

УДК 551.5; 5.539.104 (078)
DOI: 10.52531/1682-1696-2025-25-1-138-144

EDN: WDHUMT

Научная статья

МЕХАНИЗМ ВОЗДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНО-ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ
НА ПОГОДНЫЕ УСЛОВИЯ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИВ.С. Чудновский,
А.В. Рыбакова
АО «НПК «СПП», Москва,
Российская Федерация

Original article

THE MECHANISM OF INFLUENCE OF
SOLAR-PROTON EVENTS ON WEATHER
CONDITIONS IN THE EUROPIAN
TERRITORY OF RUSSIA

Рассмотрен механизм воздействия солнечных космических лучей на верхнюю тропосферу Земли. Проведенные оценки указывают на возможность прогнозирования аномальных похолоданий на Европейской территории России с заблаговременностью в 9–18 дней.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: солнечные космические лучи, касп, тропосфера, стратосфера, пич-угол

V.S. CHUDNOVSKY, A.V. RYBAKOVA,
JSC «NPK SPP», Moscow, Russian
Federation

The mechanism of the effect of solar-proton cosmic rays on the upper troposphere of the Earth is considered. The estimates carried out indicate the possibility of forecasting abnormal cold weather in the European territory of Russia with an advance time of 9–18 days.

KEYWORDS: solar cosmic rays, cusp, troposphere, stratosphere, pitch angle

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос о связи солнечно-протонных событий (СПС) и погоды на Земле долгое время не выходит за рамки полемики.

Так, достаточно четко установлена связь между 22-х летним циклом солнечной активности и засухами для территории США [7]. Надежно установлена связь между числами солнечных пятен и грозовой активностью в Англии [7]. Было обнаружено, что пик неустойчивости атмосферного давления наблюдается на третьи сутки после максимума развития магнитной бури, обусловленной СПС [3]. Однако механизм подобных аномальных явлений не выходит за рамки дискуссии.

СОДЕРЖАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Протоны солнечных космических лучей (СКЛ), захваченные магнитосферой Земли, совершают «винтовые» колебательные движения от северного магнитного полюса Земли к южному и наоборот. В радиационных поясах Земли (РПЗ) существует динамическое равновесие между процессами пополнения поясов и процессами потерь частиц. В основном частицы покидают радиационные пояса

Земли из-за потери своей энергии на ионизацию (эта причина ограничивает, например, пребывание протонов внутреннего пояса в магнитной ловушке временем $t \sim 10^9$ сек), из-за рассеяния частиц при взаимных столкновениях и рассеяния на магнитных неоднородностях и плазменных волнах различного происхождения. Указанные эффекты приводят к нарушению условий стационарного движения частиц в геомагнитном поле (т. н. адиабатических инвариантов) и к «высыпанию» частиц из РПЗ в атмосферу вдоль силовых линий магнитного поля. «Высыпание» протонов в большей части происходит в полярных каспах – областях в околополюденной части магнитосферы, имеющей вид воронки, расширяющейся от Земли до магнитопаузы (рис. 1), с площадью основания каспа $s \approx 1,3 \times 10^{16}$ см².

По нашим оценкам, поток протонов может захватываться поверхностью магнитосферы с площадью $S = 4,3 \times 10^{19}$ см² (по оценкам других авторов $S = 10^{20}$ см² [4]). Таким образом, в области каспа происходит уплотнение потока протонов в $k = \frac{S}{s} \approx 3,5 \times 10^3$ раз. При мощных СПС с потоком протонов $m_c = 10^3$ частиц/(см² × с × с), с энергиями более 10 МэВ, регистрируемых КА, поток частиц в районе каспа составит m_k

$$m_k \approx \pi k m_c \approx \frac{(1-025)}{2} \times 10^7 \text{ частиц}/(\text{см}^2 \times \text{с}) = 0,375 \times 10^{11} \text{ (частиц}/(\text{м}^2 \times \text{с})) \quad (1)$$

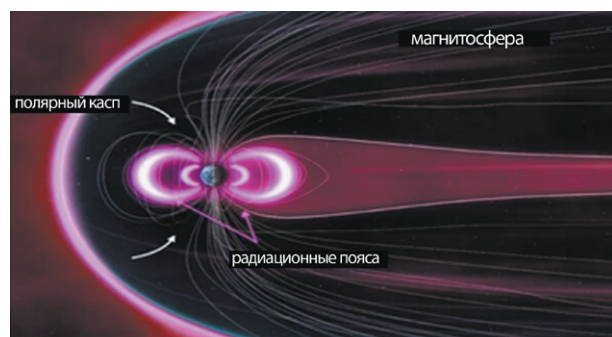


РИС. 1.

Полярные каспы и магнитосфера Земли

что соответствует плотности потока мощности

$$M = 0,064 \text{ Вт/м}^2 \quad (2)$$

В выражении (1) предполагается, что 25% энергии уходит на ионизации частиц, и половина частиц «высыпается» в районе северного каспа.

Например, при длительности вспышки (нарастании фронта) в $t=6^h=2,16 \times 10^4 \text{ с}$, энергия, приходящаяся на 1 м^2 площади, составит

$$W \approx 1,38 \times 10^3 \text{ Дж/м}^2 \quad (3)$$

Трудности в объяснении воздействия СКЛ на погоду заключаются в следующем. Как известно, основные погодные процессы разворачиваются в тропосфере (слой земли с высотами $h < 15 \text{ км}$ на экваторе и $h < 9 \div 10 \text{ км}$ в северных широтах). Однако, при «высыпании», потоки протонов с энергиями $E = (10 \div 300) \text{ МэВ}$ при СКЛ не достигают тропосферы Земли.

В таблице 1 представлены расчеты проникновения протонов в атмосферу Земли при питч-угле в $5\text{--}10^\circ$.

ТАБЛИЦА 1.

Глубина проникновения СКЛ в атмосферу Земли в северных широтах

Энергия протонов СКЛ (МэВ)	Глубина проникновения СКЛ в атмосферу h (км)
0,1	110
0,4	98
1,0	90
5,0	73
10	65
50	42
100	32
300	20

Однако здесь следует иметь ввиду следующее обстоятельство. Протоны с энергией в $0,1\text{--}0,4 \text{ МэВ}$ подвержены эффектам «перезарядки» [1]. Суть эффекта «перезарядки» состоит в следующем. Длина пробега протона с энергией $0,1 \text{ МэВ}$ на высоте 120 км около 6 км . При встрече с атомом азота или кислорода протон может захватить электрон атома кислорода или азота с потерей энергии не более 15 эВ . В этом случае протон испытывает «перезарядку» и благодаря захваченной частице становится нейтральной частицей – нейтроном. В результате взаимодействия нейтрон может отклониться на угол до 5° . Поскольку сечение взаимодействия с частицами у нейтрона на несколько порядков ниже, чем у протона, и составляет менее 2 барн , длина пробега нейтрона больше чем у протона. Однако на высотах около $(40\text{--}45) \text{ км}$ произойдет очередной акт «перезарядки» и при столкновении с молекулой или атомом азота или кислорода нейтрон может потерять электрон и становится протоном. Однако, поскольку плотность атмосферы на высоте 45 км гораздо выше, чем на высоте 120 км , пробег протона до следующего столкновения составит несколько метров. Акт перезарядки $p \rightarrow r \rightarrow n$ уменьшит энергию частицы примерно на 30 эВ и немного уменьшит скорость частицы (примерно на $0,03\%$). Ситуация повторяется, после взаимодействия образуется нейтрон, который спустится до высоты около 20 км . При повторяющейся ситуации следующая «перезарядка» произойдет на высоте около 17 км . На высоте 17 км «перезарядки» становятся очень частыми, пробеги нейтронов с энергиями $0,1\text{--}0,4 \text{ МэВ}$ составляют несколько сотен метров, и на высотах $11\text{--}14 \text{ км}$ частица потеряет оставшуюся энергию и произойдет быстрая диссипация энергии.

Частицы с энергией около $0,4 \text{ МэВ}$ могут достигнуть высот до 11 км .

Протоны с энергиями от $0,4$ до $0,7 \text{ МэВ}$ также могут быть подвержены эффектам «перезарядки», однако вероятность такого процесса для указанных энергий значительно ниже [8], большая часть энергии растрачивается на процессы ионизации.

Экспериментально, при изменениях плотности потоков нейтронов с помощью шаров зондов в Нью-Джерси и при помощи летательных лабораторий, установленных на самолетах, был обнаружен максимум распределения нейтронов с энергиями $0,1 \div 2 \text{ МэВ}$ на высотах около 12 км [12].

В таблице 2 представлены результаты измерений потоков протонов, полученные КА POES-15 в момент солнечной вспышки 8 ноября 2000 г. [6].

Согласно таблице 2, при попадании в касп до высот $11\text{--}14 \text{ км}$ на 1 м^2 будет приходиться поток

$$n = \frac{(1-0,25)}{2} \times \pi \times k \times 10^4 \times N \approx 3,3 \times 10^{13} \text{ частиц/(с} \times \text{м}^2) \quad (4)$$

ТАБЛИЦА 2.

Распределение протонов по энергиям 8 ноября 2000 г.

Е (МэВ)	Н частиц/ (см ² ×ср×с)	$\frac{(1-0,25)}{2} \times \pi \times k \times 10^4 \times N$	За 36 ^h
0,1–0,4	8×10 ⁵	3,3×10 ¹³ частиц/ (с×м ²)	ΔЕ = 17,2×10 ⁴ Дж/ м ²
0,8–4	2×10 ⁵		
14–50	5×10 ⁴		
15–40	10 ³		
40–80	10 ²		
50–90	2×10 ³		

с энергией (0,1÷0,4) МэВ.

Экспорт протонов в атмосферу Земли, согласно показаниям бортовой космической аппаратуры, продолжался около 36^h = 1,3×10⁵ с.

Энергия, закачиваемая в столб атмосферы объемом 1 м², на высотах 11÷14 км составит ΔЕ = 17,2×10⁴ Дж/м², или объемная плотность энергии на высоте 11÷14 км при высоте столба воздуха 3000 м, составит примерно ΔЕ_v = 58 Дж/м³.

Энергия молекул в объеме 1 м³ на высотах 11÷14 км, примерно равна Е_v = 2,2×10⁴ Дж/м³. Из уравнения состояния идеального газа запишем:

$$\frac{\Delta E_v}{E_v} = \frac{\Delta T}{T} \quad (5)$$

где Т – температура воздуха на высоте Н, ΔТ – приращение температуры.

Из выражения (5) при температуре воздуха Т = 218° К на высотах около 13 км составит ΔТ = 0,57°.

При повышении температуры в некотором объеме воздуха происходит увеличение давления на границе температурной области.

Если допустить, что изменение (приращение) температуры воздуха ΔТ является адиабатическим, то в этом случае связь между изменением давления ΔР и ΔТ можно оценить по формуле [9]:

$$\Delta P = \Delta T \times \frac{P}{T} \times \left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) - 1 \quad (6)$$

где $\left(\frac{\gamma-1}{\gamma}\right) = 0,286$.

При ΔТ = 0,57°, давлении воздуха на высоте 11÷14 км в Р_Н = 22000 Па, и температуре на указанной высоте в Т = 217° К, оценим величину ΔР ≈ 202 Па.

Геострофический ветер на высоте Н = 10–14 км имеет скорость V ≈ 16÷20 м/с. Оценить изменение скорости ветра v на высоте Н при изменении давления можно по формуле [11]:

$$\frac{1}{\rho} \times \frac{dP}{dx} - \frac{v^2}{r} = 2w \times (\sin \phi) \times v \quad (7)$$

где ρ = 0,280 кг/м³ – плотность воздуха на высоте Н, r ≈ 1,5×10⁶ м – расстояние от основания каспа до магнитного полюса, x ≈ $\frac{L}{2}$, L ≈ 1500000 м – среднее расстояние между барическими центрами, φ ≈ 75° – широта полярного каспа, w = 7,27×10⁻⁵ с⁻¹ – угловая скорость вращения Земли.

Тогда барический атмосферный горизонтальный градиент $\frac{dP}{dx} = 0,269 \times 10^{-3}$ Па/м, что более чем на порядок выше градиента давления при лунно-солнечных атмосферных приливах. При указанном градиенте давления v ≈ 6,8 м/с, что составляет 35% от скорости геострофического ветра V.

Оценим, насколько достоверны полученные результаты. В работе Ermakova T.S., Koval T.V., Okulicheva A.A. [5] представлены результаты измерений параметров нижней стратосферы, полученные в момент солнечной вспышки в декабре 2000 г. Согласно полученным результатам из хранилища данных JRA55 и MERRA-2, на высотах в 12–14 км, в момент солнечной вспышки температура повысилась на (2÷2,5)°, скорость ветра изменилась на (4–6) м/с, атмосферное давление в районе каспа увеличилось на (100÷300) Па, что удовлетворительно совпадает с проведенными оценками.

Имеются данные по увеличению скорости ветра в момент вспышки 17.01.2005 г. На рис. 2 представлены данные работы Ветренко С.В. [2], согласно которым, скорость ветра на высотах примерно в 15 км, изменилась на 12–15 м/с.

Результаты измерений числа протонов, полученных американским КА «GOES» в момент вспышки 17.01.2005 г, представлены в таблице 3.

Согласно данным таблицы 3, для 10 и 50 МэВ возрастание числа частиц N_Е с уменьшением их энергии подчиняется закону вида

$$N_E \approx 8,8 \times 10^4 \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-1,5} \quad (8)$$

где E₀ = 1 МэВ.

Экстраполяция по формуле (8) дает прогнозное число частиц N_Е с энергиями (0,1–0,4) порядка N_Е ≈ 24×10⁵ частиц/(см²×ср×с).

В этом случае, расчеты, проведенные по формулам (4...7), дают увеличение температуры и давления на величины: ΔТ ≈ 0,86°, ΔР ≈ 300 Па. Увеличение скорости ветра составит в соответствии с (10): v ≈ 10,2 м/с, что неплохо соответствует данным Ветренко С.В. [2], (v = 12÷15 м/с на высотах 15–20 км), представленным на рис. 2.

В северных широтах существует полярная конвективная ячейка [11]. Воздух в полярной ячейке вблизи поверхности земли в северных широтах спускается к югу, где происходит его нагрев. Нагретый воздух поднимается вверх вплоть до тропопаузы

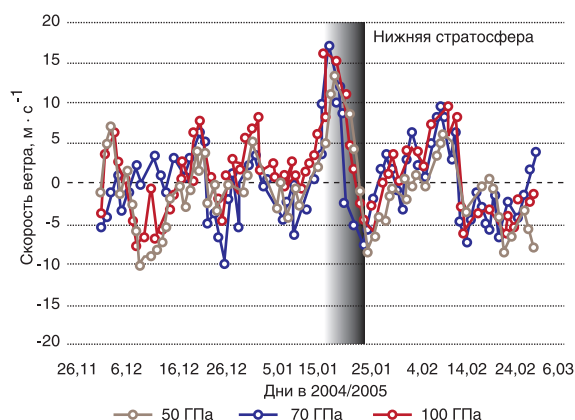


РИС. 2.
Изменение скорости ветра в нижней стратосфере

ТАБЛИЦА 3.
Оценка потока протонов с энергиями (0.1×0.4) МэВ

Е (МэВ)	Нчастиц/ (см²×ср×с)	Прогноз N	ΔЕ за 18 ^h
>50	0,24×103		
>10	2,8×103		
0,1÷0,4		24×10 ⁵	ΔЕ =25,8×10 ⁴ (Дж/м²)

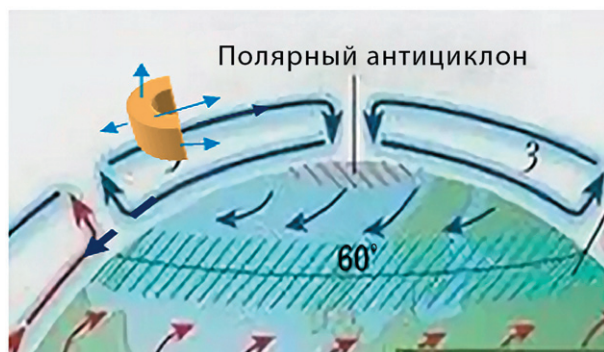


РИС. 3.
Изменение ветровой циркуляции полярной ячейки

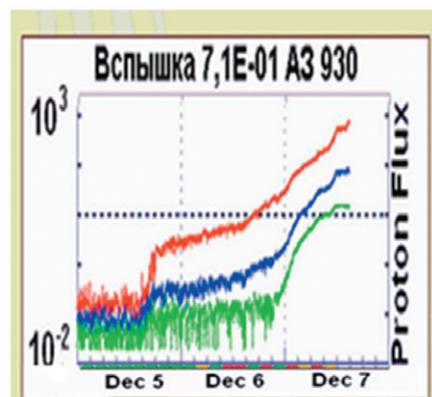
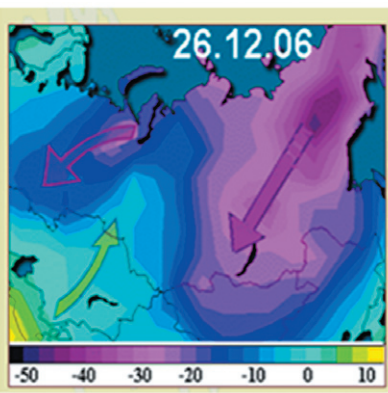


РИС. 4.
СПС 5 декабря 2006 г. и ультраполярное вторжение холодных масс воздуха



(высоты 10–13 км) и начинает восхождение к северному полюсу. В высоких широтах он снова охлаждается и опускается к поверхности земли. Если на высотах около 12 км возникает температурная неоднородность, то вследствие увеличения барического давления происходит увеличение скорости ветра на величину v , а также изменение его направления (рис. 3).

В результате холодный ветер вблизи поверхности земли (океана) может потеснить сравнительно теплые воздушные массы, и холодный фронт вторгнется южнее северного полярного круга (рис. 3, 4).

На возможную связь солнечно-протонных событий и погоды указывали как ряд исследователей, о чем говорилось в начале данной работы, так и многие блогеры (например, И.А. Васильева).

На рисунке 4 представлен пример развития СПС 5 декабря 2006 г. и последовавшее за солнечной вспышкой ультраполярное вторжение. Холодные массы воздуха, как видно из рисунка 4, могут проникать как на территорию Сибири, так и достаточно глубоко на Европейскую территорию России. Указанное обстоятельство побудило автора рассмотреть возможную связь СПС и изменение температур в районе города Москвы.

На рисунке 5 представлены изменения температурного поля в Москве в периоды трех мощных СПС. Данные о температуре взяты с сайта «Погода в Москве. Климатический монитор».

В таблице 4 представлен расчет избыточного давления ΔP (Па) для мощных СПС в зимний период (середина сентября – середина марта) с 2000 г. и изменениями температуры в г. Москве (Δt°) спустя некоторый интервал времени от СПС (Δt^A), выраженного в сутках. Значимыми предполагались изменения $\Delta t^\circ > 2,5^\circ$.

В третьем столбце таблицы указан интервал времени в сутках (Δt^A), прошедшего от СПС до похолодания. В четвертом столбце таблицы представлены отклонения температуры (Δt°) от среднестатистического температурного фона.

Из таблицы 4 просматривается связь между расчетными значениями прироста давления ΔP , обусловленного СПС, и параметрами Δt^A и Δt° , при этом, чем больше падение температуры, тем меньше времени проходит от момента СПС. Логически это вполне объяснимо. Чем выше избыточное давление, тем больше величина изменения скорости ветра, и тем быстрее волна похолодания достигнет некоторого географического

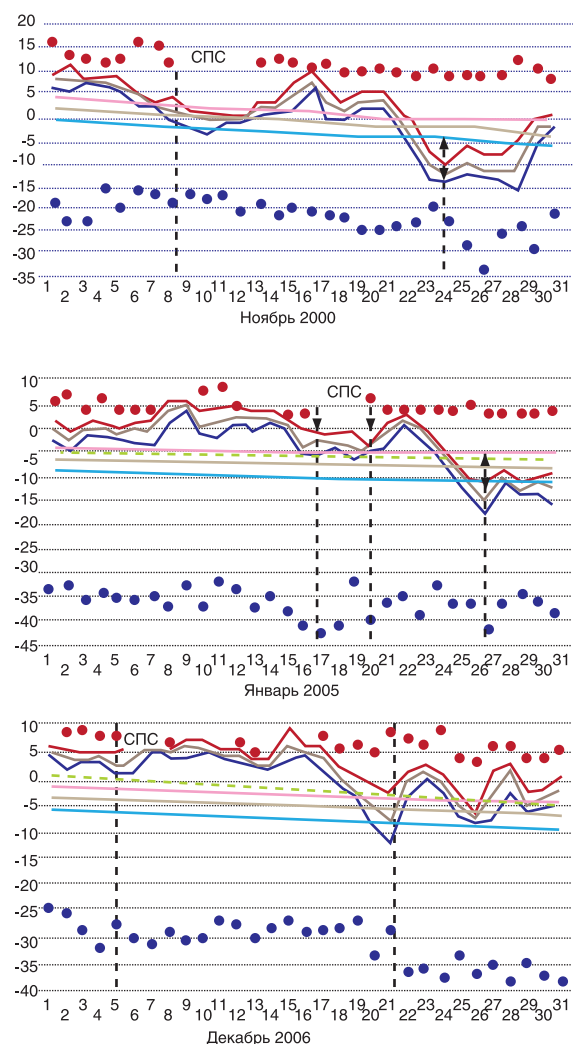


РИС. 5.
Мощные СПС и изменения температуры в г. Москва

ТАБЛИЦА 4.
Параметры мощных СПС с 2000 г.

СПС	ΔP (Па) (расчет)	Δt_D (Москва)	Δt_0 (Москва)	Примечание
8 ноября 2000	200	15	-7	
28 октября 2003*	<7	—	—	Потоки частиц с энергиями >10 МэВ более 2×10^4 МэВ/(с×ср×см ²)
17 января 2005	300	10	-8	
6 декабря 2006	320	16	-6	
23 января 2012	900	9	-14,9	
17 марта 2012	365	9,5	-5,8	
6 января 2014	540	13	-11,6	
10 сентября 2017	40	21,5	-3,5	
24 октября 2024	325	11	-5,2	

*Примечание: Потоки частиц с энергиями $(0.1 \div 0.4)$ МэВ не более 6×10^4 МэВ/(с×ср×см²), продолжительность вспышки 1–3 часа.

пункта (в выбранном случае Москвы).

Этот достаточно интересный предварительный вывод побудил автора проанализировать данные для мощных СПС, полученных до 2000 г. Результаты представлены в таблице 5.

Количественные оценки потока протонов для СПС 1942 и 1859 гг. не проводились. По косвенным оценкам, потоки частиц $N_{>10(\text{МэВ})}$ и $N_{>(0.1-0.4)\text{МэВ}}$ были значительными. По измерениям температур в 1859 г. в г. Москве данных нет.

На рис. 6 представлена зависимость Δt^A (ось Y) от Δt^0 (ось X).

Получено уравнение регрессии:

$$\Delta t^0 = 0,6744 \Delta t^A - 17,1585 \quad (9)$$

Расчетный коэффициент линейной корреляции: $R=0,7129$.

Критерий значимости $t = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} = 4,50$. При уровне $\alpha = 0,01$ по таблице распределения Стьюдента, $t_c = [(n-2), \alpha/2] = 3,105$. Поскольку $t > t_c$, то с доверительной вероятностью $P > 0,99$ связь обнаружена между параметрами обнаружена.

Рассмотрим зависимость расчетного значения ΔP от Δt^A в соответствии с таблицей 4. Поскольку, логично предположить, что $\Delta P \sim v \sim \frac{\Delta L}{\Delta t}$, построим гиперболическую зависимость вида $\Delta P \sim (\Delta t)^{-1}$ (рис. 7).

Коэффициент корреляции для гиперболической аппроксимации $R=0,7105$.

Критерий значимости $t = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} = 2,47$. При уровне $\alpha = 0,05$ по таблице распределения Стьюдента, $t_c = [(n-2), \alpha/2] = 2,36$. Поскольку $t > t_c$, то с доверительной вероятностью $P > 0,95$ связь обнаружена между параметрами обнаружена.

С другой стороны, чем выше параметр ΔP , тем сильнее ожидается похолодание в некоторой удаленной от полярного круга точке. На рисунке 8 отображена зависимость вида $\Delta P \sim \Delta t^0$.

ТАБЛИЦА 5.

Параметры наиболее мощных СПС с 1859 г.

Событие	Δt^A	Δt^*	Примечание
13 марта 1989 г. Квебекское СПС	18–20	-2,8	$N>1(\text{МэВ})>10^5 \text{ част}/(\text{см}^2\text{ср})$: GOES-7* Архангельск: $\Delta t_0 = -6,3$, $\Delta t^A = 16$ Чикаго: $\Delta t_0 = -7,9$, $\Delta t^A = 6$
12 декабря 1970 г.	15	-9,6	$N(1\div 5)\text{МэВ}>10^4 \text{ част}/(\text{см}^2\text{ср})$: Луноход-1 $\Delta t^A \approx 2^A$
23 февраля 1956 г.	13	-6,9	$N>10(\text{МэВ})>10^5 \text{ част}/(\text{см}^2\text{ср})$: оценка [10]
27 февраля 1942 г.	7,5	-15,9	Открыто радиоизлучение Солнца при солнечной вспышке
2 сентября 1859 г. Каррингтонское СПС	—	—	Стокгольм: $\Delta t^* = -6$, $\Delta t^A = 16$; Прага: $\Delta t^* = -4,1$, $\Delta t^A = 18$; Ф.И. Тютчев – холодный сентябрь в Женеве. Зима 1859/1860 в России холодная



РИС. 6.

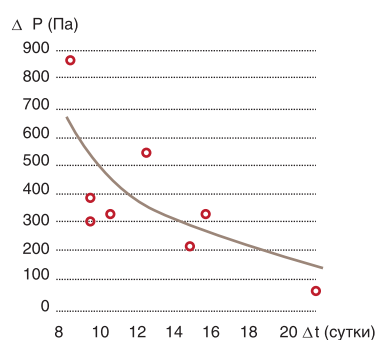
Зависимость Δt^* (ось Y) от Δt^A (ось X)

РИС. 7.

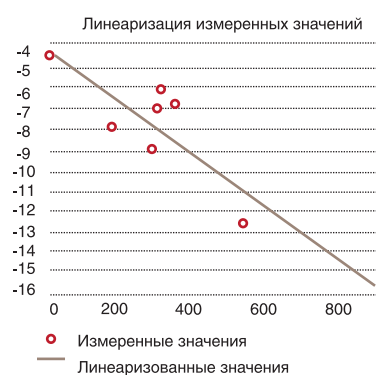
Зависимость ΔP (ось Y) от Δt в сутках (ось X)

РИС. 8.

Зависимость Δt^* (ось Y) от ΔP (ось X)

Коэффициент линейной корреляции $R = -0,9118$. Критерий значимости $t = \frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} = 5,44$. При уровне $\alpha = 0,01$ по таблице распределения Стьюдента, $t_c = [(n-2), \alpha/2] = 3,49$. Поскольку $t > t_c$, то с доверительной вероятностью $P > 0,99$ связь между параметрами обнаружена.

В работе рассмотрены взаимосвязи между сильными СПС и кратковременными похолоданиями на территории Европейской части России (в частности московского региона) в периоды с середины сентября по середину марта, когда контрасты температурных полей между северными территориями и европейской частью значительны. Это не означает, что в весенне-летний период такой связи не может быть. Примером этого может служить мощное СПС (Каррингтонское событие), которое наблюдалось в начале сентября 1859 г. Другим примером может служить мощное СПС 14 апреля 2014 г. Согласно расчетам, при указанном СПС избыточное давление в районе каспа могло достигать до 2000 Па, похолодание в московском регионе наблюдалось через 10 суток. Однако уменьшение среднесуточной

температуры в московском регионе составило всего $3,8^\circ$. Вероятно, полученное столь незначительное похолодание после мощного СПС связано с перестройкой температурного режима северных областей при переходе от зимнего периода к лету.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из проведенных оценок следует, что при мощных СПС, наблюдаемых с середины сентября по середину марта, в случаях наличия значительной протонно-нейтронной компоненты в солнечных космических лучах спустя 7–20 суток после начала СПС на Европейской территории России наблюдается кратковременное понижение среднесуточных температур на $(3,5^\circ \div 16^\circ)$. Запоздывание в похолодании и амплитуда изменений температур зависит от мощности протонно-нейтронной компоненты с энергиями E от 0,1 до 0,4 МэВ.

Естественно, было бы нелепо предполагать, что только мощные СПС отвечают за погодные изменения погоды на Европейской территории России (ЕТР). Помимо указанного фактора существует мно-

жество динамических процессов в атмосфере Земли, отвечающих за изменениями температурного режима ЕТР. Однако включение солнечно-протонного фактора в метеорологические прогнозы может существенно повысить достоверность среднесрочных прогнозов погоды для ЕТР.

ЛИТЕРАТУРА

1. БАГРИЦКИЙ Б.А. Водородная эмиссия в спектре полярных сияний. УФН, август 1958. Т. LXV. Вып. 4. С. 631–664.
2. ВЕТРЕНКО С.В. Эффекты солнечных протонных событий января 2005 года в вариациях интенсивности стратосферного полярного вихря // Известия РАН. Серия физическая. 2021. Т. 85. №9. С. 1336–1339.
3. ВЛАДИМИРСКИЙ Б.М., ТЕМУРЬЯНЦ Н.А., МАРТЫНЮК В.С. Космическая погода и наша жизнь. Фрязино: Изд-во «ВЕК2». 2004. 221 с.
4. ДРУЖИНИН И.П., САЗОНОВ Б.И., ЯГОДИНСКИЙ В.Н. Космос-Земля. Прогнозы. М.: Изд-во «Мысль». 1974. 288 с.
5. ЕРМАКОВА Т.С., КОВАЛЬ Т.В., ОКУЛИЧЕВА А.А. Последствия ранних стратосферных потеплений / Сб. докладов Министерства образования и науки XII Межд-ая конф. «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений». С. Паратунка, 2021.
6. ЛАЗУТИН А.А. Возрастание энергичных протонов СКЛ на Земле и их связь с источниками на Солнце // Солнечно-земная физика. Иркутск: 2020. Т. 6. № 4. С. 46–50.
7. МИЗУН Ю.Г. Космос и погода. М.: Изд-во «Наука». 1986. 145 с.
8. НИКОЛАЕВ В.С., ДМИТРИЕВ Н.С., ТЕПЛОВА А.Я., ФАЙНБЕРГ Ю.А. Сечение перезарядки протонов. Эксперимент // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, Астрономия, М.: 1994. Т. 35. №3. С. 84–85.
9. РЕЙФ Р. Статистическая физика. М.: Изд-во «Наука». 1977. Т. V. 351 с.
10. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. М.: Изд-во «Советская энциклопедия». 1976. 655 с.
11. ШВЕД Г.М. Введение в динамику и энергетику атмосферы. СПб.: Изд-во СПГУ, 2020, 394 с.
12. HESS W.N., CHUPP E.L. Cosmic Ray Neutron Energy Spectrum // Physical Review. V. 116. P. 445–457. 1959.
3. VLADIMIRSKY B.M., TEMURYANTS N.A., MARTYNYUK V.S. Space weather and our life. Fryazino: Vek2, 2024:221. (In Russian).
4. DRUZHININ I.P., SAZONOV B.I., YAGODINSKY V.N. Space-Earth. Forecasts. Moscow: Mysl. 1974:288 (In Russian).
5. ERMAKOVA T.S., KOVAL T.V., OKULICHEVA A.A. Consequences of early stratospheric warmings. In the collection of reports of the Ministry of Education and Science of 12 international conference “Solar-terrestrial connections and the physics of earthquake precursors”. S. Paratunka: 2021. (In Russian).
6. LAZUTIN L.L. Increase in energetic SCR protons on Earth and their relationship to solar sources. *Solnechno-zemnaya fizika*. Irkutsk: 2020;6;(4):46–50. (In Russian).
7. MIZUN YU.G. Space and weather. Moscow: Nauka, 1986:145. (In Russian).
8. NIKOLAEV V.S., DMITRIEV N.S., TEPLOVA A.YA., FAINBERG YU.A. Proton charge exchange cross section. Experiment. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 3: Fizika, Astronomiya*. Moscow. 1994;35;(3):84–85. (In Russian).
9. REIF R. Statistical physics. Moscow: Nauka, 1977:351. (In Russian).
10. Space physics. Little encyclopedia. Moscow: Sovetskaya Entsiklopedia, 1976:655. (In Russian).
11. SHVED G.M. Introduction to Atmospheric Dynamics and Energy. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University, 2020:394. (In Russian).
12. HESS W.N., CHUPP E.L. Cosmic Ray Neutron Energy Spectrum // Physical Review. 1959; V;116:445–457.

REFERENCES

Чудновский Владислав Семенович,
д.т.н., АО «НПК «СПП», ведущий научный сотрудник
тел. 8 (901) 652-99-04, e-mail: ngoka@mail.ru

Рыбакова Александра Владиславовна,
АО «НПК «СПП», ведущий инженер
тел. 8 (964) 765-28-08, e-mail: ngoka@mail.ru

✉ 111024, а/я 35, Москва
111024, post office box 35, Moscow