

УДК 523.74

**А. В. Антонов, Ю. М. Герасимов**

Радіоастрономічний інститут Національної академії наук України, Харків

## **ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ТРОПОСФЕРУ ЗЕМЛИ**

*Досліджено події тривалих змін метеопараметрів тропосфери з 2001 по 2006 рр. при дії одиночних сонячних спалахів Х-рентгенівського класу, які супроводжувались корональним викидом маси (КВМ). Встановлено, що основну дію на висотні профілі температури, тиску і вологості для північних широт від 74° до 60° здійснюють КВМ. Під їхньою дією при сонячному цілодобовому освітленні тропосфери температура збільшується приблизно на 10 °С на висотах понад 9 км. На низьких висотах відбувається охолодження тропосфери на ту ж величину. В умовах полярної ночі профілі змін температури виявляються протилежними. Вище за 6 км атмосфера холодне приблизно на 4 °С, а нижчі шари нагріваються радіаційним випромінюванням Землі на ту ж величину. У всіх випадках зафіксовано зменшення атмосферного тиску, яке на висоті 9 км може перевищувати 10 гПа. Вологість тропосфери в усіх випадках зменшується практично по всій товщі середньої тропосфери. В окремих випадках спостерігався аналогічний вплив на тропосферу прямих сонячних протонів.*

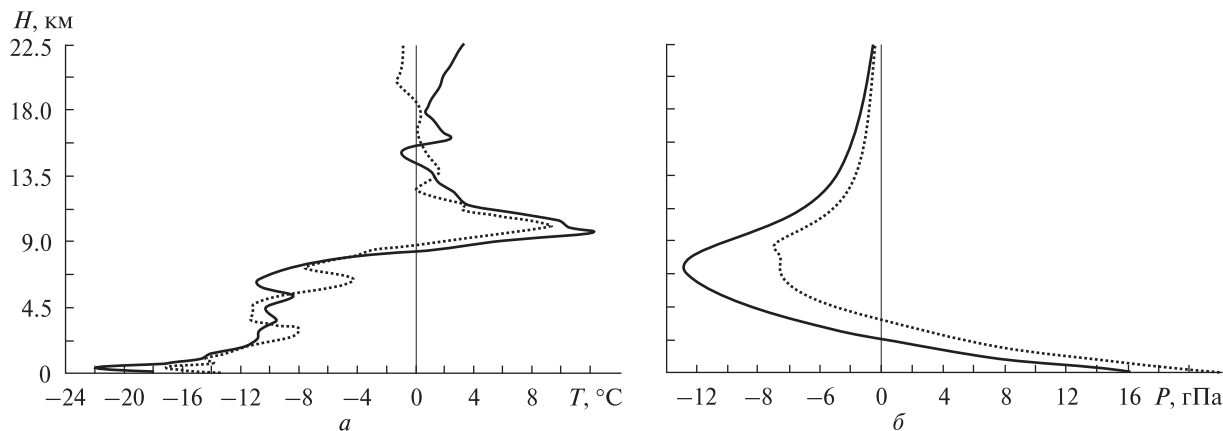
Солнечные вспышки, сопровождающиеся интенсивным рентгеновским излучением и КВМ, оказывают влияние на атмосферу Земли и геомагнитное поле. Исследование связи этих явлений проводится длительное время и продолжает развиваться в связи с актуальностью изучения проблем солнечно-земных связей. Первые исследования в этой области были связаны с изучением воздействия рентгеновского излучения вспышек на атмосферу выше 60 км [1].

Развитие возможностей спутниковых наблюдений позволило обнаружить КВМ, определить параметры их магнитного поля, интенсивность и энергетический спектр протонов в окрестности Земли на высоте 35 тыс. км. Это позволило оценить воздействия протонов высокой энергии, которые попадают в область каспа, севернее 60° геомагнитной широты, на атмосферу на высотах от 60 до 30 км. Это воздействие оказывает как кратковременное, так и долговременное влияние на параметры стратосферы, такие как температура, содержание озона, химический состав, образование водосодержащих комплексов [2].

В соответствии с расчётами [3] протоны с энергией 1 ГэВ достигают высот верхней тропосферы в 20 км и вызывают ионизацию атмосферы с ко-

эффициентом ионизации 30 ионов см<sup>-3</sup>·с<sup>-1</sup>. Более энергичные протоны могут создавать вторичные ливневые потоки ионизированных частиц на более низких высотах.

Основное воздействие заряженных частиц на атмосферу связано с процессами ионизации, диссоциации и диссоциативной ионизацией. При этом образуются элементы типа NO<sub>x</sub> (N, OH, NO) и NO<sub>x</sub> (N, NO, NO), а также нитрогены типа NO<sub>y</sub>. Ионы кислорода образуют водяные кластеры O<sub>2</sub><sup>+</sup>·H<sub>2</sub>O. Так же образуются кластеры H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>·OH и H<sup>+</sup>·(H<sub>2</sub>O)<sub>2</sub> [4]. Положительно заряженные кластеры являются эффективными центрами кристаллизации водяного пара и образования аэрозолей. Температура газовой среды определяется балансом поглощения солнечного излучения и радиационного излучения Земли и собственного теплового излучения. Однако коэффициенты поглощения образующихся химических элементов изучены не достаточно полно. Кроме того, необходимо учитывать изотропное рассеяние образующимися аэрозолями падающего излучения. Поэтому экспериментальное измерение высотных профилей различных метеопараметров тропосферы при воздействии как прямых солнечных протонов, так и протонов КВМ важны, причем наибольший интерес представляют долговре-



**Рис. 1.** Изменение высотного профиля температуры (а) и давления (б) 12 апреля 2001 г. для метеостанции 01028 при воздействии протонов КВМ относительно спокойного дня 14.04 в 12 ч (сплошная линия) и в 24 ч (пунктир)

менные вариации высотных профилей метеопараметров.

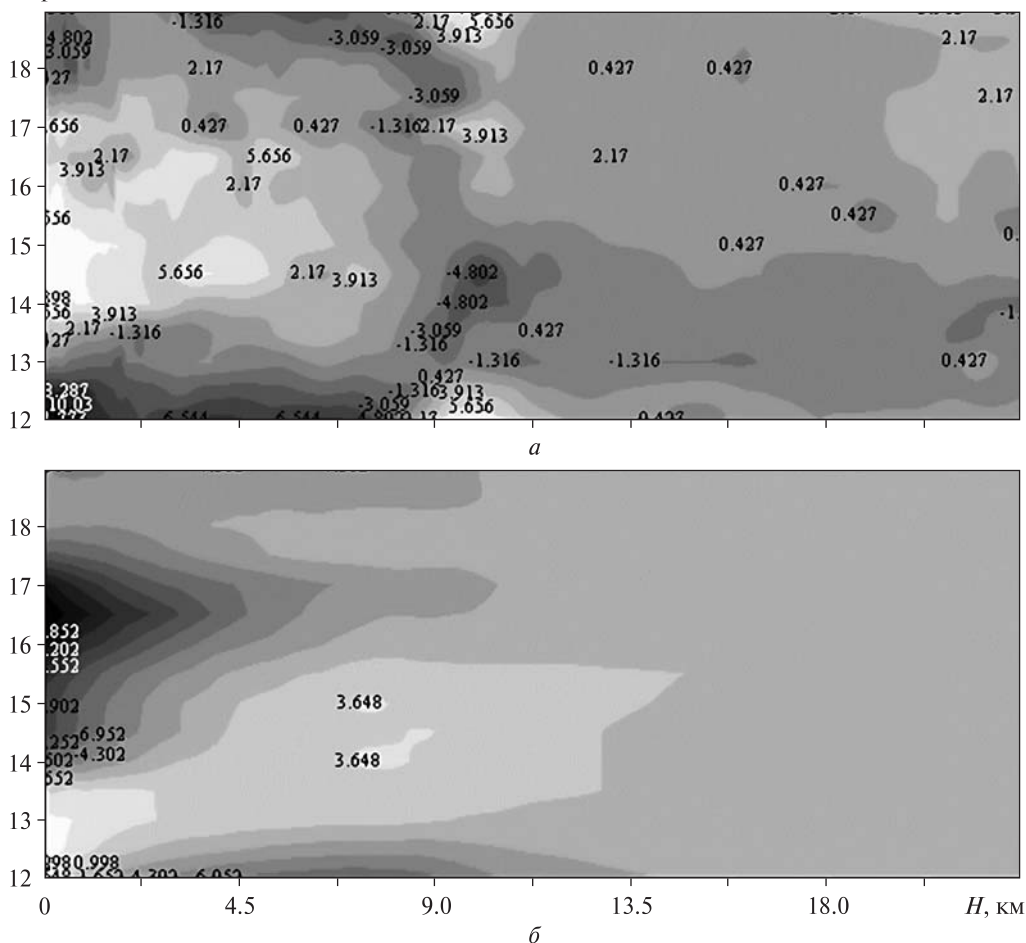
Требуемые для исследований профили температуры, давления и влажности были получены по данным пяти метеостанций 01001, 01028, 01152, 12120, 02836, расположенных на северных широтах в пределах от  $74.51$  до  $57.75^\circ$ , а по долготе от  $-8.66$  до  $+26.65^\circ$ . Данные метеостанции приводят высотные профили для 0 ч и 12 ч (здесь и далее время местное). Для анализа долговременных эффектов данный интервал измерений достаточен. Анализ выполнен по серии мощных солнечных вспышек X-рентгеновского класса в 23-м цикле солнечной активности с 2001 по 2006 гг. Отобранные солнечные вспышки сопровождалась КВМ.

Критерием отбора вспышек было расположение активной излучающей области в центральной части западного полушария Солнца. Генерируемые в этих областях прямые солнечные протоны и КВМ при его распространении вдоль открытых спиральных линий магнитного поля Солнца попадают в околоземное пространство. Данные о магнитных полях и счете протонов различных энергий были определены по измерениям разнесенных по долготе спутников GOES 8–12. Другим критерием отбора был выбор одиночных событий, которым предшествовало несколько суток излучения спокойного Солнца. Это устранило возможность спутывания влияний различных событий.

Момент появления прямых солнечных протонов и КВМ определялся по спутниковым данным, причем приход КВМ регистрировался по времени начала интенсивных геомагнитных возмущений. Проводилась оценка интенсивности и динамического спектра этих возмущений на разнесенных по долготе спутниках, что позволяло оценить структуру магнитного поля КВМ.

Параметры возмущенной тропосферы определялись относительно средних значений совместно ночных и дневных профилей трех предшествующих спокойных дней по геомагнитной обстановке и солнечному излучению, и по сравнению возмущенных профилей в 0 ч, либо в 12 ч с соответствующими по времени профилями близких, предшествующих и заведомо спокойных дней по тем же критериям. В спокойные дни высотные профили метеопараметров были типичными для всех указанных выше метеостанций. Первый вариант определения возмущений использовался для построения трехмерной картины вариаций высотного профиля рассматриваемого метеопараметра в предшествующие и последующие дни относительно рассматриваемой солнечной вспышки. При этом опорное значение профиля для рассматриваемых дней было неизменным, и получаемая трехмерная картина показывала реальные временные вариации метеопараметров. Второй вариант сравнения профилей позволял более наглядно выделять возникающие возмущения в отдельные дни.

Апрель 2001 г.



**Рис. 2.** Трёхмерное представление температурного поля (а) и поля давления (б) тропосферы относительно среднего значения для метеостанции 01028 с 0 ч 12 апреля по 0 ч 19 апреля 2001 г.

Пример воздействия протонов КВМ на высотный профиль температуры в районе метеостанции 01028 Вјогноуа показан на рис 1, а. Здесь приведены данные 12 апреля 2001 г., которые сравниваются с данными для спокойного дня 14 апреля 2001 г. для 0 ч и 12 ч. Полученные графики демонстрируют значительное увеличение температуры до 10 °С на высоте 10 км и её уменьшение на такую же величину на нижних высотах до 2 км. Более низкие высоты охлаждаются на большую величину, что может быть связано с поведением атмосферы в приземном слое. Эффект выхолаживания приземного слоя во время полярных сияний известен. Аналогичное пове-

дение высотного профиля вызывают протоны КВМ 18.04.01. Воздействие протонов КВМ приводит и к значительному изменению высотного профиля давления, что следует из рис. 1, б. Здесь показано возмущение давления 12 апреля 2001 г. в 0 ч и 12 ч по сравнению с ближайшими спокойными днями. Максимум падения давления до -13 гПа возникает в 0 ч на высоте 7 км. Ниже оно увеличивается и в приземном слое достигает +16...+20 гПа. Характер изменения давления после возмущения тропосферы для 12 ч 12 апреля 2001 г. носит такой же характер.

На рис. 2, а для той же метеостанции приведено трёхмерное изображение вариаций профиля

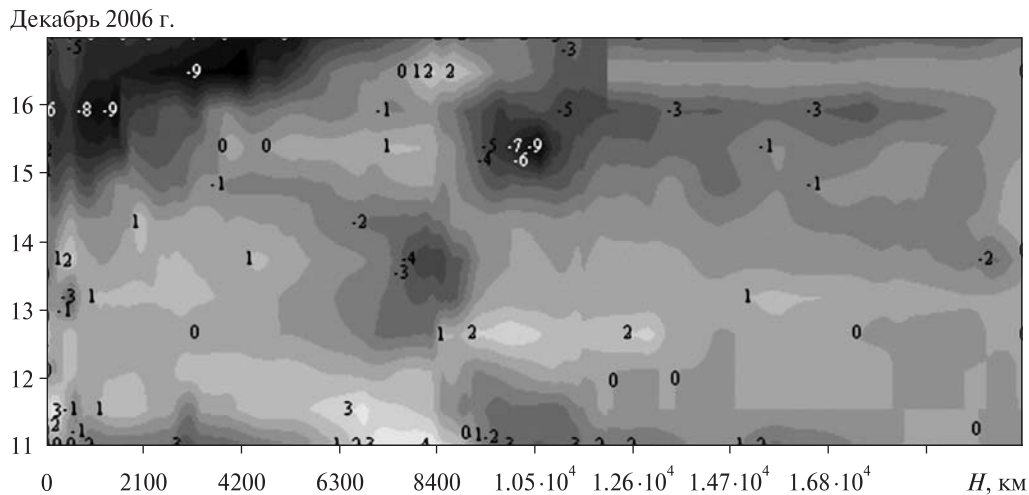


Рис. 3. Трёхмерное представление температурного поля тропосферы относительно среднего значения для метеостанции 01028 с 0 ч 11 декабря по 0 ч 17 декабря 2006 г.

температур в тропосфере с 0 ч 12 апреля до 0 ч 19 апреля 2001 г. Вариации температур получены, как указано выше, относительно среднего значения спокойных дней. Выделяются три зоны повышения температуры на высоте 10 км. При этом зоны около 12 и 18 апреля 2001 г. связаны с приходом протонов КВМ, что подтверждается значительными флуктуациями магнитного поля по спутниковым данным. Зона около 16 апреля менее контрастна и связана с воздействием прямых солнечных протонов, которые не блокируются магнитным полем КВМ и регистрируются спутником во время вспышки.

Аналогично полученное трехмерное изображение высотного профиля давления в этот же период относительно спокойных дней показано на рис. 2, б. Здесь также выделяются три области падения давления на высотах около 7 км под воздействием протонов КВМ 12 и 18 апреля 2001 г. и воздействие прямых солнечных протонов 16 апреля. Указанные результаты соответствуют условиям полярного дня. Поэтому результаты для 0 и 12 ч близки между собой. Это позволяет судить, что длительность описанных процессов может составлять одни сутки.

Аналогичным способом построен трехмерный рис. 3 относительного распределения температуры для случая полярной ночи для той же

метеостанции с 0 ч 11 декабря по 0 ч 17 декабря 2006 г. В этот период наблюдались пять случаев прихода КВМ примерно в 0 ч 12, 13, 16, 17 декабря и наиболее мощный всплеск флуктуаций магнитного поля после 12 ч 14 декабря. Протоны всех этих КВМ оказали влияние на высотный профиль температуры. Выделяется также зона охлаждения на  $4^\circ$  на высоте 8 км 13 декабря, что связано с воздействием прямых протонов зарегистрированных спутником GOES. В отсутствие солнечного освещения виден эффект вымораживания верхней тропосферы на высотах около 9 км. Нагрев более нижних слоев тропосферы происходит за счет радиационного излучения подстилающей поверхности в ИК-диапазоне. По нашему мнению, наблюдаемые явления могут быть связаны с изменением коэффициента поглощения тропосферы за счет образования положительных кластеров и формирования на их основе аэрозолей, вызывающих эффект изотропного рассеяния падающего излучения. При этом влияние рассеяния излучения аэрозолями является определяющим фактором изменения метеопараметров средней и верхней тропосферы.

Необходимо отметить, что степень воздействия протонов КВМ на тропосферу зависит от структуры магнитного поля КВМ. Однородные

магнитные поля КВМ, которые по данным разнесенных на 60° по долготе спутников, имеют высокую корреляцию интенсивности флуктуаций, оказывают максимальное влияние на тропосферу, поскольку они эффективно удерживают протоны высоких энергий.

Наблюдаемые эффекты максимальны в начальном периоде ионизации и в течение суток сглаживаются возникающей циркуляцией в тропосфере, несмотря на продолжающееся воздействие энергичных протонов. Возникающие градиенты температуры и давления могут вызывать крупномасштабные циркуляции атмосферы, которые влияют на погодные условия в приземном слое.

1. Антонов А. В. Поляризационное исследование аномально поглощения космического радиоизлучения в ионосфере на средних широтах // Космич. исслед. — 1972. — **10**, № 2. — С. 223—227.
2. Jackman C. H., Fleming E. L., Vitt F. M. Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere // J. Geophys. Res. — 2000. — **105**. — P. 11659—11670.
3. Reid G. C. Chapter 12. Solar energetic particles and their effects on the terrestrial environment // Physics of the Sun. — 1986. — Vol. III. — P. 251—278.
4. Solomon S., Rusch D. W., Gerard J. C., et al. The effect of particle precipitation events on the neutral and ion chem-

istry of the middle atmosphere. 2. Odd hydrogen // Planet. Space Sci. — 1981. — **29**. — P. 885—892.

Надійшла до редакції 17.12.10

A. V. Antonov, Yu. M. Gerasimov

#### ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF SOLAR FLARES ON THE EARTH'S TROPOSPHERE

We investigated some events of long-term change of meteorological parameters of the troposphere under the influence of single solar flares of the X-ray type which were accompanied by coronal mass ejection (CME), from 2001 to 2006. It is established that the basic effect on high-altitude profiles of temperature, pressure and damp for northern latitudes from 74 to 60 degrees is produced by CME. At round-the-clock irradiating the troposphere by the Sun, the CME action results in an increase of temperature by more than 10 °C at heights more than 9 km. At the lower altitudes, the troposphere temperature decreases by the same value. Under the polar night conditions, the profiles of temperature change appear opposite. At altitudes more than 6 km, the atmosphere cools down by about 4 °C. Lower layers are heated up by the Earth's radiation by the same magnitude. In all the cases the decrease of atmospheric pressure is detected. At a height of 9 km, the atmospheric pressure can exceed 10 hPa. For all the cases, the troposphere damp decreases across the whole thickness of the mean troposphere. In specific cases similar influence of direct solar protons on the troposphere is detected.