне спектра на Земле, что может быть вызвано либо увеличением поглощения этой радиации, либо ее отражением или рассеянием

$$E = c_p \rho \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt}, \quad (1)$$

$$E = E_r + E_t, \quad (2)$$

$$p = R\rho T, \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \text{div}(\rho \mathbf{V}) \mathbf{V} = -\nabla p - 2\rho[\omega, \mathbf{V}] - \rho[\alpha, \mathbf{V}], \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{V_z}{R_e \cos \phi}. \quad (7)$$

Здесь t — время, T — температура, p — давление, ρ — плотность воздуха; \mathbf{V} — скорость ветра; E — приток тепла к единичному объему воздуха (E_r — за счет излучения, E_t — за счет турбулентного переноса); c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; g — ускорение свободного падения; ω — угловая скорость вращения Земли; α — угловая скорость зонального переноса воздуха; R_e — радиус Земли; ϕ — широта. Как было показано ранее [19], ситуация, соответствующая среднему по интенсивности всплеску СКЛ, может быть промоделирована введением в верхнюю тропосферу отражающего слоя, который создавал бы уменьшение величины потока приходящей на земную поверхность солнечной радиации в видимом диапазоне спектра примерно на 10 %. Кроме того, для того чтобы объяснить вариацию температуры в “нулевой” день, было сделано предположение о том, что под

влиянием частиц космических лучей изменяются оптические свойства атмосферы и в длинноволновом ИК-диапазоне — предполагалось, что в течение первых суток после возникновения отражающего видимую радиацию слоя он отражает и до 40 % величины потока ИК-излучения, приходящего на его поверхности.

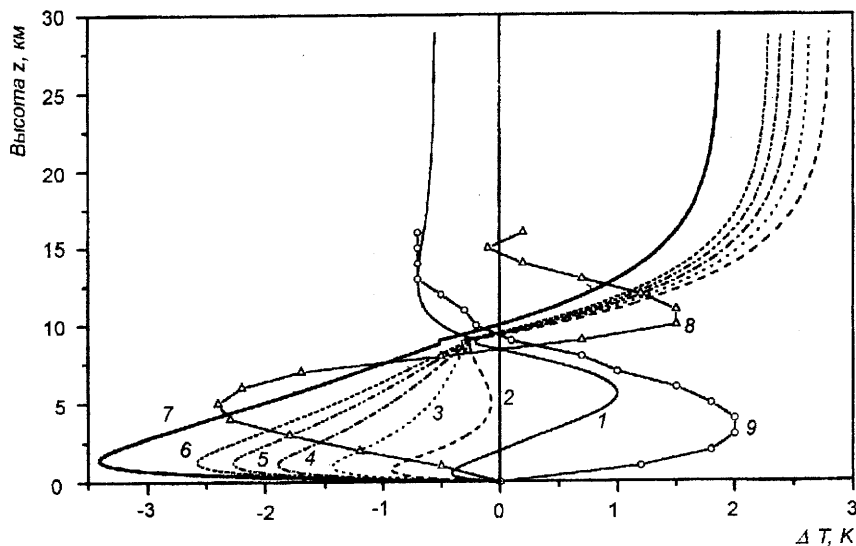


Рис. 4. Вариации высотного профиля температуры воздуха в тропосфере после всплеска СКЛ — модель и эксперимент.

Модель: 1-6 — нулевой — пятый дни после всплеска СКЛ, 7 — десятый день; эксперимент: 9 — нулевой день после всплеска СКЛ, 8 — третий день.

На рис. 4 [20] представлены вариации высотного профиля температуры после возникновения на высоте 8-9 км слоя, обусловленного всплеском СКЛ и отражающего около 10 % величины потока видимой солнечной радиации, которая приходит на его верхнюю границу. Видно, что модельные кривые достаточно хорошо, в рамках этой модели, согласуются с экспериментом.

Следует заметить, что высота отражающего слоя совпадает с высотой перистых облаков и с высотой слоя повышенной влажности в верхней тропосфере. Повидимому, это подтверждает предположение о том, что вода в различных физических фазах может играть важную роль в вариациях эффективной атмосферной прозрачности во время всплеска СКЛ. При этом появление отражающего слоя на высоте 8-9 км можно, вероятно, объяснить тем, что влияние этих космических лучей сказывается только в тех случаях, когда весьма интенсивный поток энергичных протонов проникает до соответствующего уровня.

3. Вариации температуры, давления и зональной циркуляции в нижней атмосфере средних и высоких широт во время солнечных протонных событий

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что вариации температуры тропосферы, связанные со всплесками СКЛ, могут повлиять на меридиональное распределение давления и, следовательно, на зональную (и меридиональную) циркуляцию воздуха [20].

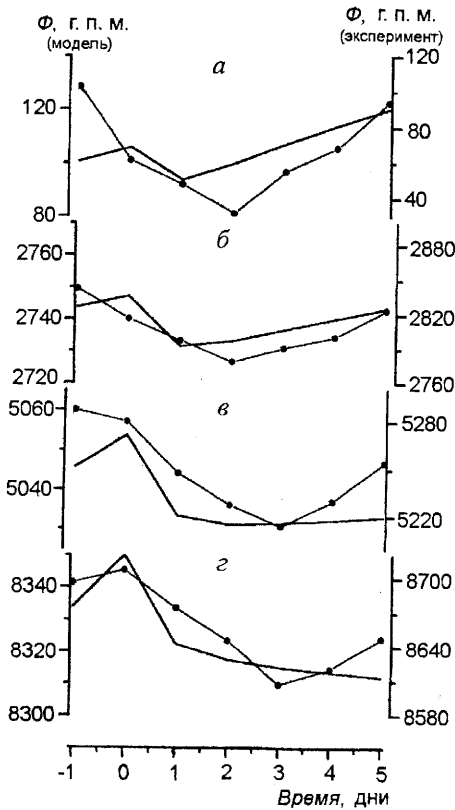


Рис. 5. Вариации во времени высоты изобарических поверхностей Φ в геопотенциальных метрах (г. п. м)

а — 1000 мбар, б — 700 мбар, в — 500 мбар, г — 300 мбар после всплеска СКЛ на широте $\phi = 60^\circ$ с. ш. Модель — сплошные линии, эксперимент — линии с точками.

z следующим соотношением: $d\Phi = \frac{g(z)}{g_0} dz$, где $g(z)$ и g_0 — ускорения свободного падения на высоте z и у поверхности Земли; абсолютные высоты изобарических поверхностей p_i зависят от давления на уровне моря p_0 и средней температуры T столба воздуха между уровнем моря и рассматриваемой поверхностью: $\Phi_{p_i} = 67,47lg \frac{p_0}{p_i}$ [18]. Для описания вариаций зональной циркуляции использовался индекс Блиновой (dA), рассчитанный на высоте 5,5 км: $d = 10^3 \frac{\alpha}{\omega}$, где α — угловая скорость зонального потока, а ω — угловая скорость вращения Земли. Достаточно убедительное согласие модельных расчетов и эксперимента свидетельствует в пользу описанного выше радиационного механизма [20].

В заключение можно сделать следующие выводы.

1. Климатические характеристики Западной Европы (температура, давление, ко-

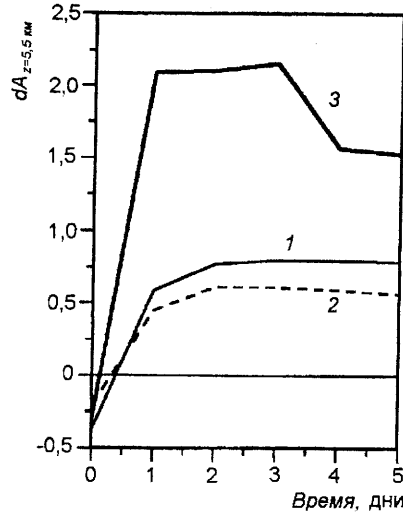


Рис. 6. Вариации индекса Блиновой после всплеска СКЛ в области высоких широт.

1 — модель для $\phi = 60^\circ$ с. ш.; 2 — $\phi = 70^\circ$ с. ш.; 3 — эксперимент для $\phi = 65^\circ$ с. ш.

Соответствующие расчеты изменения давления воздуха и зональной циркуляции атмосферы, проведенные в предположении, что после всплеска СКЛ изменяется прозрачность и, как следствие, температура тропосферы в высоких широтах ($\phi \geq 55^\circ$ с. ш.), представлены на рис. 5, 6. Вариации атмосферного давления представлены в виде изменений геопотенциальных высот соответствующих изобарических поверхностей (геопотенциальная высота Φ связана с высотой

личество осадков) испытывают значительные изменения под влиянием длиннопериодных (от нескольких десятков до нескольких сотен лет) вариаций уровня солнечной активности.

2. Характер 11- и 22-летних вариаций (корреляция/антикорреляция с изменением уровня солнечной активности) может изменяться в ходе векового солнечного цикла.

3. Поскольку одними из наиболее вероятных агентов воздействия активного Солнца на нижнюю атмосферу Земли являются космические лучи солнечного и галактического происхождения, то на основе полученных ранее другими авторами экспериментальных данных была построена модель реакции нижней атмосферы на увеличение интенсивности потока СКЛ. Полученные результаты в рамках модели показывают хорошее согласие с экспериментом.

Указатель литературы

1. Гумилев Л. Н. Гетерохронность увлажнения Евразии в древности (Ландшафт и этнос. IV) // Вестн. Ленингр. ун-та. 1966. № 6. С. 62-71.
2. Гумилев Л. Н. Гетерохронность увлажнения Евразии в средние века (Ландшафт и этнос. V) // Там же. № 18. С. 81-90.
3. Лэм Х. Х. Изменения климата в исторический период, изучаемые с помощью диаграмм и карт циркуляции // Солнечная активность и изменения климата / Под ред. Р. У. Фейрбриджа. Л., 1966. С. 44-48.
4. Дзердзеевский Б. Л. К методике изучения флуктуаций климата разных масштабов времени // Избранные труды. Общая циркуляция атмосферы и климат. М., 1975.
5. Веретененко С. В., Пудовкин М. И. Эффекты вариаций космических лучей в циркуляции нижней атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т. 33. № 6. С. 35-40.
6. Шуурманс К. И. Е. Эффекты солнечных вспышек в атмосферной циркуляции // Солнечно-земные связи, погода и климат / Под ред. Б. МакКормака, Т. Селиги. М., 1982. С. 129-135.
7. Виллет Х. К. Характер связи солнечных и климатических явлений // Солнечная активность и изменения климата / Под ред. Р. У. Фейрбриджа. Л., 1966. С. 23-28.
8. Пудовкин М. И., Веретененко С. В. Вариации меридионального профиля атмосферного давления в ходе геомагнитного возмущения // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 118-121.
9. Абросов В. Н. Гетерохронность периодов повышенного увлажнения гумидной и аридной зон // Изв. ВГО. 1962. № 4. С. 325-328.
10. Blackford J. J., Chambers F. M. Proxy climate record for the last 1000 years from Irish blanket peat and a possible link to solar variability // Earth and Planetary Science Letters. 1995. Vol.133. P. 145-150.
11. Das Klima der Schweiz von 1525-1860 und seine Bedeutung in der Geschichte von Bevoelkerung und Landwirtschaft / Pfister C. Univ. Bern Press., 1984.
12. Pfister C. Monthly temperature and precipitation patterns in Central Europe from 1525 to the present. A meteorology for quantifying man made evidence on weather and climate // Climate since 1500 A. D. / R. S. Bradly, P. D. Jones. London, 1992. P. 118-143.
13. McKinnon, J. Sunspot Numbers: 1610-1985 // Report UAG-95, WDC-A for Solar-Terrestrial Physics. 1987.
14. Пудовкин М. И., Морозова А. Л. Проявление циклов солнечной активности в вариациях индексов температуры и увлажненности в Швейцарии с 1525 по 1989 г. // Труды конф. "Современные проблемы солнечной цикличности", май 1997, С.-Петербург. СПб., 1997. С. 205-208.
15. Jose P. D. Sun's motion and sunspots // The Astronomical Journal. 1965. Vol. 70. № 3. P. 193-200.

16. Физические основы прогнозирования магнитосферных возмущений / М. И. Пудовкин и др. Л., 1977.
17. *Pudovkin M. I., Veretenenko S. V., Pellinen P., Kuro E.* Influence of solar cosmic ray burst on the temperature of the high-latitude atmosphere // *J. of Technical Physics*. 1995. Vol. 36. № 6. P. 433–443.
18. *Тверской Л. Т.* Курс метеорологии (Физика атмосферы). Л., 1951.
19. *Пудовкин М. И., Дементеева А. Л.* Вариации высотного профиля температуры в нижней атмосфере во время солнечных протонных событий // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1997. Т. 37. № 3. С. 84–91.
20. *Pudovkin M. I., Morozova A. L.* Temperature changes near the tropopause during solar proton events // *J. of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1997. Vol. 59. № 17. P. 2159–2166.